

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Інститут Навчально-науковий інженерно-технічний інститут  
ім. акад. І.С.Гулого**

**Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки**

**«До захисту в ЕК»**

Директор інституту

\_\_\_\_\_ Сергій БЛАЖЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**«До захисту допущено»**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Валентин ПЕТРЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності \_\_\_\_\_ 144 Теплоенергетика \_\_\_\_\_  
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Теплоенергетика та енергоефективні технології \_\_\_\_\_

на тему: Оптимізація теплотехнічних параметрів системи геотермальної \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ вентиляції енергоефективного будинку \_\_\_\_\_

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ТЕ-2-10М

\_\_\_\_\_ Шуть Єгор Олександрович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ Недбайло Олександр Миколайович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_ Ігор Божко \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

Я, як здобувач Національного університету харчових технологій, розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2023 р.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім.акад.І.С.Гуло

Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 144 Теплоенергетика

(код і назва)

**Освітньо-професійна програма** Теплоенергетика та енергоефективні технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ТЕХТ**

проф. Петренко В.П.

“11” листопада 2022 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Шутя Єгора Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Оптимізація теплотехнічних параметрів системи геотермальної вентиляції енергоефективного будинку

керівник роботи: д.т.н., проф. Недбайло Олександр Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “11”11.2022 року № 794-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 10.02.2023 року

3. Вихідні дані до роботи: матеріали переддипломної практики

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Аналіз світового досвіду та тенденції розвитку використання систем геотермальної вентиляції

2. Розрахункове визначення теплової потужності повітряно-грунтового теплообмінника

3. Експериментальний стенд з дослідження аеродинаміки та теплообміну у ґрунтових теплообмінниках

4. Результати експериментальних досліджень технологічних параметрів експлуатації системи геотермальної вентиляції

5. Числове моделювання процесів теплообміну в системі геотермальної вентиляції будівель

6. Визначення оптимальних теплотехнічних параметрів ґрунтових теплообмінників

5. Перелік графічного матеріалу

презентація Power Point (слайди)



## АНОТАЦІЯ

## СИСТЕМА ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ, ПОВІТРЯНО-ГРУНТОВИЙ ТЕПЛООБМІННИК, РЕКУПЕРАТОР, ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА БУДІВЛЯ

*Мета роботи* – розроблення науково-обґрунтованої методології щодо визначення та оптимізації відповідних теплотехнічних параметрів експлуатації системи геотермальної рекуперативної вентиляції на основі використання відновлюваної теплоти ґрунту для сучасних енергоефективних будівель різних типів та призначення (в тому числі, пасивних будинків та інших).

*Об'єкт дослідження* – теплотехнічні параметри експлуатації рекуперативної системи вентиляції енергоефективної будівлі при використанні ґрунтово-повітряних теплообмінників.

*Методи дослідження* – експериментальні натурні дослідження з використанням автоматизованого вимірювального комплексу та числове моделювання параметрів цілорічної експлуатації повітряно-ґрунтового теплообмінника із подальшим зіставленням отриманих результатів із даними експерименту.

Проведені комплексні експериментальні дослідження та порівняння їх даних із результатами розрахунків за розробленою числовою моделлю складних процесів теплообміну надало можливість провести аналіз теплотехнічних параметрів повітряно-ґрунтових теплообмінників із різним діаметром трубопровода.

За допомогою розробленої числової моделі експлуатації повітряно-ґрунтового теплообмінника був виконаний розрахунок теплотехнічних параметрів теплообмінника за умови використання трубопроводів із різним типовим зовнішнім діаметром – 110, 160 та 200 мм. В якості вихідних даних задавались значення температури повітря на вході до теплообмінника та швидкості повітря на виході. Останнє значення взяте з експериментальних даних та склало 5,5 м/с.

Значення зовнішнього діаметру трубопроводу повітряно-грунтового теплообмінника має досить суттєвий вплив на різницю температур повітря на вході та виході з нього. Так, в середині опалювального періоду, коли система рекуперативної вентиляції має значний вклад додаткової теплоти до системи опалення, оптимальним щодо значення температурного напору є трубопровід із зовнішнім діаметром 110 мм. Однак, влітку для забезпечення кондиціонування повітря без порушення санітарно-гігієнічних та будівельних норм, оптимальним є зовнішній діаметр трубопроводу 200 мм, при якому витримується перепад температури вихідного та вхідного повітря на рівні 5°C. При такому перепаді значень температури повітря стає можливим відмовитись від використання додаткових пристроїв для охолодження припливного повітря та мінімізувати витрати енергії на кондиціонування приміщень.

В середині опалювального періоду вплив зовнішнього діаметру трубопроводу на лінійний тепловий потік вже значно суттєвіший. Так, при переході від діаметру 110 мм до 160 мм, лінійний тепловий потік збільшується, в середньому, на 30%. При переході від діаметру 160 мм до 200 мм зростання лінійного теплового потоку зменшується і складає 16%.

Влітку спостерігається схожа ситуація. При переході від діаметру 110 мм до 160 мм, лінійний тепловий потік збільшується, в середньому, на 32%, при переході від діаметру 160 мм до 200 мм – на 19%.

Таким чином, оптимальним виходячи із значення лінійного теплового потоку є використання трубопроводу зовнішнім діаметром 160 мм.

## ANNOTATION

## GEOTHERMAL VENTILATION SYSTEM, AIR-SOIL HEAT EXCHANGER, RECUPATOR, RENEWABLE ENERGY SOURCES, ENERGY-EFFICIENT BUILDING

The object of the study is the heat engineering parameters of operation of the recuperative ventilation system of an energy-efficient building when using soil-air heat exchangers.

The purpose of the work is to develop a scientifically based methodology for determining and optimizing the appropriate thermal parameters of the operation of the geothermal recuperative ventilation system based on the use of renewable soil heat for modern energy-efficient buildings of various types and purposes (including passive houses and others).

The research methods are experimental field studies using an automated measuring complex and numerical modeling of the parameters of the year-round operation of the air-soil heat exchanger with subsequent comparison of the obtained results with the experimental data.

Conducted complex experimental studies and comparison of their data with the results of calculations based on the developed numerical model of complex heat exchange processes made it possible to analyze the thermal technical parameters of air-ground heat exchangers with different pipeline diameters.

With the help of the developed numerical model of operation of the air-soil heat exchanger, the calculation of the thermotechnical parameters of the heat exchanger was performed under the condition of using pipelines with different typical external diameters - 110, 160 and 200 mm. The values of air temperature at the inlet to the heat exchanger and air velocity at the outlet were set as initial data. The last value was taken from experimental data and was 5.5 m/s.

The value of the external diameter of the pipeline of the air-ground heat exchanger has a rather significant effect on the difference in air temperatures at the entrance and exit from it. Thus, in the middle of the heating period, when the

recuperative ventilation system has a significant contribution of additional heat to the heating system, the optimal temperature pressure value is a pipeline with an outer diameter of 110 mm. However, in the summer, to ensure air conditioning without violating sanitary and hygienic and construction standards, the outer diameter of the pipeline is 200 mm, at which the difference in temperature of the outgoing and incoming air is maintained at the level of 5°C. With such a drop in air temperature values, it becomes possible to abandon the use of additional devices for cooling the supply air and minimize energy costs for room air conditioning.

In the middle of the heating period, the influence of the outer diameter of the pipeline on the linear heat flow is already much more significant. So, when going from a diameter of 110 mm to 160 mm, the linear heat flow increases, on average, by 30%. When going from a diameter of 160 mm to 200 mm, the growth of the linear heat flow decreases and amounts to 16%.

A similar situation is observed in summer. When going from a diameter of 110 mm to 160 mm, the linear heat flow increases, on average, by 32%, when going from a diameter of 160 mm to 200 mm – by 19%.

Thus, based on the value of the linear heat flow, it is optimal to use a pipeline with an outer diameter of 160 mm.

## ЗМІСТ

ВСТУП . . . . .	.8
1 АНАЛІЗ СВІТОВОГО ДОСВІДУ ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ . . . . .	.15
1.1 Конструктивні особливості систем геотермальної вентиляції та припущення, що приймалися під час проведення досліджень їх параметрів .15	.15
1.2 Вплив теплофізичних властивостей ґрунту на теплообмін у повітряно- ґрунтових теплообмінниках . . . . .	.17
1.3 Основи повітрообміну в приміщеннях . . . . .	.19
1.4 Аналіз світового досвіду енергоефективного будівництва . . . . .	.21
2 РОЗРАХУНКОВЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ПОТУЖНОСТІ ПОВІТРЯНО-ҐРУНТОВОГО ТЕПЛООБМІННИКА . . . . .	.27
2.1 Аналітична модель теплообміну в повітряно-ґрунтовому теплообміннику . . . . .	.27
2.2 Обґрунтування довжини і діаметра ґрунтового теплообмінника . . . . .	. .
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД З ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛООБМІНУ У ҐРУНТОВИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ . . . . .	.39
3.1 Конструкція основних елементів та контрольоване обладнання експериментального стенду . . . . .	.39
3.2 Застосування ґрунтових теплообмінників в інженерних системах енергоефективного будинку . . . . .	.45
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ . . . . .	.50
5 ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В СИСТЕМІ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ БУДІВЕЛЬ . . . . .	.60
5.1 Математична модель процесів аеродинаміки та теплообміну в повітряно-ґрунтовому теплообміннику . . . . .	.60
5.2 Граничні умови та припущення в моделі . . . . .	.64
5.3 Валідація математичної моделі та сітковий аналіз . . . . .	.65

6 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГРУНТОВИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ . . . . .	.69
6.1 Температура повітря на виході з повітряно-грунтового теплообмінника при різних діаметрах трубопровода. . . . .	.69
6.2 Лінійна густина теплового потоку при різних діаметрах трубопровода повітряно-грунтового теплообмінника . . . . .	.71
ВИСНОВКИ . . . . .	.73
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ. . . . .	.75

## ВСТУП

Природні кліматичні умови та виробничі можливості України дозволяють використовувати в промислових обсягах відновлювані джерела енергії, залучати значний енергетичний потенціал скидних ресурсів та позабалансові джерела палива і енергії. Прогнозоване споживання обсягів технічно доступних та економічно рентабельних відновлюваної енергії значно зменшить залежність України від імпорту паливно-енергетичних ресурсів.

Ґрунт, завдяки власним властивостям накопичувати теплоту, є природним акумулятором енергії. Про природні якості ґрунту, як джерела відновлювальної енергії, свідчать його фізичні властивості: теплопровідність, густина, теплоємність, що залежать від геологічних характеристик ґрунту – його типу, структури, вологості; гідрологічних характеристик – рівня ґрунтових вод та інших особливостей. Ґрунт характеризується здатністю до практично безмежного акумулювання енергії та самостійної термічної регенерації. Для вилучення відведення енергії ґрунту використовуються теплообмінники різних типів.

На основі проведеного аналізу літературних джерел, попередніх наукових досліджень та існуючих технологічних схем ґрунтових теплообмінників можна стверджувати, що горизонтальні теплообмінники є переважаючими для забезпечення нормативних умов мікроклімату в приміщеннях різного призначення, в тому числі, енергоефективних будівель.

Група експертів з Міжнародної асоціації геотермальної енергії провела оцінку запасів низько- й високотемпературної енергії Землі. Виявилось, що Україна має високий потенціал теплоти ґрунту та ґрунтових вод. Температура ґрунту та гірських порід біля поверхні Землі визначається балансом енергії, що надходить від Сонця та ендогенної теплоти від глибини до земної поверхні. Теплота, що надходить від Сонця, акумулюється в приповерхневих шарах ґрунту осадових та гірських порід на глибинах до майже ізотермічної поверхні. Шар ґрунту між глибиною промерзання та ізотермічною поверхнею може розглядатися як природний сезонний акумулятор теплоти. При чому енергія,

що відведена в холодний період року, буде відновлятися в теплий період року. Карту розподілу густини теплового потоку ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) відображено нижче на рисунку 1.

Останнім часом велика кількість досліджень присвячена вивченню та вдосконаленню технологій використання теплового потенціалу ґрунту для потреб опалення та охолодження будинків. Відновлювана теплота ґрунту може використовуватися в системах обігрівання та вентилявання приміщень різного призначення. Необхідність досліджень в цій області обумовлена витратами суспільства на створення теплового комфорту людини всередині приміщення. Застосування повітряно-ґрунтових теплообмінників може знизити залежність суспільства від викопних палив та зменшити техногенне навантаження на екосистему місць проживання населення [1].

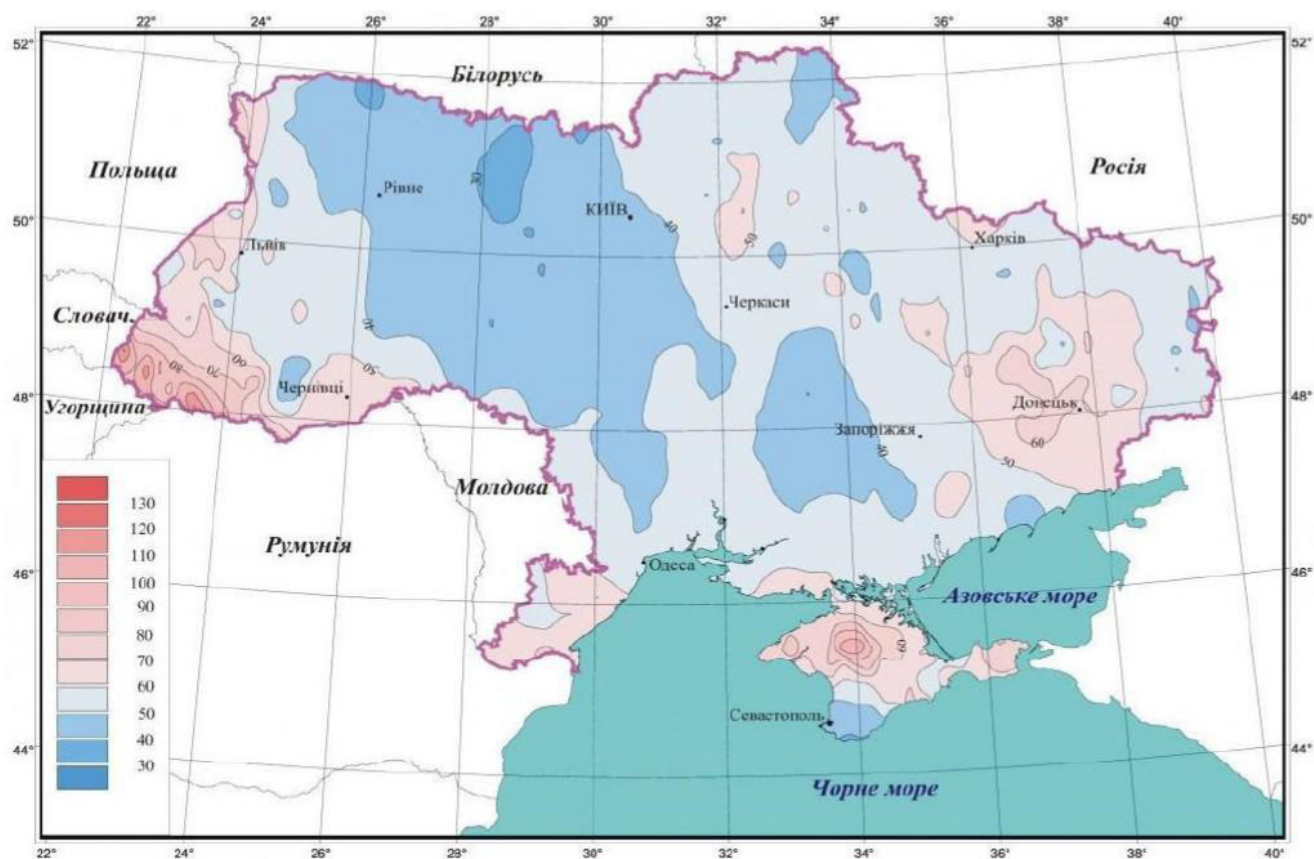


Рисунок 1 – Розподіл густини теплового потоку по поверхні ґрунту України

Для комфортного довготривалого перебування людей в будівлях однією з найважливіших умов є наявність свіжого повітря в приміщеннях, що забезпечується завдяки експлуатації системи вентиляції. Вентиляція виконує функцію обміну повітря у приміщенні для видалення надлишків теплоти, вологи, шкідливих та інших забруднюючих речовин з метою забезпечення допустимого мікроклімату та чистоти повітря у зоні перебування людини. Нормативний повітрообмін в житлових та адміністративно-побутових приміщеннях визначений державними будівельними нормами України і, відповідно, є обов'язковим при новому будівництві чи реконструкції старих будівель.

Розв'язання проблеми підвищення енергоефективності будівель має особливу актуальність для України в зв'язку з тим, що в країні наявні обмежені запаси нафти і природного газу, різко скоротився видобуток вугілля, спостерігається значне підвищення вартості всіх видів енергоносіїв і недостатньо впроваджуються нові і прогресивні методи щодо теплового захисту будівель. Поєднання архітектурних прийомів із технологічними особливостями підтримання комфортних санітарно-гігієнічних умов у окремих приміщеннях завдяки прогресивним системам вентиляції є невід'ємною складовою сучасного енергоефективного будівництва. Потрібно забезпечити науково обґрунтовані доцільні добовий, сезонний і цілорічний теплові режими будівель шляхом як гармонізації динамічних внутрішніх і зовнішніх теплових впливів, так і залучення до цього природних ресурсів енергії, таких як відновлювана теплота ґрунту, температура якого є середньорезультуючою поміж холодним та теплим періодами року.

Також слід відмітити незавершеність формування вітчизняної нормативно-регуляторної документальної бази щодо технічних регламентів з проектування, проведення проектно-монтажних і пуско-налагоджувальних робіт, технічного обслуговування і експлуатації низькотемпературних систем теплопостачання на основі геотермальної вентиляції.

Останнім часом в світових джерелах інформації опублікована низка наукових досліджень особливостей експлуатації повітряно-ґрунтових

теплообмінників методом числового моделювання. Аналіз ефективності використання таких теплообмінників зазвичай містить розрахунки параметрів теплопровідності ґрунтового масиву до стінки трубного теплообмінника або конвективного теплообміну каналної повітряної частини теплообмінника із внутрішньою поверхнею стінки трубопроводу.

Підвищення вимог щодо енергоефективності будівель ускладнює розроблення систем вентиляції у зв'язку з витратами значної кількості енергії цілорічно (як в теплий, так і в холодний періоди року) на підігрівання та охолодження припливного повітря. Одним із способів розв'язання цієї проблеми є геотермальна система вентиляції, завдяки якій можна зменшити різницю температури припливного повітря з нормованим значенням і, відповідно, знизити витрати енергії на його приготування перед постачанням в приміщення (рисунок 2).

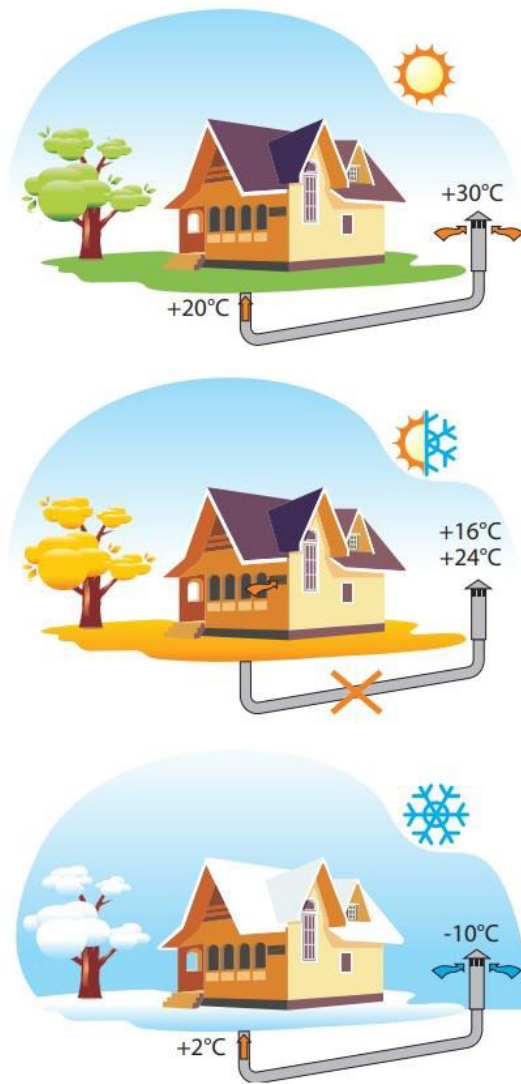


Рисунок 2. Принцип сезонної експлуатації геотермальної вентиляції будівлі

Новітні системи теплозабезпечення енергоефективних будівель, в багатьох випадках, є полівалентними із високим ступенем автоматизації керування параметрами процесів підтримання норм температурно-вологісного режиму приміщень.

Система геотермальної вентиляції представляє собою систему трубопроводів (повітряно-грунтовий теплообмінник), що заглиблені в ґрунті. Проходячи по них припливне повітря постачається примусово рекуперативною вентиляційною установкою до будівлі (рисунок 3).

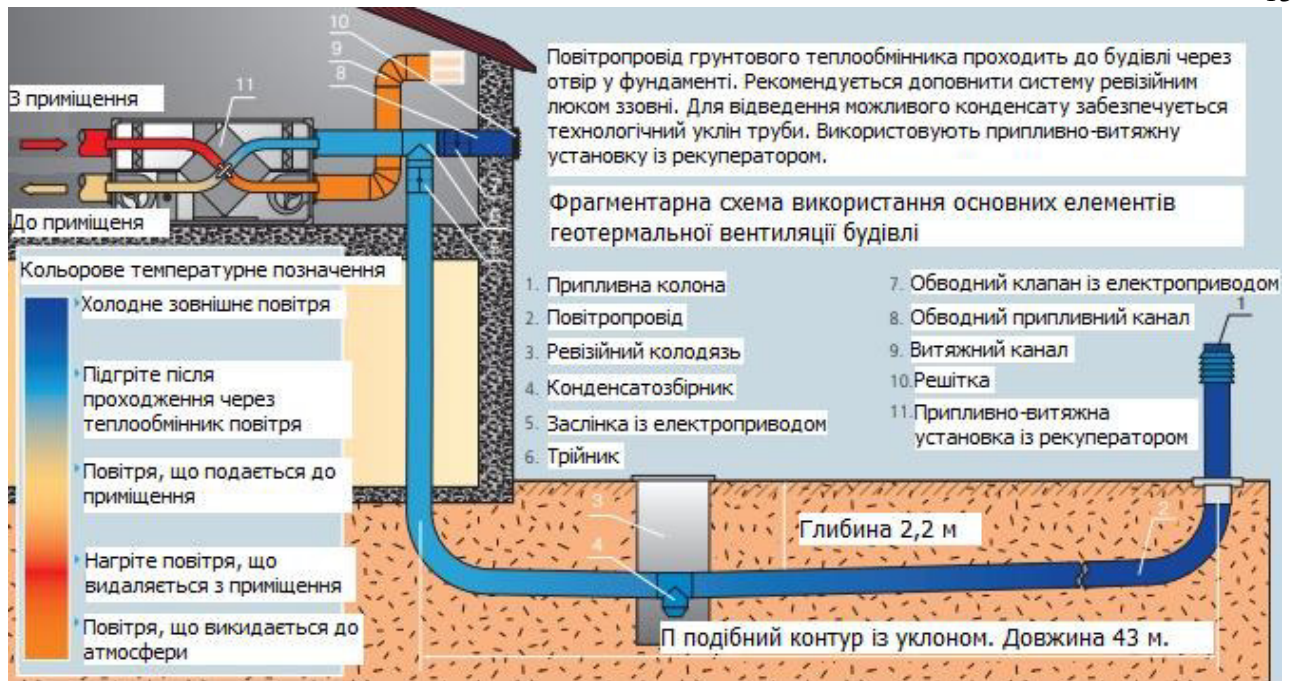


Рисунок 3. Технологічна схема використання основних елементів геотермальної вентиляції будівлі

Повітряно-ґрунтовий теплообмінник зазвичай має канали з круглим або прямокутним поперечними перерізами різної конфігурації та довжини, що виконані із пластику або металу та занурені в ґрунт на відносно невелику глибину (до 3 м). Енергетична ефективність таких геотермальних систем є предметом наукових досліджень у провідних країнах Світу. Так, наприклад, в Європі проведені дослідження [1 – 4], Африці [5, 6], Азії [7] та Америці [8]. В Україні роботи в цьому напрямку тільки починають розвиватися [9, 10, 13].

Активний розвиток систем геотермальної вентиляції спричиняє потребу у проведенні теоретичних досліджень для розуміння процесів, що відбуваються в повітряно-ґрунтових теплообмінниках, та визначення кількісного впливу різних параметрів на економічну ефективність такої системи. Взагалі енергетична ефективність теплообмінника може залежати від наступних параметрів [11]:

- конфігурації та геометричних розмірів теплообмінника;
- кліматичних умов;
- теплофізичних властивостей ґрунтів.

Тому, метою роботи є зменшення енерговитрат на забезпечення нормативних параметрів мікроклімату приміщень шляхом використання

відновлюваної теплоти поверхневих шарів ґрунту.

На основі попередньо вивченого матеріалу висунуто **гіпотезу**: використання повітряного ґрунтового теплообмінника в системі вентиляції приміщень різного призначення підвищить енергетичну ефективність будівлі в цілому.

Для досягнення поставленої мети необхідне розв'язання наступних задач:

1. Розробити технологічну схему та аналітичну модель функціонування ґрунтового теплообмінника;
2. Визначити вплив конструкційно-технологічних параметрів ґрунтового теплообмінника на його ефективну теплову потужність та перевірити правильність гіпотези у ході досліджень;
3. Визначити взаємовплив трубопроводів контурів під час функціонування системи геотермальної вентиляції при забезпеченні нормативних параметрів мікроклімату в приміщеннях різного призначення;
4. Експериментально підтвердити, отримані теоретичним шляхом, раціональні конструкційно-технологічні параметри ґрунтового теплообмінника та дослідити їх вплив на мікроклімат в окремому приміщенні;

Розгляд вищезазначених факторів разом або поодиноці є складною задачею, що стоїть перед колективом фахових амбітних дослідників.

# 1 АНАЛІЗ СВІТОВОГО ДОСВІДУ ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ

1.1 Конструктивні особливості систем геотермальної вентиляції та припущення, що приймалися під час проведення досліджень їх параметрів

Основним елементом системи геотермальної вентиляції є повітряно-грунтовий теплообмінник, що знаходиться в ґрунтовому масиві на певній глибині (від 1 до 3 м), що залежить від кліматичних умов конкретної місцевості. Повітряно-грунтовий теплообмінник зазвичай має канали з круглою формою поперечного перерізу та різної довжини (таблиця 1.1). Основні конструкції типових повітряно-грунтових теплообмінників наведені в роботі [14].

Таблиця 1.1. Геометричні характеристики повітряно-грунтових теплообмінників

Автор	Форма перерізу	Розмір перерізу, м	Довжина теплообмінника, м	Глибина, м	Посилання на інформацію
<i>Tzaferis та ін.</i>	кругла	0,125 (R)	30	1,5	[1]
<i>Badescu V.</i>	кругла	0,05-0,25 (D)	36	3	[2]
<i>Benkert S та ін.</i>	кругла	0,125 (D)	42	0,7-1,8	[3]
<i>Філатов С.О., Володин В.И.</i>	кільцевий канал	0,54×0,05	4-17	вертикальн а орієнтація	[4]
<i>A. Sehli та ін.</i>	кругла	0,110 (D)	53,16	3	[5]
<i>S. Amara та ін.</i>	кругла	0,21 (D)	60	1-5	[6]
<i>Sanusi та ін.</i>	кругла	0,076 (D)	25	0,5-1,5	[7]
<i>M. Krarti, J. Kreider</i>	кругла	0,2 (D)	80	1,5	[8]
<i>Noor AziahMohdAriffin</i>	кругла, труба в трубі	0,05 (D)	25	1	[11]
<i>Rouag, Amar та ін.</i>	кругла	0,3 (D)	10	-	[12]
<i>P.M. Congendo та ін.</i>	кругла	0,2 (D) 0,25 (D)	20 20	2,5; 3; 4 3	[14]

Останнім часом в інформаційних джерелах опубліковані декілька досліджень роботи повітряно-грунтових теплообмінників методом числового

моделювання. Аналіз ефективності таких теплообмінників зазвичай містить або розрахунок теплопровідності масиву ґрунту до стінки теплообмінника або розрахунок параметрів конвективного теплообміну поміж повітрям в теплообміннику та ґрунтовим масивом. В роботах із різними обмеженнями, що введені в модель, розглядається одно-, двох- та тривимірне моделювання повітряно-ґрунтових теплообмінників.

В [1] наведено порівняння восьми, існуючих на час публікації моделей, що описують теплообмін повітря в каналі із ґрунтом. В роботі приведено оцінку чутливості методів до таких параметрів, як температура повітря на вході, швидкість повітря, довжина труби, її радіус та глибина розташування теплообмінника. Результати розрахунків зіставлені з експериментальними даними.

Так, наприклад, в роботі [2] наведена двовимірна числова модель для розрахунку параметрів повітряно-ґрунтового теплообмінника, що містить одиночну трубу довжиною 36 м із круглим поперечним перерізом. Модель базується на визначенні значень температури на поверхні ґрунту та у вертикальному перерізі ґрунтового масиву. Розглядалась тільки горизонтальна частина теплообмінника, вплив вертикальних ділянок входу та виходу повітря вважався незначним. На поверхні ґрунту модель враховує конвективний тепловий потік, довгохвильове випромінювання із поверхні ґрунту, поглинання поверхнею ґрунту енергії інсоляції, а також приховану теплоту випаровування.

Напіваналітична модель визначення температури ґрунту біля повітряно-ґрунтового теплообмінника круглого поперечного перерізу при довготривалій його експлуатації наведена в [12]. Метою роботи було визначення оптимальної відстані між трубами такого пристрою, а також між самими пристроями у випадку розташування декількох теплообмінників на невеликій відстані.

В роботі [4] на основі числового моделювання було розраховано оригінальну схему вилучення теплоти або холоду ґрунту енергетичними палями з наповненням повітрям в якості теплоносія. Встановлено, що при використанні енергетичної палі в складі системи припливної вентиляції, в теплий період року температура повітря знижувалась на  $3 \div 6^\circ\text{C}$ , а в холодний –

відбувалось його нагрівання на  $6 \div 9^{\circ}\text{C}$ . При цьому на транспортування повітря витрачалось енергії не більш як 0,3% від енергії теплового потоку енергетичної палі.

Витрата повітря в системах такого типу зазвичай постійна і вибирається на розсуд авторів.

Дані щодо витрати або швидкості повітря, що проходить через повітряно-грунтовий теплообмінник, наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Швидкість або витрата повітря в повітряно-грунтових теплообмінниках

Автор	Форма перерізу	Швидкість або витрата повітря	Посилання на інформацію
<i>Tzaferis та ін.</i>	кругла	5 м/с	[1]
<i>BenkertS та ін.</i>	кругла	140 м <sup>3</sup> /год	[3]
<i>Филатов С.О., Володин В.И.</i>	кільцевий канал	0,073 кг/с	[4]
<i>A. Sehli та ін.</i>	кругла	1-5 м/с	[5]
<i>S. Amara та ін.</i>	кругла	3,79 м/с	[6]
<i>Sanusi та ін.</i>	кругла	5,6 м/с	[7]
<i>M. Krarti, J. Kreider</i>	кругла	3,5 м/с	[8]
<i>Басок Б.І. та ін.</i>	прямокутна	природна конвекція	[9]
<i>Noor AziahMohdAriffin</i>	кругла, коаксіальна	0,5 м/с	[11]
<i>P.M. Congendo та ін.</i>	кругла	450 м <sup>3</sup> /год; 1200 м <sup>3</sup> /год	[14]

## 1.2 Вплив теплофізичних властивостей ґрунту на теплообмін у повітряно-грунтових теплообмінниках

В роботах зазвичай приймалось допущення, що ґрунт є гомогенним та ізотропним середовищем. Основні теплофізичні властивості ґрунтів, в яких розглядались процеси теплообміну, наведені у таблиці 1.3.

Також в декількох роботах було показано, що властивості ґрунту, а саме його теплопровідність, незначною мірою впливають на температуру повітря на виході із повітряно-грунтового теплообмінника. Так, наприклад, в роботі [14]

наведені розрахунки параметрів повітряно-грунтового теплообмінника, що розташований на глибині 3 м в ґрунті з теплопровідністю в діапазоні  $1,49 \div 2,1$  Вт/(м·К), та зроблений висновок, що такий діапазон значень істотного впливу на температуру повітря на виході із теплообмінника не спричиняє. Автори пов'язують такий результат із низькою теплоємністю повітря, що обумовлює швидке зниження температури повітря до значення, близького до температури ґрунту.

Таблиця 1.3. Теплофізичні властивості ґрунтів

Автор	Теплопровідність ґрунту, $\lambda$ , Вт/(м·К)	Масова теплоємність ґрунту, $C_p$ , кДж/(кг·К)	Густина ґрунту, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Посилання
<i>Badescu V.</i>	1,2	2,2	1800	[2]
<i>Benkert S, та ін.</i>	1,5	1,3	1600	[3]
<i>Філатов С.О., Володин В.И.</i>	2	1,100	1850	[4]
<i>A. Sehlі та ін.</i>	2,01	1,38	2300	[5]
<i>S. Amara та ін.</i>	2,01	1,38	2300	[6]
<i>Rouag Amar та ін.</i>	1,74 0,52	1,9954 1,84	1868 2050	[12]
<i>Басок Б.І. та ін.</i>	1,42	1,15	1840	[13]
<i>P.M. Congendoma ін.</i>	1,49 2,3 1,24	1,340 2,850 1,650	1800 1650 1520	[14]

Розміщення системи зволоження масиву ґрунту вздовж зовнішньої поверхні горизонтального трубопроводу забезпечує підвищення температуропровідності ґрунту, що збільшує інтенсивність вилучення теплоти з масиву ґрунту.

Окрім цього технологічно доцільним є розташування бактерицидних ультрафіолетових ламп в просторі нагнітального повітропроводу. Це забезпечуватиме ерадикацію наявних в повітрі патогенних мікроорганізмів без жодного шкідливого впливу на інші показники повітря, що кондиціонується і довкілля.

### 1.3 Основи повітрообміну в приміщеннях

Для комфортного перебування людей в будівлях однією з найважливіших умов є наявність свіжого повітря в приміщеннях, що забезпечується завдяки експлуатації системи вентиляції. Вентиляція виконує функцію обміну повітря у приміщенні для видалення надлишків теплоти, вологи, шкідливих та інших забруднюючих речовин з метою забезпечення допустимого мікроклімату та чистоти повітря у зоні перебування людини. Нормативний повітрообмін в житлових та адміністративно-побутових приміщеннях визначений державними будівельними нормами України і, відповідно, є обов'язковим при новому будівництві чи реконструкції старих будівель.

Загальну мінімальну витрату зовнішнього повітря  $Q_{tot}$ ,  $\text{дм}^3/\text{с}$ , за певної кількості людей і площі приміщення визначають за формулою

$$Q_{tot} = n \cdot q_p + S \cdot q_B, \quad (1.1)$$

де  $n$  – проектна кількість людей у приміщенні;

$q_p$  – питома витрата зовнішнього повітря на одну людину,  $\text{дм}^3/(\text{с} \cdot \text{людина})$ ;

$S$  – загальна площа приміщення;

$q_B$  – питома витрата зовнішнього повітря на розбавлення будівельних забруднень (зменшення концентрації забруднюючих речовин, що виділяються від будівельних матеріалів),  $\text{дм}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ .

Значення питомої витрати зовнішнього повітря для нежитлових та невиробничих приміщень при різних умовах мікроклімату наведені в таблиці 1.4 [14].

Для прикладу розглянемо звичайний офіс на 30 осіб з розрахунковою (проектною) площею приміщення на одну людину  $10 \text{ м}^2$  при оптимальних умовах мікроклімату та низькому рівні забруднення повітря будівлі. Для такого офісу мінімальна витрата зовнішнього повітря буде складати

$$Q_{tot} = 30 \cdot 7 + 300 \cdot 0,7 = 420 \text{ дм}^3/\text{с} \quad (1.2)$$

Таблиця 1.4. Значення питомої витрати зовнішнього повітря для громадських приміщень при різних умовах мікроклімату.

Умови мікроклімату	Мінімальна витрата зовнішнього повітря на одну людину $q_p$ , $\text{дм}^3/(\text{с} \cdot \text{людина})$	Мінімальна витрата зовнішнього повітря на розбавлення будівельних забруднень $q_B$ , $\text{дм}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$		
		при дуже низькому рівні забруднення повітря будівлі	при низькому рівні забруднення повітря будівлі	при високому рівні забруднення повітря будівлі
Підвищені оптимальні	10	0,5	1,0	2,0
<b>Оптимальні</b>	<b>7</b>	<b>0,35</b>	<b>0,7</b>	<b>1,4</b>
Допустимі	4	0,2	0,4	0,8
Обмежено допустимі	Менше 4	–	–	–

Зазвичай температура зовнішнього повітря відрізняється від нормативної температури в середині приміщення – влітку вона вища, відповідно, припливне повітря потрібно охолоджувати, а взимку нижча – зовнішнє повітря перед постачанням в приміщення потрібно нагрівати. Для зміни температури припливного повітря на  $1^\circ\text{C}$  в умовному офісі на 10 осіб потрібно затратити

$$P = c_p \cdot \rho \cdot Q_{tot} \cdot \Delta t = 1,006 \cdot 1,2 \cdot 0,42 \cdot 1 = 0,5 \text{ кВт} \quad (1.3)$$

Для офісу нормативна результуюча температура приміщення становить в опалювальний період  $+22,0 \pm 2,0^\circ\text{C}$ ; у теплий період року  $+24,5 \pm 1,5^\circ\text{C}$ . Згідно [4] температура зовнішнього повітря в м. Києві в холодний період року становить  $-26^\circ\text{C}$ , а в теплий період  $+28^\circ\text{C}$ . Відповідно, для забезпечення нормативного повітрообміну в офісі в холодний період потрібно підвищити температурний потенціал припливного зовнішнього повітря на  $48^\circ\text{C}$  і залучити для цього 24 кВт теплової потужності. Таким чином, на систему вентиляції потрібно затрачати значну кількість енергії цілорічно (як в теплий, так і в холодний період року).

Підвищення норм з енергоефективності будівель спонукає до вирішення даної проблеми, одним із яких є геотермальна система вентиляції, завдяки якій можна зменшити різницю температури припливного повітря з нормативним значенням, і відповідно, знизити витрати енергії на його приготування перед постачанням в приміщення.

#### 1.4 Аналіз світового досвіду енергоефективного будівництва

Світова енергетична криза 70-х років минулого століття сприяла появі нового науково-експериментального напрямку в будівництві, що пов'язаний із поняттям «енергоефективні будівлі». Однією з перших енергоефективна будівля була побудована в 1974 році в м. Манчестері (штат Нью-Гемпшир, США). Основна мета створення цієї будівлі полягала у виявленні сумарного ефекту енергозбереження від використання архітектурних та інженерних рішень, що спрямовані на економію енергетичних ресурсів. Загальне енергоспоживання будівлі зменшувалось завдяки ефективному використанню сонячної радіації, двошарових огорожувальних конструкцій і електронного управління інженерними системами будівлі. Енерговитрати на вентиляцію були зменшені за рахунок оптимізації розподілу повітря і заміни зовнішнього повітря очищеним рециркуляційним. Рекуператори теплоти дозволили зменшити на 75% затрати енергії на охолодження та нагрівання припливного повітря. Система управління штучним освітленням, що регулює інтенсивність світла в залежності від зміни природного освітлення, надала можливість зекономити частину електроенергії. Реалізація цього проекту поклала початок будівництву енергоефективних будівель по всьому світу. Роботи з підвищення енергоефективності успішно проводяться також в Європі. Лідерами в цій галузі є Данія, Німеччина, Фінляндія. В столиці Фінляндії, Гельсінкі, існує цілий енергоефективний район VIKKI.

Однієї з сучасних тенденцій в світовому будівництві є розроблення і створення будівель, в яких комфортні планувальні рішення поєднуються із екологічністю та енергоефективністю. Поняття «енергоефективний будинок»

охоплює різні види енергоощадних типів будинків, якщо їм притаманні кращі показники енергоспоживання, аніж встановлені на даний час законодавчо і будівельними нормами країни.

В останні роки значно збільшився обсяг будівництва енергоефективних будівель різного призначення і отримали розвиток в міжнародній практиці стандарти, правила та інші нормативні документи з проектування та оцінки енергоефективності таких будівель.

Енергоспоживання будівлі стало домінуючим критерієм якості проекту. Якщо при будівництві перших енергоефективних будівель основний інтерес був до заходів з економії енергії, то з початку 90-х років минулого століття пріоритет віддається енергоощадним рішенням, що одночасно сприяють підвищенню якісних показників мікроклімату в приміщеннях будівлі. При цьому якість мікроклімату виходить на перший план порівняно із енергозбереженням. Єдиного наукового поняття енергоефективності будівлі міжнародними експертами до теперішнього часу не визначено.

В світі з'явилась велика кількість будівель і мікрорайонів, збудованих на основі різних концепцій енергетичних і екологічно чистих технологій. Всі вони визначаються власними найменуваннями. Відповідно до загальноживаної світової класифікації та існуючих концепцій енергетично ефективних і екологічно чистих технологій, будівлі з низьким енергоспоживанням визначаються наступним чином.

Енергоефективна будівля (energy efficient building) - будівля, в якій ефективне використання енергоресурсів досягається завдяки застосуванню інноваційних рішень, що можуть бути здійснені технічно, обґрунтовані економічно, а також прийнятні з екологічної і соціальної точок зору, а також не змінюють звичайний спосіб життя.

Будівля з низьким енергоспоживанням (low energy building) – будівля, що збудована із використанням сучасних технологій та будівельних матеріалів. Питома витрата енергії на опалення складає від 50 до 80 кВт·год/м<sup>2</sup> опалювальної площі в рік.

Будівля із нульовим використанням енергії (zero energy building) - будинок виробляє таку ж кількість енергії, яку використовує. Враховується енергія, що використовується для транспортування її в будівлю, тобто втрати при передаванні енергії.

Пасивна будівля (passive building) - будівля, в якій передбачені спеціальні засоби по використанню нетрадиційних (відновлюваних) джерел енергії, що суттєво знижує споживання енергії від традиційних джерел.

Автором ідеї пасивної будівлі є Вольфганг Файст (м. Дармштадт, Німеччина). Принципи пасивної будівлі: використання відновлюваних джерел енергії (сонячної радіації, теплоти ґрунту і повітря), посилена теплова ізоляція ОК, глибока утилізація теплоти повітря і каналізаційних стоків, що видаляються. Енергоспоживання, при цьому, не перевищує 15 Вт/м<sup>2</sup> загальної площі.

Біокліматична архітектура (bioclimatic architecture) – одно з напрямлень архітектури в стилі hi-tech, широко використовує засклені поверхні. Основний принцип – гармонія з природою, бажання приблизити людське житло до природи.

Здорова будівля (healthy building) – будівля, в якій пріоритетність при виборі енергозберігаючих технологій віддається технічним рішенням, що одночасно сприяють покращенню мікроклімату приміщень і захисту довкілля, збудовані з використанням екологічно чистих матеріалів.

Метою зеленого (екологічного) будівництва (green building) є мінімальний вплив на довкілля та здоров'я людей, зниження енергетичних і матеріальних затрат при будівництві і експлуатації будівель за рахунок ефективного використання енергії, води і інших ресурсів, скорочення обсягів відходів, викидів та іншого впливу на зовнішнє середовище. Такі технології інтенсивно і широко впроваджуються в країнах Європи. В Європі сертифіковані понад 1 млрд. споруд, тоді як в Україні «зеленим» вимогам повністю відповідає лише одна новобудова.

В країнах, де розвивається екологічне будівництво, створюються національні стандарти, в яких враховуються соціально-економічні і природні

умови країни: законодавство, державна політика по відношенню до енергоресурсів і екології, кліматичні умови, ступінь усвідомлення проблем енергоефективності і екологічності професійними співтовариствами та населенням. Розвитком та впровадженням зелених стандартів займаються ради із зеленого будівництва, спеціально створені некомерційні організації. Координація діяльності рад і інших екологічно орієнтованих будівельних і керуючих компаній здійснюється Міжнародною Радою із зелених будівель (World Green Building Council).

Основою концепції створення «розумного будинку» (smart building) є принцип максимально ефективного використання простору та його базових елементів: структури, систем, служб і управління. В «розумному будинку» всі системи можуть працювати у відповідності до побажань господарів, часу доби, наявності мешканців, у відповідності до погодних умов, зовнішньої освітленості і т.і. для забезпечення комфортного мікроклімату всередині будинку.

Важливою особливістю і властивістю «розумного будинку», що його відрізняє від інших способів організації життєвого простору є те, що це найбільш прогресивна концепція взаємодії людини з житловим простором, коли людина однією командою задає бажану обстановку, а автоматика, у відповідності із зовнішніми і внутрішніми чинниками, задає і відслідковує режими роботи всіх інженерних систем і електроприладів для забезпечення комфортного стану всередині будівлі.

Інтелектуальна будівля (intelligent building) – будівля, де з точки зору теплопостачання і кліматизації, потоки теплоти і маси в приміщеннях і огорожувальні конструкції оптимізовані за допомогою комп'ютерних технологій. До цієї категорії відносяться і «розумні будинки».

Будівля високих технологій (hi-tech building) – будівля, в якій економія енергії, якість мікроклімату, екологічна безпека досягаються завдяки використанню технічних рішень на основі know-how.

Екологічно нейтральна будівля (carbon neutral building) – будівля, в якій кількість і якість спожитої енергії не призводять до суттєвих порушень стану навколишнього середовища.

Будівля сталого потенціалу (sustainable building) – будівля, що знаходиться в екологічній рівновазі з людиною і навколишнім середовищем. Вона поєднує можливості використання екологічно чистих відновлюваних джерел енергії, оптимального використання енергії, збереження водного ресурсу, використання будівельних матеріалів повторно, покращення якості середовища проживання. В комплексі розглядається будівля і довкілля, їх екологічний і енергетичний стани як одне ціле.

Питання забезпечення енергоефективності житлових будівель є стратегічним напрямом розвитку будівельної галузі в Україні та економіки в цілому. З кожним роком житловий фонд України збільшується, але переважну кількість будинків загальною площею 922,1 млн. м<sup>2</sup> побудовано за застарілими технологіями, що є енергозатратними і потребують значних капіталовкладень для зменшення енерговитрат на їх експлуатацію. Щорічно житловий сектор споживає близько 10 млрд. кВт·год. електроенергії та до 1,5 млн. т вугілля. При цьому втрати теплової енергії впродовж року складають понад 13 млрд. Гкал, що становить 11 % обсягів відпущеної теплової енергії.

Найбільші втрати теплової енергії, близько 30 % – у житловому фонді та до 25 % – у зовнішніх теплових мережах. Тепловтрати житлових будівель складають: через зовнішні стіни 30 – 40 %, через вікна і балконні двері – 20 – 30 %, конструкції перекриття – 4 – 6 %, підвальні перекриття і цоколі – 3 – 5% і до 50 % при теплообміні в квартирах [15]. Тому, в першу чергу, для забезпечення енергоефективності житлового будівництва необхідно на етапі проектування закладати енергоощадні технології та нові методи енергозбереження.

Переважає більшість існуючого житлового фонду України, згідно вищенаведеної енергетичної класифікацією, належить до найбільш енергоємного класу F, в той час, як в розвинених європейських країнах більшість будинків має клас B та A.

В Україні, згідно зі стандартом, є класифікації енергоефективності будинків та розроблені формули розрахунків питомих витрат, але нормативні вимоги орієнтовані переважно на обмеження витрат на тепlopостачання будівель і потребують приведення до європейських стандартів комфортного проживання та будівництва пасивних будівель.

Отже, для забезпечення енергоефективності житлового будівництва в Україні потрібно на державному рівні визначити: законодавчі та нормативні вимоги до показників енергоефективності; економічні стимули до підвищення енергоефективності будівель; типові технічні рішення з термомодернізації будівель і методи оцінювання їхньої енергоефективності.

## 2 РОЗРАХУНКОВЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ПОТУЖНОСТІ ПОВІТРЯНО-ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМІННИКА

### 2.1 Аналітична модель теплообміну в повітряно-ґрунтовому теплообміннику

Принцип використання системи геотермальної вентиляції для приміщень різного призначення (рисунок 2.1) полягає в тому, що в залежності від призначення повітря, що має температуру  $T_1$ , подається до входу ґрунтового теплообмінника і віддає (відбирає) теплоту ґрунту, в результаті чого повітря охолоджується (нагрівається), набуваючи відповідної температури  $T_2$ , і подається в приміщення. При цьому є межа теплового впливу ґрунту, що оцінюється радіусом  $R$ , який в процесі експлуатації ґрунтового теплообмінника постійно збільшується. У періоди відключення системи вентиляції і, особливо, переходу з режиму охолодження на режим нагрівання і навпаки, відбувається відновлення природного температурного поля навколо ґрунтового теплообмінника.

При дослідженні теплового режиму ґрунтового теплообмінника виникає задача визначення нестационарного температурного поля в навколишньому ґрунті при заданій інтенсивності процесу відведення теплоти.

Введені наступні припущення:

- ґрунт є однорідним та ізотропним, при цьому його теплофізичні властивості залишаються постійними зі зміною температури;
- температура на внутрішній поверхні теплообмінника, що визначається розміром  $R_0$ , по всій його довжині постійна;
- вплив теплового потоку на поверхню ґрунту внаслідок сонячної радіації не враховується;

Таким чином, виникає задача визначення температурного поля необмеженого простору з циліндричною порожниною, якщо в початковий момент часу температура дорівнює  $T_{gp}$ , а температура на поверхні порожнини підтримується рівної  $T_0$ .

Рівняння теплопровідності, що описує одномірні нестационарні теплові процеси з осьовою симетрією (зовнішня задача) [17]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad r \in [R, \infty), \quad t \in [0, \infty), \quad (2.1)$$

де  $T(r, t)$  – температура в точці ґрунту, що знаходиться на відстані  $r$  від осі ґрунтового теплообмінника в момент часу  $t$ , °C;

$t$  – час від початку процесу, с;

$a$  – коефіцієнт температуропровідності ґрунту, м<sup>2</sup>/с;

$r$  – відстань від розглянутої точки до осі ґрунтового теплообмінника, м;

$R$  – межа теплового впливу ґрунту, м.

У свою чергу коефіцієнт температуропровідності ґрунту

$$a = \frac{\lambda}{C \rho}, \quad (2.2)$$

де  $\lambda$  – теплопровідність ґрунту, Вт/(м·°C);

$C$  – питома теплоємність ґрунту, Дж/(кг·°C);

$\rho$  – щільність ґрунту, кг/м<sup>3</sup>.

Для отримання однозначного рішення необхідно задати граничні умови.

В рамках прийнятої моделі, вони будуть мати вигляд:

- початкова умова  $T(r, 0) = T_{zp}$ ,  $r \in [R, \infty)$ ;

- гранична умова на внутрішній межі  $T(R, t) = T_e$ ,  $t \in [0, \infty)$ .

Розв'язання даного рівняння можна отримати у вигляді невластного інтеграла, використовуючи результати, отримані в [17]. Для цього перейдемо до нової функції  $\tilde{T} = T - T_0$ . При цьому диференціальне рівняння буде мати той же вигляд, а граничні умови перетворяться таким чином:

$$\tilde{T}(r, 0) = 0,$$

$$\tilde{T}(R, t) = T_e - T_{zp}.$$

$$\tilde{T}(r, t) = \frac{2(T_e - T_{zp})}{\pi} \int_R^\infty \frac{(1 - e^{-a^2 s^2 t}) K(r, s) ds}{J_0^2(Rs) + N_0^2(Rs) s}.$$

(2.3)

Тоді, остаточно запишемо рівняння нестационарного температурного

поля

$$T(r,t) = T_{zp} + \frac{2(T_e - T_{zp})}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{(1 - e^{-a^2 s^2 t}) K(r,s) ds}{R J_0^2(Rs) + N_0^2(Rs) s}. \quad (2.4)$$

В цій формулі  $K(r,s) = J_0(Rs)N_0(rs) - N_0(Rs)J_0(rs)$ ,  $J_0(s)$  - функція Бесселя нульового порядку,  $N_0(s)$  - функція Неймана нульового порядку. Це

рішення отримано з використанням прямого 
$$\bar{u}(s,t) = \int_0^{\infty} u(r,t) r K(r,s) dr$$
 і

зворотнього 
$$u(r,t) = \int_0^{\infty} \frac{\bar{u}(s,t) s K(r,s) ds}{R J_0^2(Rs) + N_0^2(Rs)}$$
 перетворення Вебера.

Хоча отримана явна формула для знаходження температури, скористатися нею в інженерних розрахунках важко.

Це пояснюється кількома чинниками:

- підінтегральна функція є сильно осцилюючою;
- в розв'язку присутній невластний інтеграл першого роду.

При обчисленні цього інтеграла чисельно його потрібно буде замінювати визначеним інтегралом з досить великою верхньою межею. Для отримання оцінки поведінки підінтегральної функції, необхідно досліджувати асимптотичну поведінку спеціальних функцій, що входять до неї, при великих значеннях аргументів. У зв'язку з тим, що функція осцилююча, застосування прямих чисельних методів, типу методу Сімпсона, потребує дуже дрібного розбиття інтервалу інтегрування, що в свою чергу, призведе до великої помилки через похибки машинних обчислень. Застосування спеціальних методів інтегрування осцилюючих функцій, типу метода Файлона, важко через

відсутність точних формул вигляду 
$$\int_a^b \frac{s^n K(r,s) ds}{R J_0^2(Rs) + N_0^2(Rs)}, n \in N.$$

Таким чином можна констатувати той факт, що отримане вище рішення задачі являє скоріше теоретичну, ніж практичну цінність.

Результати розв'язку наведені на рисунку 2.1 для вихідних значень:  $T_{гр} = 10^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\epsilon} = 26^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda = 2,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ ;  $C = 1100 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ ;  $\rho = 1800 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Як видно, на практично можливому діапазоні використання системи вентиляції в режимі охолодження (два місяці відповідають дуже холодного літа для України, п'ять місяців – дуже жаркого) збільшення діаметру ґрунтового теплообмінника в 10 разів (з 0,1 м до 1,0 м) призводить до збільшення його питомої теплової потужності приблизно в 2 рази. Крім того, при збільшенні діаметра теплообмінника зменшується його пневматичний опір, а, значить, і енергія, необхідна для прокачування повітря через нього, що також позитивно в аспекті енергоефективності процесу.

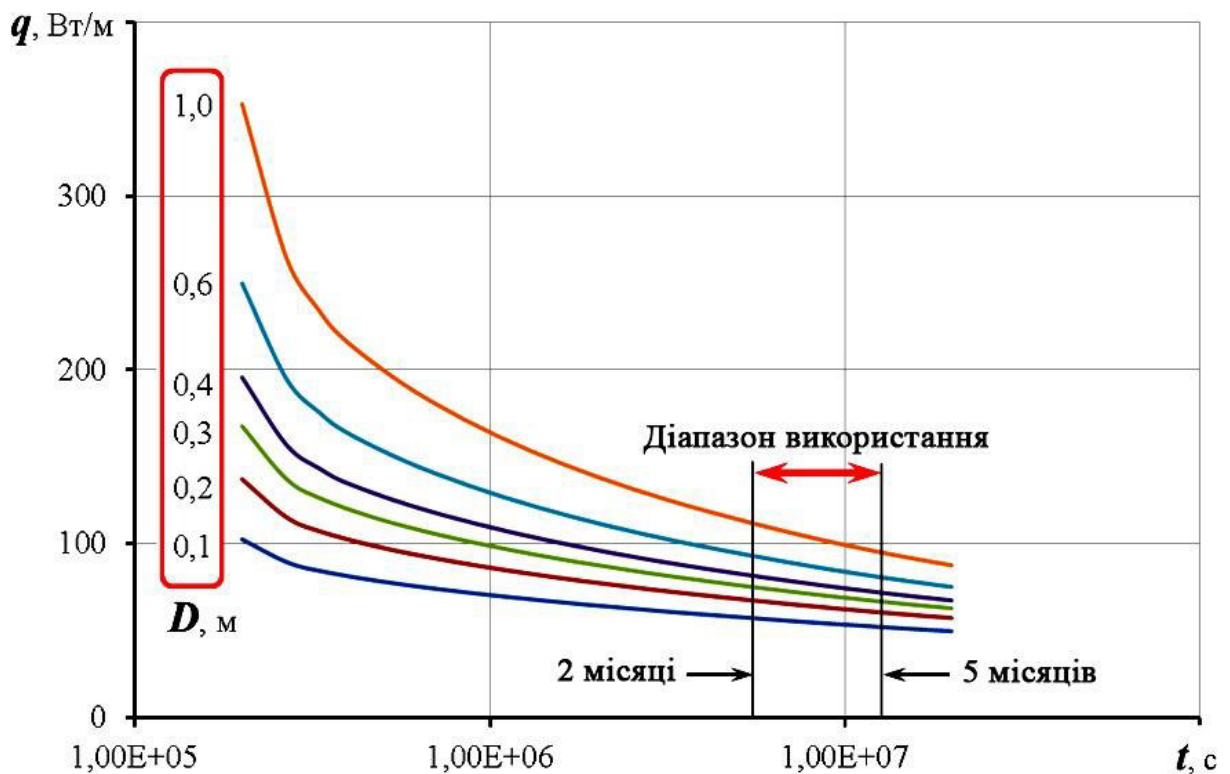


Рисунок 2.1 – Залежність питомої теплової потужності ґрунтового теплообмінника  $q$  від часу  $t$  функціонування для різних діаметрів  $D$  теплообмінника

З іншого боку, збільшення діаметра теплообмінників приводить до різкого зростання вартості системи вентиляції. Тому обґрунтувати діаметр ґрунтового теплообмінника в конкретних умовах його функціонування стане можливим тільки після економічних розрахунків. Отримані залежності будуть

справедливі також для роботи ґрунтового теплообмінника в режимі нагрівання повітря при  $T_s = -6^\circ\text{C}$ .

## 2.2 Обґрунтування довжини і діаметра ґрунтового теплообмінника

Для повноцінного використання теплового потенціалу ґрунту через ґрунтовий теплообмінник необхідно прокачувати певну кількість повітря. При завищеній подачі ми не забезпечимо істотного ефекту у вигляді охолодження (нагрівання) повітря, що прокачується, а будемо лише витратити енергію на прокачування повітря через ґрунтовий теплообмінник, яка навіть може перевищити отримувану теплову енергію від теплообмінника. При заниженій подачі повітря тепловий потенціал ґрунту буде використаний не повною мірою.

Таким чином, із збільшенням довжини теплообмінника повинна збільшуватись і кількість повітря, що прокачується через нього. У першому наближенні будемо вважати, що подача повітря пов'язана з довжиною теплообмінника лінійною залежністю виду

$$Q = L \cdot k_Q \quad (2.5)$$

де  $L$  – довжина теплообмінника, м;

$k_Q$  – коефіцієнт подачі,  $\text{м}^2/\text{год.}$ ;

$$k_Q = \frac{3600 q}{\Delta T C_s \rho_s}, \quad (2.6)$$

де  $q$  – питома лінійна теплова потужність ґрунтового теплообмінника,  $\text{Вт/м}$ ;

$\Delta T$  – різниця температур на вході і на виході з теплообмінника, що може бути забезпечена на всьому діапазоні функціонування системи вентиляції,  $\text{K}$ ;

$C_s$  – питома теплоємність повітря,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;

$\rho_s$  – щільність повітря,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

На основі роботи [18] при часі функціонування системи вентиляції з використанням ґрунтового теплообмінника  $t = 10^7$  с (цей час відповідає середньому діапазону використання системи вентиляції на одному з режимів –

нагрівання або охолодження) і різниці температур  $\Delta T = 8^\circ\text{C}$  (прийнята середня різниця температур на основі наших попередніх експериментальних досліджень) була складена таблиця 2.1, в якій відображено залежність питомої теплової потужності ґрунтового теплообмінника від діаметра теплообмінника.

Таблиця 2.1. Питома тепла потужність ґрунтового теплообмінника при різних діаметрах ґрунтового теплообмінника  $D$  і часі функціонування системи вентиляції  $t = 10^7$  с, а також різниці температур  $\Delta T = 8^\circ\text{C}$

$D, \text{ м}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0
$q, \text{ Вт/м}$	53,8	62,5	68,7	74,2	84,0	99,8

Тоді, тепла потужність ґрунтового теплообмінника, Вт

$$P = q \cdot L \quad (2.7)$$

Потужність  $P_n$ , що необхідна для прокачування повітря через трубопроводи ґрунтового теплообмінника, як функцію геометричних параметрів теплообмінника, шорсткості стінок повітропроводу, а також температур повітря на вході і на виході з теплообмінника.

Ефективна тепла потужність ґрунтового теплообмінника

$$P_{ef} = P - P_n. \quad (2.8)$$

Були виконані розрахунки в програмному середовищі Matlab, що дозволяє визначати ефективну теплову потужність ґрунтового теплообмінника, в залежності від його діаметра і довжини. Результати розрахунків представлені в таблиці 2.2 і на рисунку 2.2.

Таблиця 2.2. Ефективна теплова потужність  $P_{ef}$  ґрунтового теплообмінника при його різних діаметрах і довжинах

$H, \text{ м}$	$D, \text{ м}$					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0
5	228,7	309,5	342,8	370,7	419,9	499,0
10	81,9	595,0	680,2	739,5	839,4	997,9
15	-1178,2	817,3	1004,5	1103,8	1257,6	1496,5
20	-4682,1	920,9	1304,9	1460,0	1674,0	1994,9
25	-11953,4	834,1	1568,5	1804,1	2087,5	2492,7
30	-24908,0	469,3	1779,5	2131,1	2497,1	2989,8
35	-45854,8	-277,2	1919,8	2435,6	2901,6	3486,0
40	-77495,3	-1525,1	1968,4	2711,1	3300,0	3981,2
45	-122923	-3410,4	1902,1	2950,9	3690,0	4475,1
50	-185626	-6084,8	1695,0	3147,1	4071,0	4967,5

Як видно з рисунку 2.2, від певного діаметра ґрунтового теплообмінника можливо отримати лише певне максимальне значення ефективної теплової потужності, при деякій довжині теплообмінника, яку назовемо критичною.

Перевищення критичної довжини теплообмінника призводить до зменшення ефективної теплової потужності і, як наслідок, збільшення потужності, що необхідна для прокачування повітря через теплообмінник, тому що при збільшенні довжини ґрунтового теплообмінника збільшується пневматичний опір в трубопроводах (місцеві опори та опори по довжині).

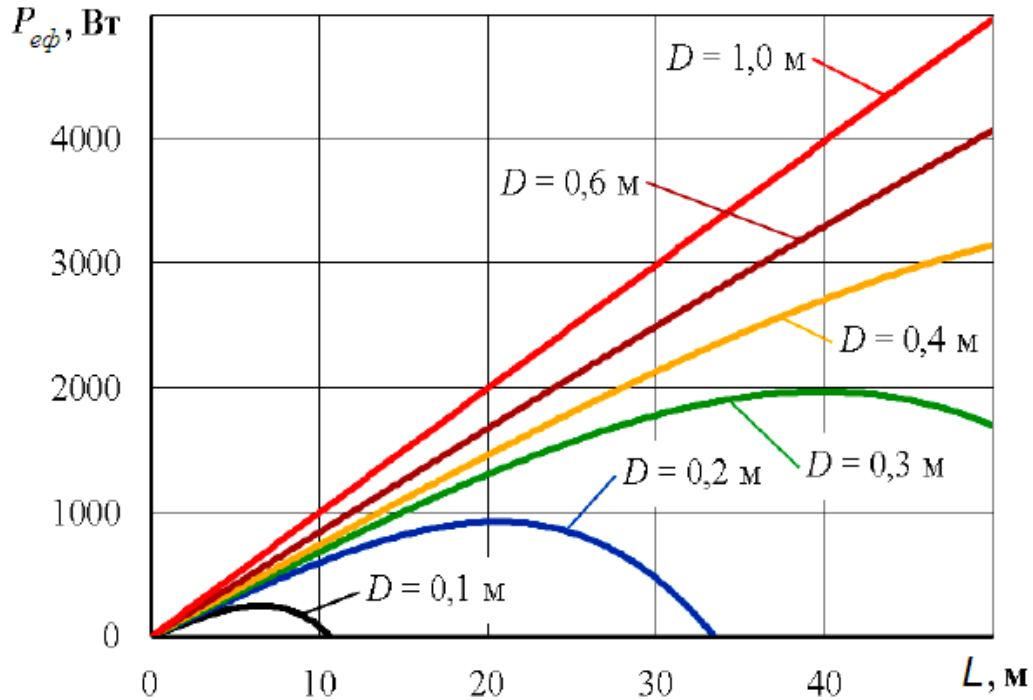


Рисунок 2.2 – Графік залежності ефективної теплової потужності  $P_{эф}$  від довжини  $L$  ґрунтового теплообмінника при різних його діаметрах

Апроксимуючи отримані розрахунки, що наведені у таблиці 2.2 для кожного діаметра ґрунтового теплообмінника поліномами четвертого ступеня і досліджуючи отримані функції на екстремум, були отримані критичні довжини ґрунтового теплообмінника при різних його діаметрах. Результати розрахунків оформили у вигляді таблиці 2.3 і рисунку 2.2.

Таблиця 2.3. Критична довжина ґрунтового теплообмінника  $L_{кр}$  при різних діаметрах ґрунтового теплообмінника  $D$

$D, \text{ м}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0
$H_{кр}, \text{ м}$	6,5	20,6	39,8	63,3	117,9	274,0

В результаті отримано наступну функціональну залежність критичної довжини ґрунтового теплообмінника від його діаметра

$$L_{кр} = -5,252 + 95,869D + 183,35D^2 \quad (2.9)$$

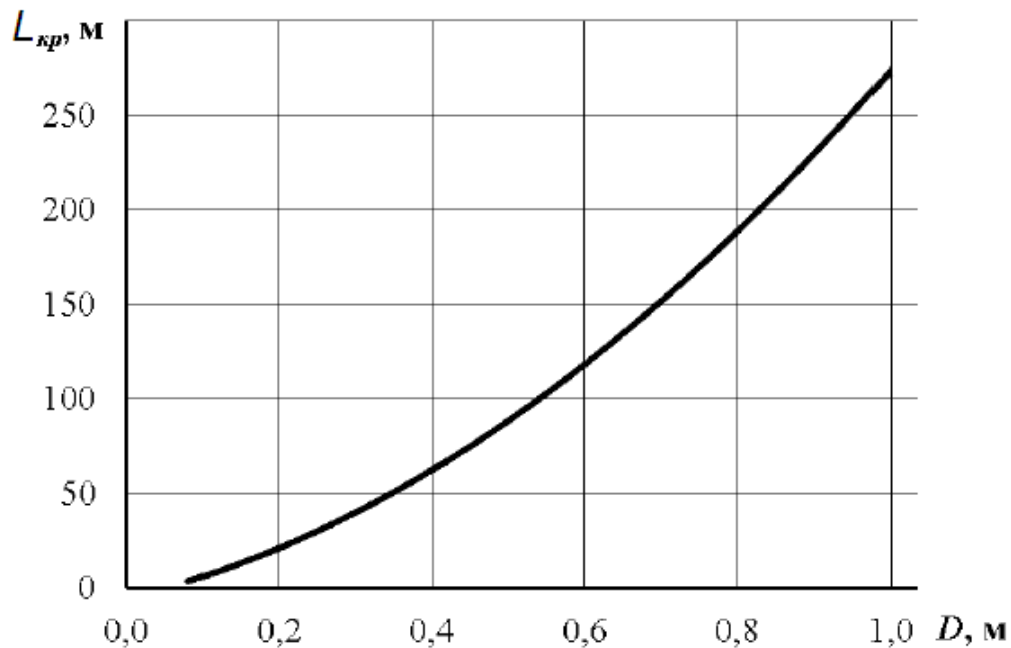


Рисунок 2.3 – Графік залежності критичної довжини  $L_{кр}$  ґрунтового теплообмінника від його діаметра  $D$

Отримано залежність вартості одного погонного метра обсадної труби ґрунтового теплообмінника від його діаметра

$$C_{o.m} = -2,388 \cdot 10^{-2} + 2,327 \cdot 10^{-3} D^2 \quad (2.10)$$

Зображена на рисунку 2.4 графічна залежність отримана на основі залежності (2.10), яка з прийнятною для практичних розрахунків точністю, описує вплив ціни одного погонного метра обсадної труби ґрунтового теплообмінника від його діаметра.

Приймаючи, що ціна прокладання траншеї під ґрунтовий теплообмінник та інші витрати пропорційні ціні обсадної труби, стає можливим визначити ціну одиниці Вт ефективної теплової потужності Ц грн./Вт, що отримана від системи вентиляції з використанням ґрунтового теплообмінника, яка виражається у відносних одиницях і характеризує економічну ефективність використання системи вентиляції. Отримані результати представлені в таблиці 2.4 і на рисунку 2.4.

Як видно з рисунка 2.4, при перевищенні критичної довжини ґрунтового теплообмінника (див. таблицю 2.4) ціна одиниці ефективної теплової потужності різко зростає. Це особливо добре видно для діаметра теплообмінника  $D = 0,2$  м. Так, до критичної довжини, яка для цього діаметра складає 20,6 м, ціна одиниці ефективної теплової потужності практично лінійно залежить від довжини теплообмінника.

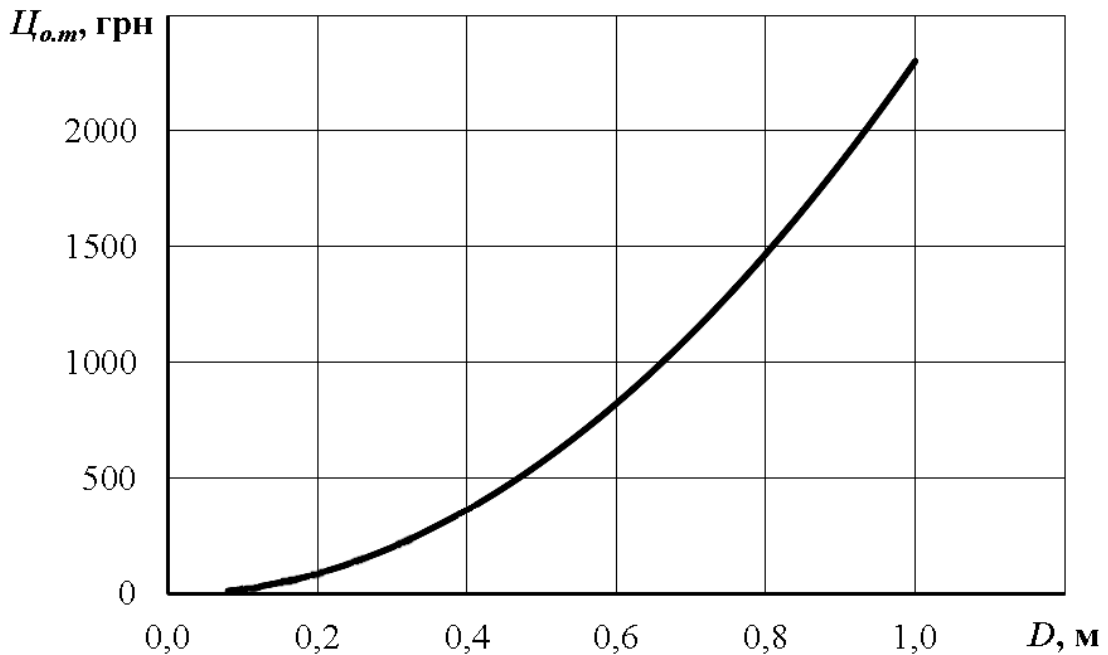


Рисунок 2.4 – Графік залежності ціни  $C_{o.m.}$  одного погонного метра полівінілхлоридної труби ґрунтового теплообмінника від його діаметра  $D$

З перевищенням критичної довжини одиниці ефективної теплової потужності вже квадратично залежить від довжини теплообмінника.

Тому, перевищувати критичну довжину теплообмінника не тільки енергетично не вигідно, але і економічно також.

Збільшення довжини ґрунтових теплообмінників:

- зменшує вплив сезонних змін температур ґрунту, що призводить до збільшення питомої теплової потужності теплообмінника і збільшення ефективності використання системи вентиляції;

- зменшує взаємовплив теплообмінників, оскільки зменшується їх кількість, необхідних для теплозабезпечення приміщення та збільшується

відстань між ними, що також підвищує ефективність використання системи вентиляції;

- не вимагає використання труб великого діаметра, бо при цьому збільшується вартість системи вентиляції (як видно з рисунку 2.5).

Таблиця 2.4. Ціна одиниці ефективної теплової потужності ґрунтового теплообмінника при його різних діаметрах і довжинах

<i>H</i> , м	<i>D</i> , м					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0
5	0,46	1,43	2,95	4,89	9,80	23,07
10	2,55	1,48	2,97	4,90	9,81	23,08
15	-	1,62	3,02	4,93	9,82	23,08
20	-	1,92	3,10	4,97	9,84	23,09
25	-	2,65	3,22	5,03	9,86	23,09
30	-	5,64	3,41	5,11	9,89	23,11
35	-	-	3,69	5,21	9,93	23,12
40	-	-	4,11	5,35	9,98	23,14
45	-	-	4,78	5,53	10,04	23,15
50	-	-	5,97	5,76	10,11	23,18

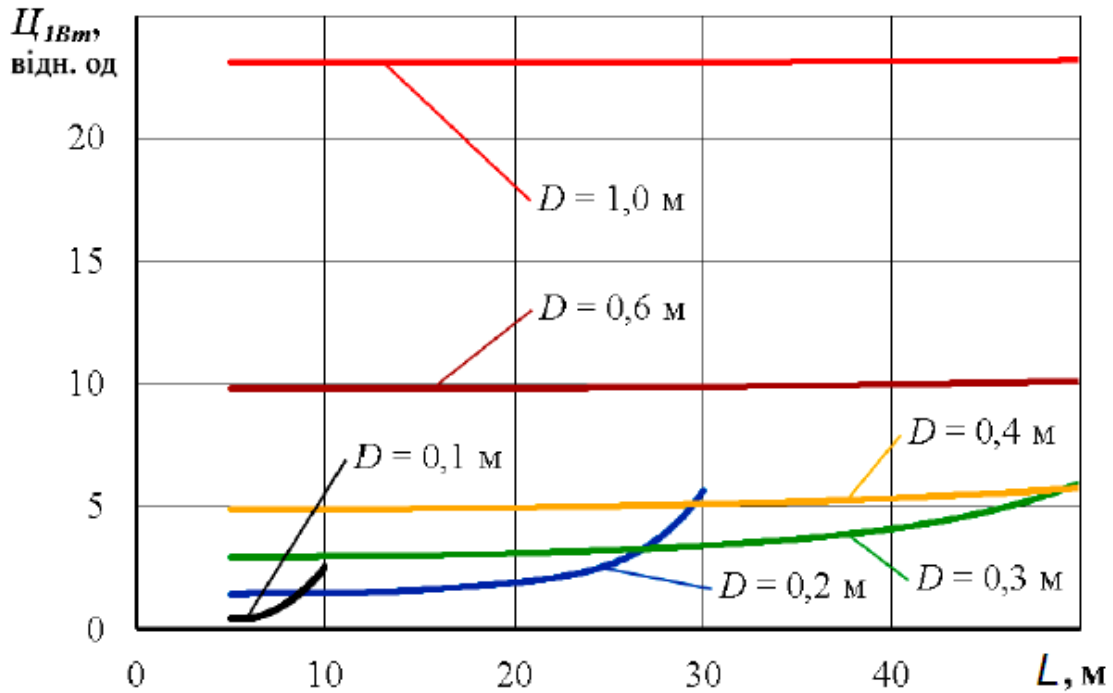


Рисунок 2.5 – Графіки залежності ціни  $C_{1Вт}$  ефективної теплової потужності від довжини ґрунтового теплообмінника  $L$  при різних його діаметрах

Тому довжина теплообмінника повинна знаходитись в діапазоні 20 - 30 м. Нижня межа цього діапазону обумовлена прагненням до зменшення впливу сезонних змін температур ґрунту та зменшенням взаємовпливу теплообмінників для підвищення ефективності використання системи вентиляції. Верхня межа діапазону обумовлена можливостями технічних засобів, що реалізують високопродуктивний і малозатратний роторний спосіб проходження траншей під ґрунтові теплообмінники. З рівняння (2.9) для цього діапазону довжин був визначений діапазон діаметрів ґрунтового теплообмінника 0,193 – 0,249 м.

## 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД З ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛООБМІНУ У ГРУНТОВИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ

### 3.1 Конструкція основних елементів та контрольно-вимірювальне обладнання експериментального стенду

Стенд створений як науково-технічну та технологічну теплофізичну лабораторію для дослідження теплофізичних процесів при експлуатації геотермальної системи вентиляції. Дана система використовується в двох технологічних режимах – в теплий період року режим пасивного кондиціонування, в холодний період – режим припливно-витяжної вентиляції з рекуперацією теплоти вихідного повітря. В останньому система виконує функцію обміну повітря у приміщенні для видалення надлишків теплоти, вологи, шкідливих та забруднюючих речовин з метою забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату та якості повітря у зоні перебування людини. Нормативний повітрообмін в житлових та адміністративно-побутових приміщеннях визначений державними будівельними нормами України і, відповідно, є обов'язковим при новому будівництві чи реконструкції старих будівель.

Основні технічні характеристики стенда:

Номінальна електрична потужність – до 1,0 кВт;

Номінальна напруга – 220 В;

Частота струму – 50 Гц;

Режим роботи – цілодобовий;

Максимальна температура нагріву припливного повітря – 25°C;

Габаритні розміри приміщення: довжина – 6,1 м; ширина – 3,2 м; висота – 2,8 м.

Експериментальний стенд з дослідження енергоефективності геотермальної вентиляції складається з основних частин:

1) Приймальний пристрій, який розташовано в захищеному від прямого сонячного випромінювання місці (рисунок 3.1);

2) Теплообмінники типу «ґрунт-повітря» різної конструкції, що виготовлені з труб НПВХ Ø110 та знаходяться в ґрунтовому масиві на глибині 2,2 м (рисунок 3.2);

3) Вентилятор Вентс ТТ Про 200 для прокачування повітря по теплообміннику та системі вентиляції будинку;

4) Вимірювальної системи – термоанемометр Testo 405-V1, напівпровідникові датчики ВМЕ280 (технічні характеристики датчиків наведено у таблиці 3.1), що реєструють температуру, вологість та тиск атмосферного повітря з вторинним приладом на основі мікропроцесора. Схему установки датчиків наведено на рисунку 3.3.



Рисунок 3.1 – Приймальний пристрій та загальний вигляд теплообмінників типу «ґрунт-повітря»

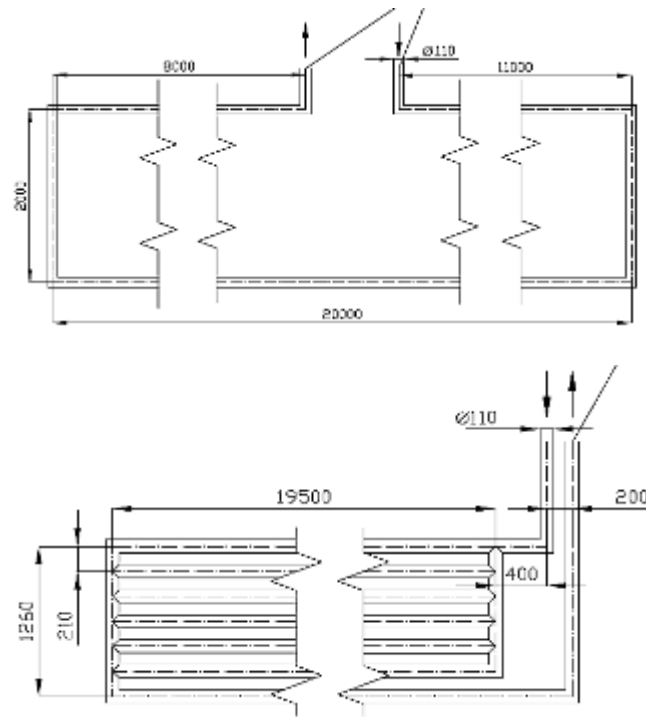


Рисунок 3.2 – Конструкція та габаритні розміри теплообмінників типу «грунт-повітря»

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики датчиків ВМЕ280

Параметр	Значення
Інтерфейси підключення	I2C
Максимальна швидкодія інтерфейсу	I2C до 3,4 МГц
Межі вимірювання температури	від -40 до 85 °С
Точність вимірювання температури	від 0.5 до 1 °С
Межі вимірювання вологості	від 0 до 100%
Точність вимірювання вологості	3%
Межі вимірювання тиску	від 300 до 1100 гПа
Точність вимірювання тиску	1 гПа
Напруга живлення	від 1,8 до 5 В
Струм в режимі вимірювання тиску	714 мкА
Струм в режимі вимірювання вологості	340 мкА
Струм в режимі вимірювання температури	350 мкА
Струм в режимі сну	від 0,1 мкА до 0,5 мкА
Розміри модуля	15 x 12 x 3 мм

Експериментальний стенд з дослідження енергоефективності геотермальної вентиляції розроблено для проведення експериментальних

досліджень теплообмінних процесів при проходженні атмосферного повітря через теплообмінники при різних режимах експлуатації. За допомогою вентилятора відбувається прокачування припливного повітря по теплообміннику з різною швидкістю 4,4 м/с та 5,5 м/с в ядрі потоку, що відповідає об'ємній витраті повітря – 29 та 37  $\text{дм}^3/\text{с}$  відповідно.

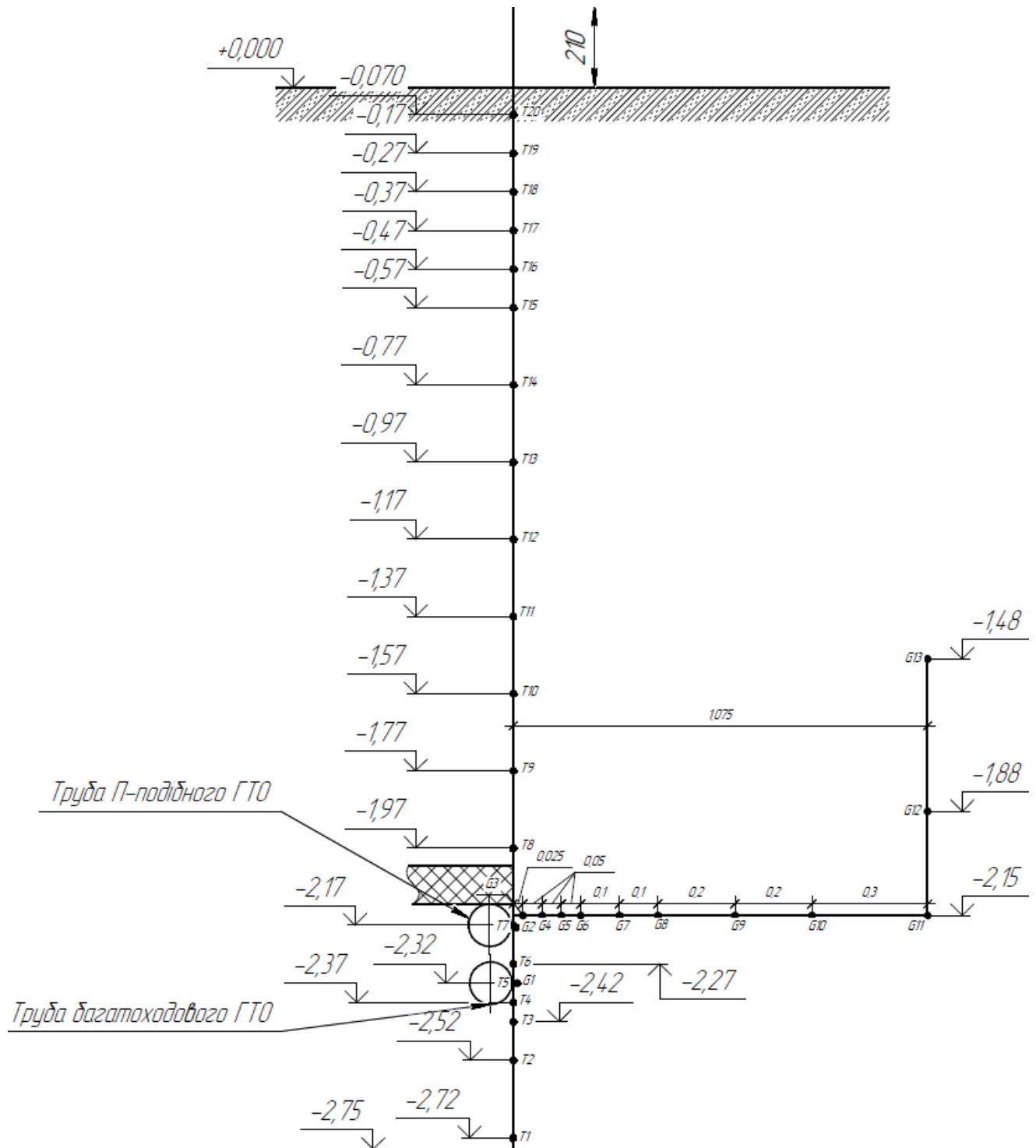


Рисунок 3.3 – Схема установки датчиків VME280

При цьому відбувається вимірювання та автоматична реєстрація значень швидкості та температури, вологості та тиску повітря у приймальному пристрої та вихідному каналі теплообмінника (на ділянці гідродинамічної і теплової стабілізації потоку) термоанемометром Testo 405-V1 (абсолютні похибки вимірювання температури  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ; швидкості  $\pm 0,3 \text{ м/с}$ ) та напівпровідниковими датчиками ВМЕ280.



Рисунок 3.4 – Вторинні прилади «ВП-1» (ліворуч) та «ВП-2» (праворуч)

Реєстрація, архівація та збереження експериментальних даних відбувається за допомогою двох вторинних приладів «ВП-1» та «ВП-2» оригінальної конструкції, розроблених у відділі теплофізичних основ енергоощадних технологій ІТТФ НАН України. Дані прилад побудовано на базі мікроконтролерів АТМЕГА-328. Загальний вигляд вторинних приладів показано на рисунку 3.4. На рисунку 3.5 показано загальний вигляд вимірювальної системи.



Рисунок 3.5 – Вимірювальна система стенду



Рисунок 3.6 – Етапи створення експериментального стенду

Перелік теплофізичних параметрів припливного повітря та ґрунту, які зберігаються при роботі експериментального стенду з дослідження енергоефективності геотермальної вентиляції:

- температура повітря («ВП-1») та ґрунту («ВП-2»);
- відносна вологість повітря («ВП-1») та ґрунту («ВП-2»);
- тиск припливного повітря на вході в теплообмінники типу «ґрунт-повітря» («ВП-1»);
- тиск припливного повітря на виході з теплообмінників типу «ґрунт-повітря» («ВП-1»).

### 3.2 Застосування ґрунтових теплообмінників в інженерних системах енергоефективного будинку

Енергоефективний будинок [19 – 21], що знаходиться на території ІТТФ НАН України по вул. Булаховського, 2, м. Київ обладнано різними інженерними системами, що використовують теплообмінники «повітря-ґрунт».

Основними є система припливно-витяжної рекуперативної вентиляції та тепла повітряна завіса стін будинку (система тепло(холодо)захисту огорожувальних конструкцій будинку). В основу останньої покладено ідею організації повітряної теплової завіси стін, шляхом відбору теплоти ґрунту за допомогою горизонтальних теплообмінників неглибокого залягання в ґрунтовому масиві, що забезпечить умови для руху повітря за рахунок природної конвекції і, як наслідок, зменшить температурний градієнт у стінах та захистить їх від промерзання.

Систему тепло(холодо)захисту огорожувальних конструкцій будинку можна реалізувати наступним чином. Повітря з оточуючого середовища, через вхідний отвір надходить у ґрунтовий теплообмінник, проходячи через нього, відбирає теплоту ґрунту і нагрівається (рисунок 3.7). Далі поступає в розподільчий короб, а потім, за рахунок різниці температур (нагрітого і холодного повітря), рухається по організованому в тепловій ізоляції простору шириною 50 мм. Далі, відпрацьоване повітря проходить вздовж стіни та

викидається в навколишнє середовище (рисунок 3.8). При цьому, ґрунтовий теплообмінник розташований горизонтально нижче глибини промерзання ґрунту та для уникнення втрат теплоти через поверхню землі ізолювано захисним шаром.

Всього було змонтовано 4 теплообмінника типу «ґрунт - повітря» – два багатоходові з розподільчими колекторами і два одноходові, що розміщені по периметру траншеї (на глибині 2,5 м), на території Інституту технічної теплофізики НАН України. Слід зазначити, що теплообмінники типу «ґрунт – повітря» мають різне призначення. Так, багатоходові з розподільчими колекторами підігрівають зовнішнє повітря, що потім надходить до рекуператора системи вентиляції будинку пасивного типу. А одноходові, що розміщені по периметру траншеї, підігрівають повітря для повітряної теплової завіси будинку.

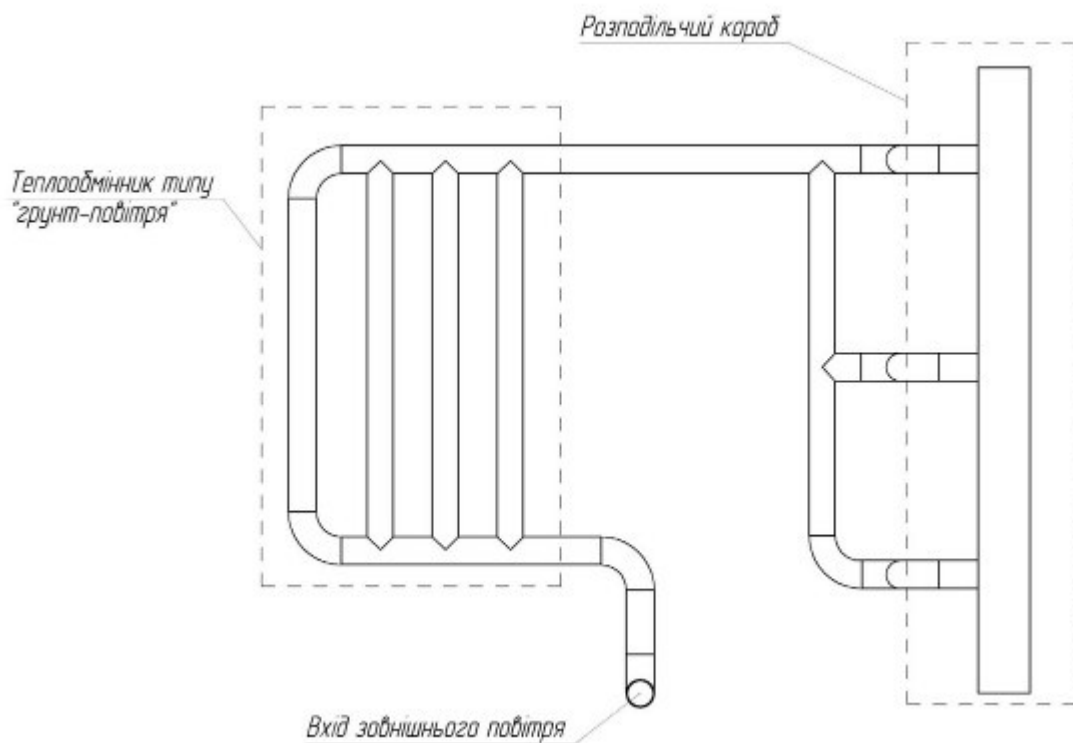


Рисунок 3.7 – Система ґрунтового теплообмінника та розподільчого коробу теплової завіси (вид зверху)

У холодний і теплий періоди року, відповідно, проводились експериментальні дослідження напірно-витратних характеристик і теплотехнічних параметрів ґрунтових теплообмінників у різних технологічних

режимах. Для прокачування крізь них зовнішнього атмосферного повітря використовувався каналний відцентровий вентилятор типу ВЕНТС ТТ Про 200 (рисунок 3.9).

Напірно-витратна характеристика вентилятора наведена на рисунок 3.10. Її особливістю є майже лінійна залежність напору від об'ємної витрати повітря у всьому діапазоні продуктивності. Для дискретного регулювання (min – max) продуктивності вентилятора у комплектації передбачений перемикач режимів роботи. Для дослідження теплообмінних процесів при проходженні атмосферного повітря через багатоходові теплообмінники додатково використовувався лабораторний автотрансформатор РНО-250-5, що дозволяв змінювати напругу змінного електричного струму живлення вентилятора (продуктивність у відповідному діапазоні значень напруги).

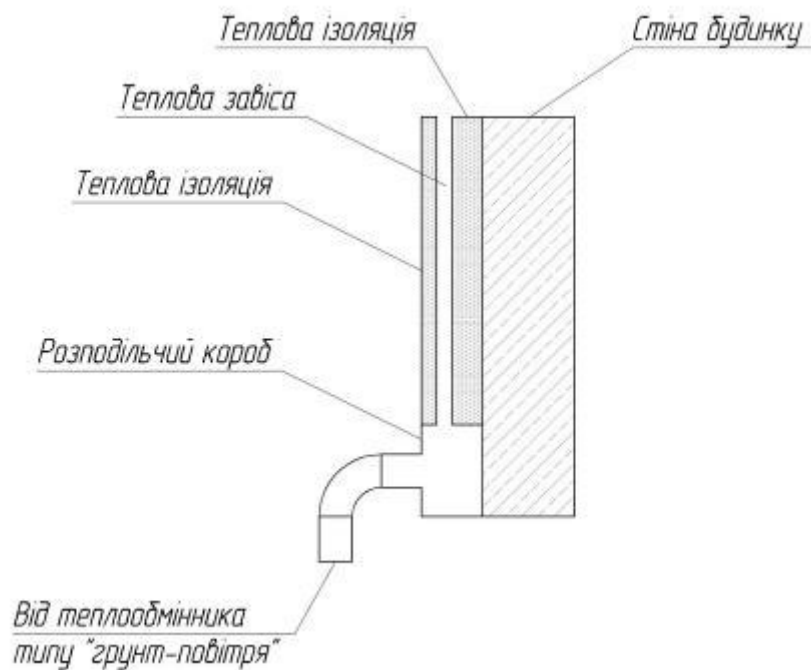


Рисунок 3.8 – Поперечний переріз стіни будинку



Рисунок 3.9 – Канальний відцентровий вентилятор типу ВЕНТС ТТ Про  
200

При цьому проводились вимірювання значень швидкості та температури повітря у вхідному і вихідному патрубках повітряних теплообмінників (на ділянці поза гідродинамічної і теплової стабілізації потоку) термоанемометром Testo 405-V1 (абсолютні похибки вимірювання температури  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ; швидкості  $\pm 0,3$  м/с).

У теплий період року проводились експериментальні дослідження, які виявили охолодження зовнішнього атмосферного повітря на  $11,2^{\circ}\text{C}$  від вихідного значення в  $29,8^{\circ}\text{C}$  [22, 23]. Значення швидкості руху повітря на вході до багатоходового південного теплообмінника і на виході з нього збігались і становили 3,6 м/с. Температура ґрунтового масиву при цьому дорівнювала  $8,8^{\circ}\text{C}$ .

Таким чином, у теплий період року ґрунтовий теплообмінник забезпечує охолодження припливного повітря. Зовнішнє повітря надходить через повітрязабірний пристрій в ґрунтовий теплообмінник, де охолоджується завдяки ґрунту. Потім охоложене повітря подається по повітропроводах до системи припливно-витяжної вентиляції з рекуператором.

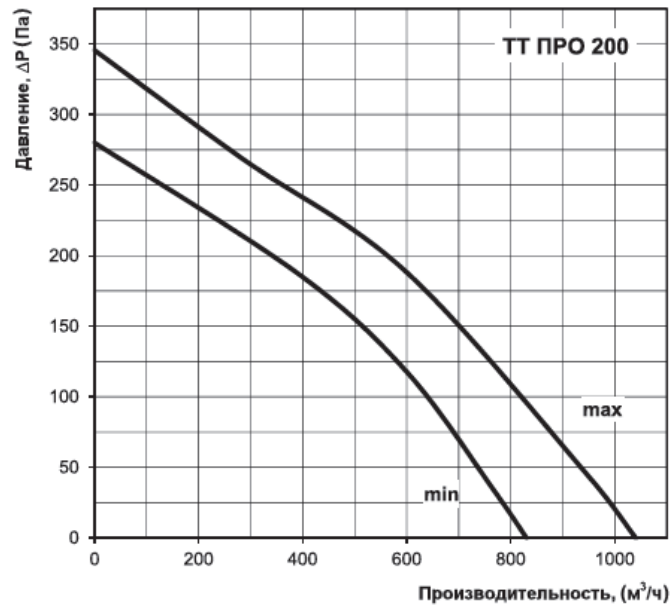


Рисунок 3.10 – Напірно-витратна характеристика ВЕНТС ТТ Про 200

У холодний період року зовнішнє повітря надходить через до теплообмінника типу «грунт - повітря», де нагрівається і потім надходить до припливно-витяжну установку для подальшого нагрівання його в рекуператорі. Попередній нагрів повітря знижує ймовірність обмерзання рекуператора припливно-витяжної установки, збільшуючи ефективний час використання рекуперації, і мінімізує витрати на додаткове нагрівання повітря в водяному або електричному нагрівачі.

#### 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ

Експериментальні дослідження результати яких приводяться, проводились протягом періоду з серпня по листопад 2020 р. Скважність вимірів складала 10 хвилин, експеримент проводився цілодобово, без перерв.

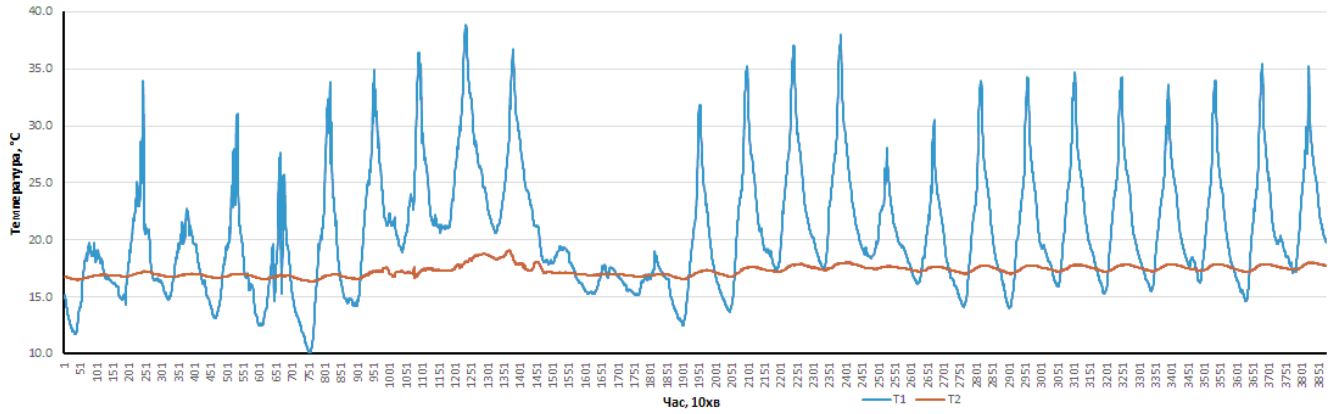
Використовувались контрольні-вимірювальні комплекси, технічні параметри яких описані в розділі 3.

Швидкість повітря в ґрунтовому теплообміннику складала 5,5 м/с, відповідно, розрахована об'ємна витрата склала 37 дм<sup>3</sup>/с.

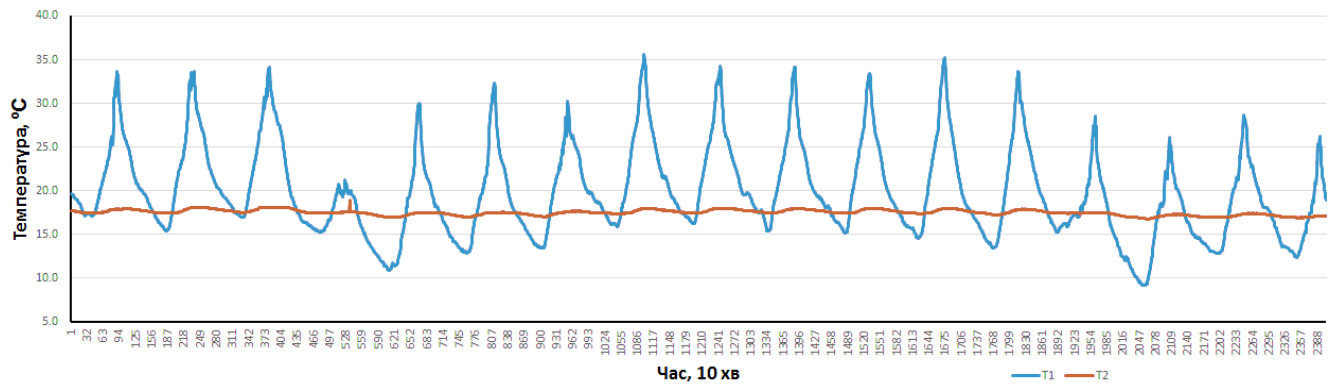
Реєструвались наступні параметри навколишнього та припливного повітря: температура; відносна вологість; абсолютний тиск.

На рисунку 4.1 приведено експериментальні дані значень температури навколишнього повітря на вході до ґрунтового теплообмінника (синя крива) та на виході з нього (червона крива). Як видно з графіків, добові коливання температури повітря на вході в ґрунтового теплообмінника практично не впливають на значення температури на виході з теплообмінника. Це пояснюється тим, що теплообмінник має площу теплообмінної поверхні, яка перевищує мінімально необхідну для роботи даного ґрунтового теплообмінника.

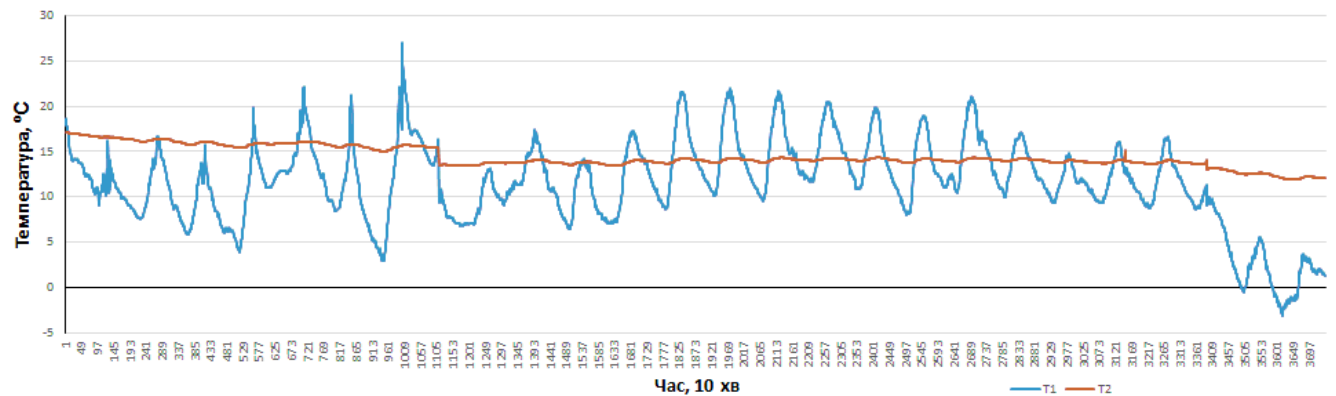
Однак слід відмітити вплив сезонного зниження температури навколишнього повітря, який проявляється у поступовому зниженні температури припливного повітря. Однак, даний вплив спостерігається з інерційністю у 12 діб (рисунок 4.1 в та 4.1 г). В цей період відбулося поступове зниження температури припливного повітря з +18 °С (серпень – жовтень) до +12 °С (середня температура за листопад). В кінці листопада, середнє значення температури припливного повітря знизилося до + 9 °С.



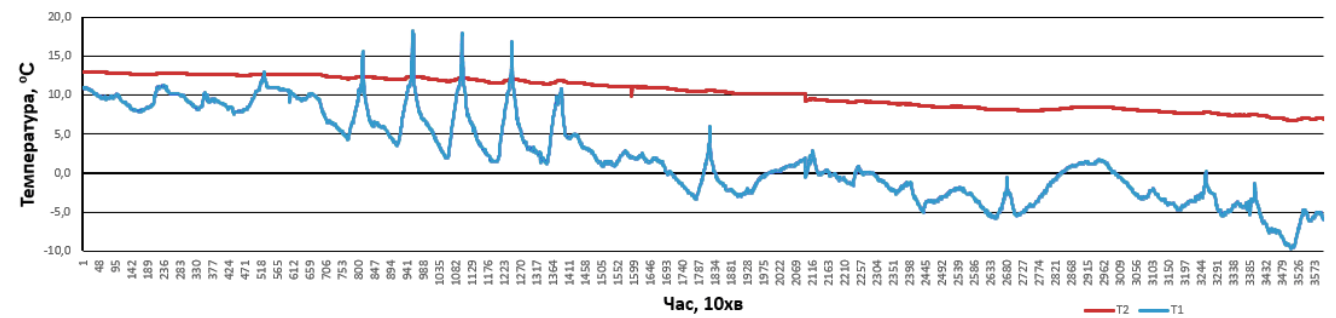
а) Інтервал 01.08.2020 – 31.08.2020 р.



б) Інтервал 01.09.2020 – 24.09.2020 р.



в) Інтервал 01.10.2020 – 31.10.2020 р.

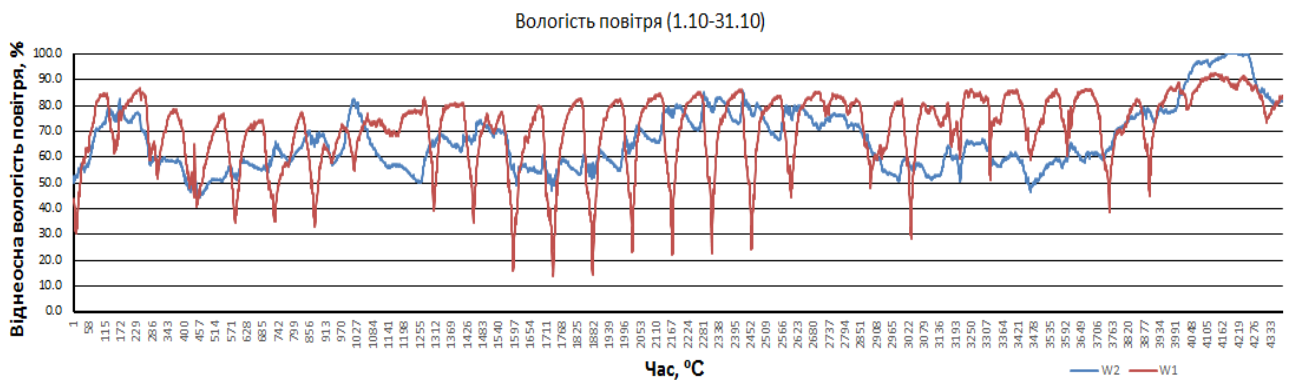


г) Інтервал 01.11.2020 – 30.11.2020 р.

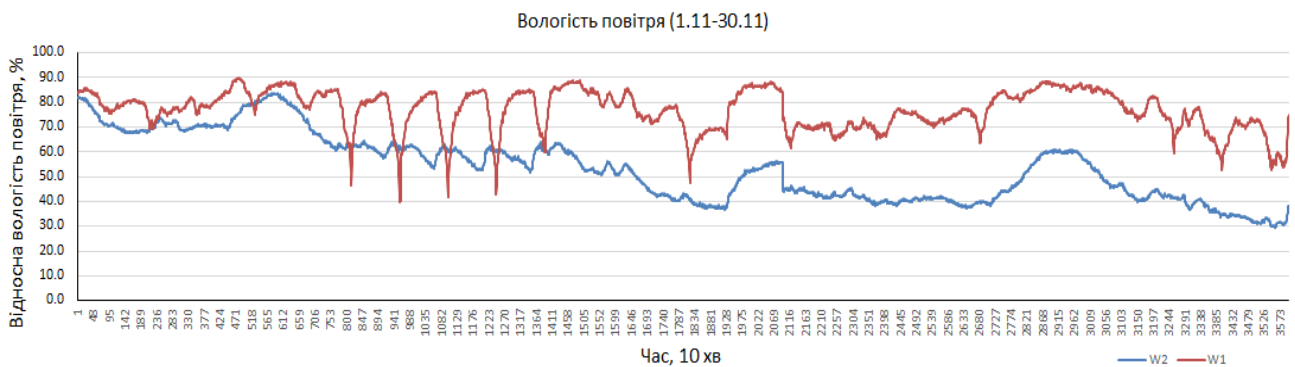
Рисунок 4.1 – Графік зміни температури повітря на вході (хвиляста крива) і виході (гладка крива) з ґрунтового теплообмінника

На рисунку 4.2 представлено зміну відносної вологості навколишнього повітря на вході до ґрунтового теплообмінника (червона крива) та на виході з нього (синя крива). Як видно з графіків, в ґрунтовому теплообміннику відбувається вирівнювання добових коливань відносної вологості навколишнього повітря.

Протягом жовтня, середня різниця значень відносної вологості склала 9%. В листопаді це значення підвищилося до 22%.



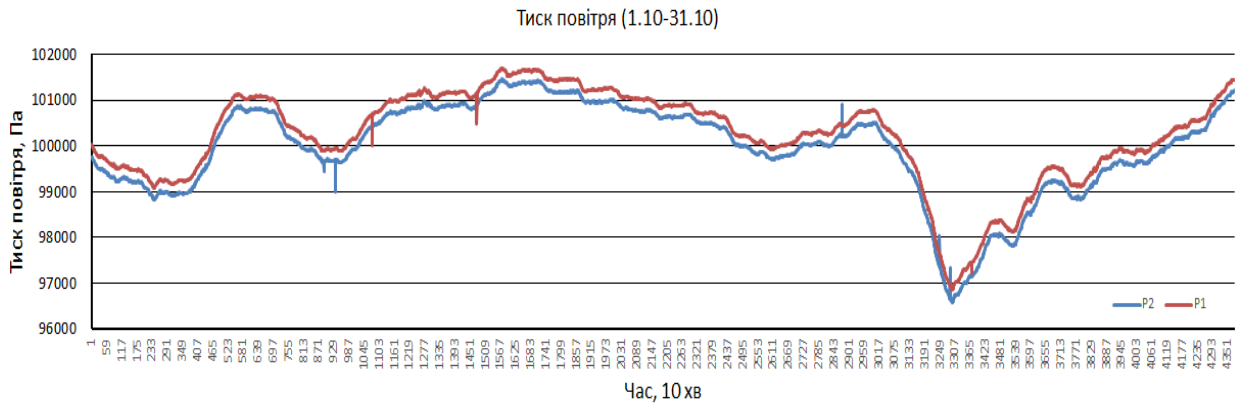
а) Інтервал 01.10.2020 – 31.10.2020 р.



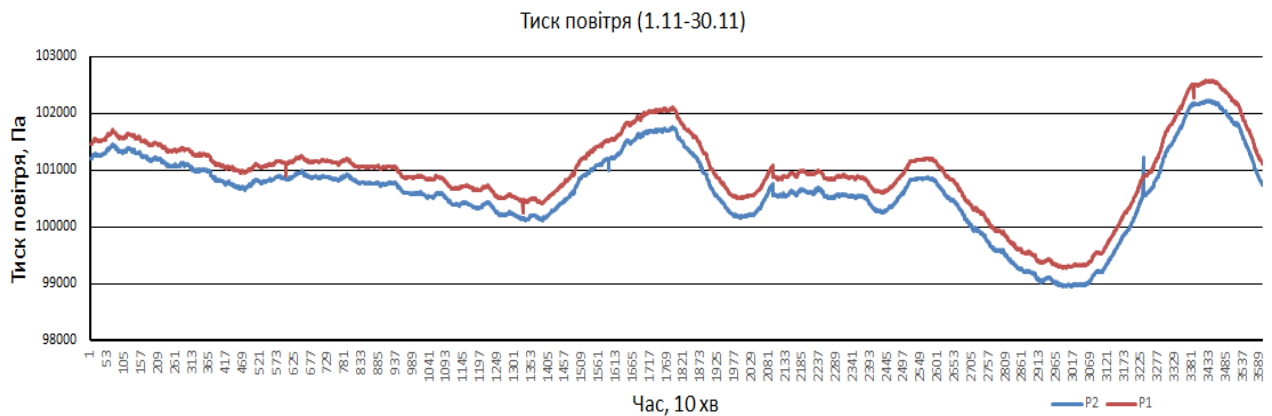
б) Інтервал 01.11.2020 – 30.11.2020 р.

Рисунку 4.2 – Графік зміни відносної вологості повітря на вході (верхня крива) і виході (нижня крива) з ґрунтового теплообмінника

На рисунку 4.3 представлено зміну абсолютного тиску навколишнього повітря на вході до ґрунтового теплообмінника (червона крива) та на виході з нього (синя крива). Як видно з графіків, аеродинамічний опір з ґрунтового теплообмінника складає до 400 Па.



а) Інтервал 01.10.2020 – 31.10.2020 р.



а) Інтервал 01.10.2020 – 31.10.2020 р.

Рисунок 4.3 – Графік зміни абсолютного тиску повітря на вході (верхня крива) і виході (нижня крива) з ґрунтового теплообмінника

На рисунку 4.4. показано зміну температури по висоті ґрунтового масиву під теплообмінником, від глибини 2,17 м ґрунту до глибини 2,72 м. Також, для зіставлення, на графіку наведено зміну температури зовнішнього та припливного повітря після теплообмінника.

Експлуатація ґрунтово-повітряного теплообмінника впливає на температурне поле ґрунтового масиву в області радіусом 0,3 м. При подальшому віддаленні від поверхні труби, температурне поле ґрунтового масиву залишається рівномірним та стабільним. Таким чином, можна зробити висновок, що для геологічно-кліматичних умов м. Києва доцільним міжосьовим кроком для монтажу є 0,6 м. При такому кроці мінімізується взаємовплив сусідніх трубопроводів один на одного.

Характерні результати вимірювань представлено на рисунках 4.4 – 4.11.

Зокрема, на рисунку 4.5 наведений повний узагальнений масив даних вимірювань значень температури впродовж обраного терміну експериментів з початку червня 2020 р. по червень 2021 р. По осі абсцис відкладений час вимірювань значень параметру експериментальної точки, спочатку отриманої один раз через 10 хвилин, а починаючи із 10800 хвилини (75 доба експлуатації теплообмінника) один раз в 1 хвилину. Загальний час вимірювань – 53440 хвилин, тобто 371 доба – маже календарний рік. Технологічні перерви відображені на нижній осі абсцис червоними вертикальними маркерами (лініями). Видно, що температура зовнішнього повітря коливалась впродовж досліджуваного періоду від  $+36^{\circ}\text{C}$  до  $-14^{\circ}\text{C}$  (погодні умови в м. Києві в 2020 - 2021 рр.), а температура повітря, що пройшло через горизонтальний ґрунтовий теплообмінник, була квазістаціонарною (практично не залежала від часу поточної доби), і змінювалась від  $+18^{\circ}\text{C}$  влітку до  $+2,5^{\circ}\text{C}$  взимку. Вентиляційне повітря було майже не чутливим до локальних змін (добових, декадних) температури повітря довкілля, і його температурний рівень визначався виключно тепловим режимом ґрунтового масиву, що оточував ґрунтовий теплообмінник. Тобто влітку повітря охолоджувалось максимально на  $18^{\circ}\text{C}$ , а взимку підігрівалось максимально на  $16^{\circ}\text{C}$  до позитивних температур (що важливо, бо не було промерзання) – і була в діапазоні змін між двома червоними горизонтальними лініями, зокрема в кінці весни, влітку і на початку осені температура вентиляційного повітря мало змінювалась і становила  $18^{\circ}\text{C}$ . За рахунок такого ефекту і збільшувалась енергетична ефективність системи вентиляції та кондиціонування будинку.

Нижче наведені більш ретельні дослідження локальної зміни температури (рисунок 4.5), відносної вологості (рисунок 4.6) та абсолютного тиску (рисунок 4.7) для двох діб кінця літа 2020 р.

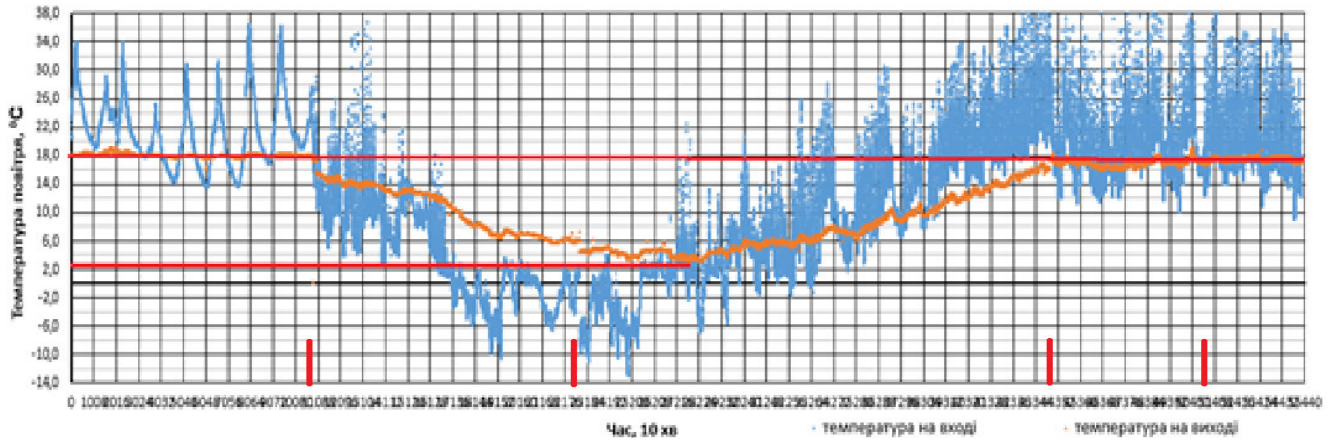


Рисунок 4.4 – Узагальнений масив даних вимірювань значень температури впродовж обраного терміну експериментів з початку червня 2020 р. по червень 2021 р.

Температурний перепад доби 17 серпня 2020 р. сягав майже  $15^{\circ}\text{C}$ . Полуденний температурний пік зовнішнього повітря із значенням в  $34,0^{\circ}\text{C}$  ґрунтовий масив поблизу ґрунтового теплообмінника ледь помітно відчув із запізненням в 3 години з підвищенням температури ґрунту приблизно на  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Аналогічна ситуація спостерігалась і для доби 18 серпня.

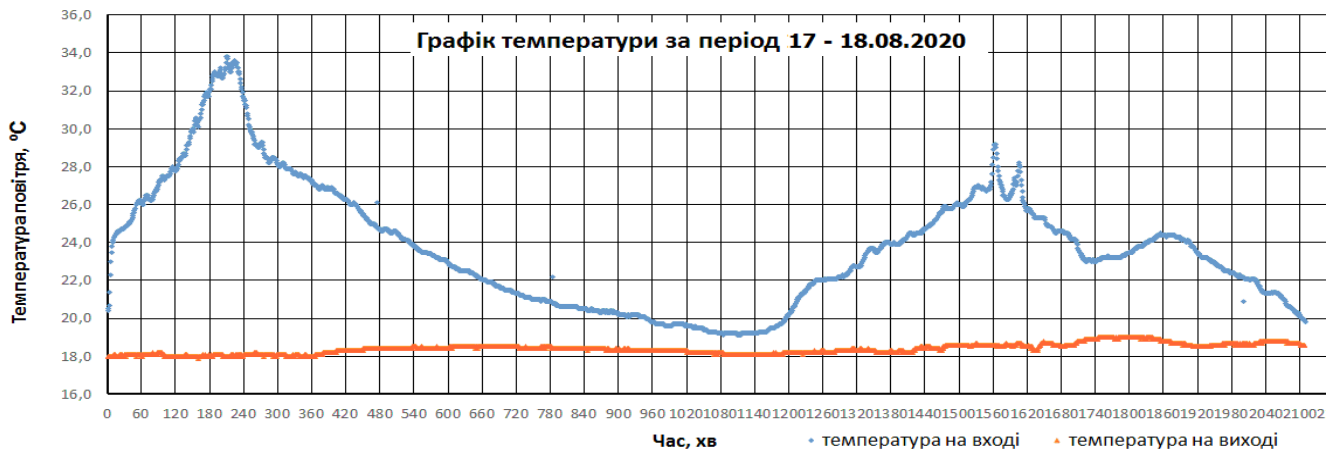


Рисунок 4.5 – Зміна температури повітря, відповідно, на вході (верхня крива) та виході (нижня крива) повітряно-ґрунтового теплообмінника

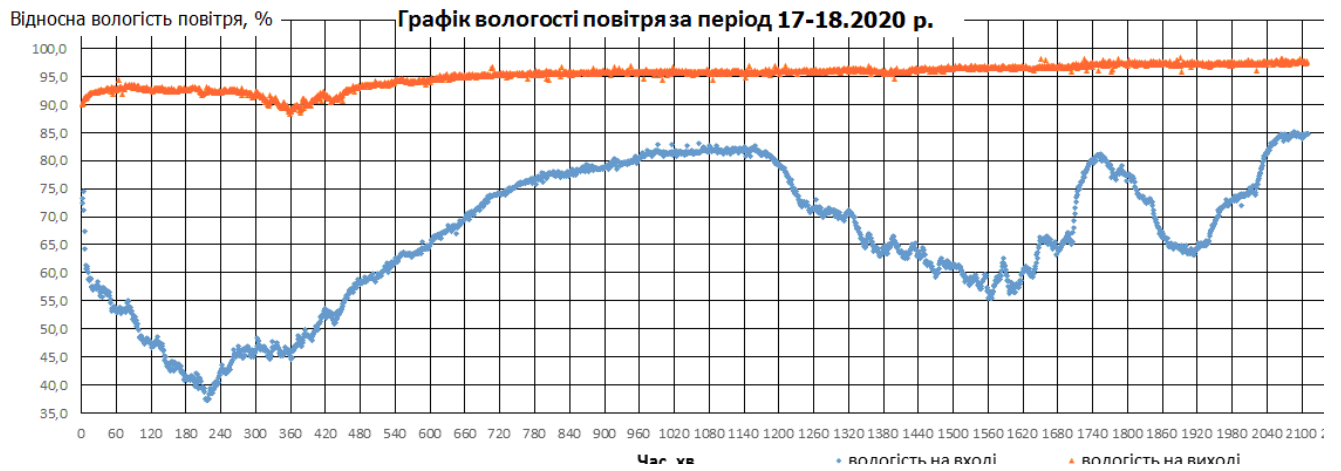


Рисунок 4.6 – Зміна відносної вологості повітря, відповідно, на вході (нижня крива) та виході (верхня крива) повітряно-грунтового теплообмінника

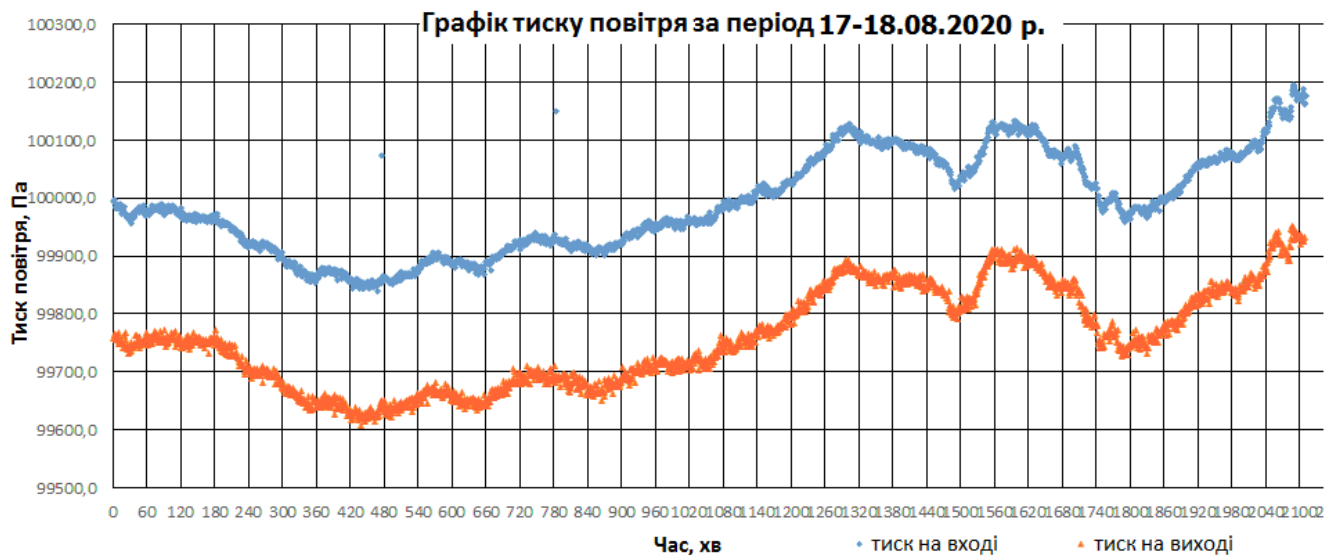


Рисунок 4.7 – Зміна абсолютного тиску, відповідно, на вході (нижня крива) та виході (верхня крива) повітряно-грунтового теплообмінника

Відносна вологість вентиляційного повітря була досить високою і за 2 доби дещо зростала від 91,5% до 97,0%. Відносна вологість атмосферного повітря довілля суттєво змінювалась від 37,0% в піку полуденної температури 17 серпня і до 82,0% в прохолодний нічний час. Час мінімумів відносної вологості зовнішнього повітря чітко співпадав з максимумами динаміки зміни його температури.

Динаміка зміни тисків вхідного і вихідного потоку повітря корелювала із динамікою зміни зовнішньої температури. Обидві криві на рисунку 4.8

розташовані еквідистантно, перепад тисків весь інтервал вимірювань становив 225...235 Па, що повністю відповідає розрахунковим аеродинамічним втратам геометрії каналу контуру теплообмінника.

Відображення ефектів часткової конденсації водяної пари зовнішнього повітря наведено на рисунку 4.8. Конденсатоутворення мале місце у весняний період експлуатації ґрунтового теплообмінника, коли значення середньої добової температури зовнішнього повітря майже співпадали із такими для ґрунтового масиву поблизу теплообмінника. При цьому відносна вологість вентиляційного повітря здебільшого перевищувала (на 20 - 25%) таку зовнішнього повітря, а в окремі інтервали часу відбувалась конденсація водяної пари (100%) на внутрішній поверхні трубопроводу [24].

В цей період вологість вентиляційного повітря здебільшого переважала вологість зовнішнього повітря, як видно з рисунку 4.9.

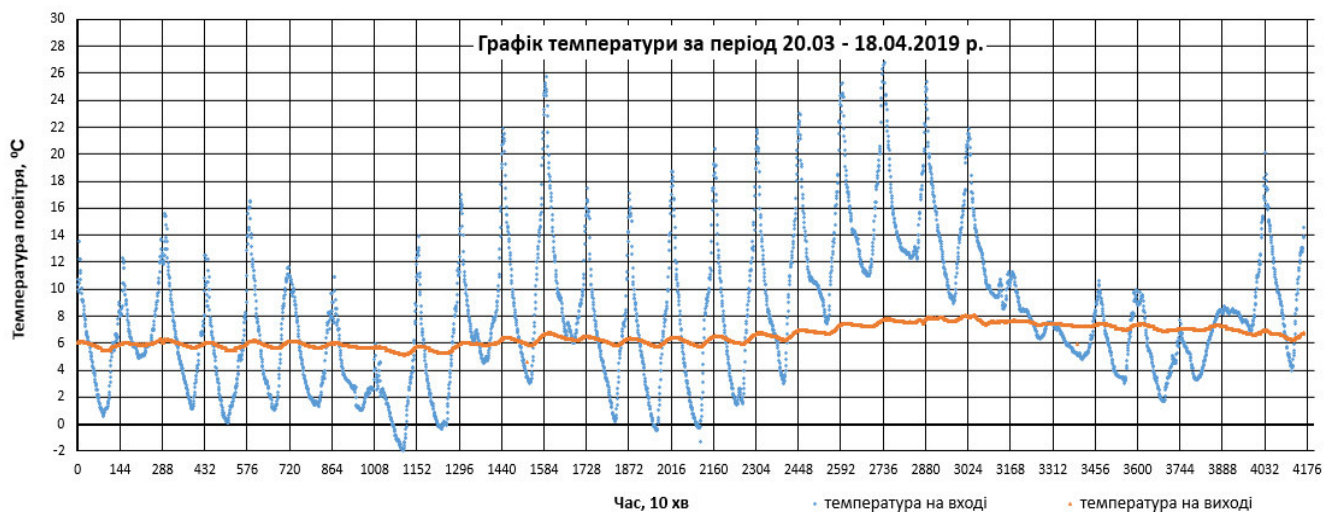


Рисунок 4.8 – Зміна температури повітря, відповідно, на вході (хвиляста крива) та виході (гладка крива) повітряно-ґрунтового теплообмінника

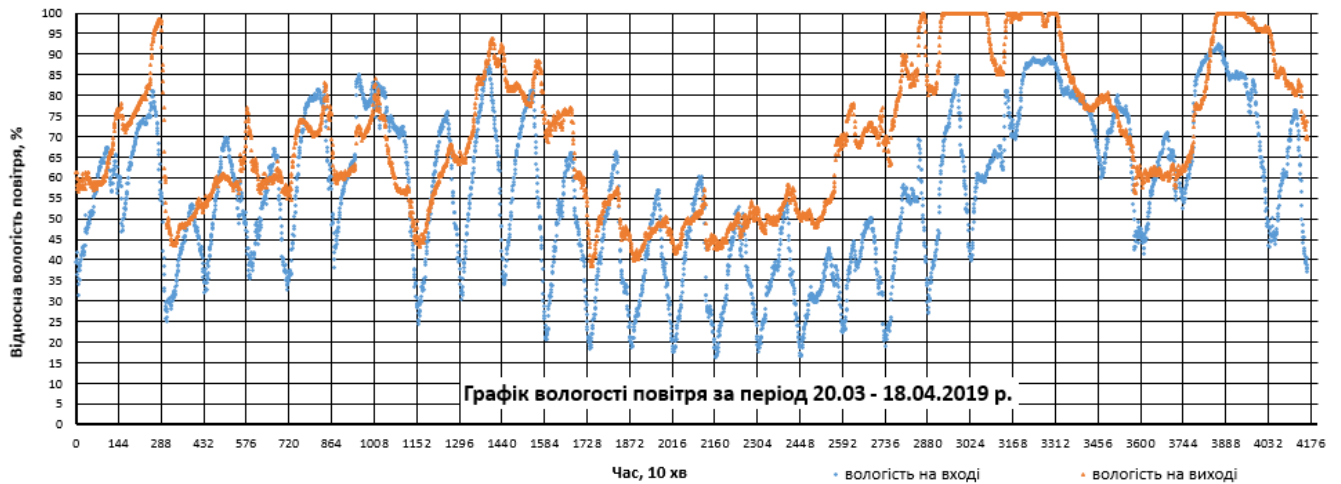


Рисунок 4.9 – Зміна відносної вологості повітря, відповідно, на вході (нижня крива) та виході (верхня крива) повітряно-грунтового теплообмінника

На рисунку 4.10 показано зміну температури по висоті ґрунтового масиву від поверхні ґрунту до глибини 1,97 м. Як видно з графіків, добові коливання температури навколишнього повітря впливають на шар ґрунту до глибини 0,6 м. Далі зміна температури відбувається дуже поступово та посилюється вплив інерційності.

Починаючи з глибини 1,77 м помітні коливання температури, що пов'язані з експлуатацією самої системи геотермальної вентиляції.

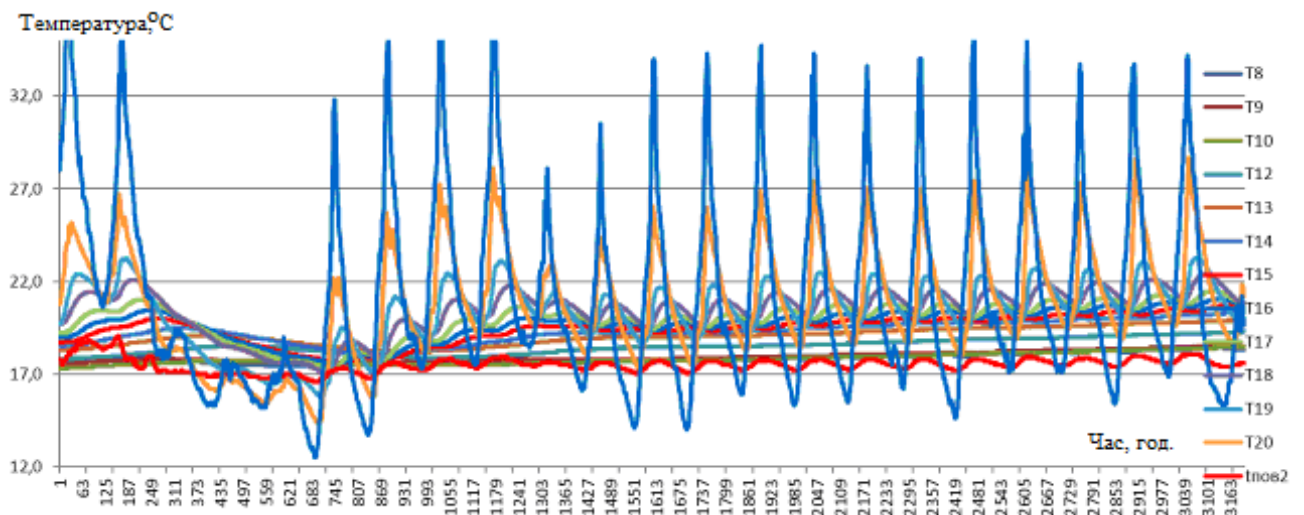


Рисунок 4.10 – Зміна температури ґрунтового масиву над повітряно-ґрунтовим теплообмінником (датчики температури T8 - T20 відповідно до схеми експериментального стенду, рисунок 3.3) за період 13.08 – 4.09.2020 р.

На рисунку 4.11 показано зміну температури по висоті ґрунтового масиву під повітряно-ґрунтовим теплообмінником від глибини 2,17 м ґрунту до глибини 2,72 м. Також, для поглиблення аналізу процесів теплообміну, на графіку наведена зміна температури зовнішнього та припливного повітря після повітряно-ґрунтового теплообмінника [25].

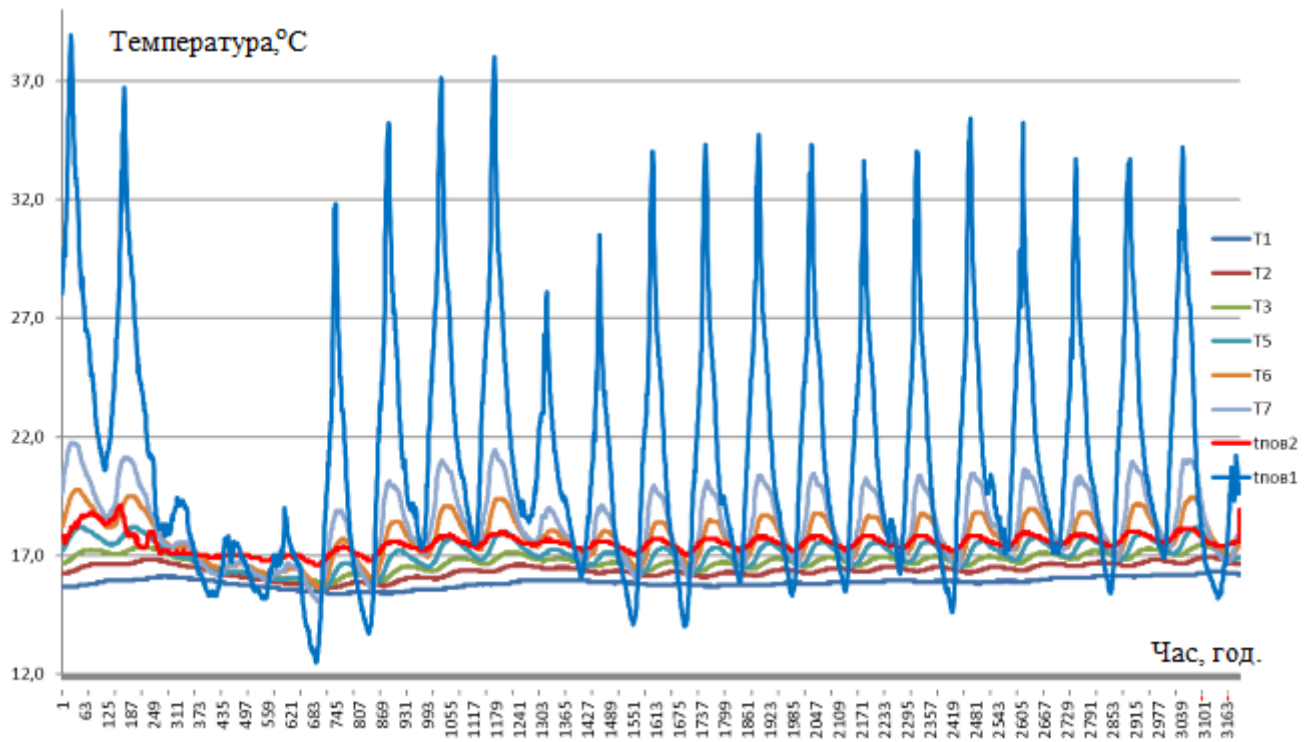


Рисунок 4.11 – Зміна температури ґрунтового масиву у під повітряно-ґрунтовим теплообмінник (датчики температури T1 - T7 відповідно до схеми експериментального стенду, рисунок 3.3) за період 13.08 – 4.09.2020 р.

Експлуатація повітряно-ґрунтового теплообмінника впливає на температурне поле ґрунтового масиву в області радіусом понад 0,3 м. При подальшому віддаленні від поверхні труби температурне поле ґрунтового масиву залишається рівномірним та стабільним. Таким чином, можна зробити висновок, що для умов м. Києва доцільним міжцентровим кроком для монтажу теплообмінників є не менше 0,6 м. При такому кроці мінімізується тепловий взаємовплив сусідніх трубопроводів один на одного.

## 5 ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В СИСТЕМІ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ БУДІВЕЛЬ

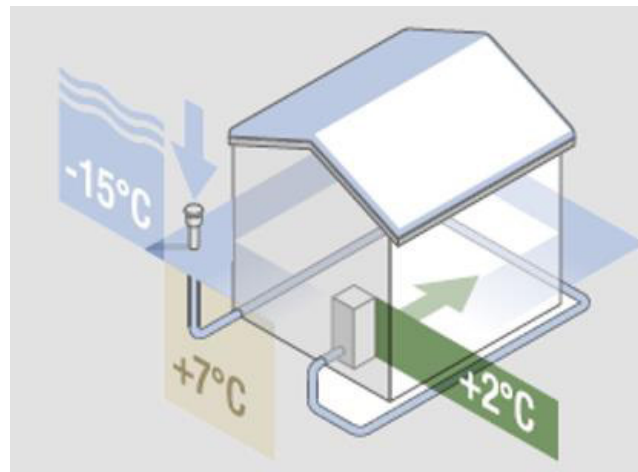
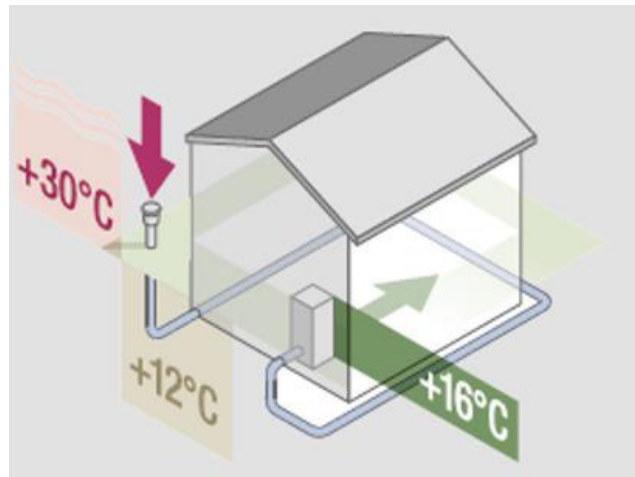
### 5.1 Математична модель процесів аеродинаміки та теплообміну в повітряно-грунтовому теплообміннику

Для розв'язання завдань ґрунтового акумулювання і вилучення теплоти необхідно знати глибину річних змін температур в ґрунті  $H$ , що визначає шар ґрунту, що реагує на річну зміну температури атмосфери Землі. Нижче глибини  $H$  температурний режим ґрунтового масиву стабільний і визначається виключно геологічним станом. Як показано в [27], значення  $H$  може змінюватися від 3,9 м до 5,0 м, а температура ґрунтового масиву нижче цієї глибини може бути від 5°C до 9°C, в залежності від регіону України. Тому при пропусканні припливного повітря через ґрунтові теплообмінники відбувається його нагрівання в холодний період року або охолодження в теплий (схематично зображено на рисунку 5.1).

В даному науково-дослідній роботі для дослідження течії повітря в трубі, що розташована в масиві ґрунту, використовувалась числова модель, в основу якої покладено наступні припущення:

- всі матеріали, що використовувались в розрахунках, вважались ізотропними та гомогенними;
- у відповідності до даних, що наведені в роботі [27], прийнято, що температура ґрунту залежить від глибини.

Розрахунки виконувались на основі системи рівнянь збереження імпульсу, енергії, кінетичної енергії турбулентності та швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності (5.1 – 5.8), що характеризують процеси аеродинаміки та теплообміну в повітряно-грунтовому теплообміннику [28].



а)

б)

Рисунок 5.1. Схематичний принцип експлуатації геотермальної вентиляції, відповідно, в холодний і теплий періоди року: а) нагрівання повітря; б) охолодження повітря.

Рівняння нерозривності

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (5.1)$$

Рівняння збереження кількості руху

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (5.2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (5.3)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right). \quad (5.4)$$

Рівняння збереження енергії

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (5.5)$$

Рівняння теплопровідності ґрунту

$$a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0. \quad (5.6)$$

Для замикання системи рівнянь турбулентного перенесення використовується  $k - \varepsilon$  модель турбулентності, що описана за допомогою рівнянь для кінетичної енергії та швидкості дисипації.

Рівняння збереження кінетичної енергії

$$\frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial vk}{\partial y} + \frac{\partial wk}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (5.7)$$

та рівняння збереження швидкості дисипації

$$\frac{\partial u\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v\varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial w\varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + G_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.8)$$

Основні рівняння вирішувались за допомогою методу кінцевих об'ємів. В більшості областей розрахункова сітка мала елементи у вигляді призм. Рівняння Нав'є-Стокса розраховувались із першим порядком точності.

Схема розрахункової області представлена на рисунку 5.2.

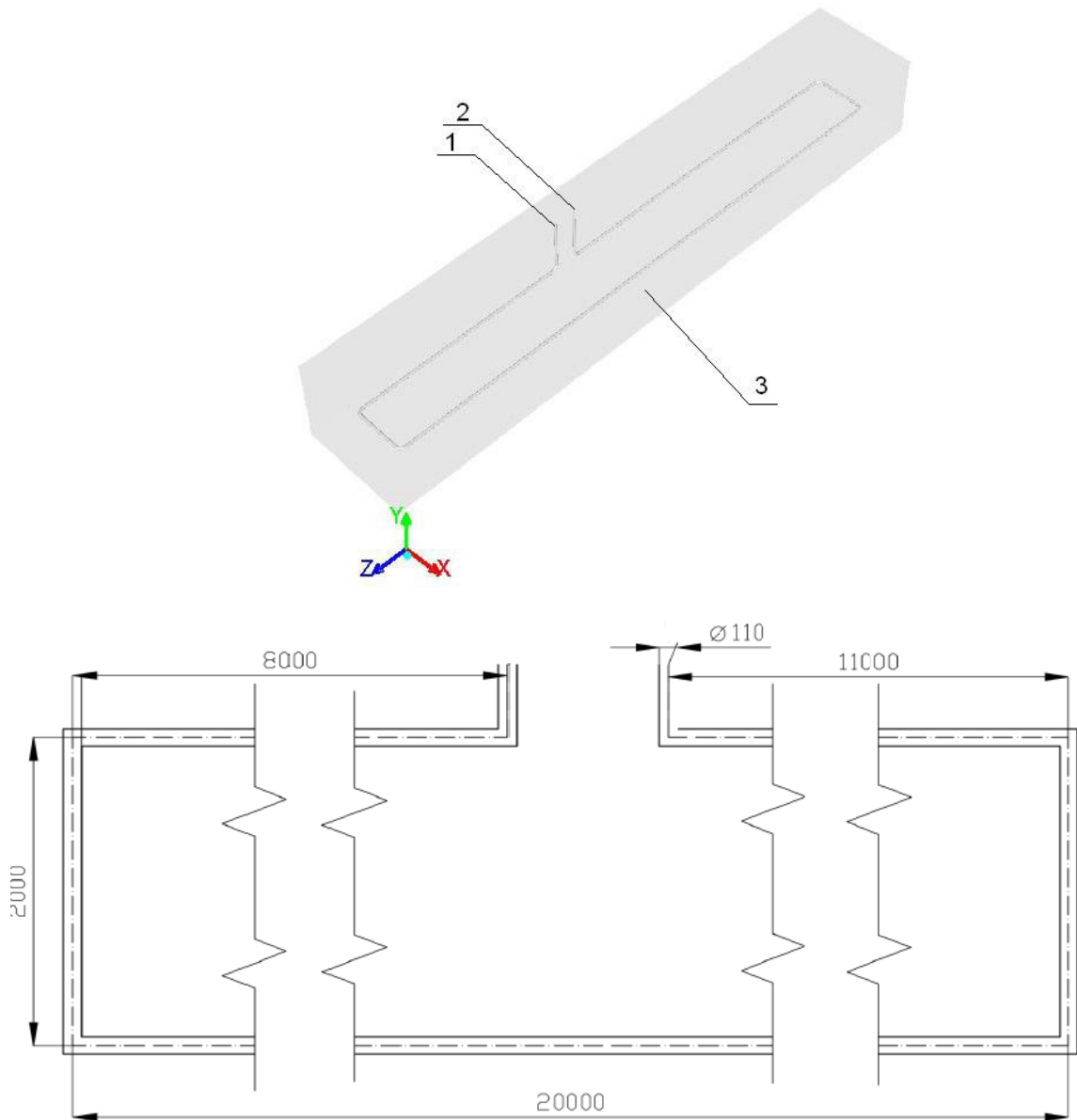


Рисунок 5.2. Схема розрахункової області та геометричні розміри теплообмінника: 1 – вхід до повітряно-грунтового теплообмінника; 2 – вихід з теплообмінника; 3 – масив ґрунту.

Теплофізичні властивості матеріалів, що використовувались в розрахунках, наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Теплофізичні властивості ґрунту та повітря, що прийняті в моделі

	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Теплоємність, кДж/(кг·К)	Щільність, кг/м <sup>3</sup>
Повітря	0,02420	1,006	1,225
Ґрунт	0,99262	1,059	1920

## 5.2 Граничні умови та припущення в моделі

При виконанні розрахунків в моделі використовувались наступні граничні умови:

1. На поверхні ґрунтового масиву, що контактує із атмосферою, задавались граничні умови III-го роду – коефіцієнт тепловіддачі 23 Вт/(м<sup>2</sup>·К) та температура, що дорівнювала значенню такої для повітря на вході до повітряно-ґрунтового теплообмінника.

2. З боків ґрунтового масиву, що був обмежений розрахунковою областю, задавалась температура ґрунту (в Кельвінах), що залежала від глибини та пори року:

$$\begin{aligned}
 \text{середина квітня} \quad T(z) &= 0,16z^3 + 0,6899z^2 + 0,343z + 277,24 \\
 \text{середина липня} \quad T(z) &= 0,431z^2 + 2,685z + 287,3 \\
 \text{середина жовтня} \quad T(z) &= -0,245z^3 - 0,702z^2 - 0,494z + 285,1 \\
 \text{середина січня} \quad T(z) &= -0,54392z^2 - 2,4523z + 277,54
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

На нижній границі області температура ґрунту  $T_s$  була постійною і складала [27]: квітень - 4°C; липень - 13,0°C; жовтень - 10,5°C; січень - 4,75°C.

3. На вході до повітряно-ґрунтового теплообмінника були задані швидкість повітря  $v$ , м/с та його вхідна температура  $T_{in}$ , К. В якості параметрів турбулентності були обрані турбулентна інтенсивність 10% та гідравлічний діаметр, що відповідав внутрішньому діаметру труби.

### 5.3 Валідація математичної моделі та сітковий аналіз

Розрахункова область мала вигляд паралелепіпеда із розмірами 22 м × 4,0 м × 4,21 м (довжина × ширина × висота), в якій було розташовано трубу повітряно-грунтового теплообмінника діаметром  $\varnothing 0,110$  м. Домен був розбитий на комірки за допомогою пірамідальної сітки із різним згущенням до повітряно-грунтового теплообмінника. Були обрані три варіанти сітки з різним розміром розрахункових комірок. Результати зіставлення представлені на рисунку 5.3.

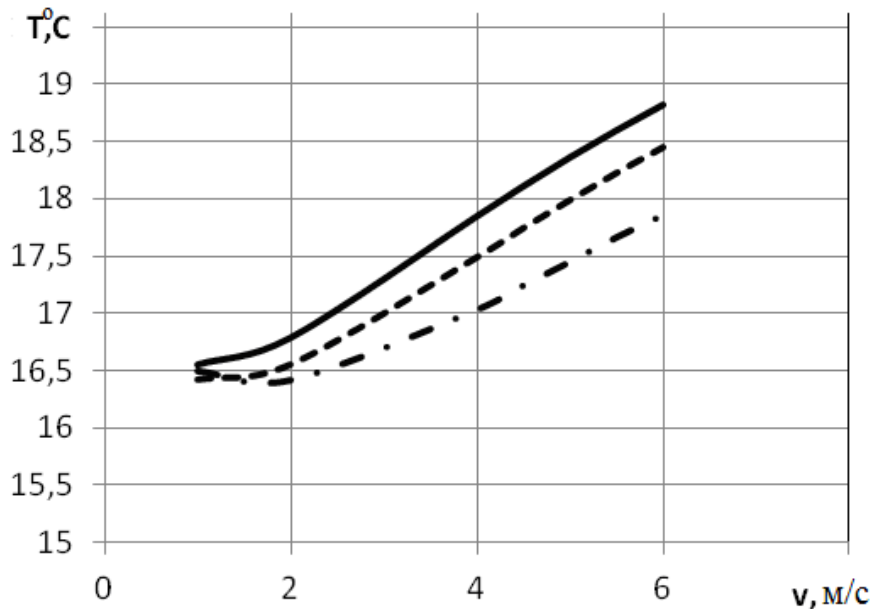


Рисунок 5.3. Аналіз сітки: — 4350 тис. комірок, - - 1000 тис. комірок, - . - 400 тис. комірок.

За результатами порівняння, для подальших розрахунків, було обрано сітку із 1 млн. комірок, оскільки різниця між результатами розрахунків між даною та сіткою з 4,35 млн. комірок складає менше ніж  $0,5^{\circ}\text{C}$  (на відміну від різниці температур між сітками з 400 тис. та 1 млн. комірок), що лише незначно більше невизначеності вимірювання температури при експериментальних дослідженнях.

Валідацію результатів розрахунку проведено на основі даних, що були отримані на експериментальному стенді, який описано вище. Порівнювались

дані повномасштабного експерименту із даними математичного моделювання при умові вирішення стаціонарної задачі руху повітря в повітряно-грунтовому теплообміннику при різних середньодобових температурах повітря на вході [28].

При виконанні валідаційних розрахунків, у якості граничних умов на боковій поверхні масиву ґрунту, задавались значення температури ґрунту в жовтні та квітні місяці, розраховані згідно (5.9). На верхній поверхні задавались граничні умови III роду із температурою, що дорівнювала температурі повітря на вході в теплообмінник.

Порівняння експериментальних даних температури на виході із повітряно-грунтового теплообмінника та результатів математичного моделювання представлено на рисунку 5.4.

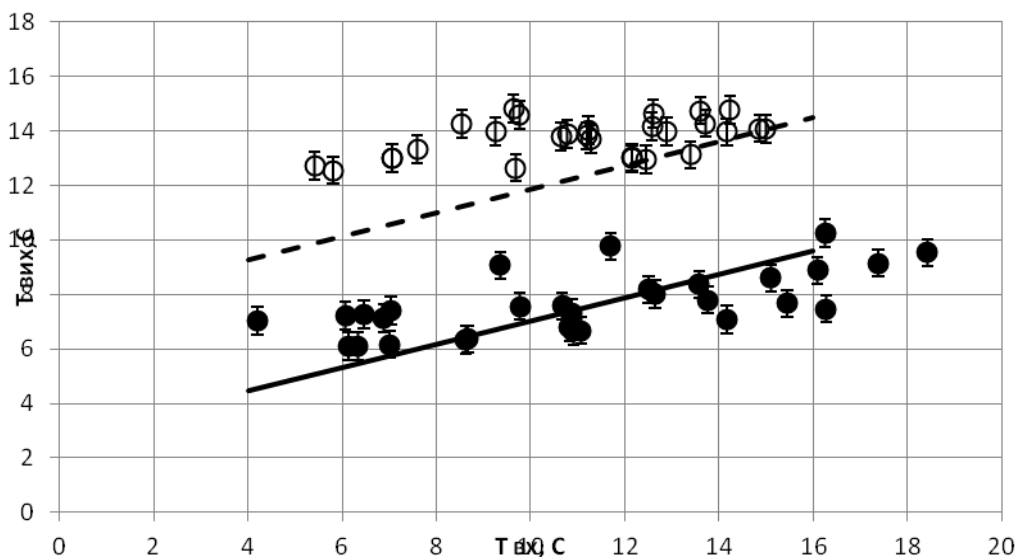


Рисунок 5.4 – Валідація теплофізичного моделювання за допомогою експериментальних даних: — - розрахунок (квітень); ● - експериментальні дані (квітень); - - - - розрахунок (жовтень); ○ - експериментальні дані (жовтень).

Як видно з рисунка 5.4, частина експериментальних даних співпадає із розрахунком в межах похибок експериментальних вимірювань. Деякі точки лежать вище розрахункової кривої, що пояснюється тим, що розрахунок

виконувався в стаціонарній постановці, і не може враховувати накопичення теплоти в ґрунті при різкій зміні температурного режиму. Тобто за умови, якщо середньодобова температура протягом попередніх діб перед добою вимірювання відрізнялась на декілька градусів порівняно із добою вимірювання, тоді тепла енергія накопичувалась в масиві ґрунту навколо труби повітряно-ґрунтового теплообмінника і спричиняла більш високе значення температури на виході із теплообмінника. Ця нестационарність параметрів процесу не була врахована в моделі, що була використана в даному випадку. Але в цілому, при відсутності різкої зміни погодних умов, модель прогнозує температуру на виході із повітряно-ґрунтового теплообмінника із точністю експериментального вимірювання.

Для отриманих даних виконано розрахунок середньої відносної похибки за формулою

$$\sigma = \frac{T_{вих(експеримент)} - T_{вих(розрахунок)}}{T_{вих(експеримент)}} \cdot 100\% . \quad (5.10)$$

На рисунку 5.5 представлений діапазон розподілу відносної похибки, розрахунок якої проводився в Кельвінах.

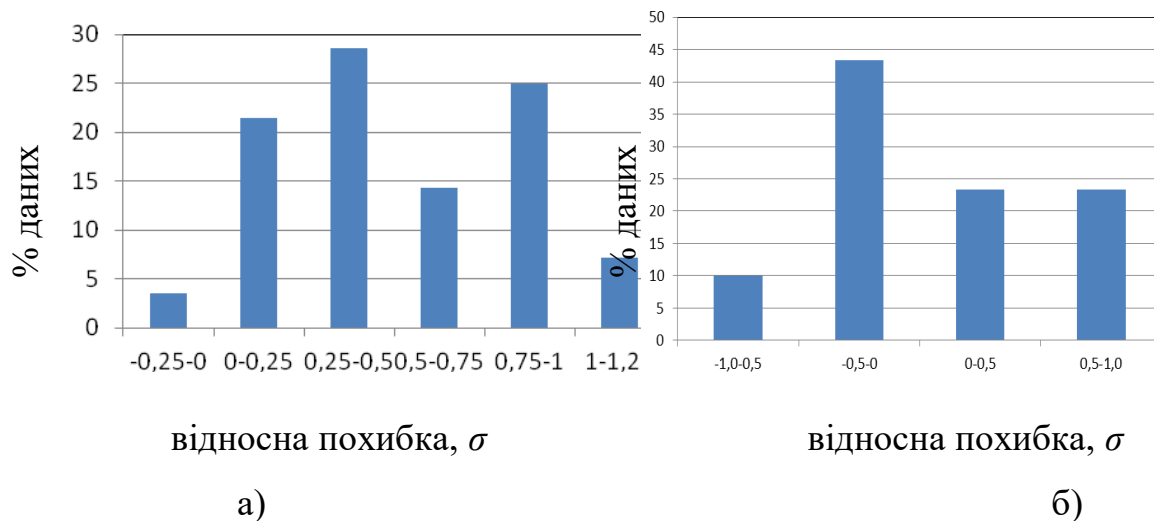


Рисунок 5.5. Діапазон розподілу відносної похибки для: а) жовтня 2020 р.; б) квітня 2020 р..

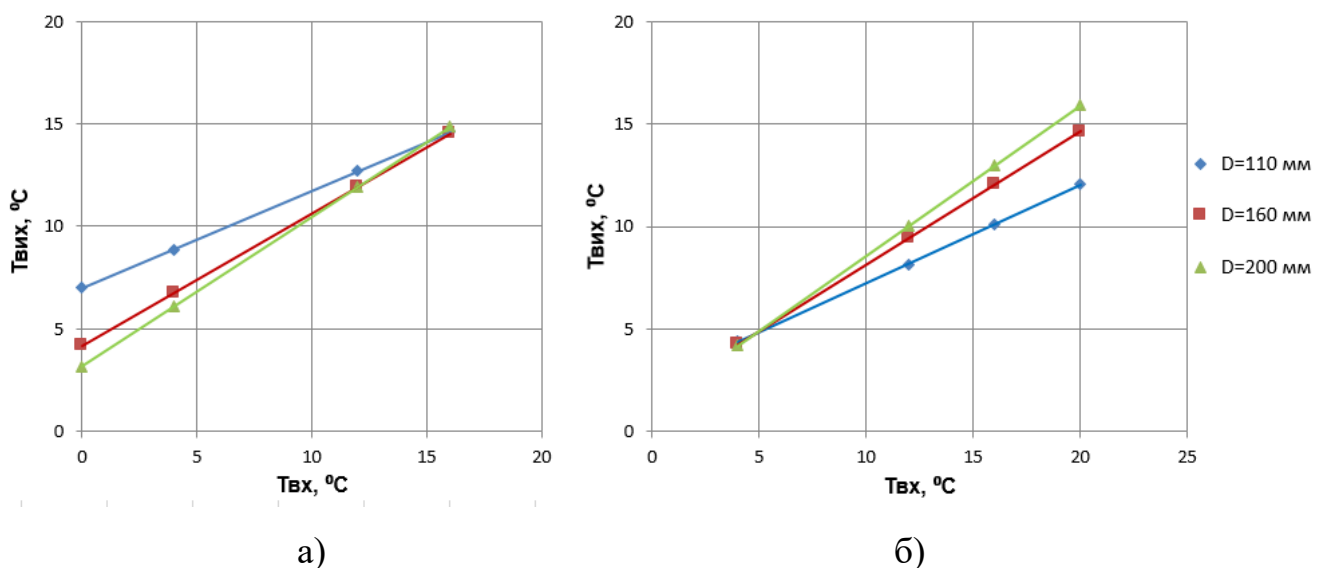
Результати розрахунку розподілу відносної похибки показали, що вона варіюється в діапазоні від - 0,25 до 1,25% (рисунок 5.5). Більшість даних для жовтня 2020 року (28%) має відносну похибку в межах 0,25 - 0,5%. Для квітня 2020 року діапазон відносної похибки варіювався від - 1 до 1%. Більшість даних для квітня (рисунок 5.5а) (40%), має відносну похибку від 0 до - 0,5%.

## 6 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГРУНТОВИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

### 6.1 Температура повітря на виході з повітряно-грунтового теплообмінника при різних діаметрах трубопровода

За допомогою описаної вище математичної моделі роботи повітряно-грунтового теплообмінника в теплофізичній постановці був виконаний розрахунок параметрів експлуатації теплообмінника за умови використання трубопроводів із різним типовим зовнішнім діаметром – 110, 160 та 200 мм. В якості вихідних даних задавалась температура повітря на вході до теплообмінника та швидкість повітря. Значення останнього взято з експериментальних даних і складало 5,5 м/с.

За допомогою моделі визначалась температура повітря на виході з повітряно-грунтового теплообмінника та розраховувались значення лінійного теплового потоку між ґрунтовим масивом та повітрям, що прокачувалось через теплообмінник. На рисунку 6.1 представлені відповідні дані для середини чотирьох місяців 2020 року – жовтня, січня, квітня та липня. Ці місяці можна вважати такими, що загалом характеризують кліматичні дані, що є актуальними для відповідного періоду року.



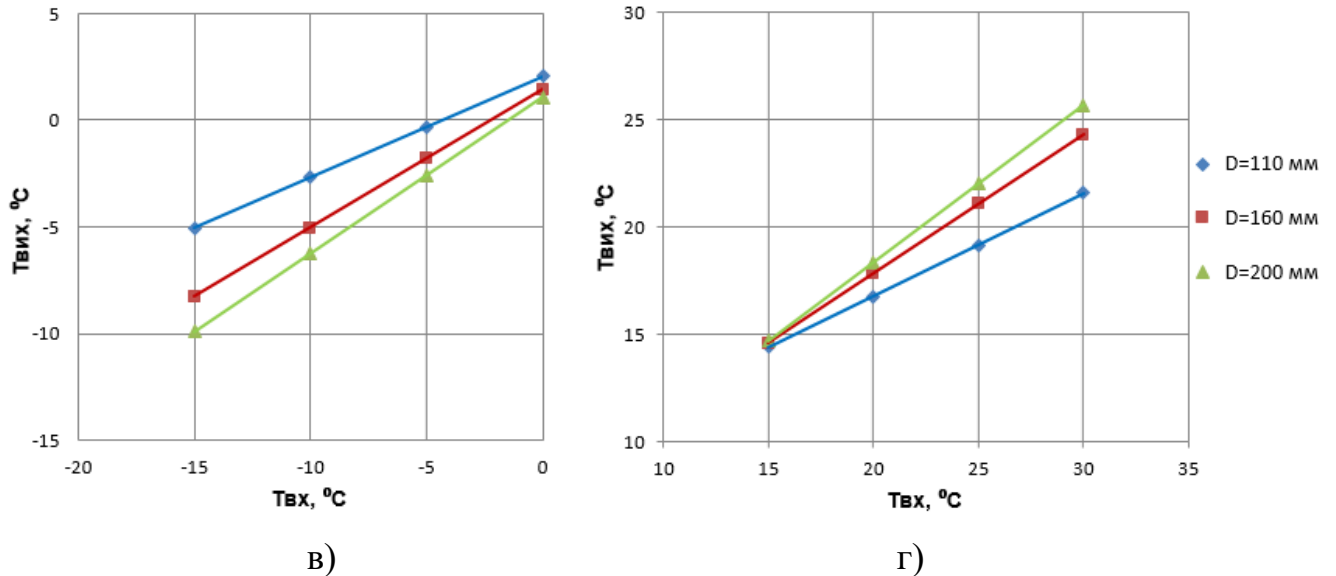


Рисунок 6.1. Залежність температури повітря на виході з повітряно-грунтового теплообмінника при різних діаметрах труби для: а) жовтня; б) квітня; в) січня; г) липня.

Як видно з рисунку 6.1, значення зовнішнього діаметру трубопроводу має досить суттєвий вплив на різницю температур повітря на вході та виході з повітряно-грунтового теплообмінника. Так, на початку (з 15 жовтня) та в середині опалювального періоду (рисунок 6.1а та рисунок 6.1в), коли система рекуперативної вентиляції має значний вклад в роботу системи опалення, оптимальним щодо значення температурного напору є трубопровід із зовнішнім діаметром 110 мм. Однак, влітку (рисунок 6.1г) для забезпечення кондиціонування повітря, без порушення санітарно-гігієнічних та будівельних норм [14], оптимальним є зовнішній діаметр трубопроводу 200 мм, при якому витримується перепад температури вихідного та вхідного повітря на рівні 5°C. При такому перепаді значень температури повітря можливо відмовитись від використання додаткових пристроїв для охолодження припливного повітря та мінімізувати витрати енергії на кондиціонування приміщень [29].

## 6.2 Лінійна густина теплового потоку при різних діаметрах трубопроводу повітряно-ґрунтового теплообмінника

На рисунку 6.2 наведені залежності впливу зовнішнього діаметра трубопроводу повітряно-ґрунтового теплообмінника на лінійну густина теплового потоку.

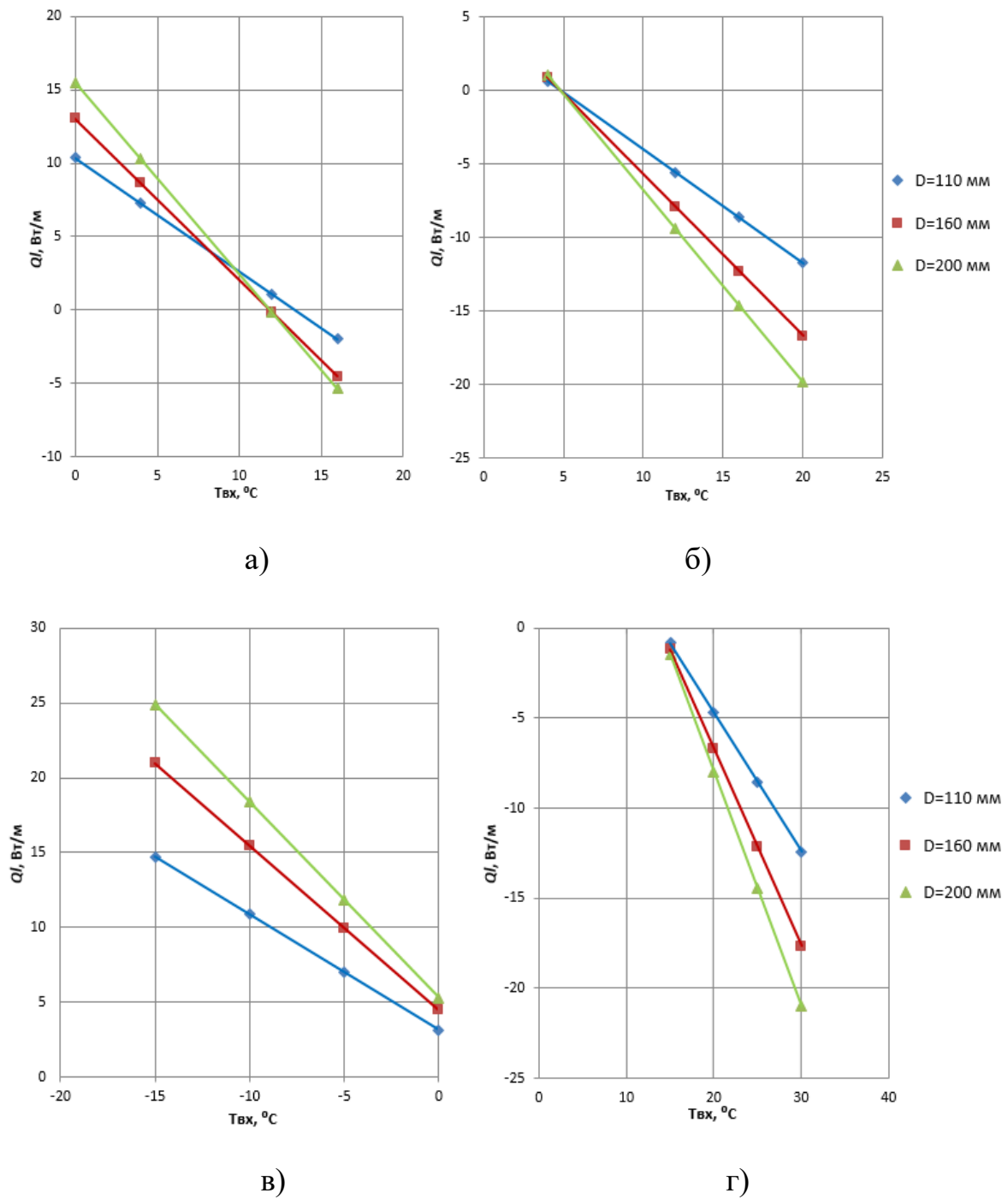


Рисунок 6.2. Залежність густини теплового потоку повітряно-ґрунтового теплообмінника при різних діаметрах труби для: а) жовтня; б) квітня; в) січня; г) липня.

Лінійна густина теплового потоку при роботі повітряно-грунтового теплообмінника слабо залежить від зовнішнього діаметру трубопроводу теплообмінника на початку та в кінці опалювального періоду (15 квітня) (рисунок 6.2а та рисунок 6.2б).

В середині опалювального періоду (рисунок 6.2в) вплив зовнішнього діаметру трубопроводу на лінійний тепловий потік вже значно суттєвіший. Так, при переході від діаметру 110 мм до 160 мм, лінійний тепловий потік збільшується, в середньому, на 30%. При переході від діаметру 160 мм до 200 мм зростання лінійного теплового потоку зменшується і складає 16% [30 - 32].

Влітку (рисунок 6.2г) спостерігається схожа ситуація. При переході від діаметру 110 мм до 160 мм, лінійний тепловий потік збільшується, в середньому, на 32%, при переході від діаметру 160 мм до 200 мм – на 19%.

Таким чином, оптимальним з точки зору квазістаціонарності лінійного теплового потоку є використання трубопроводу зовнішнім діаметром 160 мм [33].

## ВИСНОВКИ

1. В загальному розумінні на ефективність теплообміну в повітряно-грунтових теплообмінниках можуть впливати такі фактори, як глибина розміщення теплообмінника, його геометричні розміри і конструкція, значення температури ґрунту і повітря, теплофізичні властивості ґрунту і матеріалу, із якого виготовлений теплообмінник, витрата повітря через систему, а також кліматичні особливості місцевості тощо.

2. В теплий період року при значних добових коливаннях температури зовнішнього повітря розглянутий теплообмінник працює в режимі регенератора. Добові коливання температури атмосферного повітря впливають на температурний стан поверхневого шару ґрунту на глибину біля 60 см. Температурний вплив роботи повітряно-ґрунтового теплообмінника на масив ґрунту розповсюджується на відстань до 30 см. Значні погодні коливання температури атмосферного повітря впливають на температурний стан масиву ґрунту до глибини 2,25 метрів

3. Проведені комплексні експериментальні дослідження та порівняння їх даних із результатами розрахунків за розробленою числовою моделлю складних процесів теплообміну надали можливість виконати порівняльний аналіз теплотехнічних параметрів повітряно-ґрунтових теплообмінників із різним діаметром трубопроводу.

В результаті проведених експериментальних досліджень підтверджено раціональні конструктивно-технологічні параметри ґрунтового теплообмінника. Встановлено, що при температурі зовнішнього повітря  $24 \div 34^\circ\text{C}$  та об'ємній подачі повітря  $350 \div 420 \text{ м}^3/\text{год}$  ефективна теплова потужність знаходиться в межах  $200 \div 868 \text{ Вт}$ , а різниця температур на вході і на виході з ґрунтового теплообмінника становить  $8^\circ\text{C}$ . При зміні температури зовнішнього повітря від  $0$  до  $-10^\circ\text{C}$  та об'ємній подачі повітря на рівні  $250 \div 275 \text{ м}^3/\text{год}$  ефективна теплова потужність змінюється від  $155$  до  $787 \text{ Вт}$ , а температура в приміщенні знаходиться на рівні  $8^\circ\text{C}$ . З подальшим зниженням температури на вході в ґрунтовий теплообмінник ефективна теплова потужність зростає до

1000 Вт. Встановлено, що протягом всього часу функціонування ґрунтового теплообмінника ефективна теплова потужність знаходиться в діапазоні  $170 \div 1340$  Вт і постійно зменшується внаслідок виснаження теплового потенціалу масиву ґрунту. Об'ємна подача повітря знаходиться в діапазоні  $310 \div 423$  м<sup>3</sup>/год і також постійно зменшується.

4. Зіставлення результатів розрахунку з експериментальними даними показало, що запропонована числова модель адекватно описує процеси аеродинаміки та теплообміну в повітряно-ґрунтовому теплообміннику.

Таким чином, для експлуатації рекуперативної вентиляції взимку та кондиціонування повітря влітку, при даній протяжності повітряно-ґрунтового теплообмінника, відповідних теплофізичних властивостях ґрунту та витраті повітря, оптимальним є використання пластикових труб із зовнішнім діаметром 160 мм.

Теоретичним шляхом обґрунтовано, що раціональне значення довжини ґрунтового теплообмінника знаходиться в діапазоні  $20 \div 30$  м, а діаметр в межах  $0,193 \div 0,249$  м. При зазначених параметрах спостерігається найбільша теплова потужність, величина якої знаходиться в межах  $920 \div 1350$  Вт.

5. Введено поняття критичної довжини ґрунтового теплообмінника. Це довжина теплообмінника, що забезпечує максимальне значення ефективної теплової потужності при певному діаметрі теплообмінника, причому перевищення критичної довжини теплообмінника призводить до зменшення ефективної теплової потужності внаслідок збільшення електричної потужності, що необхідна на прокачування повітря через теплообмінник. Тому перевищувати критичну довжину теплообмінника також економічно не вигідно, бо при цьому ціна 1 Вт ефективної теплової потужності різко зростає.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. A. Tzaferis, D. Liparakis, M. Santamouris, A. Argiriou Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers. *Energy and Buildings*, 18 (1992) P. 35 - 43.
2. Badescu V. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house. *Renew Energy* 2007; No.32, P. 845 – 855.
3. Benkert S, Heidt F.D., Scholer D. Calculation tool for earth heat exchangers GAEA. In: *Proceeding of building simulation*, vol.2; 1997. Prague: Fifth International IBPSA Conference. Prague; 1997. P. 9 – 16.
4. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія
5. Филатов С.О., Володин В.И. Эффективность использования энергетических свай с теплоносителем воздух в системах вентиляции теплоснабжения. *Промышленная теплотехника*, 2013, Т. 35, № 3, С. 44 - 50.
6. A. Sehli, A.Hasni, M.Tamali The potential of earth-air heat exchangers for low energy cooling of buildings in South Algeria. *Energy Procedia* 18 (2012) P. 496 – 506.
7. S. Amara, B. Nordell and B. Benyoucef Using Fougara for Heating and Cooling Buildings in Sahara. *Energy Procedia* 6 (2011) P. 55 – 64
8. Sanusi, Aliyah NurZafirah Low Energy Ground Cooling System for Buildings in Hot and Humid Malaysia. PhD thesis Demontfort University, 2012.
9. Noor Aziah Mohd Ariffin, Aliyah Nur Zafirah Sanusi. Materials for the earth air pipe heat exchanger system as a passive ground cooling technology for hot humid climate. *Materials of 2-th international conference on emerging trends in scientific research 2014*, Kuala Lumpur 2-nd and 3-rd November 2014
10. M. Krarti, J. F. Kreider Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel. *Energy Conversion and Management*. Vol. 37, No. 10, P. 1561 - 1574, 1996.
11. Басок Б.І., Новіцька М.П. Теплофізичне моделювання повітряно-грунтового теплообмінника для теплової завіси фасадних стін

експериментального енергоефективного будинку. Промышленная теплотехника. 2017. Т.39, № 1. С. 35 - 38.

12. Накорчевский А.И., Беляева Т.Г. Регрессионный анализ глубин годовых флуктуаций температур в верхних слоях грунта. Промышленная теплотехника, 2005, N. 27, № 6, С. 86 - 90.

13. Basok V.I., Novitska M. P., KuzhelL.M., BozhkoI.K., NedbailoO.M., Tkachenko M.V., Goncharuk S.M. The method of thermal-air vein provided by soil heat. Patent on Ukraine on koristnu model. Patent on Ukraine on koristnu model № 88791 МРК F24F 1/00,F24F5/00 vid 25.03.2014 Bull. № 6. (Ukr.)

14. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування.

15. Rouag, Amar & Benchabane, Adel & Mehdid, Mohamed Charaf-eddine. (2018). Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I A new transient semi-analytical model for determining soil temperature. Journal of Cleaner Production. 182. P. 538 - 544. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.089.

16. Недбайло О.М., Божко І.К. Аналіз енергетичних параметрів роботи системи теплопостачання енергоефективного будинку. Енергоефективність в будівництві та архітектурі. 2017. Випуск 9. С. 179 – 182.

17. Будақ Б.М. Сборник задач по математической физике / Б.М. Будақ, А.А. Самарский, А.Н. Тихонов. – М.: Наука, 1980. – 688 с.

18. А.С. Ковязин, И.Г. Величко, Д.А. Долгих Теоретическое определение тепловой мощности грунтового теплообмінника. Збірник наукових праць Інституту механізації тваринництва НААН «Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві». Вип. 1(9). Запоріжжя, 2012. С. 56 - 63.

19. И.К. Божко, А.Н. Недбайло, М.В. Ткаченко, И.Г. Засецкий Комбинированная система теплоснабжения высокоэнергоеффективного дома. Енергоефективність в будівництві та архітектурі. 2014. Випуск 6. С. 14 – 22.

20. А.Н. Недбайло, М.Ф. Калинина, И.К. Божко, М.П. Новицкая, С.М. Гончарук, Л.Н. Кужель, О.Н. Лысенко Математическая модель нестационарного процесса теплопереноса в многослойной ограждающей конструкции. Керамика: наука и жизнь. №2 (23). 2014. С. 14 – 29.

21. И.К. Божко, М.Ф. Калинина, С.М. Гончарук, А.Н. Недбайло Теплофизическая лаборатория для исследования особенностей энергоэффективности зданий. *Керамика: наука и жизнь*. №3 (24). 2014. С. 74 – 83.
22. Басок Б.І., Воробйов, Л.Й., Михайлик В.А., Лунина А.О. Теплофізичні властивості природного ґрунту. *Промышленная теплотехника*, 2008, Т. 30, №4, С. 77 - 85.
23. Басок Б.И., Авраменко А.А., Рыжков С.С., Лунина А.А. Динамика теплообмена жидкости в грунтовом прямолинейном одиночном элементе (теплообменнике). *Промышленная теплотехника*, 2009, Т. 31, №1, С.62 - 67.
24. Недбайло О.М., Басок Б.І., Новіцька М.П., Приємченко В.П. Дослідження термовологісних параметрів повітря у ґрунтових теплообмінниках. Робоча програма та тези доповідей II-ї міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія». Багатофункціональні еко- та енергоефективні, реурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях, 2021. Київ, КНУБА, 24-26 листопада 2021 р. С. 13 - 14. <https://cutt.ly/kYkpS0D>
25. Басок Б.І., Недбайло О.М., Новіцька М.П., Ткаченко М.В., Божко І.К. Дослідження теплофізичних процесів при експлуатації геотермальної системи вентиляції Збірник матеріалів XXI Міжнародної науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 17 – 18 травня 2022 р., Київ, Україна, 2022, С. 107.
26. Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов Планирование эксперимента. Мн.: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
27. Накорчевский А.И., Беляева Т.Г. Регрессионный анализ глубин годовых флуктуаций температур в верхних слоях грунта. *Промышленная теплотехника*. 2005. Т. 27. № 6. С. 86 – 90.
28. Boris Basok, Ihor Bozhko, Maryna Novitska, Aleksandr Nedbailo, Myroslav Tkachenko Numerical modeling and experimental studies of the operational parameters of the earth-to-air heat exchanger of the geothermal

ventilation system. Rocznik Ochrona Środowiska, Volume 23, 2021. P. 42 – 64.

(Scopus Q3) [DOI: 10.54740/ros.2021.003](https://doi.org/10.54740/ros.2021.003)

29. Rohit Misra та ін. Field investigations to determine the thermal performance of earth air tunnel heat exchanger with dry and wet soil: Energy and exergetic analysis. Energy & Buildings. No. 171, 2018. P. 107 - 115. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.04.026

30. Басок Б.І., Недбайло О.М., Новіцька М.П., Ткаченко М.В., Божко І.К. Прогнозування теплового стану повітряно-грунтового теплообмінника із застосуванням штучної нейронної мережі «Енергетика: економіка, технології, екологія.» 2021. № 2 С. 95 -101. (Index Copernicus, Наукове фахове видання України, категорія Б) DOI 10.20535/1813-5420.2.2021.247414

31. Басок Б.І., Недбайло О.М., Новіцька М.П., Ткаченко М.В., Божко І.К. Дослідження теплофізичних процесів при експлуатації геотермальної системи вентиляції Збірник матеріалів XXI Міжнародної науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 17 – 18 травня 2022 р., Київ, Україна, 2022, С. 107.

32. В.В. Гоцуленко, О.М. Недбайло, С.М. Гончарук, О.М. Лисенко, І.К. Божко "Інноваційні системи кліматизації будівлі 0-енергії" Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 19 – 20 травня 2022 р.). – К.: Інтерсервіс, 2022. С. 73 – 75 с.