

УДК 662.997; 621.577

Желих Василь Михайлович

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплогазопостачання та вентиляції,

ORCID: 0000-0002-5063-5077

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

Савченко Олена Олексіївна

Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплогазопостачання та вентиляції, ORCID: 0000-0003-3767-380X

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

Горбаченко Лілія Петрівна

Викладач, ORCID: 0000-0002-0968-6251

Львівський техніко-економічний коледж, Львів

Штець Василь Михайлович

Аспірант, ORCID: 0000-0002-7284-9834

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМІННИКА ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ

***Анотація.** Використання існуючих технологій нагрівання припливного повітря у системах вентиляції пов'язані з великим споживанням теплової енергії, отримання якої відбувається за рахунок використання електроенергії або органічних видів палива. Збільшення вартості традиційних енергоносіїв сприяє впровадженню технологій використання альтернативних джерел енергії. Для нагрівання припливного повітря у системах вентиляції є можливим використання низькопотенційної теплоти енергії ґрунту. Для відбору цієї енергії використовуються ґрунтові теплообмінники, які на даний час представлені великою різноманітністю конструкцій. В даній статті розглядається тепловий баланс прямої ділянки горизонтального ґрунтового теплообмінника. Для турбулентного режиму руху повітря у гладкостінному трубопроводі каналного ґрунтового горизонтального теплообмінника встановлено залежність для визначення коефіцієнта тепловіддачі від внутрішньої поверхні стінки трубопроводу до повітря у теплообміннику.*

***Ключові слова:** низькопотенційна енергія; геотермальна система вентиляції; горизонтальний ґрунтовий теплообмінник; коефіцієнт тепловіддачі*

Постановка проблеми

Проектування герметичних зовнішніх огорожень пасивних будинків дозволяє запобігти неконтрольованому надходженню зовнішнього повітря у приміщення. Для забезпечення приміщень пасивних будинків свіжим повітрям та для видалення з них забрудненого повітря необхідно використовувати механічну припливно-витяжну вентиляцію, яка дозволяє підтримувати у приміщеннях необхідні параметри мікроклімату. Перед подачею у приміщення зовнішнє повітря проходить обробку, зокрема в холодний період року його нагрівають у електричних або водяних калориферах. Отримання теплової енергії

відбувається за рахунок використання електроенергії або органічних видів палива. Для заощадження теплової енергії у системах вентиляції, що використовується для нагрівання зовнішнього повітря, доцільно застосовувати теплообмінники «повітря-повітря» та ґрунтові теплообмінники. Теплообмінники «повітря-повітря» призначені для другого нагрівання зовнішнього припливного повітря за рахунок теплоти витяжного повітря. У пасивних будинках рекомендується встановлювати рекуператори з відсотком рекуперації понад 75% [1].

Ґрунтові теплообмінники залежно від розташування у ґрунтовому масиві можуть бути вертикальні або горизонтальні і використовуються

для першого нагрівання зовнішнього припливного повітря за рахунок низькопотенційної теплоти ґрунту [2,3]. Вертикальні теплообмінники, в свою чергу, можуть бути коаксіальними, U-подібними або подвійними U-подібними, які опускаються у бурові свердловини глибиною 50-100 м. Горизонтальні теплообмінники бувають каналними (трубними), безканалними та безмембранними. Найпоширенішими є каналні теплообмінники, які представляють собою окремі труби, що з'єднані між собою послідовно у вигляді плоского змійовика або паралельно з використанням П-подібних або Z-подібних колекторних систем.

Аналіз основних досліджень та публікацій

Більшого поширення в Україні набули технічні комплекси з вертикальними теплообмінниками. В роботах [4,5] наведені результати досліджень їх оптимальної форми, обґрунтування довжини та діаметру. Результати досліджень горизонтальних ґрунтових теплообмінників застосовувались в системах тепlopостачання для забезпечення низькопотенційною енергією теплових pomp [6].

Системи вентиляції, в яких для першого нагрівання зовнішнього припливного повітря використовуються ґрунтові теплообмінники, називаються геотермальними (рис.1.) [7].

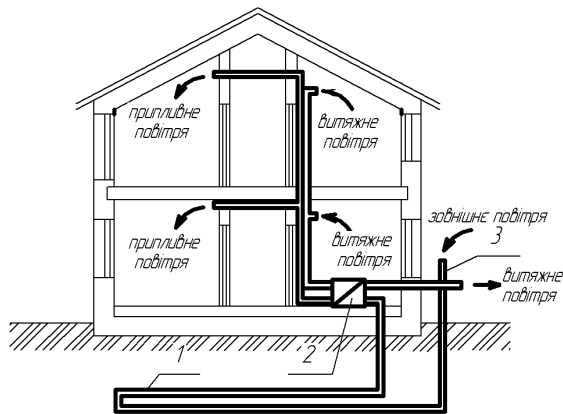


Рисунок 1 – Принципова схема геотермальної вентиляції пасивного будинку

- 1 – горизонтальні ґрунтові теплообмінники,
2 – рекуператор, 3 – забірня вентиляційна шахта

Принцип дії геотермальної вентиляції в холодний період року полягає в наступному. Повітря, яке має температуру t_3 , подається на вхід ґрунтового теплообмінника та забирає тепло ґрунту через стінку теплообмінника. За рахунок цього зовнішнє припливне повітря нагрівається до температури $t_{пр}$ та подається у приміщення. За потреби, повітря з температурою $t_{пр}$ догрівають у

рекуператорі за рахунок теплоти витяжного повітря до необхідної температури внутрішнього повітря $t_в$.

Моделювання процесів теплообміну та розрахунків теплових потоків у ґрунтових теплообмінниках проводилися різними авторами для окремо запропонованих конструкцій теплообмінників [6,8,9].

Велика різноманітність конструкцій ґрунтових теплообмінників не дозволяє однозначно описати теплофізичні процеси, які в них відбуваються.

Формулювання мети статті

Метою досліджень було визначення коефіцієнту тепловіддачі від внутрішньої поверхні труби ґрунтового теплообмінника до повітря, яке рухається в ньому на основі розроблених теплових балансів горизонтальної ділянки гладкостінного трубопроводу.

Основна частина

При передачі теплоти від ґрунту до зовнішнього повітря через стінку теплообмінника відбуваються такі теплофізичні процеси: тепловіддача від ґрунту до зовнішньої стінки теплообмінника, теплопровідність через стінку теплообмінника та конвективний теплообмін між внутрішньою стінкою теплообмінника та повітрям, яке рухається в ньому.

Для моделювання роботи ґрунтового теплообмінника була використана наступна модель. В якості ґрунтового теплообмінника розглядається пряма ділянка горизонтального гладкостінного теплообмінника, яка прокладена у масиві ґрунту на глибині h (рис.2.).

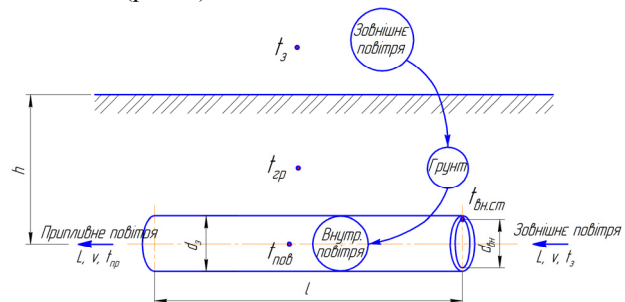


Рисунок 2 – Схема теплових потоків при роботі прямої ділянки горизонтального ґрунтового теплообмінника геотермальної вентиляції

На зовнішній стінці труби приймалися певні умови, а саме температура зовнішньої стінки ґрунтового теплообмінника дорівнювала температурі прилеглого ґрунту. З внутрішньої сторони задавалась витрата повітря L та його температура на вході у теплообмінник t_3 .

Баланс теплової енергії на прямій горизонтальній ділянці у ґрунтовому теплообміннику описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} Q = \alpha_B \cdot \pi \cdot d_{BH} \cdot l \cdot (t_{BH,CT} - \bar{t}_{BH,POB}) \\ Q = L \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{PP} - t_3) \end{cases} \quad (1)$$

де α_B - коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні теплообмінника, Вт/(м²·К); d_{BH} - внутрішній діаметр труби теплообмінника, м; l - довжина ґрунтового горизонтального теплообмінника, м; $t_{BH,CT}$ - температура внутрішньої стінки труби теплообмінника, °С; $\bar{t}_{BH,POB}$ - середня температура повітря, яке рухається у теплообміннику, °С, залежить від температури зовнішнього повітря та температури на виході з ґрунтового теплообмінника:

$$\bar{t}_{BH,POB} = \frac{t_3 + t_{PP}}{2} \quad (2)$$

L - кількість повітря, яка проходить через ґрунтовий теплообмінник, м³/с:

$$L = F \cdot v = \frac{\pi d_{BH}^2}{4} \cdot v \quad (3)$$

де $F = \frac{\pi d_{BH}^2}{4}$ - площа поперечного перетину теплообмінника, м²; c, ρ - питома ізобарна теплоємність, кДж/(кг·°С), та густина зовнішнього повітря, кг/м³, за температури t_3 .

Враховуючи залежності (2) та (3) система рівнянь, яка описує баланс теплової енергії у ґрунтовому теплообміннику буде мати вигляд:

$$\begin{cases} Q = \alpha_B \cdot \pi \cdot d_{BH} \cdot l \cdot \left(t_{BH,CT} - \frac{t_3 + t_{PP}}{2} \right) \\ Q = \frac{\pi \cdot d_{BH}^2}{4} \cdot v \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{PP} - t_3) \end{cases} \quad (4)$$

Тоді, баланс теплової енергії набуде вигляду:

$$\alpha_B \cdot \pi \cdot d_{BH} \cdot l \cdot \left(t_{BH,CT} - \frac{t_3 + t_{PP}}{2} \right) = \frac{\pi \cdot d_{BH}^2}{4} \cdot v \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{PP} - t_3) \quad (5)$$

Коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої стінки труби ґрунтового теплообмінника можна визначити за значенням критерію Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha_B \cdot (d_3 - d_{BH})}{\lambda_{POB}} \quad (6)$$

де λ_{POB} - коефіцієнт теплопровідності повітря, яке транспортується у теплообміннику, Вт/(м·К); Nu - критерій Нуссельта, який залежить від багатьох факторів, зокрема: причина руху повітря (природна чи вимушена конвекція), режим руху потоку (ламінарний чи турбулентний), швидкість руху

повітря, теплофізичні параметри повітря (густина ρ , коефіцієнт теплопровідності λ , коефіцієнт динамічної в'язкості μ , ізобарна питома теплоємність c_p), геометрична форма тіла, наявність фазових переходів. Врахування цих факторів здійснюється за допомогою безрозмірних критеріїв Рейнольдса Re , Грасгофа Gr та Прандтля Pr .

$$Nu = f(Re, Gr, Pr)$$

Приймаємо, що режим руху повітря у ґрунтовому теплообміннику турбулентний. При турбулентному режимі руху повітря у теплообміннику критерій Нуссельта не залежить від критерія Грасгофа та з урахуванням фізичних властивостей повітря визначається як:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25} \cdot \bar{\varepsilon}_1 \quad (7)$$

де $\bar{\varepsilon}_1$ - коефіцієнт, який враховує вплив на тепловіддачу процесу гідродинамічної стабілізації потоку на початковій ділянці теплообміну залежить від числа Рейнольдса та співвідношення $\frac{1}{d}$ [Бух].

Якщо прийняти, що для двоатомних газів $Pr \cong 0,72$, для газів $\left(\frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25} = 1$, $\bar{\varepsilon}_1 = 1$, а критерій Рейнольдса розписати як $Re = \frac{v \cdot d_{BH}}{v}$, то критерій Нуссельта становитиме:

$$Nu = 0,021 \cdot \left(\frac{v \cdot d_{BH}}{v} \right)^{0,8} \cdot 0,72^{0,43} \cdot 1^{0,25} \cdot 1 \quad (8)$$

Після спрощення виразу

$$Nu = \frac{91 \cdot v^{0,8} \cdot d_{BH}^{0,8}}{5000 \cdot v^{0,8}} \quad (9)$$

Прирівнявши залежності (6) та (9) отримується вираз:

$$\frac{\alpha_B \cdot (d_3 - d_{BH})}{\lambda_{POB}} = \frac{91 \cdot v^{0,8} \cdot d_{BH}^{0,8}}{5000 \cdot v^{0,8}} \quad (10)$$

$$\alpha_B = \frac{91 \cdot \lambda_{POB} \cdot v^{0,8} \cdot d_{BH}^{0,8}}{5000 \cdot (d_3 - d_{BH}) \cdot v^{0,8}} \quad (11)$$

Із врахуванням залежності (3) вираз (11) набуде вигляду:

$$\alpha_B = \frac{91 \cdot \lambda_{POB} \cdot \left(\frac{4L}{\pi d_{BH}^2} \right)^{0,8} \cdot d_{BH}^{0,8}}{5000 \cdot (d_3 - d_{BH}) \cdot v^{0,8}} \quad (12)$$

Звідки

$$\alpha_B = 0,0552 \frac{\lambda_{POB} \cdot L^{0,8}}{\pi^{0,8} \cdot d_{BH}^2 \cdot (d_3 - d_{BH}) \cdot v^{0,8}} \quad (13)$$

Як видно із залежності (13), коефіцієнт тепловіддачі залежить від характеристик повітря, яке рухається у горизонтальному ґрунтовому теплообміннику, зокрема його кількості, коефіцієнтів теплопровідності та кінетичної в'язкості, та діаметрів трубопроводу теплообмінника.

Висновки

Визначено баланс теплової енергії прямої ділянки гладкостінного трубопроводу ґрунтового горизонтального теплообмінника геотермальної системи вентиляції та знайдено коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні труби теплообмінника до рухомого повітря в теплообміннику.

Література

1. Файст В. Основные положения по проектированию пассивных домов. – М.:Изд-во Ассоциации строительных вузов. – 2008. – 144 с.
2. Вертикальные ґрунтовые теплообменники [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.insolar.ru/nasos-lib3_2.php – назва з екрану
3. Vasyi Zhelykh. Improving efficiency of heat exchange of horizontal ground-air heat exchanger for geothermal ventilation systems / Vasyi Zhelykh, Olena Savchenko, Vadym Matusyevych // *Fizyka budowli w teorii i praktyce*. – 2016. - Том VIII, N 4. – P.43-46.
4. Накорчевский А.И. Оптимальная конструкция ґрунтовых теплообменников / Накорчевский А.И., Басок Б.И. // *Пром. теплотехника*. – 2005. – Т.27, №6. – С.27-31.
5. Ковязин А.С. Обоснование длины и диаметра ґрунтового теплообменника / А. С. Ковязин, Д. А. Долгих. // *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Вип. 97. – 2013. - С.582-591
6. А.И. Тарасов, В.А.Тарасова. Обоснование граничных условий теплообмена при моделировании ґрунтовых теплообменников. // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. - №6/8(54). – 2011. – С.9-14.
7. Савченко О.О. Технічні передумови влаштування геотермальної вентиляції пасивних будинків. / Савченко О.О., Желих В.М., Дуднік К.А., Конончук О.М. // // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Теорія і практика будівництва”*. - Львів: Вид-во Львівської політехніки. - 2015. - № 823. - С.281-285.
8. Филатов С.О. Работа теплообменников утилизации теплоты ґрунта / С.О. Филатов, В.И. Володин // *Труды БГТУ. Химическая техника, теплотехника и энергосбережение*. – 2011. - №3. – С.179-184.
9. Михеев Д.Д. Методика расчета тепловых потоков в ґрунтовом теплообменнике. / Михеев Д.Д., Федянин В.Я. // 61-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава. Часть 11. Энергетический Факультет / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2003. - С.12-14.

Стаття надійшла в редколегію 05.04.2017

Жельх Василий Михайлович

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры теплогазоснабжения и вентиляции,
ORCID: 0000-0002-5063-5077

Национальный университет «Львовская политехника», Львов

Савченко Елена Алексеевна

Кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, ORCID: 0000-0003-3767-380X

Национальный университет «Львовская политехника», Львов

Горбаченко Лилия Петровна

Преподаватель, ORCID: 0000-0002-0968-6251

Львовский технико-экономический колледж, Львов

Штець Василий Михайлович

Аспирант, ORCID: 0000-0002-7284-9834

Национальный университет «Львовская политехника», Львов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ҐРУНТОВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ

Аннотація. Использование существующих технологий нагревания приточного воздуха в системах вентиляции связаны с большим потреблением тепловой энергии, получение которой происходит за счет использования

электроэнергии или органических видов топлива. Увеличение стоимости традиционных энергоносителей способствует внедрению технологий использования альтернативных источников энергии. Для нагрева приточного воздуха в системах вентиляции возможно использование низкопотенциальной тепловой энергии грунта. Для отбора этой энергии используются грунтовые теплообменники, которые в настоящее время представлены большим разнообразием конструкций. В данной статье рассматривается тепловой баланс прямого участка горизонтального грунтового теплообменника. Для турбулентного режима движения воздуха в гладкостенном трубопроводе канального грунтового горизонтального теплообменника установлена зависимость для определения коэффициента теплоотдачи от внутренней поверхности стенки трубопровода к воздуху в теплообменнике.

Ключевые слова: *низкопотенциальная энергия; геотермальная система вентиляции; горизонтальный грунтовый теплообменник; коэффициент теплоотдачи*

Vasyl Zhelykh

Doctor of Science, Professor, Head of Department "Heat, Gas Supply and Ventilation", ORCID: 0000-0002-5063-5077
Lviv Polytechnic National University, Lviv

Olena Savchenko

PhD, Associate Professor of Department "Heat, Gas Supply and Ventilation", ORCID: ORCID: 0000-0003-3767-380X
Lviv Polytechnic National University, Lviv

Liliya Horbachenko

Lecturer, ORCID: 0000-0002-0968-6251
Lviv Technical and Economical College, Lviv

Vasyl Shtets

Graduate student, ORCID: 0000-0002-7284-9834
Lviv Polytechnic National University, Lviv

DEFINITIONS OF THERMAL CHARACTERISTICS OF HORIZONTAL GROUND-AIR HEAT EXCHANGER FOR GEOTHERMAL VENTILATION SYSTEMS

Abstract. *The use of existing technologies for heating of supply air in ventilation systems is associated with a high consumption of thermal energy. The receipt of this heat energy is due to the use of electricity or organic fuels. The increase in the cost of traditional energy sources promotes the introduction of technologies for the use of alternative energy sources. To heat the incoming air in ventilation systems is possible to use low-potential heat of soil. For the selection low-potential heat of soil are used in ground-air heat exchangers. Currently, ground-air heat exchangers are represented by a wide variety of designs. In this paper, the heat balance of a straight section of a horizontal ground-air heat exchanger is considered. The dependence for determining the heat transfer coefficient from the inner surface of the pipeline wall to the air in the heat exchanger was determined at the turbulent regime of air movement in the smooth-walled pipe of the ground-air horizontal heat exchanger.*

Keywords: *low-potential energy; geothermal ventilation system; horizontal ground-air heat exchanger; the heat transfer coefficient*