

УДК 692+644.1

ТЕПЛОФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВІТРЯНО-ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМІННИКА ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ ЗАВІСИ ФАСАДНИХ СТІН ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО БУДИНКУ

Басок Б.І., член-кореспондент НАН України, Новіцька М.П., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна

В роботі розглянуто можливість вилучення теплового потенціалу ґрунту для теплозабезпечення енергоефективних будівель. Представлено числове теплофізичне моделювання ґрунтово-повітряного теплообмінника неглибокого залягання. В результаті розрахунку отримано, що ґрунтово-повітряні теплообмінники дають можливість нагрівати або охолоджувати повітря для мінімізації енергоспоживання енергоефективної будівлі.

В работе рассмотрена возможность извлечения теплового потенциала грунта для теплообеспечения энергоэффективных зданий. Представлено численное теплофизическое моделирование ґрунтово-воздушного теплообменника неглубокого залегания. В результате расчета получено, что ґрунтово-воздушные теплообменники дают возможность нагревать или охлаждать воздух для минимизации энергопотребления энергоэффективного здания.

The possibility of energy extraction from soil for heat supplying of energy-efficient building is considered at this article. The numerical simulation of an air-earth heat exchanger which lies at relatively shallow depths is represented. In conclusion it was obtained that air-earth heat exchangers might increase or decrease air temperature to minimize energy consumption of energy-efficient buildings.

Бібл. 9, рис. 4.

Ключові слова: повітряно-ґрунтовий теплообмінник, чисельне моделювання, енергоефективна будівля.

α – коефіцієнт теплопровідності;

g – прискорення вільного падіння;

p – тиск;

T – температура;

t – час;

u, v, w – проекції вектору швидкості на осі OX, OY и OZ прямокутної системи координат;

x, y, z – поперечна, повздожня та вертикальна прямокутні координати;

α – коефіцієнт тепловіддачі;

β – коефіцієнт термічного розширення;

ϑ – температура повітря;

μ – коефіцієнт динамічної вязкості;

ρ – густина.

Нижні індекси:

0 – за нормальних умов;

m – середньорічна;

max – максимальна;

o – тривалість теплового періоду року.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Використання теплового потенціалу ґрунту для охолодження або нагріву повітря є відомою і дуже давньою технологією. В сучасних умовах, посилена теплоізоляція пасивних будинків дає можливість використовувати такі низько потенціальні джерела теплоти для зменшення енергоспоживання будинків, як взимку так і в літку.

Одним із засобів мінімізації енергоспоживання енергоефективного будинку пасивного типу є обладнання його тепловою завісою фасадних стін [1].

Теплова завіса фасадних стін організовується за допомогою горизонтальних ґрунтово-повітряних теплообмінників неглибокого залягання. Ґрунтово-повітряний теплообмінник складається з групи повітряних каналів, що розташовані під землею на невеликій глибині.

Принцип роботи ґрунтово-повітряного теплообмінника заснований на такому фізичному явищі, як наявність різниці температур між температурою повітря та температурою ґрунту. Влітку температура ґрунту на певній глибині нижче за температуру навколишньо-

го повітря тому є можливість охолодити повітря, що рухається такими каналами на певну величину. А взимку навпаки, температура ґрунту, що розташований нижче глибини промерзання, вище за температуру повітря, то є можливість нагрівати повітря за рахунок теплоти ґрунту. Таке нагріте або охолоджене навколишнє повітря зазвичай використовують для вентиляції, зменшення теплових втрат будинку, або підвищення температурного комфорту людей що знаходяться в приміщенні [1-6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для розуміння процесів тепло та повітрообміну, що відбуваються в таких теплообмінниках розроблено декілька математичних моделей та методів, що на даний час опубліковані у літературі.

Зазвичай такі дослідження, вивчають канали з поперечним перерізом круглої форми, що занурюються в ґрунт на глибину від 1 до 5 метрів. В [3], наприклад, наведено порівняння восьми існуючих моделей, що описують теплообмін такого каналу із ґрунтом, за умови вимушеної циркуляції повітря в каналі. В роботі наведено оцінку чутливості методів до таких параметрів,

як температура повітря на вході, швидкість повітря, довжина труби, її радіус та глибина занурення. Результати розрахунків співставлені з експериментальними даними. Також в роботі наведено оцінку похибки кожного із методів.

В роботі [4], наведено спрощену аналітичну модель для оцінки енергетичних характеристик підземного повітряного тунелю. На основі цієї моделі є можливість передбачати температуру повітря повздовж тунелю в любу годину дня, а також середньодобовий ефект охолодження/нагрівання повітря в тунелі та його амплітуду. Положення моделі базуються на знаннях про незбурене температурне поле ґрунту характерного для деяких місць в США [5]. Данні про температуру ґрунтів конкретної місцевості є важливими для розрахунку теплообмінників такого типу. Аналогічні кліматичні данні представлені в [7]. В роботі наявні данні вимірів метеостанції про температури ґрунтів на різних глибинах на території Aristotle University of Thessaloniki, отримано залежність температури ґрунту на глибині 180 см від температури повітря. Крім того аналогічні данні, характерні для України можна знайти в роботі [8]. В [8] приведено середньомісячні температури ґрунту для м. Києва в залежності від глибини.

При вирішенні задачі про теплообмін повітряно-ґрунтового теплообмінника інтерес представляють формули, що описують температуру навколишнього повітря впродовж року. Така залежність може використовуватись в якості граничної умови для температури повітря на вході в теплообмінник. В роботі [9], наприклад, використовують залежність такого виду.

$$\vartheta(t) = \vartheta_m + (\vartheta_{\max} - \vartheta_m) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{t_o}\right). \quad (1)$$

Де ϑ_m – середньорічна температура повітря, °C; $\vartheta_{\max}$ – максимальна температура повітря впродовж року, °C; t_o – тривалість теплового періоду року, с.

При розрахунках за такою формулою графік зміни температури повітря впродовж року, за умови $\vartheta_m = 10^\circ\text{C}$, $\vartheta_{\max} = 25^\circ\text{C}$, $t_o = 145$ днів, набуває вигляду відображеному на рис. 1.

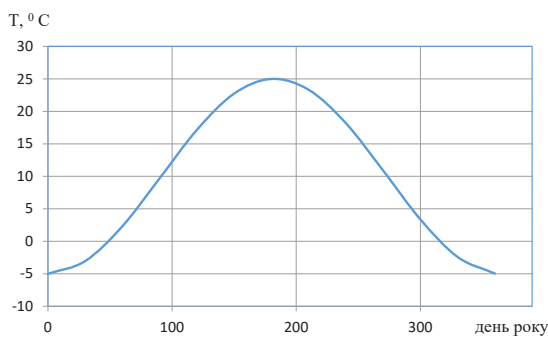


Рис. 1. Графік зміни температури повітря, розрахований за формулою (1).

Формулювання цілей статті та відокремлення не вирішених в попередніх роботах частини загальної проблеми. Метою цієї роботи був попередній роз-

рахунок задачі руху повітря в ґрунтово-повітряному теплообміннику за рахунок сил природної конвекції, на відміну від вимушеної циркуляції, що розглядається в роботах [2-5,9].

Формулювання задачі та граничні умови

В роботі наведено попередні результати розрахунку стаціонарної задачі руху повітря в горизонтальному повітряно-ґрунтовому теплообміннику та зазорі теплової завіси фасадної стіни будинку. Повітряні канали цього теплообмінника, на відміну від попередніх досліджень, мають прямокутний поперечний переріз. Повітря, що надходить в повітряно-ґрунтовий теплообмінник, відбирає теплоту ґрунту, нагрівається, рухається у розподільчий короб і за рахунок різниці температур (нагрітого і холодного повітря) надходить у міжшаровий простір стін будівлі, що знаходиться між утеплювачем та стіною будинку, циркулює в ньому віддаючи теплоту, після цього відпрацьоване повітря викидається назовні. Режим течій в такій конструкції передбачався ламінарний. Розглядалась тривимірна задача, розрахункова схема простору, що розглядається представлена на рис. 2.

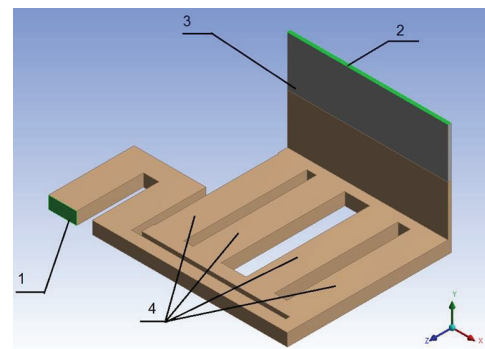


Рис. 2. Розрахункова схема. 1 – вхід в ґрунтовий теплообмінник; 2 – вихід із теплової завіси; 3 – міжшаровий простір у стіні; 4 – багатоходова система повітряних коробів.

Місце розміщення повітряно-ґрунтового теплообмінника біля південної стіни енергоефективного будинку представлено на рис. 3.

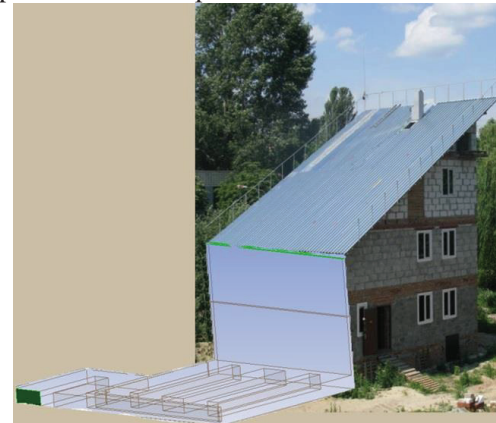


Рис. 3. Розташування теплової завіси фасадних стін.

При проведенні розрахунків вирішувалась задача про теплообмін та рух всередині повітряно-грунтового теплообмінника за рахунок ефекту природної конвекції повітря, що виникає внаслідок різниці температур в повітряному міжшаровому проторі між стіною та утеплювачем. Така побудова повітряно-грунтового теплообмінника дозволить уникнути затрат енергії на створення вимушеного руху повітря у коробі повітряно-грунтового теплообмінника.

При проведенні розрахунків на вході в ґрунтовий теплообмінник 1 (рис. 2) та виході з теплової завіси 2 (рис. 2), задавалась умова з нульовим надлишковим тиском. Температура повітря, що надходить в короб складала 0 °С. На внутрішній поверхні міжшарової стіни 3 (рис. 2) задавались граничні умови першого роду з постійною температурою. Різниця температур між стінами складала 4 °С. На поверхні багатоходової системи повітряних коробів, повітряно-грунтового теплообмінника в першому наближенні теж було задано граничні умови першого роду з постійною температурою, що приймалась рівною 8 °С. Природна циркуляція розраховувалась з використанням наближення Бусінеска, в якому густина повітря приймається постійною у всіх розв'язуваних рівняннях, за винятком рівняння імпульсу в якому додається член, що враховує силу Архімеда. $(\rho_0 - \rho)g = \rho_0 \beta (T - T_0)g$, де ρ_0 та T_0 – значення густини та температури за нормальних умов, β – коефіцієнт термічного розширення, для повітря він складає 0,00367.

Розрахунок виконано на основі системи рівнянь імпульсу та енергії (2–6). Така система диференціальних рівнянь, що характеризує процес теплообміну та аеродинаміки в повітряно-грунтовому теплообміннику, містить рівняння нерозривності

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

Рівняння збереження кількості руху

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right). \quad (5)$$

Рівняння збереження енергії

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (6)$$

Рівняння теплопровідності ґрунту

$$a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0. \quad (7)$$

Для розрахунку використовувався пакет Ansys Fluent. Основні рівняння вирішуються за допомогою методу кінцевих об'ємів. В більшості областей сітка мала елементи у вигляді паралелограмів, що створені за

допомогою схеми тар. Рівняння Нав'є-Стокса розраховувались з першим порядком точності.

Із рішення отриманої системи різницевих рівнянь визначалися поля швидкості, тиску та температури в повітряному потоці, який рухається в теплообміннику, що розглядається.

Результати розрахунку приведені на рис. 4.

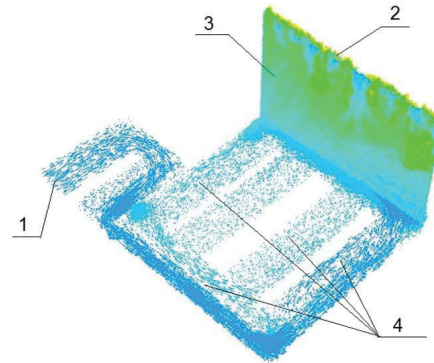


Рис. 4. Поле векторів швидкості. Позначення:

1 – вхід в ґрунтовий теплообмінник;

2 – вихід із теплової завіси;

3 – міжшаровий простір у стіні;

4 – багатоходова система повітряних коробів.

Наявність швидкості на вході в ґрунтовий теплообмінник говорить про те що при підігріві повітря теплотою ґрунту можна організувати природну циркуляцію повітря та відмовитись від використання пристроїв, що споживають електричну енергію. Природна тяга, що виникає внаслідок різниці температур, достатня для наявності природної циркуляції повітря.

Проведене теплофізичне моделювання показало, що винайдена конструкція дозволяє організувати природну конвекцію повітря в міжшаровому зазорі стіни будівлі. Крім того за допомогою теплової завіси стін можливо зменшити теплоспоживання будинку.

Висновки

1. Теплообмінники ґрунт-повітря дають можливість нагріти повітря на 2...8 градусів Цельсія в залежності від температури навколишнього середовища та стану ґрунтового масиву.

2. Числове моделювання показало, що в міжшаровому просторі стіни будівлі можливий рух повітря за допомогою природної конвекції.

Робота виконана в рамках українсько-білоруського проекту Ф73 за підтримки фонду фундаментальних досліджень України, договір №Ф73\108-2016.

ЛІТЕРАТУРА

1. Басок Б.І., Новіцька М.П., Кужель Л.М., Божко І.К., Недбайло О.М., Ткаченко М.В. Гончарук С.М. Спосіб забезпечення повітряно-теплової завіси теплотою ґрунту. Патент на корисну модель України № 88791 МПК F24F 1/00, F24F 5/00 від 25.03.2014. Бюл. № 6.

2. A. Sehli, A. Hasni, M. Tamali. The potential of earth-air heat exchangers for low energy cooling of buildings in

South Algeria, *Energy Procedia*, 2012. No 18. P.496 – 506.

3. *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*, 1992. No 18. P. 35–43.

4. *M. Krarti, J. F. Kreider*. Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel, *Energy Conversion and Management*, 1996. Vol. 37. No. 10. P. 1561–1574.

5. *Badescu V*. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house, *Renew Energy*, 2007. No. 32. P. 845–855.

6. *S. Amara, B. Nordell and B. Benyoucef*. Using Fouggara for Heating and Cooling Buildings in Sahara, *Energy Procedia*, 2011. No 6. P. 55–64.

7. *I. Tsimoura, K. Ikonou, A. Mamaloukas, G. Tsilingiridis*. Study of ground temperature variations at depths up to 3 meters at the Meteorological Station of Aristotle University of Thessaloniki, In: *Proceeding of 5th International Conference on Renewable Energy Sources – New Challenges*, 5-6 May 2016. P. 294–303.

8. *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.

9. *Benkert S, Heidt FD, Scholer D*. Calculation tool for earth heat exchangers GAEA. In: *Proceeding of building simulation '97, Fifth International IBPSA Conference*, Prague. 1997. P. 9–16.

THE THERMO-PHYSICAL SIMULATION OF AN AIR-EARTH HEAT EXCHANGER FOR HEAT SUPPLYING OF THE DOUBLE SKIN FAÇADE WALL SYSTEM OF ENERGY-EFFICIENT BUILDING

Basok B.I., Novitska M.P.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03057, Ukraine

The possibility of energy extraction from soil for heat supplying of energy-efficient building is considered at this article. The aim of this article is preliminary calculation of air circulation in a low depth air-earth heat exchanger. The numerical simulation of an air-earth heat exchanger which lies at relatively shallow depths is represented. The calculation has been done on the basis of movement and energy equation system. The numerical simulation has shown that in a double skin facade wall of a building air flow is possible due to natural convection. In conclusion it was obtained that air-earth heat exchangers might increase or decrease air temperature to minimize energy consumption of energy-efficient buildings.

References 9, figures 4.

Key words: air-earth heat exchanger, numerical simulation, energy-efficient building.

1. *Basok B.I., Novitska M. P., Kuzhel L.M., Bozhko I.K., Nedbailo O.M., Tkachenko M.V., Goncharuk S.M.* Spособ zabezpechennia povitriano-teplovoi zavisy teplotoiu gruntu [The method of thermal-air vein provided by soil heat], Patent Ukrainy na koristnu model [Patent on Ukraine on useful model], № 88791 MPK F24F 1/00, F24F 5/00 vid 25.03.2014 Bull. № 6. (Ukr.)

2. *A. Sehli, A.Hasni, M.Tamali*. The potential of earth-air heat exchangers for low energy cooling of buildings in South Algeria, *Energy Procedia*, 2012. No 18. P.496 – 506.

3. *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*, 1992. No 18. P. 35-43.

4. *M. Krarti, J. F. Kreider*. Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel, *Energy Conversion and Management*, 1996. Vol. 37. No. 10. P. 1561-1574.

5. *Badescu V*. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house. *Renew Energy*, 2007. No. 32. P. 845–855.

6. *S. Amara, B. Nordell and B. Benyoucef*. Using Fouggara for Heating and Cooling Buildings in Sahara, *Energy Procedia*, 2011. No 6. P. 55–64.

7. *I. Tsimoura, K. Ikonou, A. Mamaloukas, G. Tsilingiridis*. Study of ground temperature variations at depths up to 3 meters at the Meteorological Station of Aristotle University of Thessaloniki, In: *Proceeding of 5th International Conference on Renewable Energy Sources – New Challenges*, 5-6 May 2016. P. 294–303.

8. *Nakorchevskii A.I., Beliaeva T.H.* Rehressionnyi analiz hlubin hodovykh fluktuatsii temperature v verhnikh sloiakh grunta [Regressive analysis of depths of annual fluctuations temperatures in overhead ground layers], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2005. V. 27. № 6. P.86–90. (Rus.)

9. *Benkert S, Heidt FD, Scholer D*. Calculation tool for earth heat exchangers GAEA. In: *Proceeding of building simulation '97, Fifth International IBPSA Conference*, Prague. 1997. P. 9–16.

Получено 28.12.2016

Received 28.12.2016