

О. С. КОВЯЗИН

ОБҐРУНТУВАННЯ ДІАМЕТРА ОБСАДНОЇ ТРУБИ ҐРУНТОВОГО ТЕПЛООБМІННИКА ТА ПОДАЧІ ПОВІТРЯ В НЬОГО

Використано попередньо розроблену математичну модель процесу теплообміну між повітрям, що рухається в вертикальному теплообміннику і масивом ґрунту, яка пов'язує між собою енергетичні показники ґрунтового теплообмінника із його параметрами, а також природно-кліматичними умовами. На основі максимізації введеного критерію оптимізації, який назвали енергоозброєністю ґрунтового теплообмінника, обґрунтовано діаметр обсадної труби ґрунтового теплообмінника та об'ємну подачу повітря в нього.

Ключові слова: поверхневі шари Землі, тепла енергія, ґрунтовий теплообмінник, енергоозброєність, діаметр обсадної труби, подача повітря.

A. C. KOVIAZIN

ОБОСНОВАНИЕ ДИАМЕТРА ОБСАДНОЙ ТРУБЫ ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА И ПОДАЧИ ВОЗДУХА В НЕГО

Использована предварительно разработанная математическая модель процесса теплообмена между воздухом, движущемся в вертикальном теплообменнике и массивом грунта, связывающая между собой энергетические показатели ґрунтового теплообменника с его параметрами, а также природно-климатическими условиями. На основе максимизации введенного критерия оптимизации, который назвали энерговооруженностью ґрунтового теплообменника, обоснованы диаметр обсадной трубы ґрунтового теплообменника и объемная подача воздуха в него.

Ключевые слова: поверхностные слои Земли, тепловая энергия, ґрунтовый теплообменник, энерговооруженность, диаметр обсадной трубы, подача воздуха.

O. KOVIAZIN

SUBSTANTIATING THE DIAMETER OF THE LINER PIPE OF THE EARTH HEAT EXCHANGER AND PROVIDING THE AIR SUPPLY TO IT

The purpose of the research done was to increase the efficiency of geothermal ventilation that allows us to use the thermal energy of surface layers of the earth for the cooling and heating of the inflow air by substantiating the diameter of the liner pipe of the earth heat exchanger with the volumetric air supply to it. Mathematical simulation was done based on the equations of hydrodynamics, heat exchange and heat conductivity carrying out the computation experiment based on the method of finite volumes. A preliminary developed mathematical model of the heat exchange process between the air moving in the vertical heat exchanger and the soil in-situ was used. This model interconnects the energy indicators of the earth heat exchanger with its parameters including natural climatic conditions. Temperature fields of the cooled air and the soil in-situ were determined and as a consequence, the effective heat power of the earth heat exchanger, the volumetric supply and the ambient air temperature and heat exchanger operation time were also determined for different diameters of the liner pipe. An efficient heat power of the earth heat exchanger is gradually decreased with time. An abrupt drop in power corresponds to an ample air supply to the heat exchanger and it can be explained by a faster exhaustion of the power potential of soil and high energy inputs for the pumping of air through it. An optimization criterion was the relation of the effective thermal energy produced during the earth heat exchanger operation to the diameter of its liner pipe that was named as the power loading of the earth heat exchanger. Based on the maximization of optimization criterion we substantiated the diameter of liner pipe and that of the earth heat exchanger and the volumetric air supply to it.

Key words: surface layers of the earth, thermal energy, earth heat exchanger, power loading, liner pipe diameter and the air supply.

Вступ

Принцип дії геотермальної вентиляції з використанням ґрунтових теплообмінників (рис. 1) полягає в тому, що повітря, яке має температуру T_1 , подається на вхід ґрунтового теплообмінника і віддає (відбирає) тепло ґрунту, в результаті чого повітря охолоджується (нагрівається), набуваючи температури T_2 і подається в тваринницьке приміщення. Свердловина заповнена тампонажним розчином з високою теплопровідністю, що покращує теплообмін між обсадної трубою і ґрунтом. Обсадна труба виконана з матеріалу з високою теплопровідністю, наприклад, сталі. При цьому між внутрішньою поверхнею обсадної труби теплообмінника, що має внутрішній діаметр D , і масивом ґрунту виникає тепловий потік dQ/dt , величина якого визначає енерговідбір теплообмінника від масиву ґрунту.

Для підвищення ефективності геотермальної вентиляції необхідно обґрунтувати параметри ґрунтових теплообмінників.

В роботах [1–5] розроблено математичну модель процесу теплообміну між повітрям, що рухається в вертикальному теплообміннику і масивом ґрунту, яка пов'язує між собою енергетичні показники ґрунтового теплообмінника із його параметрами, а також природно-кліматичними умовами. Проте в цих працях не обґрунтовано діаметр обсадної труби ґрунтового теплообмінника та об'ємну подачу повітря в нього.

Мета роботи

Підвищити ефективність використання геотермальної вентиляції шляхом обґрунтування діаметру обсадної труби ґрунтового теплообмінника та

об'ємної подачі повітря в нього.

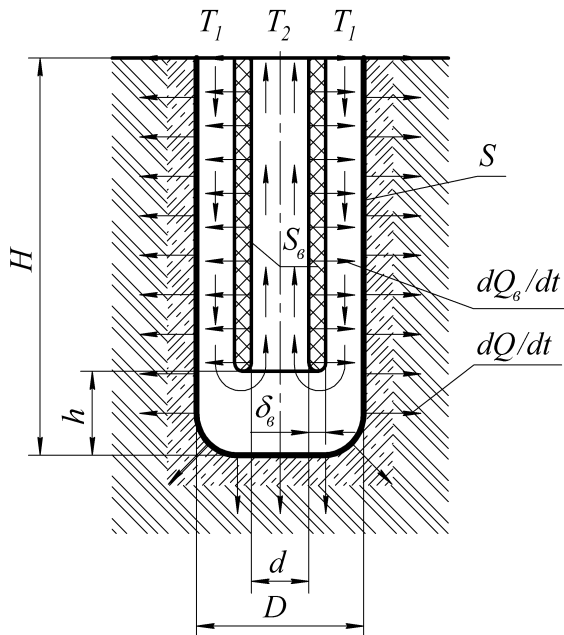


Рис. 1 – Подовжній переріз ґрунтового теплообмінника

Викладення основного матеріалу

Теплова потужність ґрунтового теплообмінника

$$P_T = \frac{V_t}{3,6} \rho C_p |T_1 - T_2|,$$

де V_t – об'ємна подача повітря в теплообмінник, м³/год; ρ – густина повітря, кг/м³; C_p – теплоємність повітря, кДж/(кг·°C).

Потужність, яка необхідна для прокачування повітря через ґрунтовий теплообмінник, визначається за формулою

$$P_{\Pi} = \frac{V_t \Delta p}{3600 \eta_{\Pi}},$$

де Δp – втрати тиску в ґрунтовому теплообміннику, Па; η_{Π} – повний ККД вентилятора.

Відомо [8], що передача енергії у формі роботи є більш цінним, ніж передача енергії у формі тепла. Електродвигун вентилятора вимагає електроенергії, яка перетворюється із теплової енергії з великими втратами. Оцінити втрати, що виникають в процесі вироблення електроенергії на електростанціях, а також при транспортуванні енергії по електричних мережах можливо за допомогою коефіцієнта корисного використання (КПВ) первинного енергоресурсу, який закріплений в німецькому стандарті DIN 4701 (ч. 10).

Згідно [9] питома витрата первинного енергоресурсу для електроенергії становить 2,8, для геотермальної енергії та інших поновлюваних джерел енергії – 1,0.

Тепер стає можливим визначити ефективну теплову потужність

$$P_e = P_T - k_{ee} P_{\Pi},$$

де k_{ee} – питома витрата первинного енергоресурсу для електроенергії, $k_{ee} = 2,8$.

Ефективна теплова енергія, яку отримаємо за час функціонування ґрунтового теплообмінника

$$E = \sum_{i=1}^n P_{ei} (t_i - t_{i-1}),$$

де P_{ei} – ефективна теплова потужність теплообмінника на i -ому інтервалі часу функціонування.

В якості критерію оптимізації використовуємо відношення E/D , яке показує не тільки скільки енергії отримуємо від теплообмінника певних розмірів, а і враховує економічні аспекти, оскільки, згідно наших попередніх досліджень [10] вартість ґрунтового теплообмінника прямо пропорційна діаметру D його обсадної труби. За аналогією з енергоозброєністю автомобіля, що представляє собою відношення потужності двигуна до маси автомобіля [11], назвемо прийнятий критерій оптимізації енергоозброєністю ґрунтового теплообмінника.

Обчислювальний експеримент проводився з використанням пакету обчислювальної гідродинаміки *ANSYS Fluent*, який в якості методу просторової дискретизації використовує метод кінцевих об'ємів з розрахунком невідомих в центрах комірок. Для зменшення кількості елементів кінцево-елементної сітки і економії обчислювальних ресурсів [6] використовували симетрію зі вказуванням умови *symmetry* на площині, що проходить через вісь теплообмінника. В якості вирішувача використовували вирішувач по тиску: на вході $T_{\Pi}(x, y, 0, t)$ задавався рівномірний профіль швидкості v (*velocity-inlet condition*), на виході передбачався постійний тиск $p = 0$ (*pressure-outlet condition*). Для моделювання турбулентності використовувалася модель Ментера ($k-\omega$ *Shear Stress Transport* або *SST* модель) [7].

Обговорення результатів

Результати обчислювального експерименту¹ з обґрунтування діаметра обсадної труби ґрунтового теплообмінника та об'ємної подачі повітря в нього представлено на рис. 2–4.

¹ $t = 10^7$ с; $H = 30$ м; $\delta_b = 0,05$ м; $\rho_r = 1600$ кг/м³; $\lambda_r = 1,45$ Вт/(м·°C), $C_r = 1350$ Дж/(кг·°C)

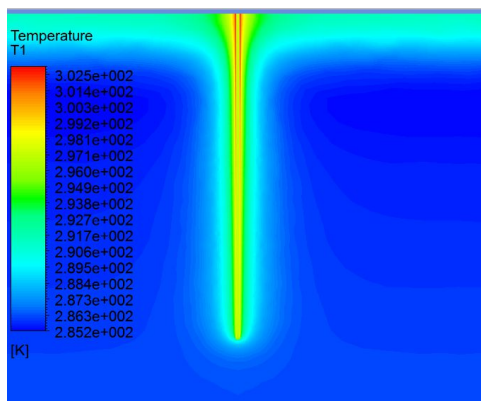


Рис. 2 – Температурне поле охолоджуваного повітря і масиву ґрунту при діаметрі обсадної труби $D = 0,35$ м і подачі повітря $V_i = 650$ м³/год для температури зовнішнього повітря $T_1 = 30$ °С і часу функціонування $t = 10^7$ с

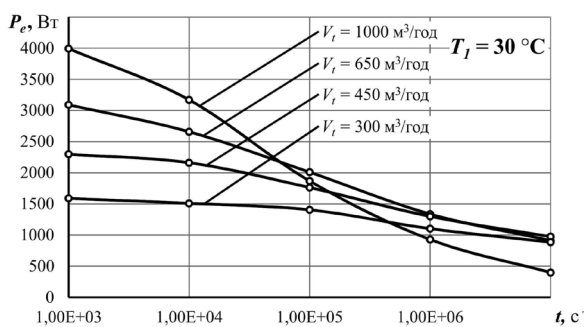


Рис. 3 – Графіки залежності ефективної теплової потужності P_e від часу функціонування ґрунтового теплообмінника t при різній об'ємній подачі повітря V_i

Для температури зовнішнього повітря $T_1 = 30$ °С і діаметра обсадної труби $D = 0,35$ м побудували графік (рис. 3), з якого видно, що ефективна теплова потужність ґрунтового теплообмінника з часом постійно зменшується. Більш різке падіння потужності відповідає більшим подачам повітря в теплообмінник, що можна пояснити більш швидким виснаженням енергетичного потенціалу ґрунту та більшим витратам енергії на прокачування повітря крізь нього.

Для діапазону температур зовнішнього повітря $T_1 = 30-40$ °С немає явно переважного варіанту сполучення діаметру обсадної труби ґрунтового теплообмінника і подачі повітря в нього (рис. 4б-г) і можна рекомендувати декілька варіантів сполучення цих параметрів.

Як видно з рис. 4а для температури зовнішнього повітря $T_1 = 25$ °С оптимальними є значення діаметру обсадної труби $D = 0,35$ м і об'ємної подачі повітря $V_i = 650$ м³/год оскільки при цьому спостерігається максимум енергоозброєності ґрунтового теплообмінника. Тому для подальших досліджень приймаємо діаметр обсадної труби $D = 0,35$ м і об'ємну подачу повітря $V_i = 650$ м³/год.

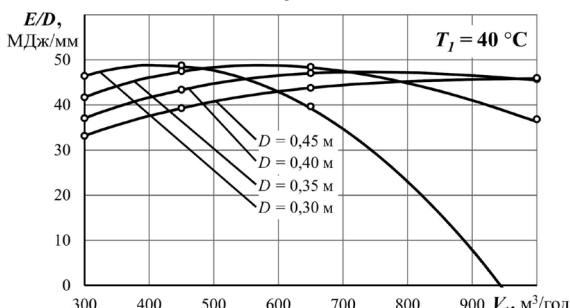
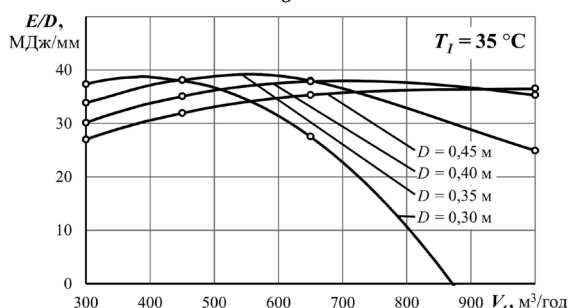
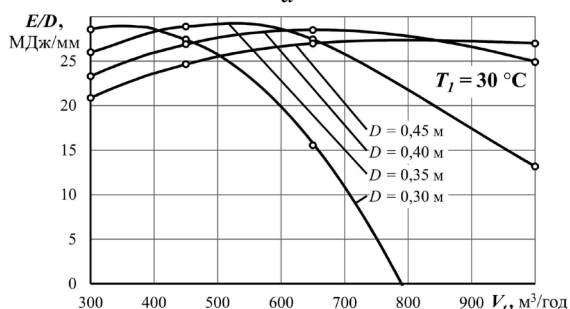
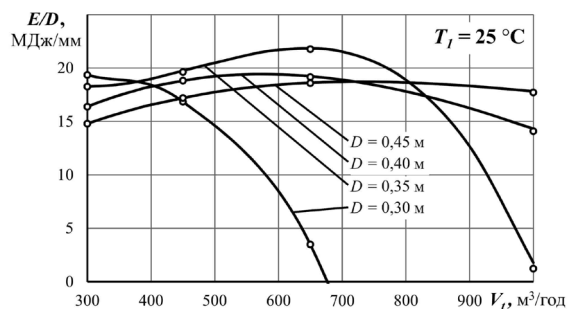


Рис. 4 – Графіки залежності енергоозброєності ґрунтового теплообмінника від діаметру обсадної труби D і об'ємної подачі повітря V_i при температурі зовнішнього повітря: а – $T_1 = 25$ °С; б – $T_1 = 30$ °С; в – $T_1 = 35$ °С; г – $T_1 = 40$ °С

Висновки

Ефективна теплова потужність ґрунтового теплообмінника з часом постійно зменшується. Більш різке падіння потужності відповідає більшим подачам повітря в теплообмінник, що можна пояснити більш швидким виснаженням енергетичного потенціалу ґрунту та більшим витратам енергії на прокачування повітря крізь нього.

Обґрунтовано діаметр обсадної труби ґрунтового теплообмінника та об'ємну подачу повітря в нього на основі максимізації введеного критерію оптимізації, який назвали енергоозброєністю ґрунтового теплообмінника, що являє собою відношення ефективної теплової енергії, яку отримаємо за час функціонування ґрунтового теплообмінника до діаметру обсадної труби.

Для діапазону температур зовнішнього повітря $T_1 = 30-40$ °C немає явно переважного варіанту сполучення діаметру обсадної труби ґрунтового теплообмінника і подачі повітря в нього і можна рекомендувати декілька варіантів сполучення цих параметрів. Для температури зовнішнього повітря $T_1 = 25$ °C оптимальними є значення діаметру обсадної труби $D = 0,35$ м і об'ємної подачі повітря $V_t = 650$ м³/год оскільки при цьому спостерігається максимум енергоозброєності ґрунтового теплообмінника.

Список літератури

1. Ковязин А. С. Обоснование соотношения площадей поперечного сечения ґрунтового теплообмінника для геотермальной вентиляции. *Математичне моделювання: Науковий журнал*. Кам'янське: ДДТУ, 2016. № 2(35). С. 46–51. ISSN 2519-8106.
2. Ковязин А. С. Обоснование толщины теплоизоляции внутренней трубы ґрунтового теплообмінника. *Вестник двигателестроения*. Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. № 1(2017). С. 19–24. ISSN 1727-0219.
3. Ковязин А. С., Величко И. Г. Влияние материала и толщины стенки обсадной трубы ґрунтового теплообмінника на теплоотбор из массива ґрунта. *Вісник національного університету «Львівська політехніка» «Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація»*. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013. № 758. С. 57–62.
4. Ковязин А. С. Влияние на энергосъем формы поперечного сечения ґрунтового теплообмінника. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Технічні системи і технології тваринництва»*. Вип. 132. Харків, 2013. С. 251–255.
5. Shevchenko Igor, Kovyazin Alexey, Jan Radosław Kamiński, Szeptycki Aleksander. Simulation of thermal field in soil. *Problemy Inżynierii Rolniczej*. Falenty: Institute of Technology and Life Sciences, 2017. № 1(95). S. 57–65. ISSN 1231-0093.
6. Бруяка В. А., Фокин В. Г., Солдусова Е. А. и др. *Инженерный анализ в ANSYS Workbench*. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 271 с. ISBN 978-5-7964-1392-0.
7. Menter F. R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA*. Paper 93-2906. No. 1993. 21 p.
8. Рей Д., Макмайкл Д. *Тепловые насосы*. Москва: Энергоиздат, 1982. 224 с.
9. Люке Андреас. Первичная энергия как критерий энергетической эффективности. *Энергосбережение*. Москва: Информационно-издательское предприятие «АВОК-ПРЕСС», 2011. № 4. С. 8–12.
10. Ковязин А. С., Долгих Д. А. Обоснование длины и диаметра ґрунтового теплообмінника. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Вип. 97. Т. 1. Глеваха, 2013. С. 96–105.
11. Гришкевич А. И. *Автомобили: Теория*. Минск: Выш. шк., 1986. 208 с.

References (transliterated)

1. Kovyazin, A. S. (2016), "Obosnovanie sootnosheniya ploshhadej poperechnogo sechenija ґрунтового теплообмінника dlja geotermal'noj ventiljacii [Justification for ratio of cross-sectional areas of ground heat exchanger for geothermal ventilation]", *Mathematical Modeling: Scientific Journal*, no. 2(35), pp. 46–51, ISSN 2519-8106.
2. Kovyazin, A. S. (2017), "Obosnovanie tolshhiny teploizoljacii vnutrennej trubicy ґрунтового теплообмінника [The rationale for the thickness of the thermal insulation the inner tube of ground heat exchanger]", *Herald of Aeroenginebuilding*, no. 1(2017), pp. 19–24, ISSN 1727-0219.
3. Kovyazin, A. S. and Velichko, I. G. (2013), "Vlijanie materiala i tolshhiny stenki obsadnoj trubicy ґрунтового теплообмінника na teplootbor iz massiva ґрунта [Influence of the material and casing wall thickness of a ground heat exchanger on energy extraction rate]", *Herald of national University "Lviv Polytechnic" "Power system. Engineering the environment. Automation"*, no. 758, pp. 57–62.
4. Kovyazin, A. S. (2013), "Vlijanie na energosyom formy poperechnogo sechenija ґрунтового теплообмінника [Influence of the cross-section shape of a ground heat exchanger on energy extraction rate]", *Herald of Kharkov national technical University of agriculture named Peter Vasilenko, "Technical systems and technology of animal husbandry"*, no. 132, pp. 251–255.
5. Shevchenko, I., Kovyazin A., Kamiński J. R. and Szeptycki A. (2017), "Simulation of thermal field in soil", *Problemy Inżynierii Rolniczej*, no 1(95), pp. 57–65, ISSN 1231-0093.
6. Brujaka V. A., Fokin V. G., Soldusova E. A., Glazunova N. A. and Adejanov I. E. (2010), *Inzhenernyj analiz v ANSYS Workbench [Engineering analysis in ANSYS Workbench]*, Samara State Technical University, Samara, Russia, ISBN 978-5-7964-1392-0.
7. Menter, F. R. (1993), "Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows", *AIAA*, Paper 93-2906, no. 1993, 21 p.
8. Rej, D. and Makmajkl D. (1982), *Teplovye nasosy [Heat pumps]*, Energoizdat, Moscow, Russia.
9. Ljuka, Andreas (2011), "Pervichnaja jenergija kak kriterij energetičeskoj effektivnosti [Primary energy as a criterion of energy efficiency]", *Energy saving*, no. 4, pp. 8–12.
10. Kovyazin, A. S. and Dolgikh, D. A. (2013), "Obosnovanie dliny i diametra ґрунтового теплообмінника [Ground of the length and diameter of the ground heat exchanger]", *Mechanization and electrification of agriculture*, no. 97(1), pp. 96–105.
11. Grishkevich, A. I. (1986), *Автомобили: Теория [Cars: Theory]*, High school, Minsk, USSR.

Надійшла (received) 31.01.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковязин Олексій Сергійович (Ковязин Алексей Сергеевич, Kovyazin Aleksey) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Запорізька державна інженерна академія, доцент кафедри металургійного обладнання, e-mail: kvznas@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3027-872X>.