

## Дослідження функціонування теплообмінника у ґрунтах різної температуропровідності

© О. С. Ковязін, 2018

Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя, Україна  
Надійшла 25 січня 2018 р.

С помощью математической модели процесса теплообмена между воздухом, движущимся в вертикальном теплообменнике, и массивом грунта, которая связывает между собой энергетические показатели грунтового теплообменника с его параметрами, а также природно-климатическими условиями, установлено, что эффективная тепловая энергия за время функционирования теплообменника линейно зависит от температуропроводности грунта как для отдельно расположенного теплообменника, так и для двух теплообменников, расположенных на межосевом расстоянии 4 м. Вычислительный эксперимент проводился с использованием пакета вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent. Определено температурное поле охлаждаемого воздуха и массива грунта для грунтов различной температуропроводности. Установлено, что температуропроводность грунта является определяющим показателем его энергетического потенциала и очень сильно влияет на эффективную тепловую мощность, особенно при длительном времени функционирования грунтового теплообменника. От грунта с температуропроводностью  $1,03 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  можно получить примерно в 3,6 раза больше эффективной тепловой энергии за время функционирования теплообменника, чем от грунта с температуропроводностью  $0,32 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

**Ключевые слова:** поверхностные слои Земли, тепловая энергия, почвенный теплообменник, температуропроводность грунта.

**Вступ.** Ефективне ведення галузі тваринництва неможливе без повноцінної годівлі та створення оптимальних умов утримання тварин, які в основному визначаються мікрокліматом. Охолодження (нагрівання) припливного повітря для тваринницьких приміщень може бути здійснено за допомогою геотермальної вентиляції, яка дає змогу використовувати теплову енергію поверхневих шарів Землі.

Принцип дії геотермальної вентиляції з використанням ґрунтових теплообмінників (рис. 1) полягає у тому, що повітря, яке має температуру  $T_1$ , подається на вхід ґрунтового теплообмінника і віддає (відбирає) тепло ґрунту. У результаті повітря охолоджується (нагрівається), набуваючи температуру  $T_2$ , і подається у тваринницьке приміщення. Свердловина заповнена тампонажним розчином з високою теплопровідністю, що покращує теплообмін між

обсадною 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.

У публікаціях [Ковязін, 2013, 2017; Shevchenko et al., 2017] розглянуто математичну модель процесу теплообміну між повітрям, що рухається у вертикальному теплообміннику, і масивом ґрунту, яка пов'язує між собою енергетичні показники ґрунтового теплообмінника із його параметрами і природно-кліматичними умовами. Проте автори не проаналізували вплив температуропровідності ґрунту на енергетичні показники ґрунтового теплообмінника, що і є метою цієї праці.

**Основна частина.** Відповідно до видан-

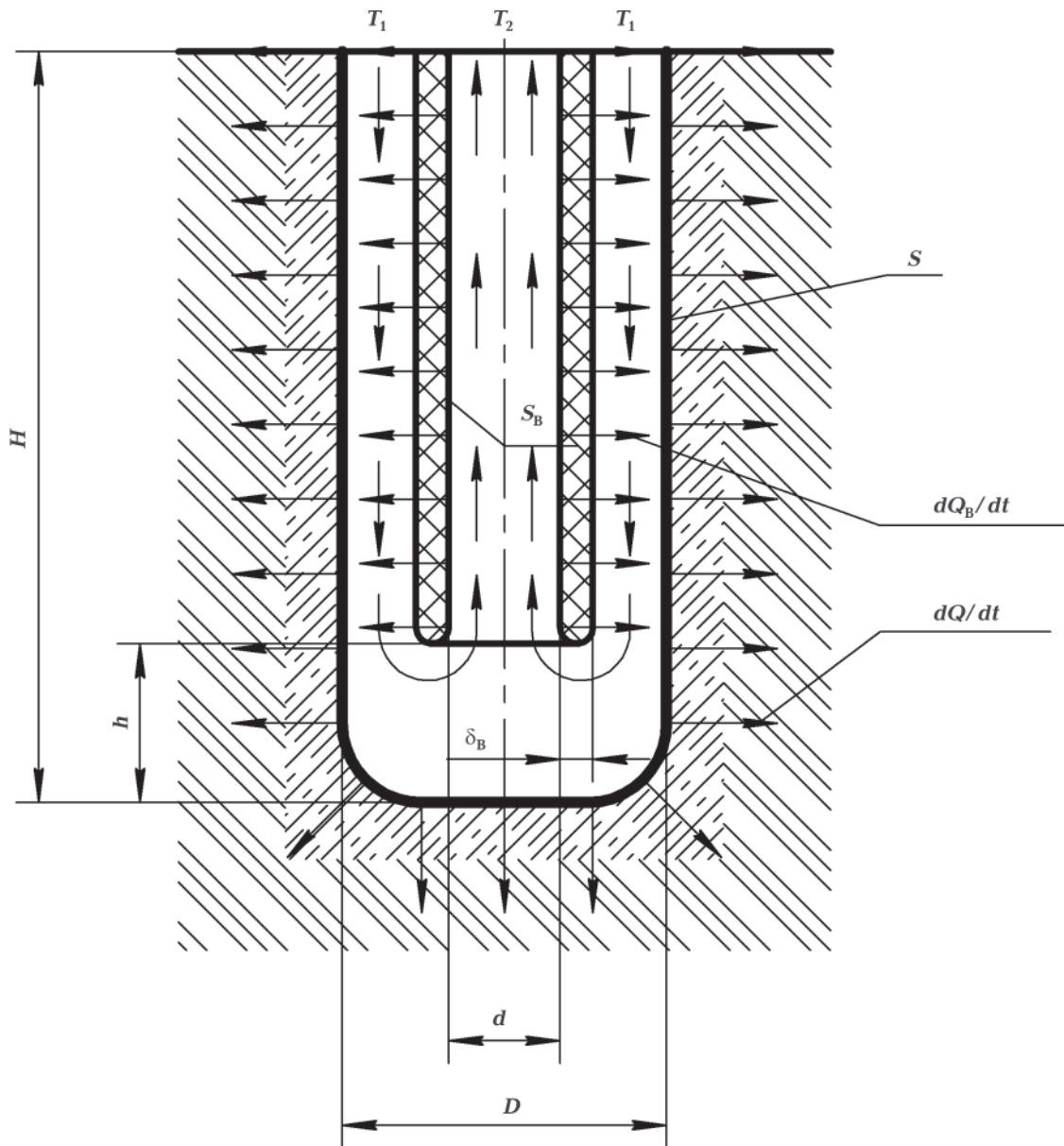


Рис. 1. Поздовжній переріз ґрунтового теплообмінника.

ня [ASHRAE, 2017], ґрунти класифікують за теплопровідністю на ґрунти з дуже низькою теплопровідністю ( $\lambda_r < 1$  Вт/(м·К)), з низькою теплопровідністю ( $1 < \lambda_r < 1,5$  Вт/(м·К)), з нормальною теплопровідністю ( $1,5 < \lambda_r < 2$  Вт/(м·К)), з високою теплопровідністю ( $2 < \lambda_r < 2,5$  Вт/(м·К)), з дуже високою теплопровідністю ( $\lambda_r > 2,5$  Вт/(м·К)).

Для порівняння обрано три типи ґрунту: з дуже низькою теплопровідністю — глина густиною  $1600 \text{ кг/м}^3$  і вологістю 5 %, теплофізичні характеристики ґрунту, за

[СНиП 2.02.04—88]:  $\lambda_r = 0,58$  Вт/(м·К),  $C_r = 1144$  Дж/(кг·К), температуропровідність  $a = 0,32 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; з нормальною теплопровідністю — пісок густиною  $1600 \text{ кг/м}^3$  і вологістю 10 %, теплофізичні характеристики:  $\lambda_r = 1,45$  Вт/(м·К),  $C_r = 1350$  Дж/(кг·К), температуропровідність  $a = 0,68 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; з дуже високою теплопровідністю — пісок густиною  $2000 \text{ кг/м}^3$  і вологістю 10 %, теплофізичні характеристики:  $\lambda_r = 2,73$  Вт/(м·К),  $C_r = 1340$  Дж/(кг·К), температуропровідність  $a = 1,03 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Теплова потужність ґрунтового теплообмінника

$$P_m = \frac{V_t}{3,6} \rho C_n |T_1 - T_2|,$$

де  $V_t$  — об'ємна подача повітря в теплообмінник, м<sup>3</sup>/год;  $\rho$  — густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $C_n$  — теплоємність повітря, кДж/(кг·К).

Потужність, що необхідна для прокачування повітря через ґрунтовий теплообмінник, визначаємо за формулою [Лойцянский, 2003]

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

де  $\Delta p$  — втрати тиску в ґрунтовому теплообміннику, Па;  $\eta_{\Pi}$  — повний ККД вентилятора.

Відомо [Рей, 1982], що передача енергії у формі роботи є ціннішою, ніж передача енергії у формі тепла. Електродвигун вентилятора потребує електроенергії, яка перетворюється із теплової енергії з великими втратами. Оцінити втрати, що виникають у процесі вироблення електроенергії на електростанціях, а також під час транспортування енергії по електричних мережах, можна за допомогою коефіцієнта корисного використання (ККВ) первинного енергоресурсу, який закріплений у німецькому стандарті DIN 4701 (ч. 10).

Згідно з [Люке, 2011], питома витрата первинного енергоресурсу для електроенергії становить 2,8, для геотермальної енергії та інших поновлюваних джерел енергії — 1,0. Тоді ефективну теплову потужність визначаємо за формулою

$$P_e = P_m - k_{ee} P_n,$$

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

Ефективну теплову енергію за час функціонування ґрунтового теплообмінника отримаємо за виразом

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

де  $P_{ei}$  — ефективна теплова потужність теплообмінника на  $i$ -му інтервалі часу функціонування.

У дослідженнях розглянуто окремо розташований теплообмінник і два теплообмінники, що розташовані з міжосьовою відстанню 4 м.

Обчислювальний експеримент [Снегирев, 2009] проведено із застосуванням пакета обчислювальної гідродинаміки ANSYS Fluent. Як метод просторової дискретизації цей пакет використовує метод скінченних об'ємів з розрахунком невідомих у центрах комірок. Для зменшення кількості елементів скінченно-елементної сітки і економії обчислювальних ресурсів [Бруяка, 2010] застосовано симетрію з указанням умови симетрії на площині, що проходить через осі теплообмінників. Як роздільник використовували роздільник за тиском: на вході  $T_n(x, y, 0, t)$  задавали рівномірний профіль швидкості  $v$  (velocity-inlet condition), на виході передбачали постійний тиск  $p = 0$  (pressure-outlet condition). Для моделювання турбулентності застосовували модель Ментера ( $k-\omega$  Shear Stress Transport або SST модель) [Menter, 1993]. Для сполучення швидкості і тиску використовували схему «Coupled». Градієнти змінних розв'язку в центрах комірок визначали методом Гріна—Гауса по вузлах. Для інтерполяції тиску застосовували метод «PRESTO!», для інтерполяції конвективних складових — схему адвекції другого порядку. Також застосовували конвертацію сітки в поліедричну. Після чого поліпшували якість сітки із неодноразовим використанням TUI команди /mesh/smooth «quality based».

Результати обчислювального експерименту (було прийнято  $T_1=303$  К;  $t=10^7$  с) з визначення впливу температуропровідності ґрунту на енергетичні показники ґрунтового теплообмінника наведено в таблиці, а температурні поля показано на рис. 2.

За даними таблиці побудовано графіки (рис. 3, 4).

З рис. 3 бачимо, що температуропровідність ґрунту дуже сильно впливає на ефективну теплову потужність, особливо за тривалого часу функціонування ґрунтового теплообмінника. Причому для ґрунту дуже низької теплопровідності ( $\lambda_1 < 1$  Вт/(м·К)) ефективна теплова потужність з часом

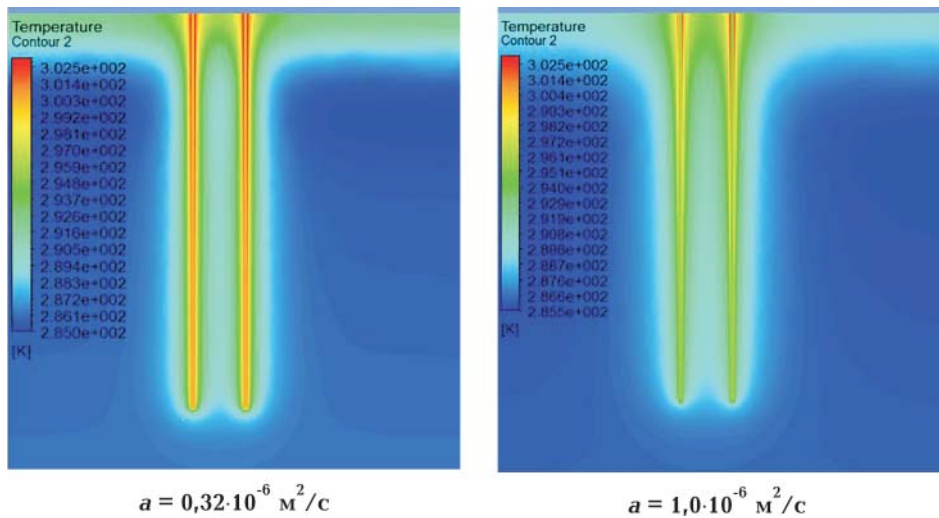


Рис. 2. Температурне поле охолодженого повітря і масиву ґрунту для ґрунтів різної теплопровідності при функціонуванні двох теплообмінників для часу функціонування  $t = 10^7$  с.

стрімко падає (майже у 5 разів для досліджуваного інтервалу часу), а для ґрунту дуже високої теплопровідності ( $\lambda_T > 2,5$  Вт/(м·К)) падіння ефективної теплової потужності повільніше (приблизно у 2 рази).

З рис. 4 бачимо, що ефективна теплова енергія за час функціонування теплообмінника практично лінійно залежить від теплопровідності ґрунту як для окремо розташованого теплообмінника, так і для двох теплообмінників, що розташовані на міжосьовій відстані 4 м. Причому від ґрунту з теплопровідністю  $a = 1,03 \cdot 10^{-6}$  м²/с (пісок густиною 2000 кг/м³ і вологістю 10 %) можна отримати приблизно в 3,6 рази більше ефективної теплової енергії за час функціонування теплообмінника, ніж ґрунту з теплопровідністю  $a = 0,32 \cdot 10^{-6}$  м²/с (глина густиною 1600 кг/м³ і вологістю 5 %).

**Висновки.** Теплопровідність ґрунту є визначальним показником енергетичного потенціалу ґрунту і дуже сильно впливає на ефективну теплову потужність, особливо за тривалого часу функціонування ґрунтового теплообмінника. Причому для ґрунту дуже низької теплопровідності ефективна теплова потужність з часом стрімко падає, а для ґрунту дуже високої теплопровідності це падіння є повільнішим.

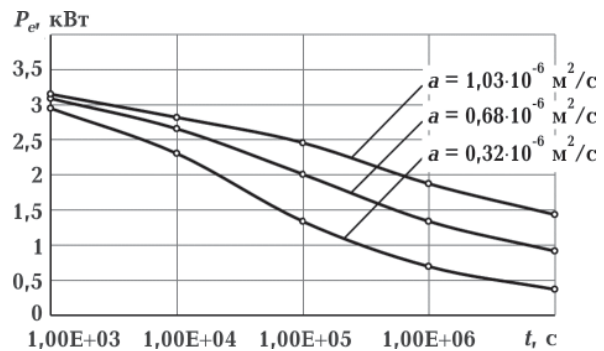


Рис. 3. Залежність ефективної теплової потужності окремо розташованого ґрунтового теплообмінника від часу функціонування для ґрунтів різної теплопровідності.

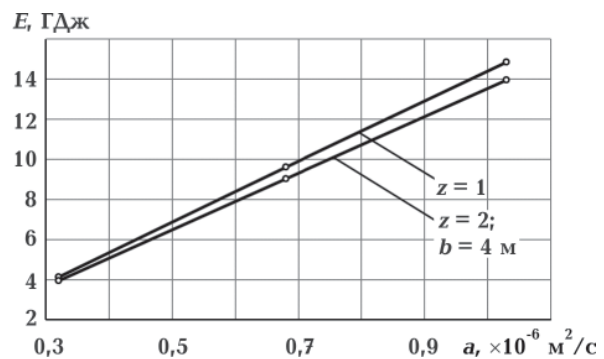


Рис. 4. Залежність ефективної теплової енергії за час функціонування теплообмінника від теплопровідності ґрунту.

**Вплив температуропровідності ґрунту на енергетичні показники ґрунтового теплообмінника**

Час функціонування, $t$ , с	Охолодження повітря, $\Delta T$ , К	Втрати тиску, $\Delta p$ , Па	Теплова потужність, $P_m$ , Вт	Потужність на прокачування, $P_n$ , Вт	Ефективна теплова потужність, $P_{ef}$ , Вт	Ефективна теплова енергія за час функціонування, $E$ , ГДж
Окремо розташований теплообмінник, $a = 0,32 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$						
$10^3$	15,25	348	3241	105	2948	0,003
$10^4$	12,22	346	2597	104	2306	0,024
$10^5$	7,67	343	1630	103	1341	0,144
$10^6$	4,64	342	986	103	698	0,77
$10^7$	3,10	341	659	103	372	4,12
Окремо розташований теплообмінник, $a = 0,68 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$						
$10^3$	15,92	348	3383	105	3090	0,003
$10^4$	13,88	347	2950	104	2658	0,027
$10^5$	10,82	345	2300	104	2009	0,208
$10^6$	7,65	343	1626	103	1337	1,41
$10^7$	5,64	342	1199	103	910	9,60
Окремо розташований теплообмінник, $a = 1,03 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$						
$10^3$	16,2	348	3443	105	3150	0,003
$10^4$	14,64	347	3111	104	2819	0,029
$10^5$	12,94	346	2750	104	2458	0,250
$10^6$	10,19	345	2166	104	1875	1,94
$10^7$	8,11	344	1724	103	1434	14,85
Два теплообмінники, $a = 0,32 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$						
$10^3$	15,25	348	3241	105	2948	0,003
$10^4$	11,27	345	2395	104	2104	0,022
$10^5$	7,64	343	1624	103	1335	0,142
$10^6$	4,57	342	971	103	683	0,757
$10^7$	3,01	341	640	103	353	3,93
Два теплообмінники, $a = 0,68 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$						
$10^3$	15,92	348	3383	105	3090	0,003
$10^4$	13,87	347	2948	104	2656	0,027
$10^5$	10,77	345	2289	104	1998	0,207
$10^6$	7,55	343	1605	103	1315	1,39
$10^7$	5,35	342	1137	103	849	9,03
Два теплообмінники, $a = 1,03 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$						
$10^3$	16,2	348	3443	105	3150	0,003
$10^4$	14,63	347	3109	104	2817	0,029
$10^5$	12,86	346	2733	104	2441	0,248
$10^6$	10,07	345	2140	104	1850	1,91
$10^7$	7,66	343	1628	103	1339	13,96

Ефективна теплова енергія за час функціонування теплообмінника лінійно залежить від температуропровідності ґрунту як для окремо розташованого теплообмінника, так і для двох теплообмінників, що розташовані на міжосьовій відстані 4 м. При-

чому від ґрунту з температуропровідністю  $1,03 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  можна отримати приблизно в 3,6 рази більше ефективної теплової енергії за час функціонування теплообмінника, ніж від ґрунту з температуропровідністю  $0,32 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

### Список літератури

- Бруяка В. А., Фокин В. Г., Солдусова Е. А., Глазунова Н. А., Агеянов И. Е. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Самара: Изд. Самар. гос. техн. ун-та, 2010. 271 с.
- Ковязин А. С. Обоснование толщины теплоизоляции внутренней трубы грунтового теплообменника. *Вестник двигателестроения*. 2017. № 1. С. 19—24.
- Ковязин А. С., Величко И. Г. Влияние материала и толщины стенки обсадной трубы грунтового теплообменника на теплоотбор из массива грунта. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2013. № 758. С. 57—63.
- Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. Москва: Дрофа, 2003. 840 с.
- Люке А. Первичная энергия как критерий энергетической эффективности. *Энергосбережение*. 2011. № 4. С. 8—12.
- Рей Д., Макмайкл Д. Тепловые насосы. Москва: Энергоиздат, 1982. 224 с.
- Снегирев А. Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 143 с.
- СНиП 2.02.04—88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Москва: ГУП ЦПП, 2005. 52 с.
- ASHRAE Handbook. 2017 HVAC Application. Chapter 34, Energy Resources.
- Menter F. R., 1993. Zonal two equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA Paper 93-2906*. 21 p.
- Shevchenko I., Kovyazin A., Kamiński J. R., Szepczycki A., 2017. Simulation of thermal field in soil. *Problemy Inżynierii Rolniczej*. № 1(95). P. 57—65.

## Study of functioning of heat exchanger in soils with different thermal diffusivity

© O. S. Kovyazin, 2018

It was found with the help of mathematical model of the process of heat exchange between the air moving in vertical heat exchanger and the massif of soil, which connects energetic factors of the soil heat exchanger with its parameters as well as natural-climatic conditions that effective thermal energy during the term of heat exchanger functioning depends linearly on thermal diffusivity of soil both for separate heat exchanger and for two heat exchangers located at 4m between axes. Calculative experiment was conducted with application of the packet of calculative hydrodynamics ANSYS Fluent. Temperature field of the air being cooled and of the massif of soil has been detected for the soils with different thermal diffusivity. It has been found that temperature diffusivity of the soil is a determinative factor of energy potential of soil and has a dramatic effect on the effective thermal capacity especially for long-term functioning of soil heat exchanger. From the soil with temperature diffusivity  $2,68 \text{ м}^2/\text{с}$  we can obtain approximately 3,6 times as

more effective thermal energy while heat exchanger is functioning than from the soil with temperature diffusivity  $0,83 \text{ m}^2/\text{s}$ .

**Key words:** surface layers of the Earth, thermal energy, soil heat exchanger, thermal diffusivity of the soil.

### References

- Bruyaka V. A., Fokin V. G., Soldusova E. A., Glazunova N. A., Adeyanov I. E.*, 2010. Engineering analysis in ANSYS Workbench. Samara: Ed. Samara State Technical University, 271 p. (in Russian).
- Kovyazin A. S.*, 2017. Substantiation of the thermal insulation thickness of the inner pipe of a ground heat exchanger. *Vestnik dvigatelestroyeniya* (1), 19—24 (in Russian).
- Kovyazin A. S., Velichko I. G.*, 2013. Influence of the material and wall thickness of the casing of the soil heat exchanger on heat removal from the soil mass. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»* (758), 57—63 (in Russian).
- Loytsyanskiy L. G.*, 2003. Mechanics of fluid and gas. Moscow: Drofa, 840 p. (in Russian).
- Lyuke A.*, 2011. Primary energy as a criterion of energy efficiency. *Energoberezhniye* (4), 8—12 (in Russian).
- Ray D., McMichael D.*, 1982. Heat Pumps. Moscow: Energoizdat, 224 p. (in Russian).
- Snegirev A. Yu.*, 2009. High-performance computing in technical physics. Numerical simulation of turbulent flows. St. Petersburg: Publishing house of Polytechnic University, 143 p. (in Russian).
- Building codes and regulations 2.02.04-88, 2005. Foundations and foundations on permafrost soils. Moscow: Ed. State Unitary Enterprise — Design Products Center, 52 c. (in Russian).
- ASHRAE Handbook. 2017 HVAC Application. Chapter 34, Energy Resources.
- Menter F. R.*, 1993. Zonal two equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA Paper* 93-2906. 21 p.
- Shevchenko I., Kovyazin A., Kamiński J. R., Szepczycki A.*, 2017. Simulation of thermal field in soil. *Problemy Inżynierii Rolniczej*. № 1(95). P. 57—65.