

УДК 621.577

Вплив конструктивних особливостей енергетичної палі на її ефективність

О. В. Приймак¹, П. О. Пасічник², І. Т. Кузицький³

¹д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, 02opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3081-6057

²к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, pasichnik89@bigmir.net, ORCID: 0000-0001-8499-6949

³асп. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, kuzytyski@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0337-7105

Анотація. Важливим напрямком енергозбереження є використання енергоефективних систем теплопостачання. Такими системами є системи з тепловими насосами для утилізації низькопотенціальної теплоти верхніх шарів земної кори. Актуальною науковою задачею є розвиток конструкцій теплових насосів для підвищення їх ефективності. Розповсюдження набувають теплові насоси на основі вертикальних ґрунтових теплообмінників, при цьому перспективним є виконання цих теплообмінників у вигляді будівельних палей, так званих, енергетичних палей. При проектуванні теплових насосів на основі енергетичних палей надзвичайно важливим є питання їх взаємовпливу, оскільки конструктив і несуча здатність встановлює певні границі рознесення фундаментних палей. В статті розглянуті системи теплопостачання з ґрунтовим тепловим насосом, у якого як випарник використано будівельні фундаментні палі, так звані, енергетичні палі. Проаналізовано відомі дослідження щодо конструктивних особливостей енергетичних палей та їх вплив на енергетичні показники теплових насосів. Встановлено, що найменш дослідженою областю в даній сфері являється методика інженерного розрахунку енергетичних палей, а саме взаємний вплив енергетичних палей одна на одну, тобто мінімально допустиму відстань між фундаментними енергетичними палями. Для масового впровадження енергетичних палей в новому будівництві необхідна коректна науково обґрунтована методика вибору оптимального конструктиву фундаментних енергетичних палей.

Ключові слова: енергетична паля, ґрунтовий тепловий насос, геотермальна енергія, енергетична ефективність

Вступ. Важливим напрямком енергоефективності є використання енергоефективних систем теплопостачання. Такими системами є системи з тепловими насосами для утилізації низькопотенціальної теплоти верхніх шарів земної кори. Актуальною науковою задачею є розвиток конструкцій теплових насосів для підвищення їхньої ефективності. На разі, розповсюдження набувають теплові насоси на основі вертикальних ґрунтових теплообмінників. При цьому перспективним є виконання цих теплообмінників у вигляді будівельних палей, так званих, енергетичних палей.

Актуальність дослідження. Ефективне застосування енергоефективних технологій в Україні потребує комплексного раціонального підходу. Так, улаштування теплонасосного обладнання на основі енергетичних палей дозволяє заощадити на спорудженні вертикальних колекторів.

Останні дослідження та публікації. Дослідження вертикальних ґрунтових теплообмінників – розповсюджена тема наукових розробок. Зокрема, найбільш глибокі дослідження проводять у США Т. Аміс, Х. Брандль, П. Д. Бьорн-Вебб та ін. Відомі роботи щодо моделювання вертикальних ґрунтових колекторів О. Кордаса і Є. Нікіфіровича. Також, конкретно моделюва-

нням роботи енергетичних палей займався білоруський спеціаліст С. Філатов

З виробничих компаній великий внесок у розвиток геотермальної енергетики на основі енергетичних палей здійснює фінська компанія Upronor.

Формулювання цілей статті. Аналіз впливу конструктивних особливостей енергетичних палей на їх теплову ефективність.

Основна частина. Енергетична паля – це будівельна фундаментна паля із замоноліченими всередині поліетиленовими трубопроводами, що в свою чергу є випарником теплового насоса (рис. 1). Таким чином, під час звичайних будівельних робіт відразу монтуються вертикальні свердловинні колектори теплового насоса. Проектування систем теплопостачання на основі теплових насосів з вертикальним ґрунтовим теплообмінником у вигляді енергетичних палей потребує чіткого розуміння товщини, довжини палей, кількості і діаметра U-подібних трубок, теплової потужності метра погонного палей та відстані між вітками.

Однією з головних характеристик енергетичних палей є кількість і діаметр труб у використаній конструкції. Їхній вплив на енергетичну ефективність чітко видно з графіка на рис. 2 [1], та табл. 1.

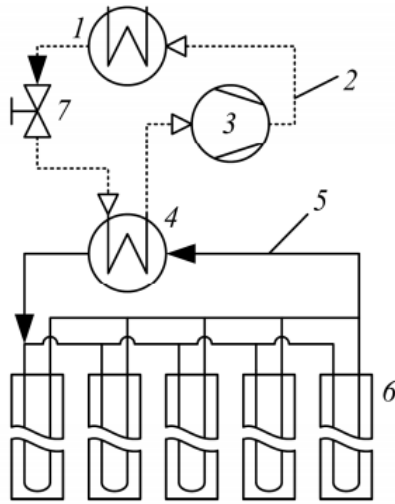


Рис. 1. Тепловий насос на основі енергетичних палей:
 1 – конденсатор; 2 – холодоагент; 3 – компресор;
 4 – випарник; 5 – проміжний теплоносій;
 6 – енергетична паля (випарник);
 7 – терморегулюючий вентиль.

Таблиця 1

Кількість і діаметр труб у конструкції

Кількість U-подібних труб	Типорозмір труб, мм
1	25×2,3; 32×3,0; 40×3,7; 50×4,6; 63×5,8
2	25×2,3; 32×3,0; 40×3,7; 50×4,6
3	25×2,3; 32×3,0; 40×3,7
4	25×2,3; 32×3,0; 40×3,7

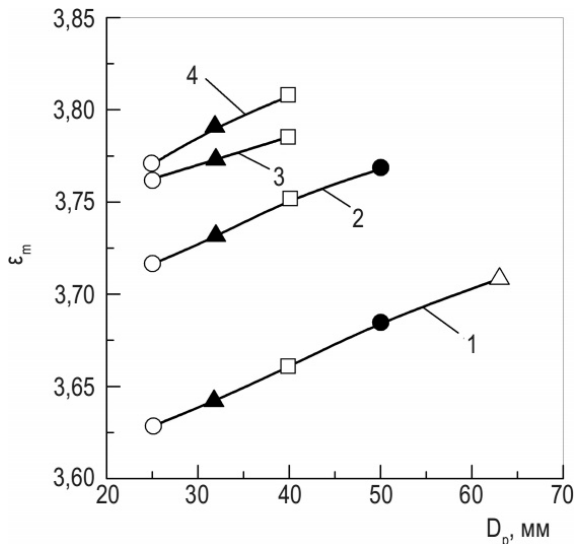


Рис. 2. Зміна середнього коефіцієнта перетворення від діаметра труб: ○-25х2,3, ▲-32х3,0, □-40х3,7, ●-50х4,6, △-63х5,8. Цифри показують кількість U-подібних труб

Показано зміну коефіцієнта перетворення в залежності від зовнішнього діаметра трубок теплообмінника. Точки на кривих відповідають конкретному зовнішньому діаметру труб вертикального ґрунтового теплообмінника у табл. 1.

Порівняно з однією трубою діаметром 25×3 мм, коефіцієнт перетворення колектора з чотирма U-подібними трубами діаметром 40×3,7 мм більший на 5 % [1]. Подальше збільшення кількості труб може привести до більшого росту енергетичних показників теплового насосу, що можна оцінити за допомогою чисельного моделювання. Для визначення оптимальної кількості і розмірів труб необхідно враховувати вартість труб, холодоагента тощо.

У [2] розглянуто вплив на роботу теплонасосного обладнання кроку укладки U-подібної трубки. З максимальним (рис. 3а) і мінімально (рис. 3б) можливим кроком s , мм, їхнього розміщення в енергетичній palі. Аналіз результатів проводився щодо зміни поточних значень теплопродуктивності Q , Вт, і коефіцієнта перетворення φ від безрозмірних параметрів

$$s = (s - s_{min}) / (s_{max} - s_{min}). \quad (1)$$

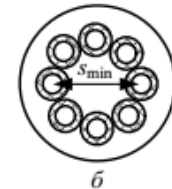
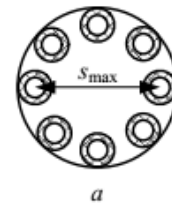


Рис. 3. Граничні випадки розташування труб в енергетичній palі.

Результати на рис. 4 показують зростання теплопродуктивності Q , Вт, і коефіцієнта перетворення φ з ростом кроку s , мм, кількості труб, що пояснюється збільшенням площі теплообміну і зниженням товщини шару заповнювача, а відповідно, і опору теплопередачі. Сумарний максимальний ефект збільшення теплопродуктивності та коефіцієнта перетворення становить, відповідно, 6 і 2 % порівняно з базовим варіантом. У порівнянні з ґрунтовим теплообмінником з однією U-подібної трубою з мінімальним кроком і діаметром ефект збільшення досягає, відповідно, 9 і 4 %. У [2] досліджено вплив на ефективність системи температури джерела теплоти (гранту) на поверхні свердловини $t_b, ^\circ\text{C}$. Отримано, що зниження температури від 8 до 0 °C протягом опалювального періоду призводить до падіння

теплопродуктивності 30 % і коефіцієнта перетворення до 10 %. Ця особливість обумовлена відбором акумульованого тепла в ґрунті і повинна враховуватися при проектуванні й дослідженні розглянутих систем. З урахуванням цього фактора досліджено вплив теплопровідності заповнювача свердловини λ_g на довжину труби в колекторі. При цьому визначалася довжина вертикального колектора H з необхідним запасом теплової потужності 30 %.

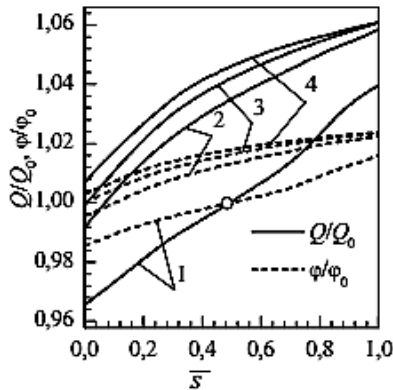


Рис. 4. Вплив відстані між трубами та їхнього діаметра на теплопродуктивність і коефіцієнт перетворення

Розглянуто два випадки. У першому випадку як заповнювач використовується поширений матеріал з теплопровідністю $\lambda_g = 2,3$ Вт/(м·К). У другому випадку вважається, що використовується заповнювач на основі раніше витягнутого при бурінні ґрунту, і його теплопровідність, Вт/(м·К), відповідає середній теплопровідності прилеглого ґрунту ($\lambda_g = \lambda$) з властивостями $\lambda = 1,8$ Вт/(м·К), $a = 0,76 \cdot 10^{-6}$ м²/с та $\lambda = 0,4$ Вт/(м·К), $a = 0,28 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Результати представлені на рис. 5 у вигляді залежності безрозмірного параметра $\Delta \bar{H}$:

$$\Delta \bar{H} = (1 - (H / H_0)) \cdot 100\%, \quad (2)$$

де H – довжина, м, вертикального ґрунтового теплообмінника, що відповідає заповнювачу з теплопровідністю, яка дорівнює теплопровідності ґрунту; H_0 – довжина теплообмінника, м, що відповідає заповнювачу з підвищеною теплопровідністю.

Видно, що застосування високотеплопровідного заповнювача для ґрунтових теплообмінників з чотирма трубами призводило до незначного зниження довжини на 1-4 %. Для цього випадку замість дорогих високотеплопровідних наповнювачів можна використовувати наповнювачі на основі ґрунту, витягнутого під час буріння.

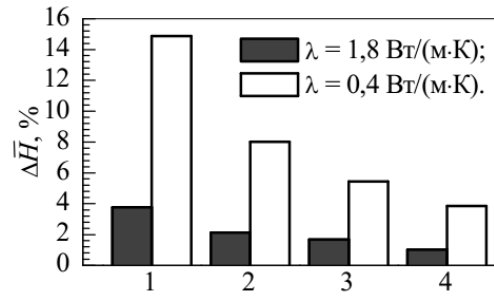


Рис. 5. Відносне зниження довжини вертикального ґрунтового теплообмінника за рахунок збільшення теплопровідності заповнювача

При проектуванні теплових насосів на основі енергетичних паль надзвичайно важливим є питання їх взаємовпливу, оскільки конструктив і несуча здатність встановлює певні границі рознесення фундаментних паль. У [3] наведено дані щодо залежності між діаметром U-подібних трубок теплообмінника та відстанню між свердловинами.

На основі математичного моделювання дуже невірніваженої гідротермодинамічної системи було встановлено, що відстань B (рис. 6) становить $50 D$. Тобто при стандартному діаметрі труб, що закладаються у вертикальні ґрунтові теплообмінники (20 мм), мінімально допустима відстань між фундаментними палями має становити 4 м. такі дані досить точно корелюють з рекомендаціями наданими в [6].

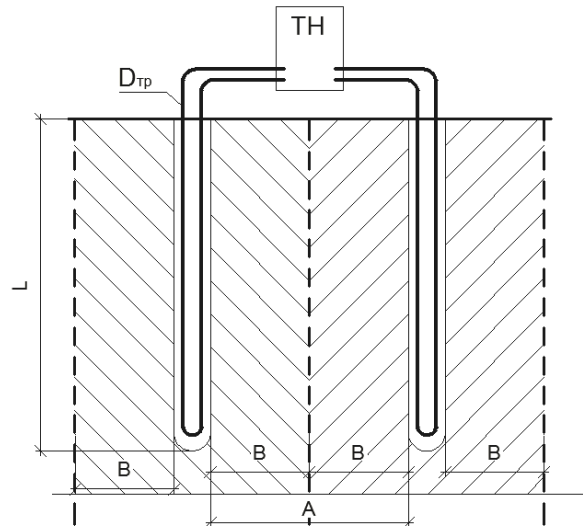


Рис. 6. Схема розміщення фундаментних паль

У свою чергу, як видно з розглянутих результатів досліджень, одна U-подібна трубка діаметром 20 мм не є найбільш ефективним рішенням конструкції вертикальних ґрунтових теплообмінників. Тому залежність, наведена в [3], є частковим випадком і не може розповсюджуватися на всі випадки. Також значний

вплив має теплопровідність заповнювача теплообмінника та ґрунту в якому його розташовано.

Питання розташування енергетичних паль потребує більш глибокого дослідження відносно великої кількості факторів і має мати наступний вигляд:

$$A = f(D_{mp}, n, \lambda_{ep}, \lambda_{zan}, H, s), \quad (3)$$

де A – відстань між свердловинами, м; D_{mp} – діаметр U-подібних трубок, м; n – кількість U-подібних трубок; λ_{ep} – теплопровідність ґрунту, Вт/(м·К); λ_{zan} – теплопровідність заповнювача теплообмінника, Вт / (м·К); H – глибина корисної частини теплообмінника; s – крок укладки U-подібної трубки.

Висновки. У роботі розглянуто конструктивні та енергетичні параметри енергетичних паль. Зокрема, розглянуті основні робочі параметри: кількість U-подібних трубок в конструкції палі; діаметр трубок; крок між трубками; теплопровідність заповнювача паль; відстань між палями. Проаналізовано відомі залежності впливу різноманітних параметрів палі на енергетичну ефективність теплового насоса, що працює на основі випарника виконаного з енергетичних паль. Також, запропонована

основа функціональної залежності відстані між енергетичними фундаментними палями та набором змінних параметрів вертикального ґрунтового теплообмінника

Перспективи подальших досліджень. Важливим напрямом наукових досліджень, пов'язаних з енергетичними палями, є розробка коректної методики проектування систем тепlopостачання на основі теплових насосів з таким обладнанням. Подальший розвиток теплових насосів на основі енергетичних паль зумовлюється складністю проектування таких систем. Необхідне глибоке дослідження параметрів енергетичних фундаментних паль та їхній вплив на проектні параметри будівлі та системи тепlopостачання, зокрема, несучу здатність фундаменту, теплопродуктивність, мінімально допустиму відстань між палями тощо.

Подяки. Велика подяка висловлюється компанії «W&H Engineering» за допомогу в спорудженні випробувального стенда теплового насоса з вертикальним ґрунтовым теплообмінником при кафедрі теплотехніки КНУБА та плідні консультації з питань теплонасосного обладнання.

Література

1. Филатов С. О. Численное моделирование и анализ энергетических параметров теплового насоса с многотрубными вертикальными грунтовыми теплообменниками / С. О. Филатов // Экология и промышленность. – 2013. - № 3. - С. 61-66.
2. Филатов С. О. Повышение эффективности систем теплоснабжения на основе использования теплоты грунта: / автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 01.04.14 / Филатов С.О. Национальная академия наук Беларуси, Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси».- Минск, 2015. – 25 с.
3. Кордас О. Моделирование энергетических характеристик геотермальных систем / Кордас О., Никифорович Е. И. // Прикладна гідромеханіка. – 2014. – Том 16, N 1. – с. 42–52
4. Acuna J. Distributed TRT – new insight on U-pipe and coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes: Doctoral Thesis in Energy Technology / Acuna J.; KTH School of Industrial Engineering and Management Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration. – Sweden, 2013. – 138 с.
5. Физические величины: справочник / А. И. Баби́чев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
6. Басок Б. И. Экспериментальный модуль гелиогеотермальной установки для теплоснабжения / Б.И. Басок // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 1. – С. 69–78
7. Мацевитый Ю. М. Восстановление теплового потенциала грунта за счет выбора рациональных режимов работы теплонасосной системы / Ю. М. Мацевитый, В.А. Тарасова, Д.Х. Харлампиди // Тезисы докладов и сообщений XIV Минского международного форума по тепло- и массообмену. – 2012. – Т. 1. – С. 736–739.
8. Гершкович В. Ф. Энергетические свай / В. Ф. Гершкович // СОК. – 2009. - №8 – с.47-50.
9. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – Чинні від 01.01.2014. – Київ: Укравхбудінформ, 2013. – V, 141 с.
10. Fan R. Heat transfer analysis of geothermal heat exchanger under coupled conduction and groundwater advection / R. Fan, Z. Ma // Acta Energetica Sinica. – 2006. – Iss. 11. – P. 1155–1162

References

1. Filatov S. O. “Численное моделирование и анализ энергетических параметров теплового насоса с многотрубными вертикальными грунтовыми теплообменниками.” *Экология і промисловість*, no. 3, 2013, pp. 61–66.
2. Filatov S. O. *Improving the efficiency of heat supply systems based on the use of ground heat*. Diss. Abstract. National Academy of Sciences of Belarus, State Scientific Institution "Institute of Heat and Mass Transfer named after AV Lykov of the National Academy of Sciences of Belarus", 2015.
3. Kordas O., Nikiforovich E. I. “Моделирование энергетических характеристик геотермальных систем.” Прикладна гідромеханіка *Applied hydromechanics*, vol. 16, no. 1., 2014, pp. 42–52.
4. Acuna J. *Distributed TRT – new insight on U-pipe and coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes*. Diss. KTH School of Industrial Engineering and Management Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration, 2013.
5. A. I. Babichev, N. A. Babushkina, A. M. Bratkovsky and others *Физические величины: справочник*. Energoatomizdat, 1991.
6. Basok, V.I. “Экспериментальный модуль геотермальной установки для теплоснабжения.” *Промышленная теплотехника*, vol. 28, № 1, 2006, pp. 69–78.
7. Matsevityi Yu. M., Tarasova V. A., Kharlampidi D. Kh. “Восстановление теплового потенциала грунта за счет выбора рациональных режимов работы теплонасосной системы.” *Тезисы докладов и сообщений XIV Мирового международного форума по тепло- и массообмену, Vol. 1*, 2012, pp. 736–739.
8. Gershkovich V. F. “Energeticheskie avai.” *SOK*, no. 8, 2009, pp. 47–50.
9. *Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia*. DBN V.2.5-67:2013, Ukrarkhbudinform, 2013.
10. Fan R., Ma Z. L. “Heat transfer analysis of geothermal heat exchanger under coupled conduction and groundwater advection.” *Acta Energetica Solaris Sinica*, no. 11, 2006, pp. 1155–1162.

УДК 621.577

Влияние конструктивных особенностей энергетической сваи на ее эффективность

А. В. Приймак¹, П. О. Пасичник², И. Т. Кузицкий³

¹ д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, 02opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3081-6057

² к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, pasichnik89@bigmir.net, ORCID: 0000-0001-8499-6949

³ асп., Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, kuzytskyi@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0337-7105

Аннотация. Важным направлением повышения энергоэффективности является использование энергоэффективных систем теплоснабжения. Такими системами являются системы с тепловыми насосами для утилизации низкопотенциальной теплоты верхних слоев земной коры. Актуальной научной задачей является развитие конструкций тепловых насосов для повышения их эффективности. Распространение получают тепловые насосы на основе вертикальных грунтовых теплообменников. При этом перспективным является выполнение этих теплообменников в виде строительных свай, так называемых, энергетических свай. При проектировании тепловых насосов на основе энергетических свай чрезвычайно важным является вопрос их взаимовлияния, поскольку конструктив и несущая способность устанавливает определённые границы разнесения фундаментных свай. В статье рассмотрены системы теплоснабжения с грунтовым тепловым насосом, у которого в качестве испарителя использовано строительные фундаментные сваи, так называемые, энергетические сваи. Проанализированы известные исследования по конструктивным особенностям энергетических свай и их влияние на энергетические показатели тепловых насосов. Установлено, что наименее исследованной областью в данной сфере является методика инженерного расчёта энергетических свай, а именно взаимное влияние энергетических свай друг на друга, то есть минимально допустимое расстояние между фундаментными энергетическими сваями. Для массового внедрения энергетических свай в новом строительстве необходимо корректная научно обоснованная методика выбора оптимального конструктива фундаментных энергетических свай.

Ключевые слова: энергетическая свая, грунтовой тепловой насос, геотермальная энергия, энергетическая эффективность

UDC 621.577

Influence of the Design Features of the Energy Pile on its Efficiency

O. Priymak¹, P. Pasichnyk², I. Kuzytskyi³

¹ Sc.D, prof. National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine., 02opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3081-6057

² PhD, associate professor. National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine., pasichnik89@bigmir.net, ORCID: 0000-0001-8499-6949

³ Post-graduate student. National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine., kuzytskyi@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0337-7105

Abstract. An important area of energy conservation is the use of energy efficient heat supply systems. Such systems are systems with heat pumps to utilize the low-potential heat of the upper layers of the earth's crust. The urgent scientific task is the development of designs of heat pumps to increase their efficiency. The distribution of heat pumps is acquired on the basis of vertical ground heat exchangers, with the promising implementation of these heat exchangers in the form of building piles, so-called power piles. The issue of their interaction is very important when designing heat pumps based on power piles, since the structural and bearing capacity establishes certain boundaries for the separation of foundation piles. Research of vertical soil heat exchangers is a popular theme of scientific developments, in particular, the most profound studies are conducted in the USA. Also, Belarusian specialists are specifically involved in the modelling of energy piles. Finnish companies make a major contribution to the development of geothermal energy based on power piles. The article deals with the systems of heat supply with a soil heat pump, which used as a evaporator building foundation piles, so-called power piles. The robots have constructively developed energy parameters of energy fingers. Considered basic working parameters: the number of U-piping tubes in the design of the piles; tube diameter; crock between piles; heat supply of the piles; distance between piles. Well-known studies on the design features of power piles and their impact on the energy performance of heat pumps are analysed. It was established that the least investigated area in this field is the method of engineering calculations of energy piles, namely, the mutual influence of energy piles one by one, that is, the minimum allowable distance between the foundation energy piles. For the mass implementation of power piles in the new construction, a scientifically sound method of selecting the optimal structure of the foundation energy piles is necessary.

Keywords: energy pile, soil heat pump, geothermal energy, energy efficiency.

Надійшла до редакції / Received 01.06.2018