

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЕЗОННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ

Б. В. Моркляник

Национальный университет «Львовская политехника»

ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, 79013, Украина. E-mail: morklyanyk@mail.ru

Температурное воздействие на горные породы является причиной возникновения в них дополнительных напряжений и деформаций, а также фазовых превращений (т. е. замерзания и оттаивания) поровой жидкости. При написании этой статьи ставилась цель наработать экспериментальный материал, необходимый для разработки методики, направленной на определение температурных полей в горных породах, в которых расположены коллекторы тепловых насосов. Представленные экспериментальные закономерности сезонной смены температуры на дневной поверхности основания в г. Львове и г. Днепропетровске. Была выполнена аппроксимация зависимостей сезонной смены температуры на дневной поверхности от времени. Рассмотрены конечные ряды тригонометрических функций (точнее, отрезок ряда Фурье) и ряд в виде смещенных полиномов Чебышева первого рода. Сделан вывод о том, что полученные в работе результаты могут быть использованы в качестве исходных данных для расчета оснований и фундаментов тепловых насосов.

Ключевые слова: грунтовые основания, температурные поля, температура, тепловые насосы.

ЗАКОНОМІРНОСТІ СЕЗОННОГО РОЗПОДІЛУ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ В ГРУНТОВІЙ ОСНОВІ

Б. В. Моркляник

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери 12, м. Львів, 79013, Україна. E-mail: morklyanyk@mail.ru

Температурний вплив на гірські породи є причиною виникнення в них додаткових напружень і деформацій, а також фазових перетворень (тобто замерзання і розмерзання) порової рідини. При написанні цієї статті ставилася мета напрацювати експериментальний матеріал, необхідний для розробки методики, спрямованої на визначення температурних полів в гірських породах, в яких розташовані колектори теплових насосів. Приведені експериментальні закономірності сезонної зміни температури на денній поверхні основи в містах Львові та Дніпропетровську. Була виконана апроксимація залежностей сезонної зміни температури на денній поверхні від часу. Розглянуто кінцеві ряди тригонометричних функцій (точніше, відрізок ряду Фур'є) і ряд у вигляді зміщених поліномів Чебишева першого роду. Зроблено висновок про те, що отримані в роботі результати можуть бути використані як вихідні дані для розрахунку основ і фундаментів теплових насосів.

Ключові слова: ґрунтові основи, температурні поля, температура теплових насосів.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Зависимость украинской экономики от импортных энергоресурсов заставляет искать все новые пути снижения затрат на отопление зимой и кондиционирование летом.

В этой связи значительный интерес представляет инновационная технология, основанная на использовании так называемых тепловых насосов.

Данная технология привлекательна хотя бы с той точки зрения, что для выработки одного и того же количества тепла тепловой насос потребляет в 2,5...4,5 электрической энергии меньше чем любой другой электрический нагревательный прибор. Если же тепловой насос используется в реверсном режиме (т.е. для отопления зимой и кондиционирования летом), то экономия энергии существенно возрастает по сравнению с приведенными цифрами.

Привлекательным является также тот факт, что в данный момент в Украине имеет место некоторый избыток электрической энергии. Кроме того, использование тепловых насосов для отопления и кондиционирования преимущественно в ночное время позволит существенно разгрузить электрические сети и еще сильнее снизить затраты на отопление (в Украине «ночной» тариф электрической энергии значительно ниже «дневного») [1].

Суть этой технологии заключается в том, что в

отопительный период на обогрев зданий и сооружений расходуется низко потенциальное природное тепло грунтовой толщи, а при кондиционировании избыток тепла не рассеивается в атмосфере, а отводится в грунтовое основание (если система работает в реверсном режиме, то имеет место накопление тепловой энергии).

Следует также отметить, что тепловые насосы получили значительное распространение в бедных природными ресурсами и промышленно развитых странах (Австрия, Швеция, Япония и др.), которые кроме всего прочего обладают высокой экологической культурой.

Эксплуатация грунтовых тепловых насосов приводит к подогреву оснований зданий (если насос работает в режиме кондиционирования) или их охлаждению (если насос работает в режиме отопления) (рис. 1, 2).

Кроме того, при наличии в основании подземных грунтовых вод, возможно их замерзание, что приводит к морозному пучению и изменению фильтрационных свойств грунтовых оснований. Также возможно размещение коллекторов тепловых насосов в железобетонных элементах конструкций, в которых, соответственно, возникают переменные температурные напряжения [2].

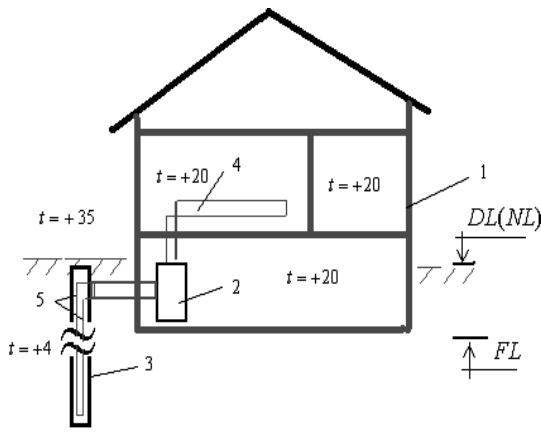


Рисунок 1 – Схема использования теплового насоса для кондиционирования воздуха: 1 – охлаждаемое здание; 2 – тепловой насос; 3 – U-подобный зонд (конденсатор); 4 – обогревательный прибор (испаритель); 5 – трубки теплообменника

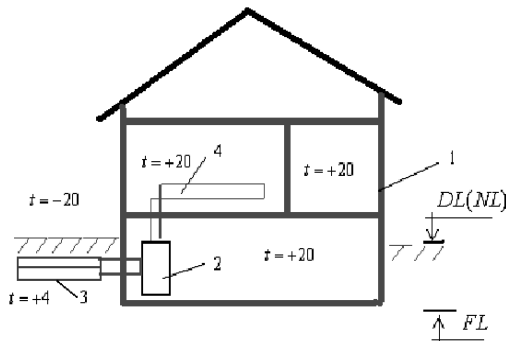


Рисунок 2 – Схема использования горизонтального коллектора для обогрева жилого помещения: 1 – отапливаемое здание; 2 – тепловой насос; 3 – горизонтальный коллектор; 4 – обогревательный прибор (испаритель)

Таким образом, при использовании грунтовых насосов для нужд кондиционирования и отопления возникают новые актуальные задачи геомеханики, которые требуют своего решения.

В частности, при устройстве тепловых насосов и особенно их грунтовых коллекторов следует учитывать конкретные природные условия. Последнее также определяет конструкцию и расположение теплового коллектора (т.е. наружного теплообменника).

Целью работы являлось определение, насколько точно можно (и можно ли вообще) выполнить моделирование температурных полей в грунтовой толще на протяжении годового цикла изменения температур для конкретных климатических условий.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Поставленная задача является базовой при теплотехнических расчетах грунтовых оснований тепловых насосов в случае их использования в качестве носителя, накопителя, преобразователя и источника тепловой энергии (о грунтовых коллекторах тепловых насосов и тепловых насосах вообще, а также об особенностях их использования см. в [3]).

Данное утверждение вполне справедливо, поскольку для учета влияния на температурный ре-

жим основания коллектора грунтового теплового насоса обязательно необходимо иметь представление об изменении в основании температурных полей и потоков в течении весенне-летне-осенне-зимнего цикла.

На решение очерченной проблемы и направлены изложенные ниже материалы теоретических исследований.

Задача исследований была сформулирована следующим образом. Известен закон изменения во времени температуры на верхней (при $z = 0$) $T_v(t)$ границе грунтового основания (рис. 3). Известно распределение температуры в основании по глубине $T_0(z)$ в момент времени $t = 0$.

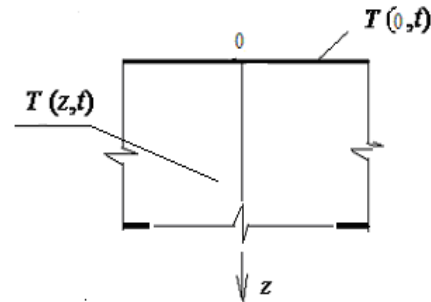


Рисунок 3 – Расчетная схема к определению температурных полей в основании

Известны плотность ρ и теплофизические характеристики основания (т.е. его удельная теплоемкость c_p и коэффициент теплопроводности λ).

Требуется определить теоретический закон распределения температуры в грунтовом основании и далее – выяснить, насколько теоретические закономерности распределения температурных полей по глубине грунтового основания отличаются от их фактических величин.

С физической точки зрения такая картина имеет место на вертикали, проходящей через центр неограниченного в плане основания [3, 4].

С математической точки зрения задача исследований сводится к решению уравнения теплопроводности вида [3–5]

$$a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

при выполнении начального и граничных условий вида:

$$\left. \begin{aligned} T(0, z) &= T_0(z); \\ T(t, 0) &= T_v(t); \\ z &\in (0, \infty). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (3)$$

Для того чтобы получить аналитическое решение (1) с учетом (2) следует представить граничное условие в аналитическом виде. Положим

$$\left. \begin{aligned} T_v(t) &= \sum_{i=0}^4 a_i \cdot T_i^*(\xi); \\ \xi &= \frac{t}{12}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь $T_i^*(x)$ – смещенные полиномы Чебышева первого рода [6]; a_i – установленные с использованием метода наименьших квадратов коэффициенты аппроксимации фактических зависимостей «температура дневной поверхности – время» для городов Днепропетровска и Львова [3].

Также нам известен дискретный закон изменения среднемесячной температуры грунтового основания в городах Днепропетровске и Львове, представленный на рис. 4 и 5.

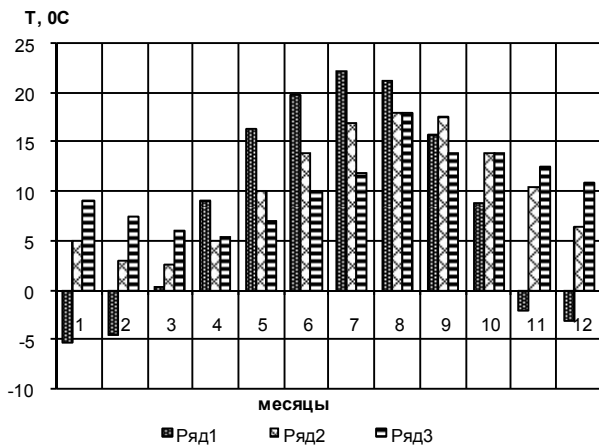


Рисунок 4 – Среднемесячные температуры грунтового основания в г. Днепропетровске за 2007–2008 гг.: ряд 1 – на дневной поверхности; ряд 2 – на глубине 1,6 м; ряд 3 – на глубине 3,2 м

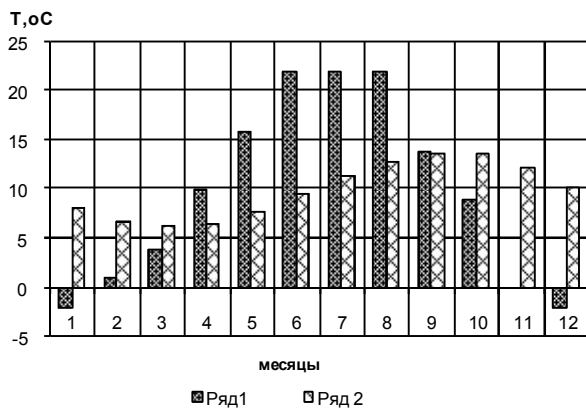


Рисунок 5 – Среднемесячные температуры грунтового основания в г. Львове за 2007–2008 гг.: ряд 1 – на дневной поверхности; ряд 2 – на глубине 3,2 метра

Требуется представить этот закон в виде конечного ряда непрерывных функций (т.е. выполнить аппроксимацию заданной в табличном виде функции). Аппроксимация выполнялась с использованием метода наименьших квадратов.

Рассматривались ряды вида

$$\left. \begin{aligned} T_v(t) &= a_0 + \sum_{i=1}^2 a_i \cdot \sin(2 \cdot i \cdot \pi \cdot \xi) + \sum_{i=1}^2 b_i \cdot \sin(2 \cdot i \cdot \pi \cdot \xi); \\ \xi &= \frac{t}{12}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} T_v(t) &= \sum_{i=0}^4 a_i^* \cdot T_i^*(\xi); \\ \xi &= \frac{t}{12}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь $T_v(t)$ – температура на дневной поверхности основания в момент времени t ; t – время в месяцах; a_i и b_i – коэффициенты аппроксимации с использованием отрезка тригонометрического ряда; a_i^* – коэффициенты аппроксимации с использованием первых пяти смещенных полиномов Чебышева первого рода [6].

В ходе аппроксимации составлялась переопределенная система линейных алгебраических уравнений, которая решалась методом наименьших квадратов [6, 7]. Полученные в ходе аппроксимации коэффициенты представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Коэффициенты аппроксимации сезонной температуры на дневной поверхности основания с использованием тригонометрических функций

Город	Коэффициенты				
	a_0	a_1	a_2	b_1	b_2
Днепропетровск	8,225	-7,020	0,216	-12,637	0,175
Львов	9,667	-5,220	1,155	-11,607	1,667

Фактические зависимости «Температура дневной поверхности-время» показаны на рис. 6 и 7. В качестве исходных приняты данные измерений за 2008 год.

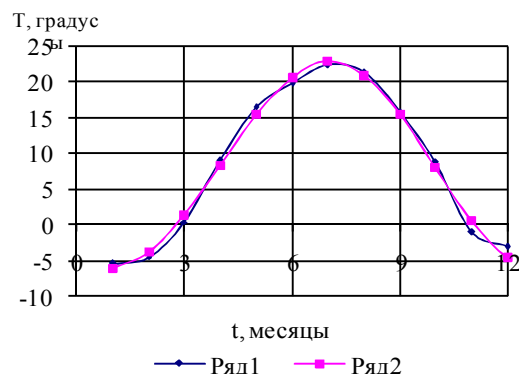


Рисунок 6 – Зависимость «Температура дневной поверхности - время» в г. Днепропетровске: 1 – фактическая, 2 – аппроксимация

Анализ представленных на рис. 6, 7 зависимостей показал, что расхождение между фактическими и теоретическими значениями температур не превышает 1°C.

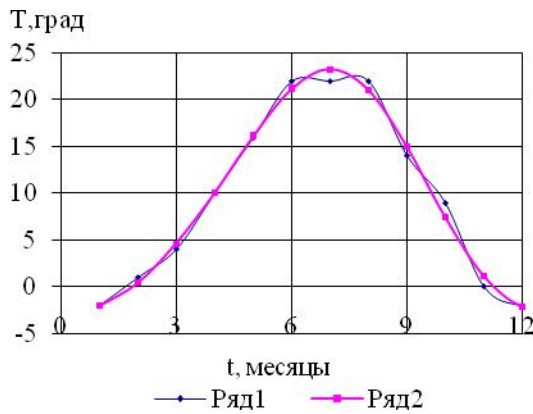


Рисунок 7 – Зависимость «Температура дневной поверхности – время» в г. Львове: 1 – фактическая; 2 – аппроксимация

Решение (1) с учетом (2)–(4) имеет вид:

$$T(z,t) = T_0 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{a \cdot t}}\right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{\sqrt{a \cdot \pi}} \cdot \int_0^t \frac{T_v(\xi)}{\sqrt{(t-\xi)^3}} \cdot \exp\left[-\frac{z^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)}\right] \cdot d\xi \quad (7)$$

В ходе численного эксперимента варьировались плотность грунтового основания, его теплоемкость и коэффициент теплопередачи [8]. Принятые в ходе численного эксперимента значения плотности, удельной теплоемкости и теплопроводности основания представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Принятые в ходе численного эксперимента значения теплофизических свойств основания

Удельный вес γ , кН/м ³	Удельная теплоемкость c_p , кДж/кг·град	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·град
15,50...20,00	0,50...2,00	0,50...2,00

При этом в качестве начальной температуры (т.е. температуры при $t = 0$) были приняты ее среднегодовые значения (для Днепропетровска $T_{cp} = 10,5$, а для г. Львова $T_{cp} = 9,9$).

Результаты расчета представлены на рис. 8–10.

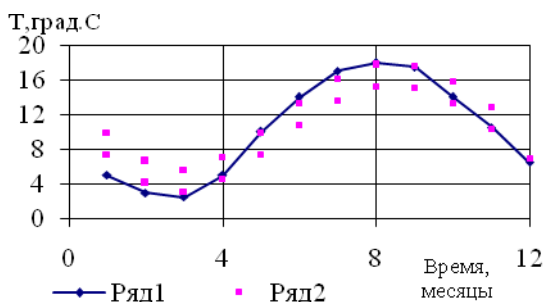


Рисунок 8 – Изменение температуры в Днепропетровске. Глубина $z = 1,6$ м: 1 – данные гидрометцентра; 2 – результаты расчета

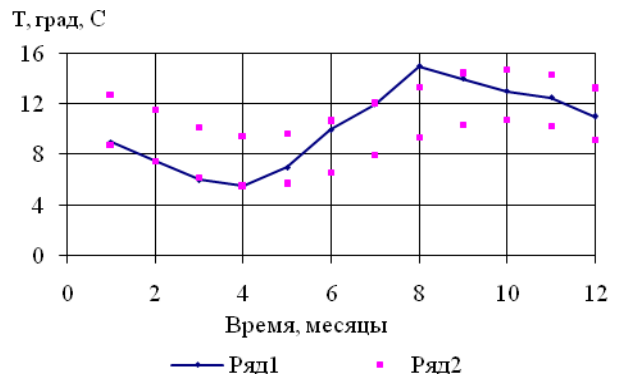


Рисунок 9 – Изменение температуры в Днепропетровске. Глубина $z = 3,2$ м: 1 – данные гидрометцентра; 2 – результаты расчета

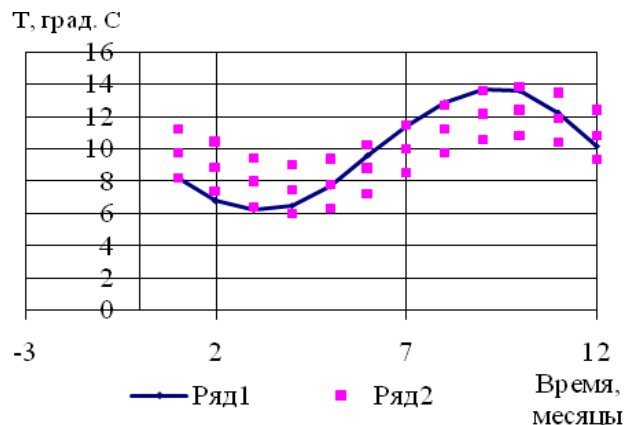


Рисунок 10 – Изменение температуры в г. Львове. Глубина $z = 3,2$ м: 1 – данные гидрометцентра; 2 – результаты расчета

ВЫВОДЫ.

1. Получено аналитическое решение об изменении температурного поля в грунтовом основании.
2. Показано что расчетные значения температур на разных глубинах имеют хорошее соответствие с их фактическими (т.е. измеренными) значениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко В.В. Системный подход к развитию энергетики Украины // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2012. – Вип. 3/2012 (74). – С. 28–31.
2. Brandl H. Energy foundation and other thermo-active ground structures // Geotechnique. – 2006. – № 2. – РР. 81–122.
3. Шаповал В.Г., Моркляник Б.В. Основания и фундаменты тепловых насосов. – Львов: Сполом, 2009. – 64 с.
4. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 1985. – 480 с.
5. Шаповал В.Г., Моркляник Б.В., Шаповал А.В. О целесообразности использования грунтовых оснований в качестве накопителей тепла // Збірник наукових праць (галузеви машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНУ, 2008. – Вип. 22. – С. 138–142.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1974. – 840 с.

7. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. – М.: Государственное изд-во физико-математической литературы, 1961. – 524 с.

8. Справочник инженера-конструктора жилых и общественных зданий / Ю.А. Дыховичный. – М.: Стройиздат, 1975. – 386 с.

REGULARITIES OF THE DISTRIBUTION OF THERMAL FIELDS IN THE SOIL FOUNDATION

B. Morklyanyk

Lviv Polytechnic National University

vul. S. Bandery, 12, Lviv, 79013, Ukraine. E-mail: morklyanyk@mail.ru

The temperature impact on the rocks is the cause of additional stress and strain on them and also phase transformations (freezing and thawing) of the pore fluid. In writing this article aim was to develop the experimental data needed for the development of methodic, directed at determining the temperature fields in rocks, in which are arranged the collectors of heat pumps. Is submitted the experimental patterns of seasonal change in temperature on the surface foundation in the city of Lviv and Dnipropetrovsk. Was performed approximation of seasonal change dependencies in temperature on the daily surface from the time. Were examined finite series of trigonometric functions (more precisely, a segment of the Fourier series) and a series of displaced Chebyshev polynomials of the first kind. It was concluded that the results obtained can be used as input data for the calculation of bases and foundations heat pumps.

Key words: bases, temperature fields, heat pumps, collectors, heat transfer.

REFERENCES

1. Shevchenko, V.V., (2012), "System approach to power industry development in Ukraine", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, iss. 3 (74), pp. 28–31.

2. Brandl, H. (2006), "Energy foundation and other thermo-active ground structures", *Geotechnique*, no. 2, pp. 81–122.

3. Shapoval, V.H. and Morklianyk, B.V. (2009), *Osnovanyia y fundamenty teplovykh nasosov* [Foundations of heat pumps.], Spolom, Lvov, Ukraine.

4. Kartashov, E.M. (1985), *Analytycheskiye metody v teoryi teploprovodnosti tverdukh tel* [Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids], Vysshaya shkola, Moscow, USSR.

5. Shapoval, V.H., Morklianyk, B.V., Shapoval, A.V. (2008), "On the feasibility of using soil bases as heat

storage", *Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo) of Poltava Yuri Kondratyuk State Technical University*, no. 22, pp. 138–142.

6. Korn, H. and Korn, T. (1974), *Spravochnyk po matematyke* [Mathematical Handbook], Nauka, Moscow, USSR.

7. Lantsosh, K. (1961), *Praktycheskiye metody prykladnoho analiza* [Practical Methods of Applied Analysis], Hosudarstvennoe izd-vo fyzyko-matematycheskoi lyteratury, Moscow, USSR.

8. Dykhovichny, Y.A. (1975), *Spravochnik inzhenera-konstruktora zhilyh i obschestvennyh zdany* [Reference Design Engineer residential and public buildings] Stroyizdat, Moscow, USSR.

Стаття надійшла 30.04.2015.