

© Б.В. Моркляник¹, В.Г. Шаповал², А.В. Халимендик², О.М. Иваськевич¹, В.М. Лавренюк¹

¹ Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина

² Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, Украина

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

© B. Morklyanyk¹, V. Shapoval², O. Khalymendyk², O. Ivaskevych¹, V. Lavreniuk¹

¹ Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

PROSPECTS FOR THE USE OF UNDERGROUND STRUCTURES AS A SOURCE OF THERMAL ENERGY

Мета. Під час написання даної статті переслідувалася мета звернути увагу наукової і технічної громадськості на перспективність застосування незайнятого (технологічно вільного) простору підземних споруд в якості джерела розподіленої теплової енергії, необхідної для опалення надземних і підземних об'єктів цивільного, промислового і спеціального призначення.

Методи. Теоретичні дослідження геотермічних процесів з використанням аналітичних математичних методів, а також методів механіки твердого тіла, що деформується. Аналіз і узагальнення результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

Результати досліджень. Показано, що використання підземних споруд в якості штучного середовища, в якому розташовано колектор (або колектори) теплових насосів дозволяє забезпечити отримання значної кількості теплової енергії, яка може бути еквівалентна енергії, наприклад, від спалювання вугілля, об'єм якого є рівним об'єму породи, що виймається при проведенні гірничої виробки аналогічних розмірів. При цьому частково вирішується проблема або повторного використання гірничих виробок, або підземних об'єктів, які не використовуються за своїм прямим призначенням, або підземних об'єктів, що є вилученими з виробничого ланцюжка, але продовжують перебувати в тривалому стійкому стані.

Наукова новизна. Отримано нове наближене рішення специфічної задачі про теплообмін плоского колектору теплового насоса з породним масивом. Отримано точне і наближене рішення задачі про теплообмін розташованого на деякій глибині колектору теплового насоса з нескінченною ґрунтовою основою. Встановлено, що вилучена з надр землі тепла енергія прямо пропорційна температурі в зоні розташування колектору теплового насоса і кореню квадратному з добутку коефіцієнта теплопередачі на щільність породи і її теплоємність. Встановлено, що швидкість вилучення теплової енергії з основи при постійній температурі породи в зоні її відбору з часом зменшується.

Практична значимість. Отримані авторами цієї роботи теоретичні результати дозволяють виконувати прогноз ефективності використання підземних споруд різного призначення в якості джерела теплової енергії.

Ключові слова: підземні об'єкти будівництва, ґрунтові теплові насоси, теплопереміщення, реверсивний процес нагріву - охолодження, тепла енергія.

Введение. В настоящее время имеет место проблема повторного использования подлежащих утилизации заброшенных подземных сооружений различ-

ного назначения [1-3]. К таким объектам обычно относят подземные горные выработки после отработки запасов полезных ископаемых и неиспользуемые по прямому назначению (в том числе заброшенные) подземные сооружения.

При повторном использовании обычно предпочтение отдаётся горным выработкам, пройденным в твердых горных породах, не подверженным обрушению или затоплению.

Нормативными документами не рекомендуется повторное использование таких выработок:

1. Тех, которые находятся в зонах возможных затоплений паводковыми водами, в том числе и при внезапном разрушении гидротехнических сооружений.

2. Устроены в таких породах:

– сильно обводнённых;

– слабых;

– неустойчивых или закарстованных;

– на участках с интенсивными оползневыми явлениями;

– склонных к самовозгоранию;

– склонных к выделению агрессивных веществ, вредных, взрывчатых и возгорающихся газов;

– имеющих повышенную радиоактивность;

– пересекающих участки с большими тектоническими нарушениями.

Повторное использование подземного пространства базируется на приспособлении уже имеющихся подземных выработок для новых целей. При этом в ряде случаев возникает необходимость выполнения дополнительных проходческих работ.

В настоящее время отработанные подземные горные выработки используют для устройства таких объектов [2-4]:

– хранилищ различных материалов (склады, резервуары воды, нефти, газа, нефтепродуктов и т.д.);

– объектов промышленности;

– гидроэлектростанций;

– тепловых электростанций;

– гидроаккумулирующих электростанций;

– предприятий по складированию, переработке и утилизации вредных (в том числе радиоактивных) отходов;

– сооружений гражданской обороны.

Проблема заключается в том, что согласно [5] для использования подземных выработок для размещения в них различных объектов их поперечные размеры должны быть не менее представленных в таблице 1. Это, в свою очередь, зачастую влечет за собой необходимость по расширению уже существующих подземных помещений.

Кроме того, размещение в подземных выработках различных объектов влечет за собой необходимость обязательного устройства:

1. Прямых и эвакуационных входов (выходов).

2. Подземного транспорта.

3. Внутренних строительных конструкций (в том числе ограждающих и несущих).
4. Систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, в том числе:
 - водоснабжения;
 - канализации и водоотлива;
 - теплоснабжения, холодоснабжения, газоснабжения.
5. Установку электротехнических устройства в том числе:
 - электроснабжения;
 - электрооборудования и кабельной сети;
 - электроосвещения.
6. Обеспечение пожарной безопасности подземных производств или складских помещений.

Таблица 1

Минимальные поперечные размеры подземных выработок при размещении в них объектов народного хозяйства

Помещения и объекты		Мин. размеры поперечных сечений выработок, м	
		ширина	высота
1.	Цехи, предназначенные для производства промышленной продукции	4,0-9,0	2,5-6,0
2.	Лаборатории, вспомогательные помещения	6,0	3,0
3.	Архивы, книгохранилища и хранилища музейных ценностей	4,0	2,5-4,5
4.	Склады и хранилища различной продукции, в том числе сельскохозяйственной	5,0-8	2,6-6,0
5.	Подземные гаражи и стоянки автомобилей	4,5-10,5	2,2-3,6

Изложенное позволило нам сделать вывод о том, что повторное использование подземных выработок для нужд ведения хозяйственной деятельности сопряжено со значительными материальными затратами, трудоемкостью и не всегда возможно или целесообразно.

В этой связи значительный интерес представляет относительно инновационная технология отопления и кондиционирования зданий и сооружений, основанная на использовании так называемых тепловых насосов [6-11].

Суть этой технологии заключается в том, что в отопительный период на обогрев зданий и сооружений расходуется низко потенциальное природное тепло грунтовой толщи. При кондиционировании избыток тепла не рассеивается в атмосфере, а отводится в грунтовое основание. Кроме того, при работе в реверсном режиме имеет место накопление тепловой энергии).

Отметим также, что тепловые насосы получили значительное распространение в бедных природными ресурсами и промышленно развитых странах (Австрия, Швеция, Япония), которые кроме всего прочего обладают высокой экологической культурой [6, 8].

Последнее косвенно свидетельствует о том, что при использовании тепловых насосов практически не возникает проблем экологического плана.

Остановимся подробнее на ключевых особенностях конструкции тепловых насосов. Основным элементом теплового насоса является тепловая машина (рис. 1).

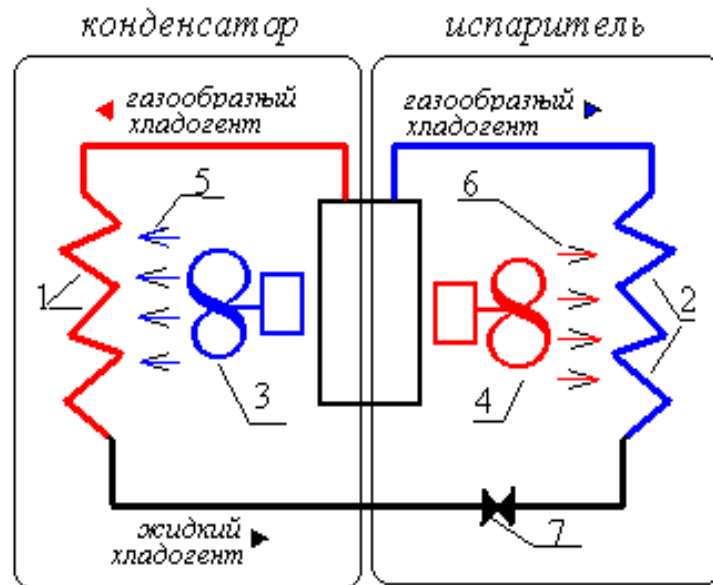


Рис. 1. Тепловая машина (схема): 1 – конденсатор; 2 – испаритель; 3 – вентилятор, охлаждающий испаритель; 4 – вентилятор, работающий на нагрев конденсатора; 5 – поток нагретого воздуха (жидкости); 6 – поток охлаждаемого воздуха (жидкости), 7 – дроссель

Принцип действия тепловой машины основан на тепловых эффектах фазовых переходов. Суть этих эффектов заключается в способности жидкости поглощать тепло при ее испарении и способности газа выделять тепло при его конденсации. Поэтому тепловые машины используют либо в качестве холодильника, либо в качестве отопительного прибора (нагревателя).

В случае использования тепловой машины в качестве холодильника процесс преобразования энергии организован так. Конденсатор находится снаружи охлаждаемого помещения, а испаритель – внутри. В процессе работы хладагент при испарении забирает тепло из помещения. Обычно в качестве хладагентов используют фторхлоруглеводороды.

Образовавшийся в процессе фазового перехода газ поступает в компрессор, который превращает его в пар высокого давления. В процессе сжатия выделяется значительное количество теплоты. Далее газ попадает в конденсатор, где он сжимается и переходит в жидкое состояние. При этом в окружающую среду (напри-

мер, в атмосферу) выделяется значительное количество тепла, которое рассеивается в ней. Далее давление хладагента снижается (обычно для этой цели используют капиллярную трубку) и он возвращается в испаритель, где вновь превращается в газ (при этом из окружающей среды вновь поглощается тепло).

Таким образом, при использовании тепловой машины в качестве холодильника имеют место четыре фазы цикла: сжатие; сжижение; расширение; испарение.

Однако тепловая машина является лишь частью теплового насоса, принцип действия которого заключается в том, что для обогрева некоторого объема здания из гораздо большего объема основания забирается низко потенциальное тепло.

При этом для того, чтобы охладить некоторый объем здания, мы должны повысить температуру гораздо большего объема грунта.

Для отбора (в случае функционирования теплового насоса в режиме отопления) или отвода (в случае функционирования теплового насоса в режиме охлаждения) тепла используют т.н. коллекторы тепловых насосов, которые занимают намного большую площадь, чем площадь отапливаемого помещения.

В зависимости от вида среды, в которой расположен коллектор теплового насоса различают такие системы тепловых насосов [6, 8]:

- «грунт – вода», (точнее «грунт – рассол»);
- «вода – вода», (иногда «вода – рассол»);
- «воздух – вода», (иногда «воздух – рассол»);
- фундамент (или фундаменты) – вода (или рассол).

Имеется также опыт размещения коллекторов тепловых насосов в подземных выработках (рис. 2).



Рис. 2. Монтаж коллектора теплового насоса на опытном участке в туннеле Ляйнцер (Австрия)

В таблице 2 представлены имеющиеся в литературе экспериментальные данные об удельной тепловой мощности отбора тепла из оснований, сложенных различными видами грунта. Представленные в таблице данные позволили нам сделать следующие выводы:

Значения удельной мощности отбора тепла из различных видов грунта представляют экономический интерес для использования грунтовых тепловых насосов;

Чем выше влажность грунта, тем больше тепловой энергии можно извлечь из основания.

В таблице 2 представлены данные для ограниченного количества видов грунтов (например, полностью отсутствуют данные для скальных пород).

Далее оценим, насколько реально использовать грунтовое основание в качестве накопителя тепловой энергии для произвольного вида вмещающей коллектор теплого насоса породы. Для определения порядка искомой величины достаточно рассмотреть одномерную (по координате) задачу так, как это было сделано авторами [6, 8].

Таблица 2

Удельные мощности отбора грунта из различных видов грунтовых оснований

Наименование грунта	Удельная мощность отбора тепла $q, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$
Сухой песок	10
Влажный песок	15,0 – 20,0
Сухой суглинок	20,0 – 25,0
Влажный суглинок	25,0 – 30,0
Суглинок, насыщенный водой	35,0 – 40,0

Рассмотрим температурное поле в центре параллельного дневной поверхности плоского коллектора теплого насоса неограниченных размеров в плане, расположенного в грунтовом основании на глубине h .

Такая расчетная схема имеет место в центре плоского коллектора теплого насоса.

Задача исследований была сформулирована так.

Известны температура на верхней (при $z = 0$) $T_{v1}(t)$ и нижней границе (при $z = H$) $T_{v2}(t)$ грунтового основания (рис. 3).

Известно распределение температуры в основании по глубине $T_0(z)$ в момент времени $t = 0$.

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

На глубине h расположен коллектор теплого насоса (зимой) и кондиционера (летом), в котором постоянно поддерживается температура $T_w(t)$ (рис. 3).

При этом между частями основания выше и ниже коллектора существует идеальный термический контакт [12].

Требуется определить распределение в основании температуры, а также количество отведенной за некоторый расчетный период времени t_0 тепловой энергии основания Q .

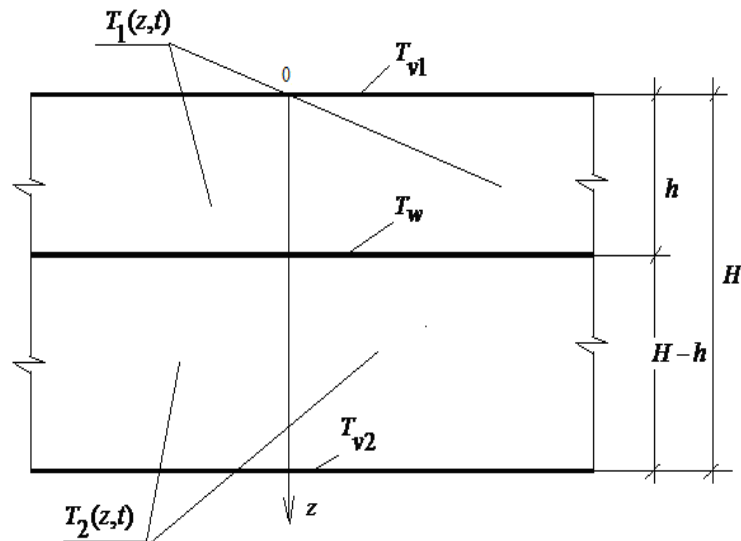


Рис. 3. К определению тепловой энергии основания

С физической точки зрения, представленная на Рис. 3. расчетная схема имеет место на вертикали, проходящей через центр неограниченного в плане плоского параллельного земной поверхности коллектора.

С математической точки зрения задача исследований сводится к решению системы уравнений теплопроводности вида [12]:

$$\left. \begin{aligned} a \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} - \frac{\partial T_1}{\partial t} &= 0; \\ a \cdot \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} - \frac{\partial T_2}{\partial t} &= 0; \\ a &= \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

при выполнении начального и граничных условий вида:

$$\left. \begin{aligned} T_1(0, z) &= T_0, \text{ при } z \in (0, h); \\ T_2(0, z) &= T_0, \text{ при } z \in (h, H); \\ T_1(t, 0) &= T_{v1}(t); \\ T_1(t, h) - T_2(t, h) - T_w(t) &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial z} T_1(t, h) - \frac{\partial}{\partial z} T_2(t, h) &= 0; \\ T_2(t, H) &= T_{v2}(t). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

и дальнейшего вычисления интеграла вида

$$Q = \lim_{z \rightarrow h} \left\{ \int_0^t \lambda(z) \cdot \frac{\partial T(z, \xi)}{\partial z} \cdot d\xi \right\}. \quad (3)$$

Здесь $T_1(z, t)$ – температура основания при $z \in (0, h)$; $T_2(z, t)$ – температура основания при $z \in (h, H)$; Q – "закачанная" в основание за время t тепловая энергия, отнесенная к одному квадратному метру коллектора; $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ – коэффициент температуропроводности [12, 13].

Для нахождения оценочных величин упростим задачу исследований, положив в (1):

$$\left. \begin{aligned} T_2(0, z) = 0 \quad \text{при} \quad z \in (h, H); \\ T_1(t, 0) = 0; \\ T_w(t) = T_w = \text{const}; \\ T_1(t, h) - T_2(t, h) - T_w = 0; \\ \frac{\partial}{\partial z} T_1(t, h) - \frac{\partial}{\partial z} T_2(t, h) = 0; \\ H = \infty; \\ T_1(0, z) = 0 \quad \text{при} \quad z \in (0, h); \end{aligned} \right\} T_2(t, \infty) = 0. \quad (4)$$

Для нахождения решения (1) с учетом (4) применим к ним одностороннее преобразование Лапласа по временной переменной. Для (1) имеем:

$$\left. \begin{aligned} a \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} - \omega \cdot T_1 &= 0; \\ a \cdot \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} - \omega \cdot T_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

При этом начальное и граничные условия (1) в области изображений по Лапласу имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} T_1(\omega, 0) &= 0; \\ T_w(\omega) &= \frac{T_w}{\omega}; \\ T_1(\omega, h) - T_2(\omega, h) - \frac{T_w}{\omega} &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial z} T_1(\omega, h) - \frac{\partial}{\partial z} T_2(\omega, h) &= 0; \\ T_2(\omega, \infty) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь ω – параметр интегрального преобразования Лапласа по переменной "t" [14]

Общее решение (5) с учетом начального и граничных условий имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} T_1(\omega) &= \frac{T_w}{2} \cdot \left\{ \begin{aligned} &\exp \left[-\sqrt{\frac{\omega}{a}}(h - z) \right] - \\ &- \exp \left[-\sqrt{\frac{\omega}{a}}(h + z) \right] \end{aligned} \right\}; \\ T_2(\omega) &= -\frac{T_w}{2} \cdot \left\{ \begin{aligned} &\exp \left[-\sqrt{\frac{\omega}{a}}(z - h) \right] + \\ &+ \exp \left[-\sqrt{\frac{\omega}{a}}(h + z) \right] \end{aligned} \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Далее найдем оригинал (7). Имеем:

$$\left. \begin{aligned} T_1(z, t) &= \frac{T_w}{2} \cdot \left\{ \begin{aligned} &erfc \left[-\frac{(h-z)}{2\sqrt{a \cdot t}} \right] - \\ &-erfc \left[-\frac{(h+z)}{2\sqrt{a \cdot t}} \right] \end{aligned} \right\} \text{ при } z \in (0, h); \\ T_2(z, t) &= -\frac{T_w}{2} \cdot \left\{ \begin{aligned} &erfc \left[-\frac{(h-z)}{2\sqrt{a \cdot t}} \right] + \\ &+erfc \left[-\frac{(h+z)}{2\sqrt{a \cdot t}} \right] \end{aligned} \right\} \text{ при } z \in (h, \infty). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Далее найдем дифференциал тепловой энергии Q . С учетом (3) имеем $dQ = \lambda \cdot \left[\frac{\partial T_1(z, t)}{\partial z} + \frac{\partial T_2(z, t)}{\partial z} \right]$, откуда:

$$dQ = \frac{\lambda \cdot T_w}{\sqrt{\pi \cdot a \cdot t}} \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{(h-z)^2}{4 \cdot a \cdot t} \right] + \exp \left[-\frac{(h+z)^2}{4 \cdot a \cdot t} \right] \right\}. \quad (9)$$

Далее положим в (9) $t = \xi$ и проинтегрируем полученное таким образом выражение на интервале $\xi \in (0, t)$. Имеем:

$$Q = \frac{2 \cdot \lambda \cdot T_w \cdot h}{a} \cdot \left\{ \begin{aligned} &\frac{\sqrt{a \cdot t}}{\sqrt{\pi} \cdot h} \cdot \left\langle 1 + \exp \left[-\frac{h^2}{a \cdot t} \right] \right\rangle + \\ &erf \left(\frac{h}{\sqrt{a \cdot t}} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Для удобства анализа приведем (10) к безразмерному виду. Для этой цели положим $\xi = \frac{\sqrt{a \cdot t}}{h}$ и $Q_0 = \frac{2 \cdot \lambda \cdot T_w \cdot h}{a}$. С учетом этих обозначений имеем:

$$\left. \begin{aligned} Q &= Q_0 \cdot Q^*; \\ Q^* &= \left\{ \frac{\xi}{\sqrt{\pi}} \cdot \left\langle 1 + \exp \left[-\frac{1}{\xi^2} \right] \right\rangle + erf \left(\frac{1}{\xi} \right) \right\}; \\ \xi &= \frac{\sqrt{a \cdot t}}{h}; \\ Q_0 &= \frac{2 \cdot \lambda \cdot T_w \cdot h}{a}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

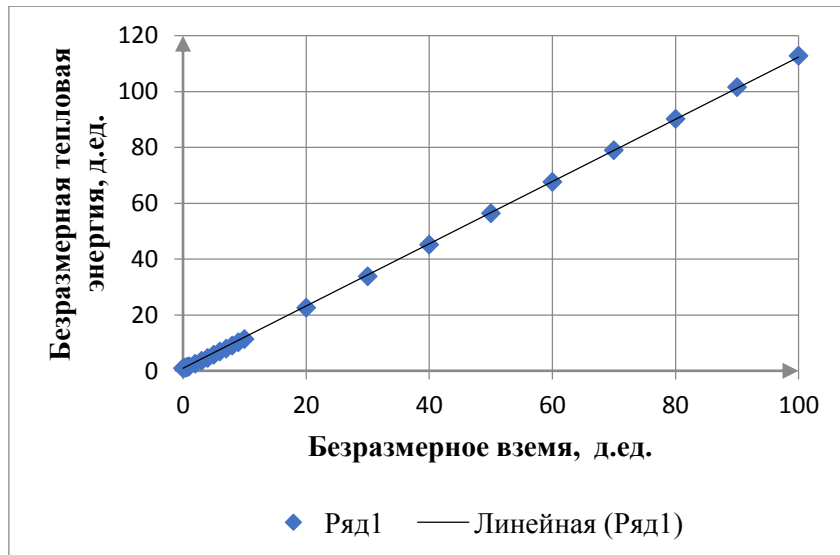
В графической форме зависимость безразмерной тепловой энергии Q^* от безразмерного времени ξ и ее аппроксимация представлена на рис. 4.

Оказалось, что с достаточной степенью точности (коэффициент корреляции $R = 0,999$) второе сверху равенство (11) может быть представлено в виде:

$$Q^* = 1,13 \cdot \xi. \quad (12)$$

С учетом (12) окончательно представим равенство (11) и окончательное решение задачи в виде:

$$\left. \begin{aligned} Q &= 1,13 \cdot Q_0 \cdot \xi; \\ \xi &= \frac{\sqrt{a \cdot t}}{h}; \\ Q_0 &= \frac{2 \cdot \lambda \cdot T_w \cdot h}{a}; \\ a &= \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Рис. 4. К аппроксимации зависимости Q^*

Примечание. Точками отмечены фактические значения функции Q^* , а сплошной линией – аппроксимация.

Вернувшись к обычным (размерным) переменным, мы получим такие простые формулы для расчета количества извлеченной за расчетное время из основания тепловой энергии Q и скорости ее извлечения $\frac{dQ}{dt}$:

$$\left. \begin{aligned} Q &\approx 2,26 \cdot T_w \cdot \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p \cdot t}; \\ \frac{dQ}{dt} &\approx 1,13 \cdot T_w \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot \rho \cdot c_p}{t}}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Анализ представленных в (14) формул позволил нам сделать следующие выводы:

1. Количество извлеченной из недр земли тепловой энергии прямо пропорционально температуре, которая имеет место в зоне расположения коллектора теплового насоса T_w и корню квадратному из произведения коэффициента кондуктивной теплопередачи на плотность породы и ее теплоемкость.
2. Зависимость количества извлеченной из породы тепловой энергии от времени описывается возрастающей во времени функцией.
3. При этом скорость извлечения из основания тепловой энергии имеет вид убывающей во времени функции.
4. При прочих равных условиях количество извлеченной из основания тепловой энергии не зависит от глубины, на которой размещен коллектор теплового насоса.

Заметим, что последнее утверждение имеет только теоретическое значение, поскольку в реальных условиях распределение в грунтовой толще температуры зависит от притока тепла из недр Земли и теплообмена на границе дневной поверхности.

Далее исследуем полученные нами теоретические результаты.

Для проведения численного эксперимента используем представленные в таблице 3 данные.

Вначале найдем удельную мощность отбора тепла. Для этого положим в нижнем равенстве (14) $t = 1$ час и $T_w = 1^{\circ}C$.

Рассчитанные таким образом значения удельная мощности отбора тепла из основания сведены в пятом столбце таблицы 3. Сопоставления этих значений с представленными во втором столбце таблицы 3 экспериментальными данными (таблица 2) позволило нам сделать вывод об их удовлетворительном соответствии. Это свидетельствует о достаточно высокой точности выполненного нами теоретического прогноза.

Таблица 3

Условия проведения и результаты численного эксперимента

Материал	Плотность, $\frac{кг}{м^3}$	Теплопроводность, $\frac{ватт}{м \cdot град}$	Теплоемкость, $\frac{ватт \cdot час}{кг \cdot град}$	Удельная мощность отбора тепла $q = 1,13 \cdot T_w \cdot \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p}, \frac{Вт}{м^2}$
1	2	3	4	5
Песок сухой	1500	0,33	0,00022	12
Песок влажный	1650	1,13	0,00058	37
Глина	1600--2900	0,7-0,9	0,00021	17-20
Гранит	2600--3000	3,5	0,00024	53-57

Далее выполним оценку экономической эффективности использования существующих подземных выработок для производства теплоэнергии с использованием грунтовых тепловых насосов.

Рассмотрим 1 метр длины выработки прямоугольной формы с размерами поперечного сечения 3 на 3 метра, при этом предположим, что вся вынимаемая породная толща будет сложена углем.

С учетом того, что удельный вес угля равен 1,2-1,5 тонны/куб.м, вес добытого в данном сечении угля равен:

$$P_{\text{угля}} = 3 \cdot 3 \cdot 1 \cdot (1,2 \div 1,5) = 10,8 - 13,5 \text{ тонн} = 10800 - 13500 \text{ кг.}$$

С учетом того, что принятая в исследованиях теплота сгорания одного килограмма угля колеблется от $q_{\text{угля}} = 2,22 \frac{\text{ватт} \cdot \text{час}}{\text{кг}}$ (бурый уголь) до $q_{\text{угля}} =$

$7,50 \frac{\text{ватт} \cdot \text{час}}{\text{кг}}$ 7,5 (антрацит), при сжигании добытого из выработки угля выделится такое количество тепловой энергии:

$$Q_{\text{угля}} = P_{\text{угля}} \cdot q_{\text{угля}} = (10800 \div 13500) \cdot (2,22 \div 7,5) \left. \vphantom{Q_{\text{угля}}} \right\} \\ = (23975 \div 101250) \text{ ватт} \cdot \text{час} \quad (15)$$

Далее найдем количество тепловой энергии, которое может быть добыто из этой выработки с использованием теплового насоса. Допустим, что коллекторы теплового насоса расположены по всей внутренней поверхности выработки так, как это показано на рисунке 2.

Кроме того, допустим, что 180 суток тепловой насос работает в режиме отопления, а 180 суток – в режиме кондиционирования.

Вначале найдем площадь поверхности выработки. Имеем:

$$F_{\text{выр}} = 4 \cdot (3,0\text{м} \cdot 1,0\text{м}) = 12 \text{ кв. м}$$

Далее с использованием верхнего равенства (14) и представленных в таблице 3 данных найдем удельную тепловую энергию, отобранную из основания за полгода. Имеем:

$$q_{\text{т.н.}} \approx 2,26 \cdot 1^\circ\text{C} \cdot \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p \cdot (24\text{час}) \cdot (180\text{сут})} = \\ = 148,5 \cdot \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p}$$

С учетом того, что 180 суток тепловой насос работает в режиме отопления, а 180 суток в режиме кондиционирования, найдем:

$$q_{\text{т.н.}} = 2 \cdot 148,5 \cdot \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} = (3100 \div 14913) \frac{\text{ватт} \cdot \text{час}}{\text{кв. м.}}$$

Для того, чтобы найти тепловую энергию, полученную из расчетного сечения выработки, умножим ее площадь на рассчитанное ранее значение удельной тепловой энергии. Имеем:

$$Q_{\text{т.н.}} = F_{\text{выр}} \cdot q_{\text{т.н.}} = \\ = (3100 \div 14913) \frac{\text{ватт} \cdot \text{час}}{\text{кв. м.}} \cdot 12 \text{ кв. м.} = \left. \vphantom{Q_{\text{т.н.}}} \right\} \\ = (37023 \div 101250) \text{ ватт} \cdot \text{час} \quad (16)$$

Сопоставление (15) и (16) позволило нам сделать вывод о том, что использование отработанной выработки для размещения в ней коллектора теплового насоса позволит только за один год ее эксплуатации получить количество тепловой энергии, сопоставимое с энергией, полученной при сжигании добытого из этой выработки угля.

В целом, изложенные в настоящей работе материалы исследований позволили нам сделать такие выводы:

1. Имеет место проблема утилизации заброшенных подземных выработок, которые, помимо всего прочего, представляют экологическую опасность для окружающей среды.

2. Традиционные методы повторного использования подлежащих утилизации подземных выработок как правило весьма трудоемки, материалоемки и дорогостоящи.

Кроме того, подлежащие повторному использованию выработки обязаны удовлетворять жестким условиям прочности, устойчивости, экологии, минимальных размеров и геометрии.

3. Существует эффективная инновационная технология отопления зданий, сооружений и подогрева воды с использованием так называемых тепловых насосов. Эта технология позволяет экономить невозобновляемые источники энергии (газ, нефть, уголь и т.д.). В ее основе лежит использование для нужд отопления и подогрева воды низкопотенциального тепла окружающей среды.

4. При использовании для нужд отопления зданий и сооружений и подогрева воды тепловых насосов в настоящее время используют такие источники тепла:

- грунтовые основания и устроенные в них выработки;
- водные источники (реки, озера, моря, океаны и т.д.);
- воздух.

5. Наиболее перспективным для использования в реверсном режиме (летом – для нужд охлаждения помещений, а зимой – для их отопления) являются водо- и неводонасыщенные грунтовые основания и подземные выработки.

6. Получены точные и приближенные решения задачи о теплообмене расположенного на некоторой глубине коллектора теплового насоса с бесконечным грунтовым основанием. Было установлено следующее:

– извлеченная из недр земли тепловая энергия прямо пропорциональна температуре в зоне расположения коллектора теплового насоса и корню квадратному из произведения коэффициента теплопередачи на плотность породы и ее теплоемкость.

– скорость извлечения из основания тепловой энергии при постоянной температуре породы в зоне ее отбора с течением времени уменьшается;

– имеет место удовлетворительное соответствие между экспериментальными и расчетными значениями удельных мощностей отбора тепла из основания.

7. При прочих равных условиях количество тепловой энергии, извлеченной из отработанной подземной выработки с использованием теплового насоса, сопоставимо с энергией, полученной при сжигании добытого из этой же выработки угля.

8. При прокладке коллекторов тепловых насосов в заброшенных подземных выработках к состоянию последних предъявляются гораздо более слабые требования, чем к выработкам, в которых расположены производства и складские помещения. Более того, количество тепловой энергии, добытой из затопленных подземных выработок, значительно превышает количество энергии, извлеченной из осушенной выработки.

Кроме того, требования к прочности и устойчивости выработок, в которых расположены обслуживаемые и, тем более необслуживаемые, коллекторы

тепловых насосов значительно менее жесткие чем к подземным выработкам, в которых работают люди и находятся материальные ценности.

Перечень ссылок

1. Ермаков, В.Н., Семенов, А.П., & Улицкий, О.А. (2001). Развитие процессов подтопления земной поверхности под влиянием закрытия шахт. *Уголь Украины №6*.
2. Повторное использование подземных сооружений и отработанных горных выработок. (n.d.). Retrieved from http://remontikas.ru/interesno/Povtornoe_ispolzovanie_podzemnyh_sooruzheniy_i_otrabotannyh_gornyh_vyrabotok.
3. Сальник, В. (2012). Атомные электростанции уйдут под землю. *Vigness.ru*.
4. Бетке, Ф. (2010). Электричество из-под земли. *Экономика и бизнес*, 44-46.
5. Объекты народного хозяйства в подземных горных выработках. (1985) *СНиП 2.01.55-85*
6. Моркляник, Б.В. (2015). *Закономірності деформування геомеханічної системи «фундамент–грунтовий масив» в зоні дії колектора теплового насоса*. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Дніпропетровськ.
7. Шаповал, В.Г., Моркляник, Б.В., & Шаповал, А.В. (2008). О целесообразности использования грунтовых оснований в качестве накопителей тепла. *Збірник наукових праць, серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава, 22, 138-142.
8. Шаповал, В.Г., & Моркляник, Б.В. (2009). *Основания и фундаменты тепловых насосов: монография*. Львов: СПОЛОМ.
9. Геотермические тепловые насосы для отопления и приготовления горячей расходной воды (2009). *Тетрадь проектанта*. Киев. Junkers-2009.
10. Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81–122.
doi:10.1680/geot.2006.56.2.81
11. Brandl, H. (1998). Energy piles and diaphragm walls for heat transfer from and into the ground. *Proceeding of the 3-h international Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*. Ghent. Technical University. Vienna. Austria-1998. 38-60.
12. Карташов, Э.М. (1985). *Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел*. Москва: Высш.шк.
13. Теплофизические расчеты объектов народного хозяйства, размещаемых в горных выработках (n.d.) *Пособие к СНиП 2.01.55-85*
14. Корн, Г., & Корн, Т. (1974). *Справочник по математике*. Москва: Наука.

АННОТАЦИЯ

Цель. При написании данной статьи преследовалась цель привлечь внимание научной и технической общественности на перспективность применения неиспользуемого пространства подземных сооружений в качестве источника распределенной тепловой энергии, необходимой для отопления надземных и подземных объектов гражданского, промышленного и специального назначения.

Методы. Теоретические исследования геотермических процессов с использованием аналитических математических методов, а также методов механики твердого деформируемого тела. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Результаты исследований. Показано, что использование подземных сооружений в качестве искусственной среды, в которой расположен коллектор (или коллекторы) тепловых насосов позволяет обеспечить получение значительного количества тепловой энергии, которое, как минимум, сопоставимо с энергией, полученной, например, при сжигании извлеченного из этой

выработки угля. При этом частично решается проблема либо повторного использования горных выработок, либо не используемых по своему прямому назначению, либо изъятых из производственной цепочки, но продолжающих находиться в длительном устойчивом состоянии подземных сооружений.

Научная новизна. Получено новое приближенное решение специфической задачи о теплообмене плоского коллектора теплового насоса с горной породой. Получены точное и приближенное решения задачи о теплообмене расположенного на некоторой глубине коллектора теплового насоса с бесконечным грунтовым основанием. Установлено, что извлеченная из недр земли тепловая энергия прямо пропорциональна температуре в зоне расположения коллектора теплового насоса и корню квадратному из произведения коэффициента теплопередачи на плотность породы и ее теплоемкость. Установлено, что скорость извлечения из основания тепловой энергии при постоянной температуре породы в зоне ее отбора с течением времени уменьшается.

Практическая значимость. Полученные авторами настоящей работы теоретические результаты позволяют выполнять прогноз эффективности использования подземных сооружений различного назначения в качестве источников тепловой энергии.

Ключевые слова: *подземные выработки, грунтовые тепловые насосы, тепломассоперенос, реверсивный процесс нагрева – охлаждения породы, тепловая энергия*

ABSTRACT

Purpose. The paper is intended to pay attention of scientific community and technical community to the application prospects of underground permanent mine workings (and not only them) as a source of distributed energy required to heat both surficial and underground facilities.

Methodology. Theoretical studies, concerning geothermal processes with the use of analytical mathematical methods, have been carried out. The results of the theoretical studies and experiments have been analyzed and generalized.

Findings. It has been demonstrated that use of underground mine workings as an artificial medium, within which thermal pump manifold (or manifolds) is placed, makes it possible to generate such an amount of thermal energy which can be compared minimally with the energy generated in the process of combustion of the coal extracted from the mine working. In this context, a problem of reuse of mine working, excluded from a production chain but remained to keep their long-lasting stable state, can be solved partially.

Scientific novelty. A new approximate solution of specific problem, concerning heat exchange between a flat-plain manifold and a rock, has been obtained. The following has been determined: the thermal energy, extracted from earth interior, is proportional directly to the temperature within the location of a manifold of thermal pump as well as square root of production of conductive heat transfer coefficient per rock density, and its heat capacity; velocity of the thermal energy extraction from the subsoil in the context of constant rock temperature within the area of its extraction decreases with the course of time; and satisfactory correspondence between experimental values and analytical values of specific capacities as for the heat extraction from a subsoil takes place. Under otherwise equal conditions, the amount of the thermal energy, extracted from the mined-out working by means of thermal pump, can be comparable with the energy generated during combustion of coal which was extracted from the mine working.

Practical relevance. The theoretical results, obtained by the paper authors, make it possible to forecast efficient use of mine workings as thermal energy sources.

Keywords: *underground mine workings, soil thermal pumps, heat and mass transfer, reverse process of rock heating-cooling, thermal energy.*