

ВЕНГЕРОВ И.Р. (Донецкий физико-технический институт НАНУ), КОСТЕНКО В.К., ТОЛКАЧЕВ О.Э., САЛЕХИРАДЖ С. (Донецкий национальный технический университет)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШАХТНОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Приведено рішення задачі тепломасопереносу в шахтному геотермальному теплообміннику, що використовується для витягання теплоти надр з метою її утилізації. Отримано залежності, необхідні для оптимізації технологічних параметрів промислових установок.

Приведено решение задачи тепломассопереноса в шахтном геотермальном теплообменнике, используемом для извлечения теплоты недр с целью ее утилизации. Получены зависимости, необходимые для оптимизации технологических параметров промышленных установок.

The decision of task of teplomassoperenosa is resulted in mine geothermal teploobmennike, in-use for extraction of warmth of bowels of the earth with the purpose of its utilization. Dependences, necessary for optimization of technological parameters of the industrial settings, are got.

Сложившаяся в угольной промышленности Украины кризисная обстановка вызвана как организационно-техническими так природными факторами. За период разработки каменноугольных месторождений Донбасса, залегающие на сравнительно небольших глубинах, мощные угольные пласты исчерпаны. Результатом этого стало монотонное уменьшение с годами мощности обрабатываемых пластов, углубление рабочих горизонтов, ухудшение безопасности ведения горных работ, рост себестоимости добытого угля. Разработку пластов малой мощности приходится осуществлять в метановой области углепородного массива, при температурах относительно неустойчивых вмещающих пород более 30...50⁰С. Состояние шахтного фонда и существующие технологии, наряду с организационно-экономическими проблемами, не позволяют существенно изменить эту ситуацию. Один из возможных путей преодоления кризиса – применение качественно новых технологических подходов к извлечению ресурсов подземных месторождений.

В перспективе представляется возможным использование на глубоких шахтах геотермальной энергии для технологических целей и для реализации потребителям в виде электрической и тепловой энергии, других типов продукции. Прогресс современных технологий ко- и тригенерации энергии низкопотенциальных тепловых источников открывает перспективы утилизации теплоты извлекаемой из недр при работе шахт в виде воздушногазовых, водных, углепородных потоков, однако их ресурсы ограничены.

Обеспечить высокий уровень извлекаемой из недр энергии можно за счет использования теплового потенциала выработанных пространств. Основанием для такого предложения послужили результаты многолетних наблюдений за температурой воздуха, движущегося по протяженным вентиляционным маршрутам. Отечественные и зарубежные исследователи установили, что воздух, проходящий несколько километров по подземным горным выработкам, нагревается до температуры окружающего массива. Такой тепловой режим может оставаться постоянным в течение десятилетий. Охлаждаемые стенки выработок постоянно подогреваются теплотой, поступающей из недр планеты. В какой-то степени инертности этого процесса способствует подпитка теплым воздухом в летний период, когда температура поступающего в шахту воздуха превышает среднегодовой уровень, составляющий для Донбасса около 9⁰С.

Увеличить объем извлекаемой энергии предложено, создавая в отработанных частях горного массива, так называемые, шахтные геотермальные теплообменники (ШГТ). Они представляют собой систему каналов-выработок в выработанном пространстве лавы, по которым движется теплоноситель, как правило, воздух (рис.1). Лабиринтная конфигурация сети каналов может иметь самую разнообразную схему: последовательную, параллельную, комбинированную. Она должна гарантировать нагрев проходящего через нее воздуха до температуры окружающих пород в течение нескольких десятков лет.

Необходимая конфигурация сети каналов создается с помощью вентиляционных сооружений, в основном перемычек. Производя переключение потоков, с их помощью можно обеспечивать рекреацию отдельных участков теплообменника, увеличивая продолжительность его функционирования. Создание каналов в выработанном пространстве в настоящее время не представляет технических трудностей. Кроме того, известны технологические схемы выемки угля

с неполной закладкой выработанного пространства, остающиеся при этом незаполненными участки могут служить каналами.

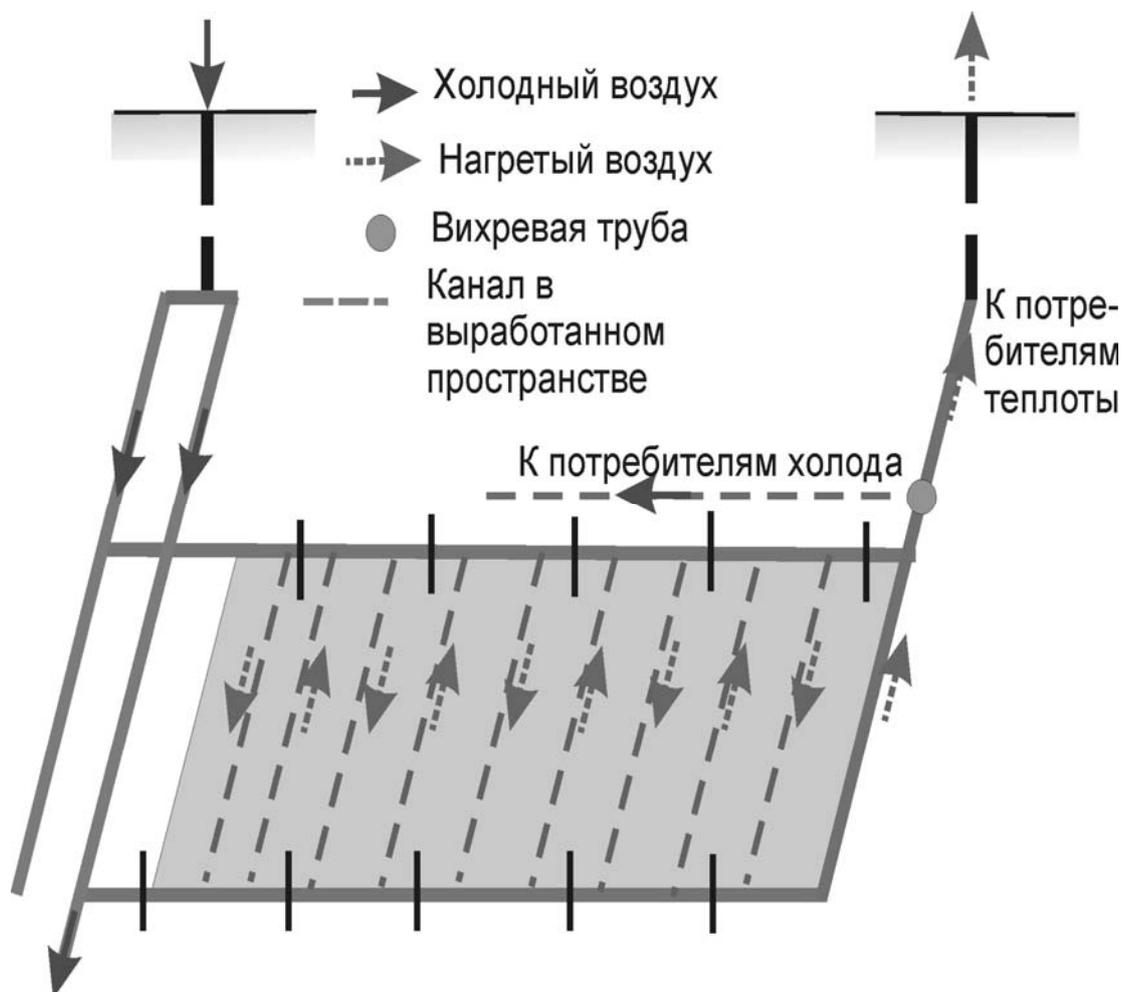


Рисунок 1 – Схема геотермального теплообменника в выработанном пространстве, образовавшемся после выемки угля.

После того, как воздух проходит по лабиринту каналов, нагретый до температуры горного массива он поступает в трансформатор энергии, это может быть тепловой насос, вихревая труба, турбохолодильник или устройство другого типа. С их помощью выполняют разделение потока на две струи - горячую и холодную. Первую из них можно использовать для получения электроэнергии путем прямого превращения тепла в электричество или с помощью паротурбинной установки, а также для иных целей. Холодный поток целесообразно использовать для кондиционирования воздуха на подземных рабочих местах.

В первом приближении, авторами теоретически исследован механизм переноса в ШГТ. Было получено выражение для зависимости температуры воздуха, движущегося в канале шахтного геотермального теплообменника, от расстояния x от входа в ШГТ и безразмерного времени $F_0 = at / R_0^2$ (a - коэффициент температуропроводности горных пород, t - время, R_0 - эквивалентный радиус сечения канала ШГТ):

$$T_B(x, F_0) = T_{B1}(F_0) + [T_{П} - T_{B1}(F_0)][1 - \exp(-Kx)], \quad (1)$$

где: $T_{B1}(F_0), T_{П}$ - соответственно температуры воздуха на входе в канал и горных пород на данной глубине ($T_{П} = T_{П}(H)$); $K = K(B_i, F_0)$ - величина, определяемая видом аппроксимации температурного поля массиве.

В [1] была использована квадратичная аппроксимация (по А.Ф. Воропаеву) температурного поля.

В ранее выполненных работах, обзор которых содержится в [2], была предложена и успешно использована экспоненциальная аппроксимация температурного поля:

$$T(r, t) = T_{cm}(t) + [T_{\Pi} - T_{cm}(t)] \left[1 - \exp\left[-\beta \left(\frac{r - R_0}{\delta_3(t)}\right)\right] \right], \quad (2)$$

где $T_{cm}(t)$ - температура стенки канала,

$\delta_3(t) = r_3 - R_0 = 4\sqrt{at}$ - ширина охлажденной зоны горного массива,

β - численный коэффициент, определяемый условиями определения $r = r_3$ - «фронта» температурного поля.

Если потребовать соблюдения неравенств: $g_3 / g_0 \leq 10^{-3}$, $\delta T_3 / \Delta T \leq 10^{-3}$, где g_3, g_0 - соответственно плотности потоков тепла через поверхности $r = r_3$ и $r = R_0$, а $\delta T_3, \Delta T$ - соответственно перепады температур $\delta T_3 = T_{\Pi} - T(r_3)$ и $\Delta T = T_{\Pi} - T_{cm}$, то из (2) получим, что $\beta = 6,9$. Таким образом, (2) принимает вид:

$$T(r_1 t) = T_{cm}(t) + [T_{\Pi} - T_{cm}(t)] \left\{ 1 - \exp\left[-6,9 \left(\frac{r - R_0}{4\sqrt{at}}\right)\right] \right\} \quad (3)$$

Сравнение безразмерных температур θ_1 и θ_2 стенки канала, вычисленных по (3) и по квадратичной аппроксимации [1] с безразмерной температурой θ_{cm} из точного решения задачи О.А. Кремнева [3,4], показало, что θ_1 лучше приближает θ_{cm} ($\theta_1 \approx \theta_{cm}$).

Таким образом, для $T_B(x, F_0)$ по (1) необходима коррекция, учитывающая более точную формулу (3). Опуская выкладки, скорректированную формулу запишем в виде:

$$T_B(x, F_0) = T_{B1}(F_0) + [T_{\Pi} - T_{B1}(F_0)] [1 - \exp(-\tilde{K}\xi)], \quad \xi = \frac{x}{R_0}, \quad (4)$$

где \tilde{K} - скорректированное значение величины K :

$$\tilde{K} = \left(\frac{\alpha \pi R_0}{\gamma c_p S \nu}\right) (1 + 0,58 B_i \sqrt{F_0}) \quad (5)$$

Обозначения величин в выражении (5) соответствует [1]. Исходя из (4) с учетом (5) получим выражение для коэффициента эффективности η ШГТ.

Критерием эффективности работы ШГТ является, очевидно, условие максимальности количества тепла, переданного горным массивом воздушному потоку.

$$\Delta Q(\xi, F_0) = C_p G [T_B(\xi, F_0) - T_{B1}(F_0)] = \max. \quad (6)$$

Теоретически возможное максимальное значение $\Delta Q(\xi, F_0)$ достижимо при бесконечной длине канала ШГТ, т.е. при $\xi \rightarrow \infty$:

$$\Delta Q_{\max} = \lim_{\xi \rightarrow \infty} \Delta Q(\xi, F_0) = \Delta Q(\infty, F_0) = C_p G [T_{\Pi} - T_{B1}(F_0)] \quad (7)$$

Коэффициент η эффективности ШГТ вводим формулой:

$$\eta = \frac{\Delta Q(\xi, F_0)}{\Delta Q_{\max}}, \eta \in [0,1] \quad (8)$$

из которой следует, что $\eta_{\max} = 1$ достижимо лишь при $\xi \rightarrow \infty$.

Для реального ШГТ необходимо задаться таким $\xi = \xi_*$, при котором η приняло бы значение, достаточно близкое к 1 (в частности принято $\eta_* = \eta(\xi_*) = 0,9$). Возможен и другой выбор η_* , поэтому целесообразно рассчитать все значения функции $\eta = \eta(\xi, F_0)$ в диапазоне изменения аргументов: $\xi \in [0,4500], F_0 \in [1,15]$. Для $R_0 = 1,5$ м и средних по Донбассу значениях теплофизических параметров [5], это соответствует длине каналов до 6750 м и времени работы ШГТ от 1,2 месяца до полутора лет. Формулу для расчетов $\eta(\xi, F_0)$ получим, подставив в (8) формулы (4) ÷ (7):

$$\eta = \eta(\alpha, \vartheta, R_0, a, F_0, \xi) = 1 - \exp\left[\frac{0,193 \cdot 10^{-2} (\alpha / \vartheta)}{1 + 0,58B_i \sqrt{F_0}}\right] \quad (9)$$

В (9) учтены средние значения плотности и удельной теплоемкости воздуха и теплофизических характеристик горных пород [5], а коэффициент теплообмена α вычисляется по известной зависимости ($\alpha \approx \vartheta^{0,8}$) [5].

Численные расчеты на ПК проведены по формуле (9) для трех вариантов значений скорости воздуха в канале: $\vartheta_1 = 2 \text{ м/с}; \vartheta_2 = 3 \text{ м/с}; \vartheta_3 = 4 \text{ м/с}$ и в ранее указанных пределах изменения аргументов ξ и F_0 .

Параметры α, ϑ, F_0 в (9) относятся к режимным (поскольку $\alpha = \alpha(\vartheta)$, а ϑ регулируемая величина), а параметры R_0, a, ξ - к технологическим (они задаются местонахождением и длиной канала ШГТ). Заметим, что согласно (9) коэффициент эффективности (фактически – аналог к.п.д.) от температуры пород T_{Π} не зависит. Результаты расчетов трех указанных вариантов приведены в таб. 1 и на рис. 1,2,3.

Таблица 1 – Результаты расчетов показателей η эффективности геотермального теплообменника

		при $\vartheta = 2, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$									
ξ	F_0	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500
1	0	0,508	0,758	0,881	0,941	0,971	0,986	0,993	0,997	0,998	
3	0	0,354	0,583	0,730	0,826	0,887	0,927	0,953	0,970	0,980	
5	0	0,292	0,499	0,645	0,749	0,822	0,874	0,911	0,937	0,955	
7	0	0,256	0,446	0,588	0,693	0,771	0,830	0,873	0,906	0,930	
10	0	0,221	0,393	0,527	0,631	0,713	0,776	0,826	0,864	0,894	
15	0	0,186	0,337	0,460	0,561	0,642	0,709	0,763	0,807	0,843	

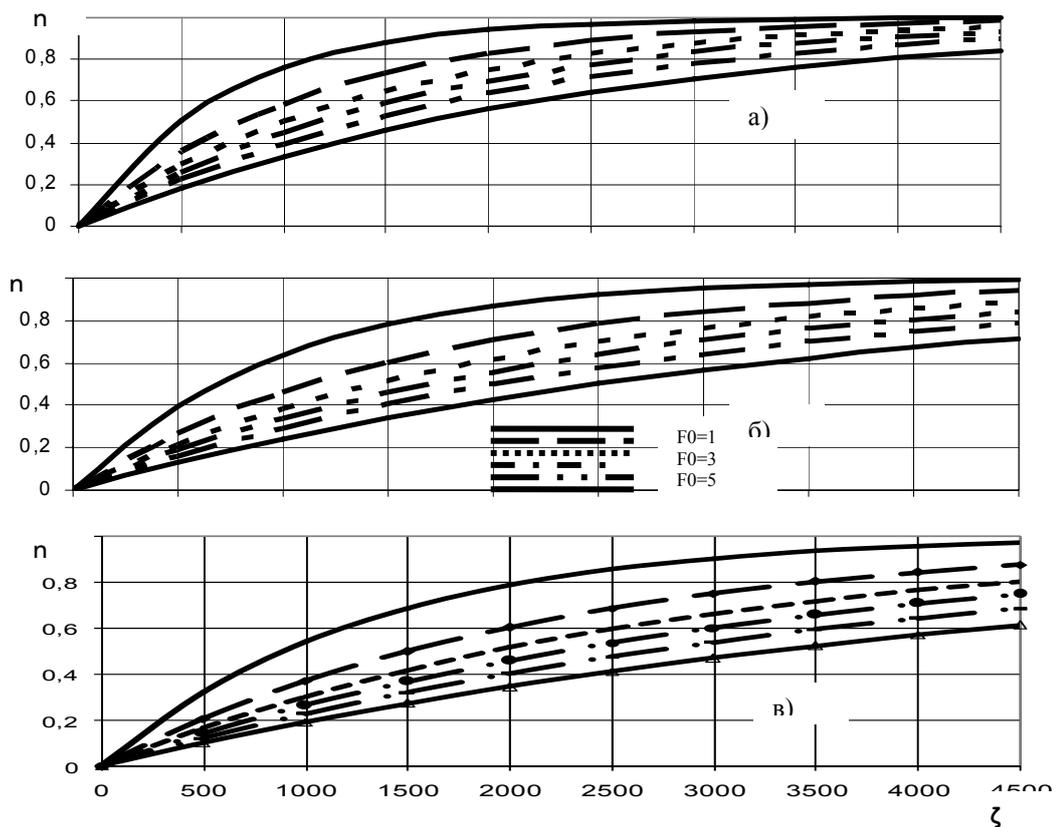
		при $\vartheta = 3, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$									
ξ	F_0	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500
1	0	0,396	0,635	0,779	0,867	0,919	0,951	0,971	0,982	0,989	
3	0	0,261	0,454	0,597	0,702	0,780	0,837	0,880	0,911	0,934	

5	0	0,211	0,378	0,509	0,613	0,695	0,759	0,810	0,850	0,882	
7	0	0,183	0,332	0,454	0,554	0,636	0,702	0,757	0,801	0,838	
10	0	0,156	0,288	0,399	0,493	0,573	0,639	0,696	0,743	0,783	
15	0	0,130	0,244	0,342	0,428	0,502	0,567	0,624	0,673	0,715	
при $\vartheta = 4, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$											
F_0	ξ	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500
1	0	0,322	0,540	0,688	0,788	0,856	0,903	0,934	0,955	0,970	
3	0	0,206	0,369	0,499	0,602	0,684	0,749	0,801	0,842	0,874	
5	0	0,165	0,303	0,418	0,514	0,594	0,661	0,717	0,764	0,803	
7	0	0,142	0,264	0,368	0,458	0,535	0,601	0,657	0,706	0,748	
10	0	0,121	0,227	0,320	0,402	0,474	0,538	0,594	0,643	0,686	
15	0	0,100	0,190	0,271	0,344	0,410	0,469	0,522	0,570	0,613	

Оптимизация ШГТ может быть осуществлена после формулировки соответствующего критерия (по минимизации капитальных и эксплуатационных затрат, по теплотехнической эффективности и т.п.).

Рисунок 2 – Эффективность ШГТ (η) при $\nu=2$ (а), 3 (б), 4 (в); $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ и длине канала ζ

Формула (9) может быть при этом весьма полезна. Предварительные, основанные на результатах расчетов трех вариантов, предложения по оптимизации ШГТ можно сформулировать таким образом:



1. Из рисунков 1,2,3 следует, что с увеличением времени эксплуатационного режима ШГТ, его эффективность снижается. Поэтому следует ограничить это время первыми, небольшими значениями F_0 .
2. Из тех же кривых (как и из таблиц 1,2,3) видно, что с ростом скорости движения воздушного потока ϑ (или его расхода G) η уменьшается. (Физический смысл чего ясен: воздух,

двигаясь быстрее, меньшее время получает от горного массива тепло). Поэтому оптимизация по скорости движения потока должна осуществляться на основе компромисса между тенденцией роста η при снижении \mathcal{G} и роста $\Delta Q(\xi, F_0)$ при увеличении \mathcal{G} .

3. Оптимизировать величину ξ_* длину канала ШГТ возможно, задавшись (с помощью других критериев оптимальности) величиной η_* . Для $\xi_* = 0,9$ из рис.1 находим: $\xi_* \approx 1600$ при $F_0 = 1$, $\xi_* \approx 2600$ при $F_0 = 3$, $\xi_* = 4000$ при $F_0 = 5$. Аналогично можно использовать и рис. 1,2,3.
4. Оптимизация в этом случае так же требует нахождения компромисса между тенденциями уменьшения длительности эксплуатационного цикла ШГТ при относительно коротких каналах и росте капитальных и эксплуатационных затрат при длинных каналах, позволяющих ШГТ эффективно работать при более продолжительных эксплуатационных циклах.

Библиографический список:

1. Костенко В.К., Венгеров И.Р. Математическая модель эксплуатационного режима шахтного геотермического теплообменника. – Вісті Донецького гірничого інституту, 2007, № 2, с. 86-89.
2. Венгеров И.Р. Хроноартефакты термодинамики. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 236с.
3. Щербань А.Н., Кремнев О.А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт: в 2-х томах. – т. 1. – Киев: Издательство АН УССР, 1954. – 430 с.
4. Венгеров И.Р. Неоднородные модели горной теплофизики. – В кн.: Физико-технические проблемы горного производства. //Сборник научных работ, выпуск 10 – Донецк: ИФГП НАНУ, 2007 с. 60-80.
5. Кузин В.А., Величко А.Е., Хохотва Н.Н. и др. Единая методика прогнозирования температурных условий в угольных шахтах. – Макеевка – Донбасс: Издательство Мак НИИ, 1979 . 196 с.