

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОЙ ПОЛИТИКИ УКРАИНЫ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«УКРАИНСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ «ЭНЕРГОСТАЛЬ»

**ИННОВАЦИОННЫЕ ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ  
БАЗОВЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ,  
ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ,  
ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

**II Межотраслевая научно-практическая конференция  
молодых ученых и специалистов в области проектирования предприятий горно-  
металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения и защиты  
окружающей природной среды  
(27–28 марта 2013 г., г. Харьков)**

СБОРНИК ТРУДОВ

ХАРЬКОВ

2013

УДК 504 (063)

И 66

Печатается по решению Научно-технического Совета  
ГП «УкрНТЦ «Энергосталь». Протокол № 3 от 12 марта 2013 г.

Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды : сборник трудов II Межотраслевой научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, 27–28 марта 2013 г., г. Харьков / ГП «УкрНТЦ «Энергосталь». – Х. : НТМТ, 2013. – 501 с.

ISBN

В сборнике представлены материалы, отражающие инновационные подходы к решению актуальных проблем развития базовых отраслей промышленности, повышения энергоэффективности, внедрения ресурсосберегающих мероприятий, улучшения экологических показателей функционирования промышленных предприятий, современные технологии и оборудование для утилизации промышленных, бытовых и особо опасных отходов, решение проблем защиты воздушного и водного бассейнов.

Статьи печатаются в авторской редакции.

Перепечатка материалов допускается  
только с письменного разрешения редакции.  
При цитировании ссылка обязательна.

© ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», 2013

**В.А. ГАБРИНЕЦ<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, профессор,

**Л.В. НАКАШИДЗЕ<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, **Н.Л. ТЕРЕНТЬЕВА<sup>1</sup>**, **И.В. ТИТАРЕНКО<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
им. акад. В. Лазаряна

<sup>2</sup>Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара, г. Днепропетровск

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТРАБОТАННЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ**

Рассмотрены вопросы утилизации пустых объемов горных выработок, остающихся после добычи полезных ископаемых. Авторами предлагается заполнять пустые объемы водой. Под действием геотермального тепла вода в объеме будет нагреваться до температуры приблизительно 12–15 °С. Отвод тепла от такого объема предлагается осуществлять с помощью теплового насоса, что обеспечит повышение температурного потенциала до значений 50–70 °С. Большая поверхность выработки обеспечит подвод большого количества тепла. Свободная конвекция, развивающаяся в свободном объеме обеспечит эффективный перенос тепла к месту его теплосъема.

**Ключевые слова:** горная выработка, геотермальное тепло, тепловой насос, естественная конвекция.

Развитие промышленности влечет за собой большие масштабы добычи полезных ископаемых в горно-металлургическом комплексе. К негативным последствиям добычи полезных ископаемых относятся образование твердых, жидких и газообразных отходов, потери полезных ископаемых при добыче и транспортировании, а также образование в недрах пространства горных выработок, камер и других пустот. Целесообразность последующего использования горных выработок как вторичных природных ресурсов обуславливается не только экономическими, но и экологическими соображениями. Вследствие обрушения горных выработок происходит нарушение структуры геосреды недр, а это ведет к дестабилизации гидрологического режима поверхностных водных источников и водных горизонтов недр, снижению плодородия почвенного покрова.

Рекультивация этих пустот требует огромных капитальных затрат. В настоящей работе предлагается использовать эти пустоты для получения тепла за счет геотермальной энергии Земли. Температурный режим горных пород, в частности скважин, исследовался во многих работах [1–10]. Этот режим зависит, с одной стороны, от конструкции ствола скважины, физико-химических свойств, структуры и формы потока продукции, с другой – от свойств и структуры вмещающих скважину горных пород и их распределения по геологическому разрезу, вскрытому этой скважиной.

В настоящей работе предлагается заполнять отработанные горные пустоты водой, которая будет под действием геотермального тепла нагреваться и аккумулировать тепловую энергию. Для практического использования этой энергии в такой водоем предлагается устанавливать тепловой насос (ТН) с теплообменным оборудованием. Тепловой насос обеспечит поднятие температурного потенциала воды бассейна до значений 50–60 °С. Естественная конвекция, развивающаяся в свободном объеме, обеспечит передачу геотермального тепла от объема бассейна к теплообменнику испарителю теплового насоса. С другой стороны, заполнение пустот водой будет способствовать стабилизации геологической обстановки в

горнодобывающем регионе.

Известно, что температурный режим в земной коре характеризуется геотермальным градиентом, показывающим, насколько изменяется температура земных недр при изменении глубины на 1 км. Его наличие объясняется существованием расплавленного ядра Земли с температурой 3500 °С, от которого к ее поверхности идет тепловой поток, что и обеспечивает устойчивое поддержание этого геотермального градиента. Его значение колеблется от максимального – 150 °С/км до минимального – 6 °С/км. Среднее значение градиента составляет 36 °С/км. Известно также, что вследствие вышесказанного на поверхности Земли существует идущий из глубины геотермальный тепловой поток, средняя величина которого равна 0,5 Вт/м<sup>2</sup>.

Большие площади горных пустот обеспечивают большие значения тепловых потоков, подводимых к ним, в соответствии с соотношением:

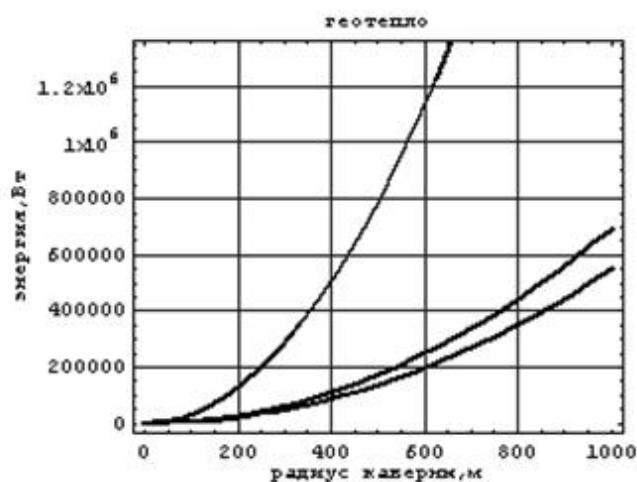
$$Q = F \cdot \lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

где  $F$  – площадь внешней поверхности пустоты, м<sup>2</sup>;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности горных пород, Вт/м·град.;

$\frac{dT}{dx}$  – геотермальный градиент.

Если в качестве примера горной пустоты взять полусферу, то количество геотермального тепла, поступающего в ее внутренний объем, за счет геотермального градиента (две нижние кривые) и геотермального теплового потока (верхняя кривая) в зависимости от величин радиуса горной каверны представлено на рис. 1. Две нижние кривые рассчитаны для двух типов горных пород – сланец и гранит. Их коэффициенты теплопроводности соответственно равны 1,75 Вт/мК и 2,21 Вт/мК.

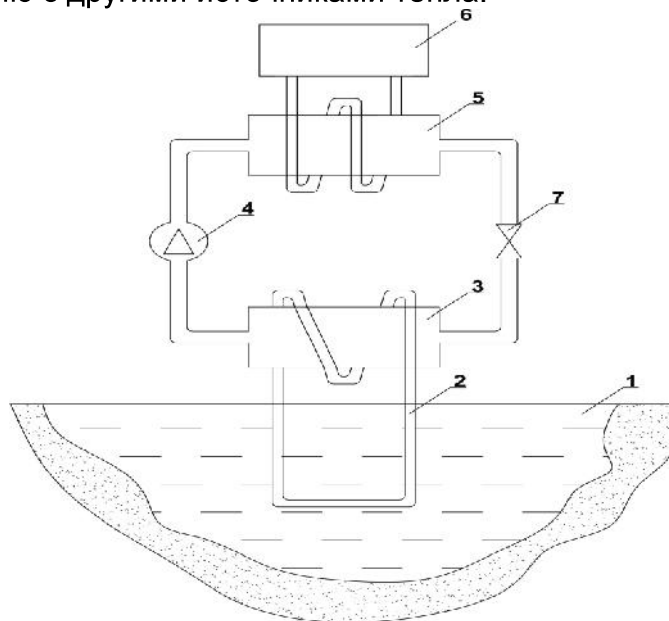


**Рисунок 1 – Количество геотермального тепла, поступающего во внутренний объем горной каверны в виде полусферы различного диаметра**

На рис. 2 представлена предполагаемая схема отвода тепла из водного бассейна в горной выработке с помощью теплового насоса. Для исключения промерзания воды при низкой температуре кипения хладагента предусматривается установка промежуточного контура с незамерзающим теплоносителем в виде смеси этиленгликоля с водой. Такой объем воды, расположенный на глубине 15 м, будет иметь постоянную температуру приблизительно 12–15 °С. За счет постоянно

подводимого геотермального тепла такая температура будет поддерживаться на протяжении всего года. Теплосъем энергии с такого объема может быть осуществлен с помощью погружаемых в водный объем поверхностных теплообменников, присоединенных к тепловому насосу. Количество отводимого тепла будет определяться размерами заполненной водой горной выработки.

Тепловые насосы, работающие по схеме вода-вода, использующие геотермальное тепло водного бассейна, необходимы для последующего повышения температурного потенциала. Уровень температуры воды из бассейна, используемой в отопительных целях, необходимо повышать относительно незначительно (50–70 °С) по сравнению с другими источниками тепла.



**Рисунок 2 – Схема отвода геотермального тепла из подземного бассейна:**

1 – заполненная водой горная выработка; 2 – контур отвода тепла из бассейна; 3 – испаритель ТН; 4 – компрессор теплового насоса; 5 – конденсатор ТН; 6 – потребитель тепловой энергии

С помощью нагнетательного насоса незамерзающий теплоноситель транспортируется к испарителю теплового насоса. Здесь он отдает свое тепло рабочей среде или хладагенту, который при этом испаряется. Теплоноситель в зависимости от конструкции системы будет охлаждаться приблизительно на величину  $\Delta T$ , равную 7–5 К.

Водный раствор теплоносителя имеет хорошие характеристики теплообмена (высокая удельная теплоемкость, низкая вязкость, легкая перекачка). На сегодняшний день в качестве такого теплоносителя внешнего контура можно использовать 25-процентный водный раствор этиленгликоля. Что касается характеристик, то его теплоемкость составляет 3,7 кДж/кг \* К (при 0 градусов), а плотность – 1,03 г/см<sup>3</sup>. Потери давления в трубе составляют примерно в полтора раза больше, чем в случае применения воды. Необходимый расход теплоносителя может быть определен из соотношения:

$$G = \frac{Q_{\text{теп}}}{c_p \Delta T}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{теп}}$  – тепловая мощность, которая в настоящий момент отдается тепловым насосом, кВт;

$c_p$  – теплоемкость теплоносителя, Дж/кгК.

Для тепловых насосов, работающих с такими источниками тепла, можно достичь высоких коэффициентов преобразования тепла. Он определяется как отношение полезной тепловой энергии, поданной к потребителю, к использованной энергии электропривода компрессора.

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{теп}}}{N_{\text{эл}}}, \quad (3)$$

где  $N_{\text{эл}}$  – электрическая мощность, которая в настоящий момент подводится к тепловому насосу, кВт.

Для каждого насоса действует основное правило термодинамики: чем меньше разность температур между источником тепла (окружающая среда) и установкой утилизации тепла (отопительная установка), тем выше (лучше) коэффициент преобразования тепла. Его теоретическое значение может быть определено из соотношения:

$$\varepsilon = \frac{T_0}{T_k - T_0} + 1, \quad (4)$$

где  $T_0$  – температура источника тепла, 290 К;

$T_k$  – температура конденсации хладагента в тепловом насосе. Определяется давлением насыщенных паров в контуре теплового насоса.

Чтобы достичь высокого коэффициента преобразования тепла, необходимо стремиться иметь как можно более низкую температуру подачи, например 35 °С в случае систем внутриспольного отопления. Для наших условий, приняв величину нагрева теплоносителя для потребителя  $T_k$  равной 340 К, мы получаем величину  $\varepsilon$ , равную 6,8. На практике она будет ниже 4–5. То есть для теплосъема 1 МВт тепловой энергии при уровне температуры 340 К необходимо будет затратить 0,2 МВт электрической мощности. При таком способе получения тепловой энергии мы еще получаем ряд преимуществ. Среди них важнейшими являются: геотермальная энергия, на которой работает тепловой насос, в отличие от газа, дров или солярки, не имеет цены; высокая производительность насоса; тепло можно направить в любую систему – обогрев теплых полов, воздухообмен, водоснабжение; возможность кондиционирования помещений, то есть удаление тепла с последующей его закачкой в подземный бассейн.

Увеличение теплосъема на единицу площади теплообменного оборудования кожухотрубчатого типа обычно сопровождается экстенсивным ростом поверхности теплообмена, размеров, массы и его стоимости. Поэтому необходимы более эффективные методы интенсификации теплообмена, принципиально новые решения в области конструирования, технологии изготовления и организации производства теплообменных аппаратов.

В предлагаемой схеме подвод тепла к теплообменнику, погруженному в воду, будет осуществляться за счет естественной или свободной конвекции, развивающейся в свободном объеме водного бассейна. Эта конвекция значительно интенсифицирует процесс переноса геотермального тепла к погруженному теплообменнику ТН. Различие плотностей частиц жидкости возле «холодного» теплообменника и возле «горячей» стенки бассейна и обуславливает возникновение устойчивого, замкнутого движения воды в бассейне, которое будет обеспечивать устойчивый перенос геотермального тепла, подводимого к водному бассейну. Более холодные частички среды, обладающие большей плотностью (более тяжелые), под действием гравитационных сил опускаются вниз, а более нагретые (более легкие) под действием архимедовых сил поднимаются вверх. Так образуются свободные конвективные токи [10–12]. Коэффициент теплоотдачи к поверхности теплообменника в этом случае будет составлять величину порядка 100 Вт/м²К [12].

С увеличением тепловой нагрузки коэффициент теплоотдачи возрастает,

причем с ростом длины теплообменной трубы при постоянном значении теплового потока его значения также растут. При отклонении теплообменной трубы от вертикали теплоотдача интенсифицируется, на углах наклона около 45° имеет максимум, затем уменьшается, причем с увеличением длины теплообменной трубы этот максимум постепенно сглаживается и при длине 1,4 м практически пропадает – наблюдается лишь уменьшение теплоотдачи. С ростом длины он смещается в сторону меньших (приближающихся к вертикали) углов. Все эти факторы позволяют создать достаточно компактный и эффективный теплообменник.

Таким образом, при использовании предлагаемого подхода к использованию отработанных горных выработок одновременно решаются две задачи: стабилизация геологической обстановки и использование геотермального тепла, представляющего собой альтернативный источник энергии с большим потенциалом.

### Библиографический список

1. Хохолов Ю.А. Математическое моделирование процессов теплообмена в подземных выработках криолитозоны / Ю.А. Хохолов // Горный информ.-аналит. бюллетень. Тематическое приложение «Аэрология». – 2005. – С. 101–110.
2. Хохолов Ю.А. Расчет температуры и воздухораспределения в сети горных выработок рудника «Айхал» / Ю.А. Хохолов // Наука и образование. – 2005. – № 1. – С. 25–28.
3. Шувалов Ю.В. Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера : ресурсосберегающие системы / Ю.В. Шувалов. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1988. – 196 с.
4. Wallace K.G., Jr. General operational characteristics and industry practices of mine ventilation systems / K.G. Wallace, Jr. // ICEE 2001 : 7th International Mine Ventilation Congress, June 17-22, 2001., Cracow, Poland, 2001. – P. 229–234.
5. Widzyk-Capehart E. Agnew gold mine expansion mine ventilation evaluation using Ventsim / E. Widzyk-Capehart, B. Watson // ICEE 2001 : 7th International Mine Ventilation Congress June 17–22, 2001, Cracow, Poland, 2001. – P. 345–352.
6. Greuer R.E. Establishing mine ventilation potentials / R.E. Greuer // ICEE 2001 : 7th International Mine Ventilation Congress, June 17–22, 2001, Cracow, Poland, 2001. – P. 9–16.
7. Зимин Л.Б. Определение движущих сил и объемов естественной вентиляции подземных объектов сложной топологии / Л.Б. Зимин // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2000. – № 3. – С. 60–65.
8. Мохирев Н.Н. Одна подземная ВУГП вместо двух поверхностных на руднике АО СП «Гипс-KNAUF» / Н.Н. Мохирев, В.И. Култыгин // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – № 11. – С. 5–7.
9. Минин В.В. Вентиляторные установки для современных рудников / В.В. Минин // Изв. вузов. Горный журнал. – 2004. – № 2. – С. 49–51.
10. Крэйт Ф. Основы теплопередачи. / Ф. Крэйт, У. Блэк ; пер. с англ. под ред. Н.А. Анфимовой. – М. : Мир, 1983. – С. 240–241.
11. Мартыненко О.Г. Свободно-конвективный теплообмен : справ. / О.Г. Мартыненко, Ю.А. Соковишин. – Минск : Наука и техника, 1982. – С. 36–37.
12. Соковишин Ю.А. Введение в теорию свободно-конвективного теплообмена / Ю.А. Соковишин, О.Г. Мартыненко. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1982. – С. 8–103.