

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В ГЛУБОКОЙ УГОЛЬНОЙ ШАХТЕ

Представлены результаты оценки нарастания геотермального потенциала воздушных потоков в реальных горных выработках действующей угольной шахты в Донецком каменноугольном бассейне.

Представлені результати оцінки наростання геотермального потенціалу повітряних потоків в реальних гірських виробках діючої вугільної шахти в Донецькому кам'яновугільному басейні.

Presents the results of evaluation of geothermal potential increase air flow into the real workings operating coal mine in the Donetsk coal basin.

Введение. Во всем мире обострилась проблема обеспечения промышленности и населения энергией. Это обусловлено исчерпанием широко используемых углеводородных ресурсов, таких как нефть и природный газ, низкой техногенной безопасностью современных атомных электростанций и негативными экологическими последствиями работы установок, использующих уголь. Неисчерпаемые в обозримом будущем и экологически безвредные виды энергии, а именно солнечная, ветровая, приливная и другие становятся все более актуальными. К ним относится и геотермальная энергия, обусловленная происходящими в недрах планеты и сопровождающимися выделением колоссальной теплоты радиохимическими и механическими процессами. Поступая к поверхности, эта теплота вместе с солнечной и техногенной обеспечивает климатический баланс Земли.

В перспективе представляется возможным извлечение из глубоких шахт геотермальной энергии для использования в технологических целях и для реализации потребителям в виде электрической и тепловой энергии.

В Украине разработку пластов мощностью менее двух метров осуществляют на глубинах 800-1500м и более, при температурах вмещающих пород более 30...50⁰С. Выемка угля сопряжена с необратимыми негативными последствиями экологического характера: минерализацией поверхностных и подземных вод; выбросами парниковых и радиоактивных газов и аэрозолей; деформациями и изъятием под отвалы поверхности. Результатом этого стало монотонное уменьшение с годами мощности отрабатываемых пластов, углубление рабочих горизонтов, ухудшение безопасности ведения горных работ, рост себестоимости добытого угля. Современное состояние шахтного фонда и существующие технологии, наряду с организационно-экономическими проблемами, не позволяют существенно изменить эту тенденцию. Один из возможных путей преодоления кризиса – применение качественно новых технологических подходов к разработке подземных месторождений.

Обеспечить извлечение энергии предполагается, создавая в отработанных частях горного массива, так называемые, шахтные геотермальные теплообменники [1.а.і.1]. Они представляют собой систему каналов-выработок в простран-

стве, где выработан угольный пласт, по которым движется теплоноситель, как правило, воздух. 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 горном массиве ($T_{\text{п}} \sim 30 \dots 50^\circ\text{C}$ и выше) в течение нескольких десятков лет.

Необходимая конфигурация сети каналов создается и трансформируется с помощью вентиляционных сооружений. Производя переключение потоков, с их помощью можно обеспечивать рекреацию отдельных участков теплообменника, увеличивая продолжительность его функционирования [2]. Создание каналов в выработанном пространстве в настоящее время не представляет технических трудностей. Например, известны технологические схемы выемки угля с неполной закладкой выработанного пространства, остающиеся при этом незаполненными, участки могут служить каналами.

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 утилизации тепла, а также для иных целей. Холодный поток целесообразно использовать для кондиционирования воздуха на подземных рабочих местах.

Авторами предпринята попытка оценить энергетические возможности шахтного геотермального теплообменника на основе анализа тепловых потоков в реальных горных выработках действующей угольной шахты в Донецком каменноугольном бассейне.

Методика и условия выполнения исследований. В качестве экспериментального участка для определения параметров тепловых потоков в шахтном геотермальном теплообменнике выбрана сеть горных выработок арендного предприятия «Шахта им. А.Ф.Засядько». Это обусловлено тем, что шахта является одной из самых глубоких в Донбассе, она ведет горные работы на глубинах 1000-1300 м и более, температура массива горных пород достигает $45 - 51^\circ\text{C}$.

Характеристика угольных пластов представлена в таблице 2.1.

К моменту подготовки статьи шахтой разрабатываются пласты m_3 , l_4 , по пластам l_1 и k_8 после крупной аварии работы не ведутся.

Пласт m_3 – сложного строения, состоит из двух угольных пачек с прослойкой песчаника мощностью 0-18 см. С глубины 700 метров пласт опасен по внезапным выбросам угля и газа, склонен к самовозгоранию. Непосредственная кровля представлена аргиллитом крепостью $f=3-4$, мощность колеблется от 4 до 14 метров, категория по устойчивости B_2-B_1 . Основная кровля представлена алевролитом или песчаником, категория пород по обрушаемости соответственно A_2 и A_3-A_4 . Непосредственная почва – алевролит «кучерявый» крепостью $f=2-3$ и мощностью до 0,5 метра, ниже залегает алевролит крепостью $f=4-5$, склонен к пучению.

Характеристика пластов

Показатели	Значения			
	m_3 C_2^7	l_4 C_2	l_1 C_2^6	k_8 C_2^5
Символы: пласта свиты				
Мощность пласта вынимаемая, м	1,42-2,15	0,9-1,16	1,58-2,06	0,9-1,23
Плотность угля, т/м ³	1,29	1,31	1,34	1,29
Угол падения пласта, град	2-11	10-16	6-22	5-19
Марка угля	ГЖО; Ж	КЖ	Ж; КЖ	КЖ; К
Зольность, %	3,2-22,1	6,4-18,6	13,1-35,4	5,5-11,5
Крепость	1,5	1,5	1,5	1,5
Содержание влаги, %	0,4-1,2	0,35-1,5	0,4-1,0	0,3-1,1
Содержание серы, %	1,3-4,3	1,1-3,4	2,0-4,4	2,3-3,7
Выход летучих, %	30,6-37,2	26,9-38,7	27,2-39,7	26,5-43,9

Обрабатывается лавами по простиранию пласта. Система разработки – столбовая, схема проветривания – 1-М-вт (рис.1).

Пласт l_1 – сложного строения, состоит от 3 до 7 угольных пачек, а на части шахтного поля разделяется на два отдельных пласта l_1^6 и l_1^H , склонен к самовозгоранию.

Непосредственная кровля на 80% территории представлена аргиллитом крепостью $f=3$ и мощностью от 0 до 1,5 метра, а на остальных 20% территории залегает алевролит крепостью $f=3-4$ и мощностью от 0 до 2,7 метров.

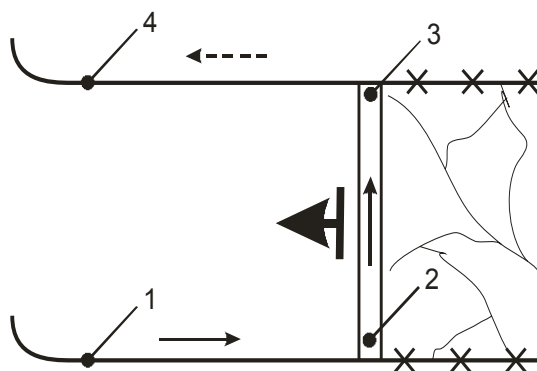


Рис. 1. Схема выемочного участка пласта m_3 :
1-4 – пункты измерения температуры воздуха

Категория пород по устойчивости B_1 , B_3-B_4 . Основная кровля- песчаник мощностью 26-34 метра, его крепость составляет $f=7-8$. Категория основной кровли по обрушаемости A_3-A_4 .

Непосредственная почва- алевролит крепостью $f=4-6$ мощностью 1,3-11 метров, пучащий (Π_2). Основная почва – песчаник крепостью $f=7-8$ мощностью от 0,2 до 2 метров.

Обрабатывается лавами по простиранию пласта. Система разработки – комбинированная, преобразующаяся в столбовую. Схема проветривания – 2-В-пт (рис. 2а), после прихода в негодность вентиляционной выработки позади очистного забоя – 1-М-вт с частичным отводом исходящей вентиляционной струи на фланговую выработку через выработанное пространство очистного забоя и вентиляционной выработки (рис. 2б).

При первом варианте проветривания в точку 3 привносили охлажденный воздух, а при втором - часть тепла выносилась утечками воздуха и не контролировалась.

Пласт k_8 - сложного строения, состоит из 2-3 угольных пачек.

Непосредственная кровля на 30-90% площади залегает аргиллит крепостью $f=3$, мощностью 0-3,5 м, категория по устойчивости B_1 . На 30-90% площади залегает известняк мощностью 3-4 метра и крепостью $f=8-9$, категория по устойчивости B_5 , так же он служит и основной кровлей, категория по обрушаемости A_4 .

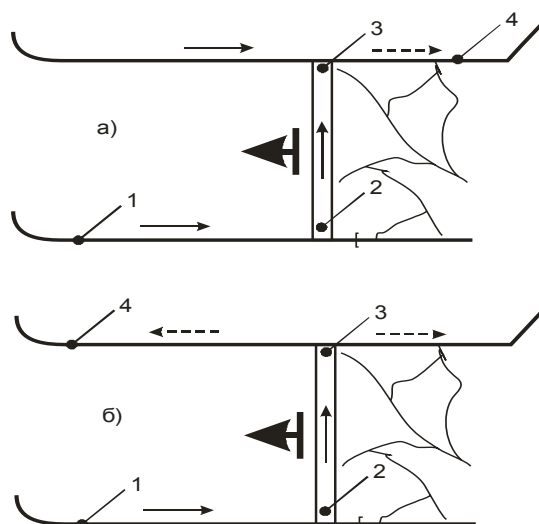


Рис. 2. Варианты схемы отработки выемочного участка пласта l_1 , а) - прямоочное с подсвежением, б) – комбинированное проветривание: 1-4 как на рис.1

Непосредственная почва, на площадях до 85%, представлена алевролитом крепостью $f=4-6$, мощностью от 0 до 1,5 м. На остальных 15% площади залегает песчаник крепостью $f=7-8$, мощностью от 5 до 12 м. Категория пород непосредственной почвы $П_1-П_2$. Основная почва представлена песчаником крепостью $f=8-9$.

Обрабатывается лавами по простиранию пласта. Система разработки – сплошная. Схема проветривания – 1-В-вт (рис. 3). Здесь следует учитывать наличие паразитных аэродинамических связей между точками 1 и 4.

Пласт l_4 в пределах шахтного поля простого и двухпачечного строения мощностью 0,9 - 1,2 м.

Непосредственная кровля пласта представлена аргиллитом и алевролитом мощностью 0,1 - 0,5 м, на контакте с пластом расслоенные до сыпучего состояния, обрушаются вслед за выемкой угля по всему рабочему пространству, весьма неустойчивые и неустойчивые (B_1 и B_2). Основная кровля среднеобрушаемая (A_2).

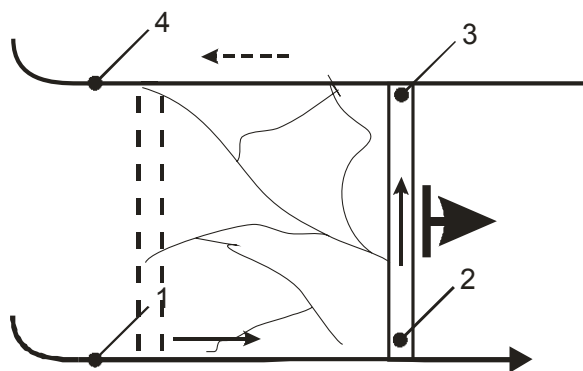


Рис. 3. Схема выемочного участка пласта $k_8:1-4$ как на рис. 1

Непосредственная почва пласта представлена алевролитом и аргиллитом.

Отрабатывается лавами по простиранию пласта. Система разработки – столбовая. Схема проветривания – 1-М-вт (см. рис. 1).

Все угольные пласты газonosны. Природная газonosность всех пластов высокая: от 8 до 26 м³ на тонну сухой беззольной массы угля.

При исследовании процессов теплообмена между стенками выработки и воздушным потоком на экспериментальном участке использованы данные температурных съёмов и замеров расходов воздуха, которые проводились совместно с участком вентиляции и техники безопасности арендного предприятия «Шахта им. А.Ф.Засядько».

Определялось изменение температуры воздуха на входе и выходе воздухоподающих, очистных (лав) и вентиляционных выработок в различные периоды отработки запасов угля в выемочном участке. При этом в точках измерения температуры фиксировали расход воздуха. Были приняты следующие обозначения величина нагрева (прироста температуры) воздуха (см. рис. 1):

- в пределах выемочного участка: $T_0 = T_4 - T_1$;
- в пределах очистного забоя: $T_{\text{лава}} = T_3 - T_2$;
- во время его движения по воздухоподающей выработке: $T_{\text{ен}} = T_2 - T_1$.

Теплоприток (ΔU) в вентиляционную струю воздуха определялся по формуле:

$$\Delta U = c \cdot \rho \cdot Q \cdot T_i, \text{ Вт} \quad (1)$$

где c - теплоёмкость воздуха, Дж/(кг К); ρ – плотность воздуха, кг/м³; Q – расход воздуха в выработке, м³/с; T_i – приращение температуры воздуха между измерными точками, К.

Поскольку измеренные значения температуры воздуха изменялись в интервале 12..41°C, отклонение значений плотности и теплоемкости воздуха от значений при 20°C не превышало 10%. При этом погрешность измерений расхода воздуха существенно превышала этот уровень. Это позволило в дальнейших расчётах плотность и теплоемкость воздуха принять постоянными.

В вычислениях были приняты следующие значения характеристик шахтного воздуха (для 20°C): плотность - $\rho = 1,24$, кг/м³; теплоёмкость воздуха - $c = 1002,9$, Дж/(кг К); давление - $P = 101325$. Па.

Необходимо принимать во внимание, что рассматриваемые условия не являются наилучшими с точки зрения оптимизации параметров геотермального теплообменника. Это обусловлено тем, что в горных выработках необходимо поддерживать комфортные и безопасные условия для горнорабочих. Характеристики вентиляционных потоков регулируют таким образом, чтобы обеспечить всех находящихся в выработках людей достаточным количеством свежего воздуха, не допустить пылеобразования из-за высокой скорости воздуха, растворить выделяющиеся из горного массива газы до безопасного уровня, а также предотвратить на рабочих местах повышение температуры воздуха более 26°C . В связи с вышеизложенным, авторы в ходе экспериментов констатировали поступление тепловой энергии в реальные вентиляционные потоки.

Результаты и обсуждение. Исследование процессов теплообмена между стенками выработки и воздушным потоком проводили на 17 выемочных участках. Десять из них отработывали пласт m_3 , по четыре - l_1 и l_4 , и три - k_8 .

Практически во всех выработках удаленных от воздухоподающих стволов наблюдали, как и ожидалось, повышение температуры воздуха в процессе движения его от начала выработки к ее окончанию. В расположенных вблизи стволов участках отмечены единичные случаи снижения температуры в жаркие периоды года.

Причиной нагревания воздуха был не только теплообмен со стенками выработок, а также работающие электроприводы машин, находящиеся под напряжением электрические кабели, рабочая жидкость в гидроприводах, теплота, выделяющаяся из транспортируемого полезного ископаемого, окисляющегося угля, горных пород и древесины. Параллельно происходило охлаждение воздуха водой, которую разбрызгивали из систем орошения и пылеподавления, из-за испарения технологической и выделяющейся из горного массива минеральной воды. Одновременное влияние всех этих нестабильных процессов предопределяло значительный разброс измеряемых температур и снижало надежность получаемых результатов.

Кроме того, нестабильными были основные влияющие на теплообмен воздуха со стенками выработок факторы, такие как массовый расход воздуха в горных выработках, из-за колебаний депрессии в вентиляционной сети, и площадь поперечного сечения деформируемых горным давлением выработок.

Несмотря на наличие систематических и несистематических погрешностей измерений получен ряд результатов, свидетельствующих о реальном получении значительных объемов низкопотенциального тепла из горного массива в выработки глубоких шахт. На рисунке 4 приведена в качестве примера диаграмма суммарных теплопритоков в горные выработки 17-й восточной лавы пласта m_3 от начала ее работы в феврале 2005 до окончания в апреле 2006 года.

Результаты показали однозначную зависимость получаемой воздушным потоком тепловой энергии от протяженности маршрута движения воздуха. В начальный период отработки участка, когда длина воздухоподающей и вентиляционной выработок была максимальной, теплоприток достигал 420 кВт. После выемки основной части запасов и сокращения протяженности маршрута движения воздуха величина ΔU сократилась более чем на порядок до 10кВт.

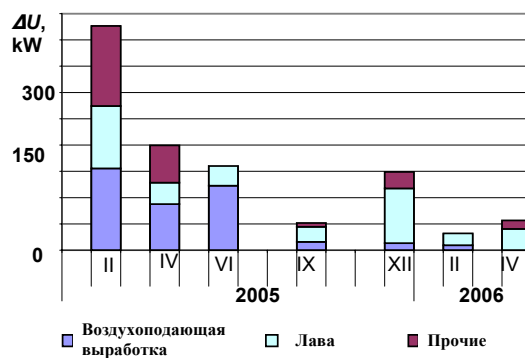


Рис. 4. Притоки тепла в вентиляционный поток за период отработки добычного участка 17-й восточной лавы пласта m_3

Показательной является изменение показателя $T_{en} = T_2 - T_1$, а именно, связь между протяженностью воздухоподающей выработки и величиной прироста температуры воздуха в ней (рис.5).

С увеличением протяженности маршрута движения воздуха температура последнего возрастала примерно на один градус через каждые 300м

Как ранее было указано, на изменение температуры вентиляционной струи существенное влияние оказывает расход воздуха в выработке. При увеличении расхода воздуха возрастает скорость его движения в выработке и, соответственно, сокращается продолжительность контакта с нагретыми поверхностями породного контура. В результате температура воздуха не достигает наибольших показателей. Данные (рис.6) показывают, что при увеличении расхода более 1600 м³/мин наблюдали снижение прироста температуры.

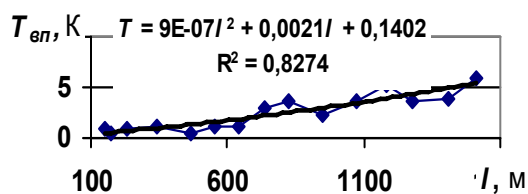


Рис. 5. Связь прироста температуры воздуха в воздухоподающей выработке 17-й восточной лавы пласта m_3 с ее протяженностью l

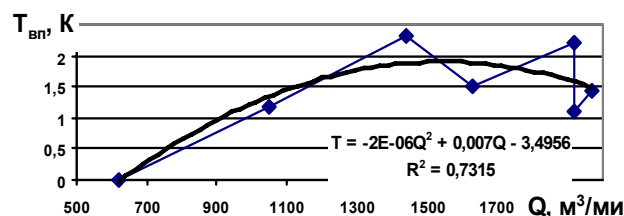


Рис. 6. Связь прироста температуры воздуха в воздухоподающей выработке 17-й восточной лавы пласта m_3 с расходом воздуха Q в ней

Обобщенные по всем десяти воздухоподающим выработкам пласта m_3 данные прироста температуры представлены на рис.7. Графики качественно подобны тем, что приведены на рисунках 5 и 6. Это свидетельствует о едином характере теплообмена между горным массивом и воздушными потоками в выработках.

Наблюдения, проведенные в очистных выработках (лавах) показали, что вследствие малой и постоянной длины этих выработок, которая составляла 200-300м, а также влияния ряда указанных выше техногенных факторов, существ-

венной связи между показателем $T_{лава}$ и протяженностью лавы или расходом воздуха установить не удалось.

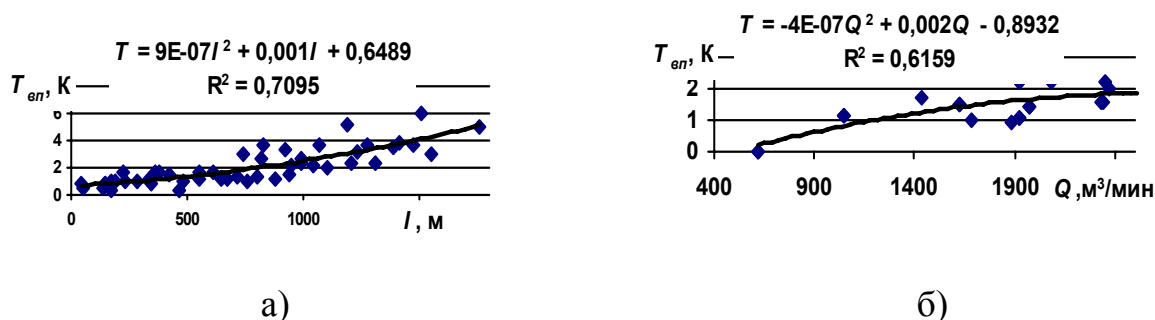


Рис. 7. Связь прироста температуры воздуха в воздухоподающих выработках пласта m_3 с их протяженностью l (а) и с расходом воздуха Q в них (б)

Изменение температуры воздуха в пределах добычного участка (T_{∂}) представлены на рис.8. Они подтвердили, что с увеличением протяженности маршрута движения воздуха температура воздуха возрастает (рис.8а), при этом охлаждающее влияние расхода воздуха не проявлялось (рис.8б) так как увеличивается время контакта воздуха и нагретых горных пород.

Установлено, что температура воздуха возрастает на один градус после того как воздух проходит по выработкам участка примерно 300м. Этот показатель равен ранее установленному для воздухоподающих выработок пласта m_3 .

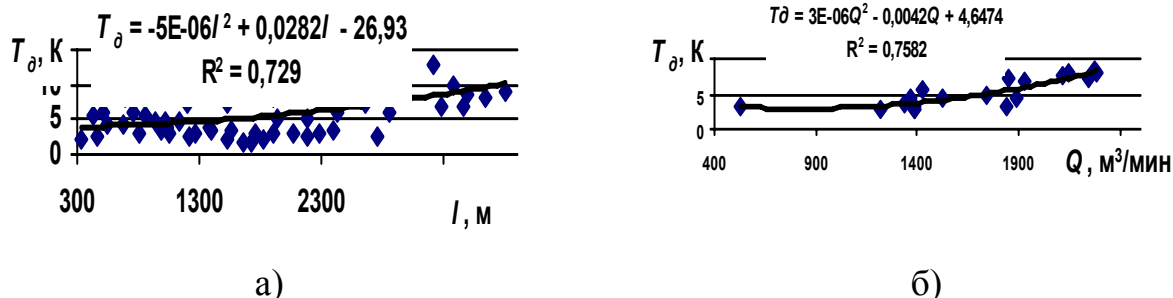


Рис. 8. Связь прироста температуры воздуха в пределах выемочных участков пласта m_3 с их протяженностью l (а) и с расходом воздуха Q в них (б)

Для остальных пластов шахты им. А.Ф. Засядько были выполнены подобные наблюдения. Было установлено, что отработка пласта k_8 прямым ходом (см. рис. 3) при наличии труднообрушаемой кровли сопряжена со значительными утечками воздуха через выработанное пространство. Это определяет уменьшение маршрута движения значительной части воздушного потока и, соответственно уменьшению нагрева воздуха. Изменение схемы проветривания добычных участков на пласте l_1 также приводило к потере значительной части тепловой энергии вместе с утечками через неподдерживаемые выработки (см.рис.2б). Тем не мене, При отработке всех обследованных участков установлено нагревание воздуха в следующих диапазонах:

- для воздухоподающих выработок ($T_{вп}$) от минус 2 до плюс 8,8 К;
- для участков (T_{∂}) от 4,3 до 13К.

Эти результаты измерения температур были использованы для расчета теплопритока в воздушные потоки и оценки приобретаемой ими энергии на основании выражения (1). Данные измерений и расчетов для всех обследованных выработок и участков сведены в табл.2. Где обозначены индексами ^o и ^w соответственно восточные и западные лавы.

Таблица 2

Обобщенные сведения о температурных изменениях в вентиляционных потоках и накапливаемой в них энергии

Название участка	$\Delta T, K$		$\Delta U, кВт$	
	$T_{вп}$	T_0	в воздухоподающей выработке	на участке
пласт m_3				
Вост. уклон	5	13	211,8	601,8
15 ^o бис	-2	12,2	-10,4	415,5
17 ^o	6	7,2	155,7	426,6
18 ^o	3,2	6	107,6	211,4
16 ^w	1	4,3	35,0	168,7
17 ^w	4	7,6	81,1	486,9
пласт l_1				
11 ^w	4	10	250,5	405,9
12 ^w	5,4	11	186,6	391,5
13 ^w	3	7	154,0	359,3
13 ^o	8	4,5	507,7	285,5
пласт l_4				
2 ^w	8,6	9,2	171,5	313,4
3 ^w	4,8	9,2	170,0	306,1
4 ^w	6,4	11,7	161,5	418,5
5 ^w	8,8	7,4	180,0	188,5
пласт k_8				
11 ^o	3,2	8,5	61,0	146,3
12 ^o	4,7	9,3	54,1	180,3
8 ^w	6,8	10,2	134,5	202,3

Выводы. Таким образом, в результате измерения динамики температуры в горных выработках глубокой угольной шахты Донецкого каменноугольного бассейна произведена экспериментальная оценка низкопотенциальных геотермальных потоков.

Установлено, что за период перемещения по горным выработкам добычных участков потоки воздуха, используемого для проветривания, нагреваются на 4,3-13К. В среднем, в выработках участков пласта m_3 воздух нагревался на один градус, перемещаясь на 300м.

При коротких, менее 1000м, маршрутах движения вентиляционных потоков существенное влияние на температуру воздуха может оказывать массовый расход воздуха. Увеличение Q более 1600м³/мин приводило к снижению темпе-

ратуры на 2-3 К. Для длинных маршрутов, протяженностью более 2000м, охлаждающее влияние расхода воздуха не сказывалось, так как продолжительность контакта воздуха с горными породами была достаточной.

Процесс разогревания воздуха происходил за счет геотермальной энергии недр. Ориентировочные расчеты показали, что мощность получаемой геотермальной энергии на выемочном участке может достигать в данных условиях 170-600 кВт и более.

Такой энергетический потенциал можно утилизировать различными способами. Наиболее простым представляется использование геотермального тепла для проветривания шахт - так называемая тепловая депрессия. Можно применить нагретый воздух для подпитки тепловых насосов. Возможны другие варианты использования геотермальной энергии для нужд предприятий или внешних потребителей.

Список литературы

1. Патент на корисну модель №17751 Україна, МПК F24J 3/08. "Спосіб одержання геотермальної енергії" / В.К.Костенко, О.В.Костенко, Т.В.Костенко; заявник і власник ДонНТУ. – №200603621; заявл. 03.04.2006; опубл. 16.10. 2006, Бюл. №10.
2. Костенко В.К. Математическая модель эксплуатационного режима шахтного геотермического теплообменника/ В.К.Костенко, И.Р.Венгеров // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2007. - № 2. - С. 86-89.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бойком В.О.
Надійшла до редакції 24.06.11*

УДК 622.224:532.528

© В.А. Дзензерский, Ю.А. Жулай, А.А.Потапенко

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ КАВИТАЦИЯ В РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Выполнена оценка эффективности технических средств гидроимпульсного воздействия с использованием режимов высокочастотных кавитационных автоколебаний для интенсификации технологических процессов в горнодобывающей отрасли.

Виконано оцінку ефективності технічних засобів гідроімпульсного впливу з використанням режимів високочастотних кавітаційних автоколиваний для інтенсифікації технологічних процесів у гірничодобувній галузі.

The estimation of efficiency of hydro impulsive technique using the high-frequency self-excited cavity oscillations modes for intensification of process technologies in mining industry is carried out.

Реализация ресурсосберегающих технологий предприятием, в том числе и в горнодобывающей отрасли, является одной из важных задач его хозяйственной деятельности. Особенно остро эта проблема встала перед руководителями хозяйствующего субъекта в условиях роста цен на энергоносители. В последнее время в мире и в Украине наблюдается устойчивая тенденция в разра-