

2. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества: технология и свойства: Учебник для вузов / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников. – М.: Стройиздат, 1979. – 476 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Кузьменком О.М.
Надійшла до редакції 25.04.2012*

УДК 622.333.013.3; 681.5: 622.817.478

© О.А. Бойко, В.А. Бойко

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ГЛУБОКИХ ШАХТ ДОНБАССА И ПУТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ НОРМАЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Прозведен аналитический анализ величин тепловой энергии, получаемой воздушным потоком, проветривающим вентиляционные сети шахт среднего и крупного размеров за счет адиабатического сжатия воздуха при опускании по стволам различной глубины, показано, что эти величины достаточно велики и для снижения температуры воздуха требуют значительного расхода электроэнергии на питание холодильных установок системы кондиционирования воздуха в глубокой шахте. Предлагается извлекать тепловую энергию сжатия воздуха и выносить ее на дневную поверхность водой. Рассматривается вопрос ускоренного формирования теплоуравнивающей оболочки (ТО) вокруг горной выработки за счет применения опережающей подготовительной забой скважины, охлаждаемой водой.

Виконано аналітичний аналіз величин теплової енергії, що її отримує потік повітря, провітрюючий вентиляційні мережі середніх і великих за розміром шахт, за рахунок адиабатичного стискування повітря при опусканні по стволах різної глибини. Показано, що ці величини досить великі і для зменшення температури повітря вимагають значних витрат електроенергії для живлення холодильних установок системи кондиціювання повітря в глибокій шахті. Пропонується витягувати теплову енергію адиабатичного стискування повітря і видаляти його на денну поверхню водою. Розглядається питання пришвидшеного формування теплоірівнювальної оболонки (ТО) гірської породи за рахунок використання охолоджуваної водою свердловини, що випереджає вибій підготовчої виробки.

Produced by the analytical analysis of the quantities of heat energy generated by air flow, air-ventilated mines network of medium and large sizes due to adiabatic compression of air by lowering the trunks of varying depth, it is shown that these quantities are large enough to reduce the air temperature require significant energy consumption for food refrigeration setting the air conditioning system in a deep mine. It is proposed to extract the thermal energy of compression of air and make it to the surface water.

Введение. В условиях экономического кризиса быстрый переход Украины на наукоемкие и энергосберегающие технологии и рост экспорта весьма проблематичны, что с особой остротой ставит задачу решения проблемы обеспечения Украины энергоносителями за счет собственных ресурсов.

Сознавая опасность сокращения добычи угля как энергоносителя, Кабинет министров в мае 2007 года принял решение об обеспечении шахт электроэнергией по льготным ценам (отнесение шахт к первой категории потребителей), что, по сути, является скрытой дотацией за счет бюджета страны в разме-

ре 500–600 миллионов гривен. Этот шаг правительства вполне оправдан как попытка остановить рост цен на энергоносители.

Существуют традиционные, общепринятые в мировой практике, пути решения проблемы роста цен на энергоносители: увеличить добычу угля на шахтах и карьерах; увеличить добычу нефти и природного газа; увеличить выработку электроэнергии на атомных электростанциях; использовать возобновляемые и нетрадиционные источники энергии; сократить энергоемкость производства продукции. Первые два пути могут быть реализованы только при наличии соответствующих месторождений на территории страны. Для Украины при современном состоянии ее экономики некоторые направления либо неприемлемы, либо трудноосуществимы. Украина обладает достаточными запасами урановой руды и современной технологией и техникой ее добычи и могла бы в короткие сроки удвоить выработку электроэнергии на атомных электростанциях, догнав по этому показателю Францию. Этому, однако, препятствует отсутствие собственного производства ТВЭЛов, отсутствие средств на строительство АЭС и «синдром Чернобыля».

В опубликованных нами ранее работах показано, что главным источником энергии для энергетики и промышленности Украины на ближайшие десятилетия останется уголь. Старых, разведанных еще в первой половине прошедшего века, запасов угля на территории Украины достаточно, чтобы обеспечить потребности коксохимии, металлургии, энергетики и новых энерготехнологических способов получения газа из угля для народного хозяйства и топлива для двигателей внутреннего сгорания на 450–500 лет.

Однако извлечение имеющихся в Украине запасов угля представляет отнюдь не простую задачу. Пресса и телевидение постоянно информирует общественность об авариях на шахтах у нас и за рубежом, связанных со взрывами метана и угольной пыли, выбросами угля и породы, обрушениями горных пород, отравлениями. Средства массовой информации Украины не сообщают о гибели шахтеров от сердечнососудистой недостаточности, связанной с высокими температурами в очистных и подготовительных забоях, хотя численность погибших по этой причине сравнима с таковой от аварий. Она хорошо знакома шахтерам, на собственном опыте знающим, что уже на глубине 660–700 м температура горных пород на шахтах Донбасса достигает 26 °С. Такую глубину, имеют более половины шахт Донбасса, 44 шахты уже работают на глубинах более 1000 м, а 4 – ведут горные работы на глубине 1400 м, где температура горных пород достигает 45–50 °С.

В былые времена обеспечить нормальные тепловые условия труда в глубоких шахтах помогали холодильные установки. Хотя выпускавшиеся в Казани турбокомпрессоры, составлявшие основу шахтных холодильных установок, были далеки от совершенства, тем не менее функцию охлаждать шахтный воздух в жаркое время года они выполняли. В настоящее время из имевшихся на 57 шахтах Донбасса систем центрального кондиционирования воздуха в строю действующих таковые сохранились только на двух шахтах. Проблема кондиционирования воздуха в глубоких шахтах Донбасса осложнилась не только отсутствием валюты на приобретение холодильных машин, но и непомерно воз-

росшей стоимостью электроэнергии. На газовых шахтах Донбасса расход электроэнергии на тонну добываемого угля достигает 150 кВт-ч, причем около 60 % этой энергии расходуется на проветривание шахт. На глубоких газовых шахтах (с учетом потребления энергии на кондиционирование) удельный расход электроэнергии на вентиляцию и кондиционирование достигал 70 % от общешахтного. Понятно, что рост стоимости электроэнергии влечет возрастание себестоимости добываемого угля и цепную реакцию возрастания стоимости производимых товаров, транспорта, коммунальных услуг и др.

В работе [1] показано, что даже при неизменной цене электроэнергии применение традиционных схем нормализации тепловых условий в шахте при подготовке и отработке угольных пластов на предельных глубинах (а в Донбассе имеются пласты угля, пригодного для коксования, на глубине 1800 м, где температура горных пород достигает 72 °С) оказывается неприемлемым из-за длительного срока выноса содержащегося в массиве горных пород запаса тепла, непрерывно пополняемого тепловым потоком из недр Земли за счет тепла расплавленных горных пород, находящихся на удалении всего 40–45 км от дневной поверхности. Даже при предельных скоростях движения воздуха по стволам и максимальном диаметре ствола 8 м из-за малой теплоемкости воздуха на охлаждение массива горных пород до температуры 26 °С на предельной глубине 1800 м потребуется период времени 260 лет. Расход электроэнергии на нормализацию тепловых условий за счет охлаждения воздухом нагретых пород горного массива крупной шахты предельной глубины отработки запасов угля в 1800 м составит величину выработки электроэнергии такой тепловой электростанции, как Приднепровская ГРЭС (мощность 2,4 млн. кВт), за 12 лет. Стоимость этой электроэнергии составит астрономическую сумму и ляжет тяжелым бременем на себестоимость добываемого угля. Традиционные для шахт средней глубины способы нормализации тепловых условий за счет подачи в шахту охлажденного воздуха и выноса им тепла, выделяющегося в горные выработки шахт для глубоких шахт неприемлема.

Постановка проблемы. Нами предлагается тепло горного массива рассматривать не как вредный фактор шахтерского труда, с которым ведется дорогостоящая борьба, а сделать реальные попытки поменять тактику этой борьбы, снизить ее стоимость и использовать тепло горных пород на пользу обществу. Приводимые ниже выкладки ни в коей мере не претендуют на глобальные решения и показатели, так как рассматривают лишь небольшой аспект использования тепла Земли, но их использование может дать существенный технико-экономический эффект в удешевлении процесса нормализации тепловых условий труда в глубоких шахтах и использовании тепла горного массива как альтернативного источника тепловой энергии для нужд народного хозяйства.

Изложение основного материала. Достижение поставленной цели предусматривается за счет нескольких операций, благоприятно изменяющих характер и параметры имеющих место в шахте термодинамических процессов, а именно:

- прекращения расхода электроэнергии на компенсацию нагрева рудничного воздуха за счет адиабатического сжатия воздуха;

- извлечения и доставки на дневную поверхность тепла горного массива, окислительных процессов и тепла, выработанного при выполнении технологических процессов по добыче и транспорту полезного ископаемого за счет израсходованной для питания приводов машин и механизмов электроэнергии;
- экономии электроэнергии на проветривание сети горных выработок за счет рационального использования естественной тяги;
- экономичного по затратам энергии и приемлемого для последующей утилизации способа доставки низкопотенциального тепла горного массива на дневную поверхность.

Знакомство с некоторыми аспектами этих вопросов целесообразно начать с процесса подачи воздуха в шахту по стволам.

Согласно общему уравнению аэростатики, изменение давления воздуха описывается зависимостью:

$$dP = \rho(X \cdot dx + Y \cdot dy + Z \cdot dz), \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, X, Y, Z – силы, действующие на элементарный объем воздуха в направлении соответствующих осей, и dx, dy, dz – величины смещений элементарного объема по соответствующей оси. При движении воздуха по вертикальному стволу перемещение имеет место только по вертикали (совпадает с осью z), поэтому $dP = \rho \cdot Z \cdot dz$. Но в данном случае на элементарный объем воздуха действует только сила земного тяготения, то есть $Z = g$ и, следовательно, $dP = \rho \cdot g \cdot dz$. Поскольку $\rho \cdot g = \gamma$, где γ – объемный вес воздуха, то (1) принимает вид

$$dP = \gamma \cdot dz. \quad (2)$$

Запишем уравнение состояния Клапейрона – Менделеева для удельного объема воздуха:

$$P \cdot v = R \cdot T.$$

Принимая во внимание, что $v \cdot \gamma = 1$, выразим удельный объем через удельный

вес, получим:

$$v = \frac{1}{\gamma}.$$

Тогда уравнение состояния для этого случая можно записать в виде:

$$\frac{P}{\gamma} = R \cdot T.$$

Отсюда (2) принимает вид:

$$dP = \frac{P}{R \cdot T} \cdot dz.$$

Сгруппировав переменные, получим:

$$\frac{dP}{P} = \frac{dz}{R \cdot T}. \quad (3)$$

Рассмотрим случай, когда воздух опускается с дневной поверхности (высотная отметка H_0 , давление $-P_0$) на горизонт околоствольного двора (отметка H_h , давление P_h). Прирост давления при опускании воздуха на горизонт околоствольного двора найдем, произведя интегрирование (3).

Получим:

$$\int_{P_0}^{P_h} \frac{dP}{P} = \int_{H_0}^{H_h} \frac{dz}{R \cdot T}; \quad \ln\left(\frac{P_h}{P_0}\right) = \frac{H_h - H_0}{R \cdot T} = \frac{H}{R \cdot T}.$$

Отсюда

$$P_h = P_0 \cdot e^{\frac{H}{R \cdot T}}.$$

При перемещении воздуха в сети горных выработок его параметры изменяются и в горизонтальных выработках, хотя естественная тяга в таких выработках не возникает, поскольку нет разности высот. Изменение температуры воздуха имеет место вследствие нагрева при политропическом сжатии воздуха и охлаждения - при расширении, но проявится это в виде естественной тяги лишь как результирующая разность давлений столбов воздуха одинаковой высоты на свежей и исходящих струях. Обозначив среднюю температуру воздуха поступающей и исходящей струй T_{1cp} и T_{2cp} , соответственно, получим расчетную величину естественной тяги

$$h_e = P_0 \cdot \left(e^{\frac{H}{R \cdot T_{1cp}}} - e^{\frac{H}{R \cdot T_{2cp}}} \right). \quad (4)$$

Величина естественной тяги не остается постоянной во времени величиной, поскольку средние температуры воздуха поступающей и исходящих струй подвержены сезонным и суточным колебаниям температуры и атмосферного давления на дневной поверхности, влиянию дополнительных источников нагрева за счет окислительных процессов и тепловыделений работающих машин и механизмов, а также тепловыделения из горного массива в атмосферу горных выработок, которое изменяется во времени непрерывно в течение длительного промежутка времени. Из (4) следует, что для определения величины естественной тяги достаточно иметь значения средней температуры и газовой постоянной столба воздуха, подаваемого на проветривание шахты, и идентичного ему по высоте столба исходящей струи. Однако определение этих параметров оказывается весьма сложной задачей, поскольку даже без учета изменения состава воздуха суммарное изменение средней температуры на каждой из струй происходит под действием многих факторов, проявление которых на свежей и исходящей струях происходит неодинаково. Например, если определять прирост температуры свежей струи только за счет политропического сжатия, то уже на глубине 1000 м прирост температуры воздуха составит около 10 °С. На самом деле прирост температуры воздуха окажется существенно меньше, но не потому, что отсутствует сжатие воздуха, а из-за наличия в стволе капежа воды и ее испарения, забирающего значительную часть тепла политропического сжатия, а также из-за наличия теплообмена поступающего свежего воздуха с горными породами ствола, образующими вокруг него тепловыравнивающую рубашку. К началу подъема исходящей струи, даже при отсутствии уклонов, когда горные работы ведутся только выше отметки околоствольного двора, параметры перемещающегося по горизонтальным выработкам воздуха также претерпевают существенные изменения, связанные с нагревом воздуха теплом горного массива и ростом его влажности.

Существенную роль в интенсивности нагрева при этом играет термическое сопротивление массива охлаждаемых воздухом горных пород, величина которого зависит от времени охлаждения, а также аэродинамических параметров выработки и скорости движения воздушного потока. Математический аппарат для расчета теплофизических параметров воздуха в горных выработках в достаточной степени разработан школой акад. А.Н. Щербаня [2], дает хорошую сходимость расчетных параметров с реально наблюдаемыми в природе результатами, однако он достаточно сложен и трудоемок.

Поскольку в настоящей статье речь идет об оценке потенциального альтернативного источника, то на первом этапе расчета воспользуемся упрощенной методикой расчета тепловых параметров воздушного потока шахтной вентиляции, приведенной в работах А. Н. Щербаня и его школы и МакНИИ. Разработка математического аппарата этой школой осуществлена в середине прошедшего столетия и, хотя с тех пор предписано использовать систему СИ, в горной теплофизике так и сохранилась система технических единиц, которая используется ниже в приводимых расчетах. Оценим величину тепловой энергии, образующейся при адиабатическом сжатии воздуха при опускании его по вертикальному стволу на глубину 1000–1500 м при подаче от 100 до 300 м³/с. Прирост тепловой энергии определится изменением температуры воздуха за счет сжатия. В соответствии с приведенными выше замечаниями не будем пока принимать во внимание капез воды в стволе и влияние теплообмена с горными породами. Тогда по зависимости $W=86400 c_p \cdot Q \cdot \gamma \cdot \Delta t$ получим для расхода воздуха 100 м³/с и глубины ствола 1000 м $W_{1000} = 24,88 \cdot 10^6$ ккал и для расхода 300 м³/с и глубины ствола 1500 м $W_{1500} = 93,3 \cdot 10^6$ ккал в сутки. Не рассматривая пока технологию способа, предположим, что все выделившееся за счет адиабатического сжатия воздуха тепло изъято у воздуха и к горным работам он направился от околоствольного двора с его начальной температурой, при которой попал в ствол на дневной поверхности. В зимнее время эта температура после подогрева воздуха калориферной установкой может быть принята равной +2 °С. На пути к лаве воздух нагрелся за счет тепла горных пород и образовавшегося за счет энергии питания машин и механизмов, а также окислительных процессов до предельно допустимой санитарными нормами величины 26 °С. Тогда окажется, что на пути до очистных забоев воздух в шахте глубиной 1000 м получил еще дополнительно $W_{1000\partial} = 54,73 \cdot 10^6$ ккал, а в шахте глубиной 1500 м при расходе 300 м³/с, соответственно, $W_{1500\partial} = 136,84 \cdot 10^6$ ккал. Даже в том случае, если на пути следования от очистных забоев до околоствольного двора воздух не получит дополнительного тепла, суммарный тепловой потенциал воздушного потока (с учетом адиабатического сжатия) составит, соответственно, $W_{1000o} = 79,6 \cdot 10^6$ ккал и $W_{1500o} = 230 \cdot 10^6$ ккал. Внушительные по величине приведенные величины станут ощутимыми, если разобраться в их сути.

Предположим, мы хотим избавиться от влияния нагрева воздуха за счет адиабатического сжатия и для этого устанавливаем в околоствольном дворе на

свежей струе холодильную установку, компенсирующую этот нагрев. Тогда при вполне приличном для такого типа установок холодильном коэффициенте $k_x = 2,5$ для компенсации $W_{1000\text{д}} = 54,73 \cdot 10^6$ ккал и $W_{1500\text{д}} = 136,84 \cdot 10^6$ ккал придется ежедневно расходовать, соответственно, 24000 и 64000 кВт·ч электроэнергии. Ценой нормализации тепловых условий в данном случае явится стоимость израсходованной электроэнергии и амортизационные расходы по холодильной установке. Как дальше за лавой изменяются параметры воздушного потока, пока никого не интересует, во-первых, потому что предполагается отсутствие горнорабочих на исходящей струе, во-вторых, потребность в оценке теплового потенциала не производилась потому, что выносимое на дневную поверхность выбрасывается в окружающую среду – его энергия не используется. Между тем, давление воздуха при его подъеме по горным выработкам будет уменьшаться, а его температура за счет адиабатического расширения упадет. Пока мы еще не научились извлекать и использовать ни тепло адиабатического сжатия рудничного воздуха, ни холод его адиабатического расширения.

Для обеспечения нормальной работы подземной холодильной установки необходимо избавиться от тепла конденсации, что осуществляется его отводом шахтной или подаваемой с поверхности водой или отдачей тепла конденсации исходящей струе воздуха. Применение воды для отвода тепла конденсации имеет свои преимущества и недостатки. Поскольку вода имеет в 3200–4000 раз большую теплоемкость, чем такое же по объему количество воздуха, то понятна ее выгода – требуется сравнительно небольшая труба для циркуляции воды. Но эта труба в глубокой шахте должна работать под высоким давлением, а поэтому окажется металлоемкой и дорогой. Использование откачиваемой шахтным водоотливом агрессивной и загрязненной механическими примесями воды для этих целей без ее обработки исключено, а обработка воды в подземных условиях является трудно организуемым и дорогостоящим мероприятием, поэтому проще использовать воду, подаваемую с дневной поверхности (например, из пожарного водоема или из става, подающего воду на пылеподавление). Но в том случае, когда используются мокрые теплообменники, воду из шахты придется откачивать, что для глубокой шахты сопряжено с дополнительным расходом электроэнергии. В конкретном случае выбор варианта должен решаться на основании технико-экономического обоснования. Преследуя цель использования шахтного тепла, примем вариант подачи в шахту охлажденной воды для компенсации влияния тепла адиабатического сжатия с дневной поверхности и отвод ее по отдельной U-образной трубе, что позволит избежать необходимости применения высоконапорного насоса, поскольку геодезическая высота в подающем и отводящем воду трубопроводах будет компенсирована.

Однако тепло адиабатического сжатия воздуха при опускании по стволу – лишь малая часть возможного теплового запаса на горизонте околоствольного двора. Сюда же поступит с исходящей воздушной струей тепло, полученное прошедшим по горным выработкам воздушным потоком от нагретого горного массива, от преобразованной в тепловую энергию энергии питания машин и механизмов, от окислительных процессов в горных выработках и притекающее к горным выработкам тепло недр Земли, то есть при центральной схеме проветри-

вания - практически все выносимое на дневную поверхность тепло, которое может многократно превышать величину тепловой энергии адиабатического сжатия воздушного потока.

Не рассматривая пока детально источники поступления тепла горного массива в поток проветриваемого горные выработки воздуха, укажем, что превышение естественной температуры горных пород величины $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ явится причиной притока тепла в горную выработку при любом типе пород горного массива. Но для того, чтобы построить эту выработку при типовых применяемых способах и средствах их проведения, вначале придется разрушить и извлечь горную породу. Уже на глубине ведения горных работ $660\text{--}700\text{ м}$ естественная температура горных пород превысит нормируемые санитарными нормами $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, и разрушенная горная масса будет выделять тепло в объем проводимой горной выработки. Для шахт Донбасса предельной глубины речь идет о вскрытии горного массива с естественной температурой до $72\text{--}75\text{ }^{\circ}\text{C}$. При существующей технологии проведения горных выработок отсутствует возможность предварительного охлаждения горного массива, а приемлемые сроки подготовки к выемке новых панелей, блоков не позволяют существенно охладить опережающий забой горной выработки массив горной породы. Поэтому взорванная горная масса будет иметь температуру, близкую к естественной температуре горных пород.

Поскольку средства механизации уборки горной породы и возведения крепи не рассчитаны на безлюдную технологию, то придется для обеспечения приемлемых условий работы проходчиков по возможности быстро охладить и убрать ее, не нарушая требований санитарных норм по температуре воздуха и нагретых стенок горной выработки. Это значит, что при типовом сечении горной выработки $14,5\text{ м}^2$ и шаге подвигания забоя за цикл взрывных работ на $1,5\text{ м}$ придется в зависимости от типа пород горного массива охладить до температуры минимум $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ по 46 тонн песчаника или известняка или $48,5$ тонны песчанистого сланца. Подсчеты показывают, что уже при естественной температуре горной породы $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ для этого потребуется затратить 34450 ккал холода для охлаждения взорванного песчаника, 35940 ккал холода для известняка или 41850 ккал холода для охлаждения песчанистого сланца. Потребность в холоде для охлаждения взорванной горной массы того же объема возрастет для условий естественной температуры горных пород $72\text{ }^{\circ}\text{C}$ в $10,5$ раз и составит соответственно 361700 ккал для охлаждения взорванного песчаника, 377300 ккал для известняка и 439400 ккал для песчанистого сланца.

Пытаться охладить в короткое время взорванную горную породу проветриваемым горную выработку воздухом обречена на провал даже при выполнении трудно осуществимого при проветривании подготовительной выработки требования обеспечить скорость движения воздуха в ней 1 и 2 м/с . В зарубежной практике проведения горных выработок имеют место прецеденты, когда воздух в выработку подается по трубопроводу диаметром $1,4\text{--}1,6\text{ м}$ и более, но такой вариант осуществляется при имеющих место в зарубежной практике площадях поперечного сечения капитальных выработок в $2\text{--}2,5$ раз больше, чем капитальные выработки шахт Донбасса. Если разместить трубопровод диаметром $1,6\text{ м}$ в вы-

работке площадью поперечного сечения $12,5 \text{ м}^2$, то ведение технологических процессов проходки окажется невозможным из-за загромождения ее сечения. Допустим, нам все же удалось разместить трубопровод повышенного диаметра и подать в забой подготовительной выработки требуемые объемы воздуха, обеспечивающие скорость его движения в выработке 1 и 2 м/с, соответственно. Эффект этого мероприятия без предварительного охлаждения, подаваемого в забой воздуха, окажется приемлемым лишь при естественной температуре горных пород порядка $35 \text{ }^\circ\text{C}$. При нагреве воздуха на $5 \text{ }^\circ\text{C}$ потребуется на вынос тепла взорванной породы при подаче $12,5 \text{ м}^2/\text{с}$ около 80 мин, а при подаче $25 \text{ м}^3/\text{с}$ – около 40 мин. При естественной температуре горных пород $72 \text{ }^\circ\text{C}$ даже при подаче охлажденного до $5 \text{ }^\circ\text{C}$ воздуха в указанных объемах потребуется промежуток времени на охлаждение взорванной горной массы от 2,5 до 6 часов.

В практике проведения квершлага сечением 28 м^2 на шахте «Виктория 1/2» в ФРГ по породе с естественной температурой горных пород $49 \text{ }^\circ\text{C}$, кроме интенсивной вентиляции по воздухопроводу диаметром 1,4 м, для обеспечения в призабойном пространстве температуры воздуха $28 \text{ }^\circ\text{C}$ потребовалось охладить подаваемый в забой воздух с помощью двух холодильных установок суммарной холодопроизводительностью около 500000 Вт при интенсивном обдуве поверхности проводимой выработки через два кольца воздухоподдачи, установленных на расстоянии 7 и 16 м от груди забоя при дополнительном орошении поверхности выработки водой. Отличие от рассматриваемого нами случая представляет применение мощного бурового комбайна «Демаг» на проходке выработки и значительно меньшая естественная температура горных пород. Запыленный и увлажненный воздух удалялся с помощью двух пылеотсасывающих установок «Ротовент», одна из которых располагалась у режущей головки комбайна, а другая – на перезагрузке выбуренной породы. Публикация скромно умалчивает о расходе воды, но упоминает о том, что в выработке для осушения имелись смонтированные с шагом 100–150 м автоматические пневмоотсосы, подключенные к трубопроводу диаметром 100 мм. Из этого следует, что в нормализации тепловых условий проводимого квершлага активно использовалось охлаждение груди забоя выработки и бурового шлама водой.

К сожалению, при буровзрывном способе проходки выработки упомянутый выше период охлаждения взорванной породы не обеспечит в ее призабойной части приемлемых температурных параметров рудничного воздуха по той простой причине, что образовавшуюся при буровзрывном (как и при буровом) способе проходки зону выработки окружает огромный по размерам горный массив с естественной для данной глубины температурой горных пород. Поэтому, наряду с поступлением тепла взорванной горной массы в проветриваемый выработку воздушный поток через стенки выработки будет притекать тепло нагретого горного массива, имеющего в первый период после их обнажения при любом способе проходки температуру, близкую к естественной температуре горной породы. По мере охлаждения горного массива вокруг выработки будет образовываться теплоуравнивающая оболочка (ТО) горной породы с логарифмическим законом изменения температуры горной породы по мере изме-

нения ее диаметра, интенсивность теплового потока из горного массива в объем горной выработки будет снижаться во времени, но при охлаждении стенок выработки воздушным потоком этот процесс окажется длящимся месяцы и годы, поэтому рассчитывать на возможность нормализации тепловых условий в проводимой горной выработке за счет участия ТО не приходится. Необходимо менять технологию ведения работ по проведению горных выработок на глубоких горизонтах, обеспечить ускоренное формирование ТО вокруг проводимой горной выработки, использовать ее как средство снижения притока тепла в горную выработку. Но для формирования ТО в горном массиве с высокой естественной температурой требуется отвести из него огромное количество тепла. Подаваемый по выработке типового поперечного сечения охлажденный воздух эту функцию выполнить не может, но даже если пойти по пути зарубежной горной практики увеличения площади поперечного сечения проводимых горных выработок и подачи максимально возможного количества охлажденного воздуха, то эффект нормализации тепловых условий в горной выработке окажется дорогостоящим, а извлеченное из горного массива тепло выброшенным исходящей вентиляционной струей в окружающую среду на дневной поверхности шахты из-за отсутствия системы извлечения низкопотенциального тепла миллионов кубометров проветривавшего горные выработки воздуха.

Нами в НГУ выполнены исследования по разработке способа и средств ускоренного предварительного формирования ТО вокруг горной выработки, обеспечивающего приемлемые темпы проведения горных выработок глубоких шахт и вынос тепла горного массива на дневную поверхность для его использования при производстве холода и теплоснабжения инфраструктуры шахты [3,4,5].

Ниже кратко излагается сущность предложенного для этих целей способа формирования ТО вокруг проводимой горной выработки с помощью скважины, опережающей подготовительный забой проводимой выработки. Охлаждение горного массива осуществляется подаваемым в скважину потоком воды, выносящим тепло горного массива при температуре, близкой к естественной температуре горных пород на глубине ведения горных работ. Схема охлаждения горного массива приведена в [6], в работах [7,8,9] рассмотрен способ ускоренного формирования ТО и влияние сформированной оболочки на интенсивность притока тепла в горную выработку при относительно больших размерах оболочки. Ниже приведен пример расчета, дающий представление о размерах запаса тепла, выносимого из ТО горных пород с различной естественной температурой в оболочках сравнительно малой величины и оценивается влияние их термического сопротивления на изменение удельного теплового потока из горного массива в выработку. Расчет выполнен с применением математического аппарата системы MathCAD.

Оценка величины тепловой энергии, подлежащей выносу при формировании ТО на глубоких горизонтах, учеными школы А. Н. Щербаня не производилась, поскольку такое мероприятие рассматривалось как длительно текущий процесс, не применимый для **оперативного** управления тепловыми условиями горных выработок. В поисках решения проблемы нормализации тепловых условий в горных выработках глубоких шахт приходится подвергать сомнению такую точку зрения.

Оценим величину подлежащей выносу тепловой энергии, необходимой для формирования ТО толщиной до 3 м в основных породах глубоких горизонтов шахт Донбасса – песчанике, известняке и песчанистых сланцах при глубине ведения горных работ от 1300 до 1800 м с шагом роста глубины 100 м, и оценим влияние ТО на величину удельного притока тепла в горную выработку типового для шахт Донбасса поперечного сечения. Величину геотермической ступени примем равной $st = 31 \text{ м/}^\circ\text{С}$. Эквивалентный гидравлический радиус горной выработки составляет $r1 = 2 \text{ м}$.

Запись условий задачи и аналитических зависимостей для расчета произведена в типичной для MathCAD 14 форме на рисунках, таблицы выдаваемых результатов расчета, ввиду лимита места в статье, опущены, графики приведены. Примем условие, что предварительное охлаждение должно обеспечить температуру вскрытой стенки выработки $tv = 26 \text{ }^\circ\text{С}$, но на расстоянии 3 м от стенки выработки сохраняется естественная температура горных пород заданного горизонта. Распределение температуры по радиусу оболочки подчиняется логарифмическому закону.

$$\begin{aligned}
 &H1 := 1300 \quad H2 := 1400 \quad H3 := 1500 \quad H4 := 1600 \quad H5 := 1700 \quad H6 := 1800 \quad st := 31 \quad F := 14 \quad tv := 26 \\
 &r1 := 2 \quad r := 2..5 \quad r2 := 5 \quad tp1 := \frac{H1 - 25}{st} + 8 \quad tp2 := \frac{H2 - 25}{st} + 8 \\
 &tp3 := \frac{H3 - 25}{st} + 8 \quad tp4 := \frac{H4 - 25}{st} + 8 \quad tp5 := \frac{H5 - 25}{st} + 8 \quad tp6 := \frac{H6 - 25}{st} + 8 \\
 &tp1 = 49.129 \quad tp2 = 52.355 \quad tp3 = 55.581 \quad tp4 = 58.806 \quad tp5 = 62.032 \quad tp6 = 65.258 \\
 &f1(r) := tp1 - (tp1 - tv) \cdot \frac{\ln\left(\frac{r}{r2}\right)}{\ln\left(\frac{r1}{r2}\right)} \quad f2(r) := tp2 - (tp2 - tv) \cdot \frac{\ln\left(\frac{r}{r2}\right)}{\ln\left(\frac{r1}{r2}\right)} \quad f3(r) := tp3 - (tp3 - tv) \cdot \frac{\ln\left(\frac{r}{r2}\right)}{\ln\left(\frac{r1}{r2}\right)} \\
 &f4(r) := tp4 - (tp4 - tv) \cdot \frac{\ln\left(\frac{r}{r2}\right)}{\ln\left(\frac{r1}{r2}\right)} \quad f5(r) := tp5 - (tp5 - tv) \cdot \frac{\ln\left(\frac{r}{r2}\right)}{\ln\left(\frac{r1}{r2}\right)} \quad f6(r) := tp6 - (tp6 - tv) \cdot \frac{\ln\left(\frac{r}{r2}\right)}{\ln\left(\frac{r1}{r2}\right)}
 \end{aligned}$$

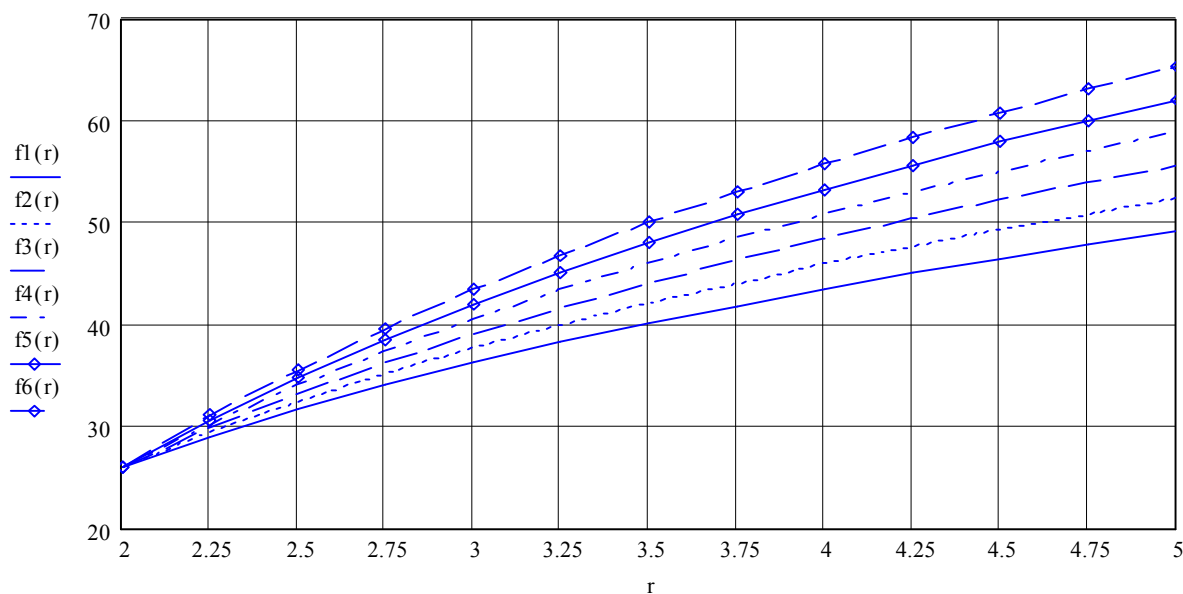


Рис.1. Распределение температуры горных пород в ТО горной выработки на глубинах от 1300 м (нижняя кривая) до 1800 м (верхняя кривая)

Характер изменения температуры горной породы по радиусу ТО одинаков для любой слагающей ее горной породы, а количество оставшейся в ней тепловой энергии зависит от объемного веса и теплоемкости горной породы. Ниже, на рис. 2, приведены аналитические зависимости для подсчета распределения тепловой энергии по слоям ТО, подсчитанные для песчаника. Обращаем внимание на тот факт, что интегрирование начинается с величин $r = r_1$, поэтому началу координат графика для любой глубины соответствуют нули.

$$c := 0.20; \quad G := 2430$$

$$f7(r) := 2\pi \cdot c \cdot G \cdot (tp1 - f1(r)) \cdot \int_{r1}^r r \, dr \quad f8(r) := 2\pi \cdot c \cdot G \cdot (tp2 - f2(r)) \cdot \int_{r1}^r r \, dr \quad f9(r) := 2\pi \cdot c \cdot G \cdot (tp3 - f3(r)) \cdot \int_{r1}^r r \, dr$$

$$f10(r) := 2\pi \cdot c \cdot G \cdot (tp4 - f4(r)) \cdot \int_{r1}^r r \, dr \quad f11(r) := 2\pi \cdot c \cdot G \cdot (tp5 - f5(r)) \cdot \int_{r1}^r r \, dr \quad f12(r) := 2\pi \cdot c \cdot G \cdot (tp6 - f6(r)) \cdot \int_{r1}^r r \, dr$$

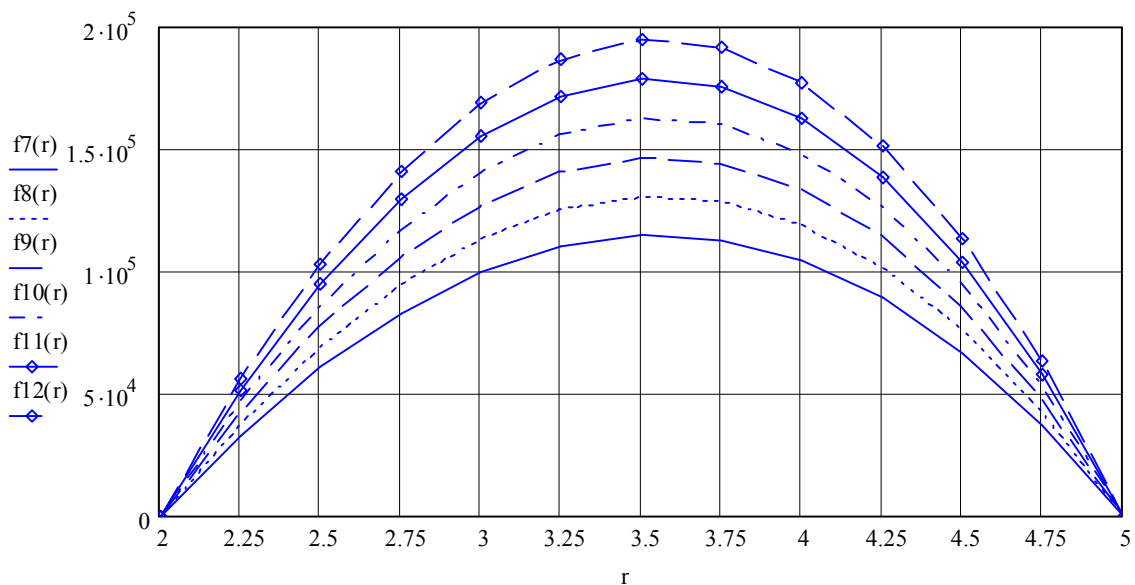


Рис. 2. Характер изменения выноса тепла по слоям при формировании ТО (нижняя кривая для горизонта глубиной 1300 м, верхняя – для горизонта 1800 м)

Характер нарастания суммарной величины подлежащего выносу из ТО запаса тепла представлен на рис. 3. Обращаем внимание читателей на приведенную на нем зависимость для суммирования количества тепла по слоям ТО, присущую Math CAD.

$$s1(r) := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 2, 2.25..r \\ s \leftarrow f7(i) + s \end{cases} \quad s2(r) := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 2, 2.25..r \\ s \leftarrow f8(i) + s \end{cases} \quad s3(r) := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 2, 2.25..r \\ s \leftarrow f9(i) + s \end{cases}$$

$$s4(r) := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 2, 2.25..r \\ s \leftarrow f10(i) + s \end{cases} \quad s5(r) := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 2, 2.25..r \\ s \leftarrow f11(i) + s \end{cases} \quad s6(r) := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 2, 2.25..r \\ s \leftarrow f12(i) + s \end{cases}$$

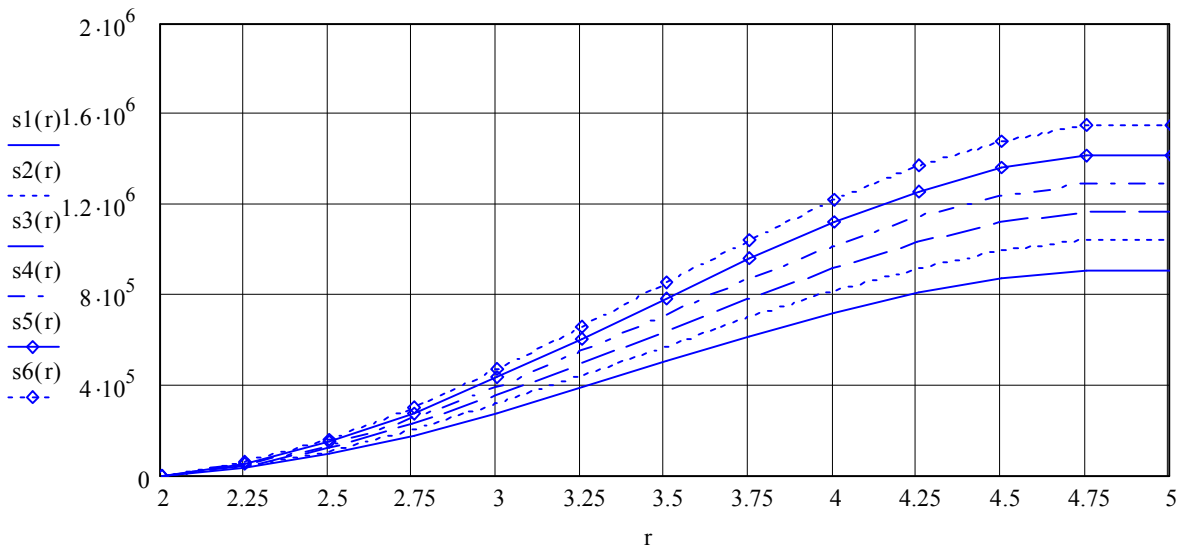


Рис. 3. Характер нарастания количества тепла, подлежащего выносу при формировании ТО горных пород выработок на различной глубине (нижняя кривая – для горизонта 1300 м, верхняя – для 1800 м)

Расчет термического сопротивления в функции толщины ТО для песчаника, известняка и песчанистых сланцев приведен ниже, на рис. 4. Обращаем внимание читателей на то, что кривые начинаются с размера радиуса оболочки 2,25 м. В стандартную аналитическую зависимость для расчета термического сопротивления в знаменателе под знаком логарифма входят радиус оболочки и эквивалентный радиус горной выработки. Оболочка действительно начинается сразу же за поверхностью выработки, то есть $r = r_1$, а их отношение равно 1. Логарифм единицы равен нулю. При нуле в знаменателе и действительных числах в числителе результатом будет бесконечность. Поэтому нужно либо отказаться от расчета или произвести его при не совпадающих величинах радиусов, что и сделано ниже. В приводимом ниже расчете минимальный радиус оболочки принят равным 2,25 м, максимальный – принят равным оговоренному в начале статьи размеру 5 м, вытекающему из максимальной толщины оболочки 3 м. Коэффициенты теплопроводности горных пород приняты по «Единой методике прогнозирования температурных условий в угольных шахтах», МакНИИ.

$$r_1 := 2.0 \quad \lambda_p := 2.56 \quad \lambda_s := 1.77 \quad \lambda_c := 0.985 \quad r := 2.25..5$$

$$f_1(r) := \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_p}{\ln\left(\frac{r}{r_1}\right)} \quad f_2(r) := \frac{2 \pi \cdot \lambda_s}{\ln\left(\frac{r}{r_1}\right)} \quad f_3(r) := \frac{2 \pi \cdot \lambda_c}{\ln\left(\frac{r}{r_1}\right)}$$

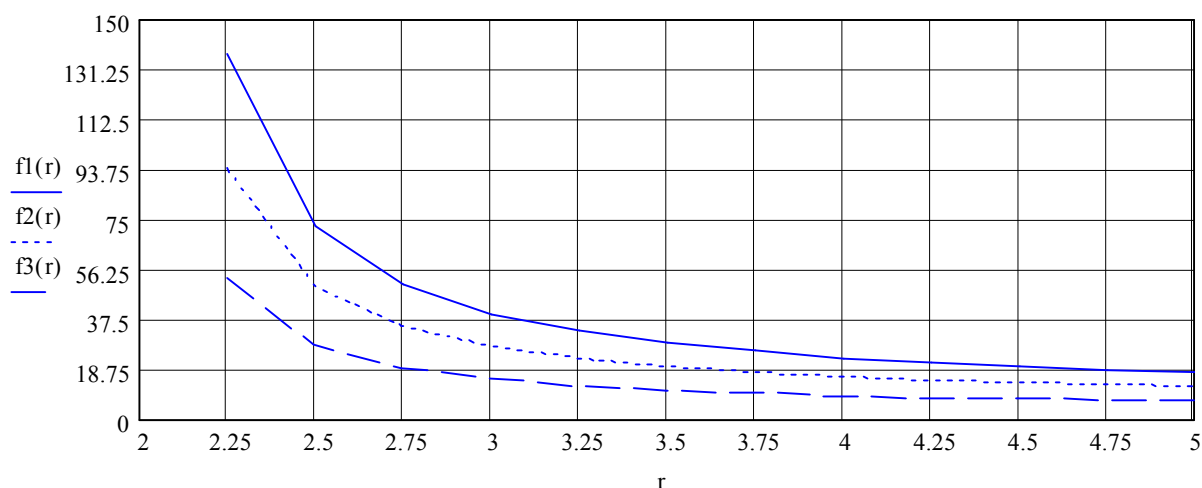


Рис. 4. Характер изменения величины термического сопротивления ТО горной выработки, пройденной по песчанику – $f_1(r)$, песчанистому сланцу – $f_2(r)$ и известняку – $f_3(r)$ в функции ее толщины

На величину удельного притока тепла из горного массива в горную выработку оказывают влияние разность температур массива горных пород и проветриваемого выработку воздуха, скорость движения воздушного потока, влажность воздуха, тип крепи и вид затяжки, влажность пород горного массива. Представляет интерес выяснить, в какой степени будет проявляться положительное влияние ТО горной выработки на снижение удельного теплового потока в горную выработку. Ниже, на рис. 5, приводятся результаты расчета величины удельного теплового потока в горную выработку, пройденную по песчанику при уменьшенной до 0,1 м разности эквивалентного радиуса выработки и радиуса ТО.

Выполненные нами предварительные расчеты показывают, что с ростом радиуса ТО на глубинах ведения горных работ более 1600 м затраты холода на создание оболочек не оправдываются ввиду малого увеличения их термического сопротивления. Необходимо искать другие пути и средства снижения притока тепла в горные выработки. Тем не менее, приводимый выше расчет влияния параметров ТО из обладающего наибольшим коэффициентом теплопроводности песчаника четко показывает, что эффект ТО положительно сказывается только при сравнительно малой толщине оболочки. Из графиков рис. 5 следует, что даже для породы с достаточно большим коэффициентом теплопроводности наличие ТО толщиной порядка 1÷1,5 м обещает снизить удельный тепловой поток в горную выработку на порядок. Для пород с меньшим коэффициентом теплопроводности результаты использования ТО могут быть лучше. Применение ТО сравнительно небольшой толщины может оказаться весьма полезным при проходке выработки, но их нельзя считать панацеей в решении проблемы нормализации тепловых условий в глубоких шахтах при длительном сроке службы горных выработок.

$$\lambda p := 2.5\epsilon \quad r1 := 2 \quad r := 2.1..5$$

$$f1(r) := \frac{2\pi \cdot \lambda p (tp1 - tv)}{\ln\left(\frac{r}{r1}\right)} \quad f2(r) := \frac{2\pi \cdot \lambda p (tp2 - tv)}{\ln\left(\frac{r}{r1}\right)} \quad f3(r) := \frac{2\pi \cdot \lambda p (tp3 - tv)}{\ln\left(\frac{r}{r1}\right)}$$

$$f4(r) := \frac{2\pi \cdot \lambda p (tp4 - tv)}{\ln\left(\frac{r}{r1}\right)} \quad f5(r) := \frac{2\pi \cdot \lambda p (tp5 - tv)}{\ln\left(\frac{r}{r1}\right)} \quad f6(r) := \frac{2\pi \cdot \lambda p (tp6 - tv)}{\ln\left(\frac{r}{r1}\right)}$$

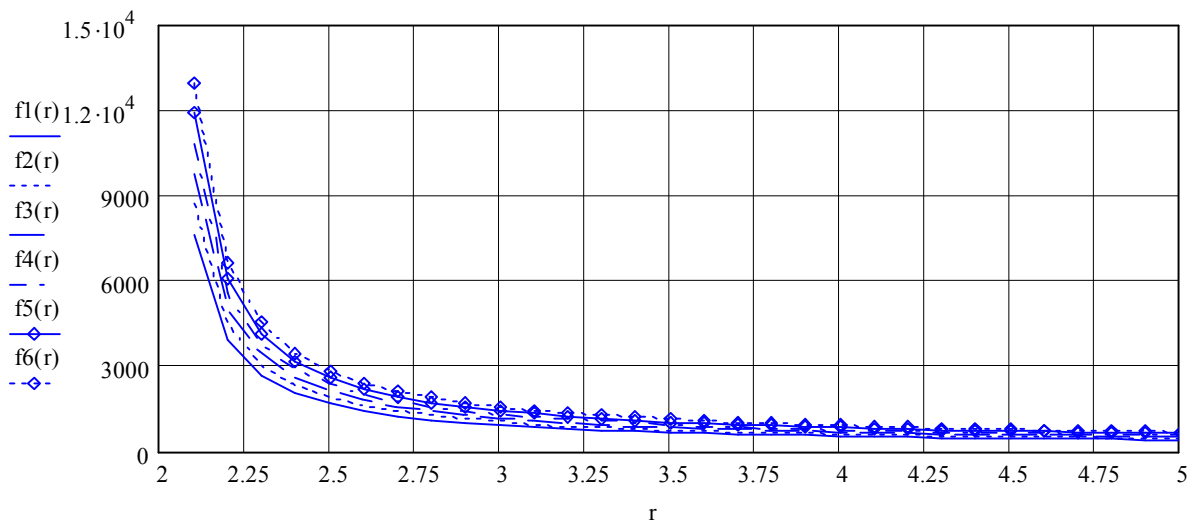


Рис. 5. Характер изменения удельного теплового потока в горную выработку, пройденную по песчанику, при наличии ТО, при различных глубинах ведения горных работ

Выводы:

1. Первоочередной задачей угольной промышленности Украины является снабжение страны каменным углем в объемах, имевших место на период обретения независимости. Обеспечение уровня добычи каменного угля 170–180 млн. тонн является залогом нормальной работы коксохимии, металлургической промышленности, энергетики и энерготехнологической переработки угля для получения газа и жидкого топлива для двигателей внутреннего сгорания. Разведанные запасы угля достаточны для обеспечения нужд страны в энергоносителях на протяжении 450–500 лет. Их освоение является гарантией экономической независимости страны и роста материального благосостояния ее населения.

2. Основным препятствием на пути возрождения угольной промышленности является катастрофическое ухудшение условий труда в шахтах, явившееся следствием уничтожения 55 систем центрального кондиционирования воздуха на шахтах, приведшее к росту температур в очистных и подготовительных забоях глубоких шахт на 12–15 °С выше регламентируемых санитарными нормами. Украина не производит холодильных машин для систем центрального кондиционирования воздуха в шахтах и не имеет валюты для их приобретения в развитых странах. Но даже наличие возможности приобрести такие машины

не может решить проблемы нормализации тепловых условий глубоких шахт из-за увеличения стоимости электроэнергии, огромных расходов ее на вентиляцию и кондиционирование воздуха, ведущих к непрерывному росту себестоимости добытого угля.

3. Основным направлением обеспечения нормальных тепловых условий в шахтах Донбасса должно явиться превращение шахт в энерготехнологические комплексы, выполняющие, наряду с добычей угля, функцию извлечения и использования тепла недр Земли в качестве альтернативного источника энергии. Залогом реализации технологии и успешного функционирования энергокомплексов должно явиться коренное изменение системы нормализации тепловых условий горных выработок шахт за счет перехода на использование воды в качестве основного средства доставки холода в горные выработки глубоких шахт и выноса тепла горного массива на дневную поверхность. Переход на такую систему доставки холода позволит использовать естественный холод осенне-зимнего периода на дневной поверхности, холод поверхностных водоемов, включая водоледяные смеси, а также холод мощных холодильных установок общепромышленного назначения, выпускаемых в Украине.

4. Классическая горная теплофизика содержит сведения о теплоуравнивающих рубашках, образующихся вокруг горных выработок при движении воздушного потока с температурой, отличающейся от естественной температуры горных пород, отмечает возможность нагрева или охлаждения пород рубашки воздухом и сведения о результатах экспериментальных исследований их параметров, которыми установлено, что диаметры рубашек могут составлять более 10 м, но период их формирования составляет годы и десятилетия. Абсолютно правильные сведения породили мнение, что теплоуравнивающие рубашки из-за столь длительного периода их формирования не могут служить средством оперативного управления тепловым режимом горных выработок глубоких шахт. Нами показано, что при переходе на систему доставки холода в горные выработки глубоких шахт и выноса тепла горного массива водой теплоуравнивающие оболочки могут быть сформированы в короткий период времени и выполнять функции средства регулирования теплового режима горных выработок глубоких шахт.

5. Извлекаемое из глубоких шахт тепло горного массива является низкопотенциальным, однако концентрированный вынос его на дневную поверхность позволяет его использовать для нужд теплофикации парников и теплиц и предварительного нагрева воды котельных, осуществляющих теплоснабжение инфраструктуры. По мере ухода горных работ на предельные глубины температура выдаваемой из шахт воды может достигать 65 °С, нормируемых для теплоснабжения зданий и сооружений и при сохранении сети циркуляции воды на нижнем отработанном горизонте на длительное время обеспечить теплом объекты инфраструктуры при отсутствии котельных или в дополнение к действующим. Применение системы теплового насоса позволяет получить тепловой потенциал воды, получать пар и осуществлять производство электроэнергии. Для использования тепла горного массива глубоких шахт необходимо уже в настоящее время осуществлять работу по созданию систем утилизации низко-

потенциального тепла, рассматривая их как первый шаг на пути использования тепла недр Земли.

6. Выполненные в НГУ исследования и расчетные обоснования показывают, что использование воды в качестве средства доставки холода с дневной поверхности в шахту и тепла горного массива на дневную поверхность имеет особо благоприятные перспективы при применении в комплексе со схемой предварительного охлаждения горного массива и ускоренного формирования ТО горных выработок. Применение такой технологии, по предварительным расчетам, сможет обеспечить на глубоких горизонтах при прохождении одного погонного метра выработки извлечение 7–8 миллионов килокалорий тепла. Украина способна собственными силами и средствами обеспечить функционирование таких систем за счет применения разработанных и освоенных Одесским «Холодмашем» водоохлаждающих машин МХРВ-1 холодопроизводительностью 1 млн. Вт. Для этого необходимо освоить их серийное производство, вместо имеющего место в настоящее время штучного – двух машин в год.

7. Следуя разумной практике развитых стран, осуществляющих контроль и руководство угольной промышленностью, правительство Украины должно осуществить полную национализацию шахт, обеспечение за счет национального бюджета выполнение научно-исследовательских работ по решению их насущных нужд и техническому переоснащению, подготовку кадров для угольной промышленности.

Список литературы

1. Бойко В. А. Оценка теплового потенциала горного массива глубокой шахты Донбасса и возможностей типовой схемы нормализации условий труда / В.А. Бойко, О. А. Бойко. // Сборник научных трудов Национального горного университета. – Днепропетровск: 2003, №16, С.113–124,

2. Щербань А. Н., Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт / Щербань А. Н., Кремнев О. А. // Издательство АН УССР, Киев: том 1,1959. – С430, том 2, 1960.– С. 348.

3. Бойко В. А. Сравнительная оценка способов и средств нормализации тепловых условий горных выработок глубоких шахт Донбасса / Бойко В. А., Бойко О. А. // Збірник наукових праць національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: 2011, №36, том 1, С. 169–177.

4. Бойко В. А. Аналитическая оценка степени охлаждения горного массива глубокой шахты с помощью скважины, опережающей забой подготовительной выработки / Бойко В. А., Бойко О. А.// Науковий вісник НГУ. – Днепропетровск: 2010, № 11/12, С. 106–113.

5. Пивняк Г. Г. Аспекты решения проблемы снижения энергопотребления при ведении горных работ в глубоких шахтах Донбасса / Пивняк Г. Г. Бойко В. А. // Науковий вісник національного гірничого університету. – Днепропетровск: 2012, №1, С. 88–98.

6. Бойко О. А.. Предварительная оценка притока тепла массива горных пород в выработку и способы его сокращения для нормализации микроклимата глубоких шахт Донбасса / Бойко О. А., Бойко В. А. // Науковий вісник НГУ. – Днепропетровск: 2011, №4(124), С. 94–105.

7. Бойко В. А. Разработка способа и средств формирования теплозащитной оболочки горных выработок глубокой шахты и оценка влияния ее параметров на теплоприток из горного массива / Бойко В. А., Бойко О. А. // Материалы международной конференции “Форум горняков 2009”, секция “Рудничная аэрология и безопасность труда”, НГУ, –Днепропетровск: 2009, С. 57–73.

8. Бойко В. А. Способ ускоренного формирования теплоуравнивающей рубашки горной выработки глубокой шахты / Бойко В. А., Бойко А. В. // Збірник наукових праць національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: 2009, №33, том 2, С. 113–125,

9. Бойко О. А. Исследование влияния теплоуравнивающей оболочки пород горного массива на величину притока тепла в горную выработку глубокой шахты Донбасса / Бойко О.А. Бойко В. А. // Науковий вісник національного гірничого університету. – Днепропетровск: 2011. №33, том 2, С. 98–106.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Голіньком В.І.
Надійшла до редакції 28.03.2012*

УДК 681.5:621.317

© С.І. Випанасенко, В.В. Овсяников

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПАЛИВА ДЛЯ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Наведено результати прискореного, більш точного визначення калорійності вугілля для теплових електростанцій за даними вимірювання його комплексної діелектричної проникності. Калорійність вугілля визначається в результаті рішення на ЕОМ оберненої задачі перетворення заздалегідь складеного банку калібрувальних характеристик діелектричної проникності різного вугілля у відповідну їм калорійність невідомого вугілля.

Приведены результаты ускоренного, более точного определения калорийности угля для тепловых электростанций по данным измерения его комплексной диэлектрической проницаемости. Калорийность угля определяется в результате решения на ЭВМ обратной задачи преобразования заранее составленного банка калибровочных характеристик диэлектрической проницаемости разных углей в соответствующую им калорийность неизвестного угля.

The results of accelerated, more accurate determination of calorific value of coal of thermal power plants according to the measurement of its complex dielectric permittivity are presented. Calorific value of coal is determined by solving the inverse problem of computer transformations pre-drawn bank calibration characteristics of the complex dielectric permittivity of different coals in their corresponding calorific value of unknown coal.

Вступ. У теперішній час на більшості промислових підприємств контроль якісних характеристик вугілля таких, як зольність, калорійність або вологість здійснюється у спеціалізованих лабораторіях традиційними фізико-хімічними методами. Процедура діагностики пов'язана зі значними втратами робочого часу (до декількох годин на одну пробу) та коштів на придбання необхідних хімічних реактивів. При тому, одночасно з традиційними методами контролю якості палив розвиваються спектроскопічні, радіаційні, теплові, електромагнітні (мікрохвильові) та інші. Ці методи використовуються для експрес-контролю речовин одночасно з традиційними методами та можуть їх доповнювати шляхом оперативної видачі результатів індикації якості. Таку експрес-інформацію можна одержувати за декілька хвилин.

Постановка задачі. Дана робота присвячена подальшому розвитку електромагнітних методів експрес-контролю якості вугілля та інших палив у напрямку підвищення точності та автоматизації визначення калорійності вугілля і пе-