

Выводы. Полученные в результате исследований зависимости информационных характеристик моментных функций третьего порядка условных математических ожиданий относительно общей асимметрии сигналов мгновенной мощности электродвигателя привода барабанной мельницы мокрого самоизмельчения типа ММС 70*23 показали, что их чувствительность к изменениям технологических состояний по заполнениям барабана рудой достаточная для использования значений этих функций в качестве дополнительных диагностических признаков в автоматизированных системах интеллектуальной идентификации.

Список литературы

1. Мещеряков Л.И. Идентифікація параметрів об'єктів автоматизованого управління в задачах АСУТП ексцесійними моделями // Сб. науч. тр. Національний гірничий університет. – 2006. – № 24. – С. 182–186.
2. Мещеряков Л.И. Базова форма дисперсійної моделі гірничих технологічних комплексів // Сб. науч. тр. НГАУ. – 2004. – № 20. – С. 209–214.
3. Мещеряков Л.И. Системная оценка идентификации барабанных мельниц // Сб. науч. трудов НГАУ. – Днепропетровск, 1998. – Т. 6. – № 3. – С. 255-259.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Слесаревим В.В.
Надійшла до редакції 22.10.10*

УДК 622.272.3: 622.418: 628.518

© В.А. Бойко, О.А. Бойко

НОРМАЛИЗАЦИЯ МИКРОКЛИМАТА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ ГЛУБОКОЙ ШАХТЫ ДОНБАССА В ПЕРИОД ЕЕ ПРОХОДКИ

Проведено аналіз факторів, що впливають на мікроклімат горизонтальної гірничої виробки глибокої шахти Донбасу в період її проходки. Запропоновано використовувати радіаційний кондиціонер, прискорене створення теплоурівнюючої оболонки навколо виробки, зрошувальне охолодження привибійної частини виробки і охолодження водою гірського масиву-ва по трасі її проходки за допомогою випереджаючої забій свердловини. Наведено попередньо тільні міркування щодо оптимізації параметрів системи охолодження повітря і стінок виробки для забезпечення нормальних теплових умов в ній.

Проведен анализ факторов, влияющих на микроклимат горизонтальной горной выработки глубокой шахты Донбасса в период ее проходки. Предложено использовать радиационный кондиционер, ускоренное создание теплоуравнивающей оболочки вокруг выработки, оросительное охлаждение призабойной части выработки и охлаждение водой горного массива по трассе ее проходки с помощью опережающей забой скважины. Приведены предварительные соображения по оптимизации параметров системы охлаждения воздуха и стенок выработки для обеспечения нормальных тепловых условий в ней.

The analysis of factors affecting the microclimate of the horizontal heading of deep mine of Donbassin in time of its driving is produced. It has been proposed to use a radiation conditioner, speed-up creation of thermal equalizing shell round heading, water spray cooling of cloze to the face part of heading and cooling by water mines rocks by driving of borehole ahead the face. The preliminary considering on optimization of parameters of the system for cooling of air and walls of mine heading for providing of normal thermal conditions in it are resulted.

Микроклимат горной выработки, как в период ее строительства, так и в период эксплуатации при добыче угля, определяется составом атмосферы, уровнем ее запыленности, атмосферным давлением, влажностью, температурой воздуха и уровнем тепловой радиации. Все эти факторы имеют место и при добыче угля в шахтах умеренной глубины и в какой-то степени зависят от горно-геологических условий и технологии ведения процессов горного производства. В приводимых ниже выкладках будем считать их неизменными и ограничимся лишь анализом влияния изменения естественной температуры пород горного массива, зависящей от глубины ведения горных работ.

Известно, что температура горного массива изменяется с глубиной. Температура земной поверхности зависит от уровня солнечной радиации и подвержена как суточным, так и сезонным колебаниям. Влияние их затухает с глубиной и не проникают глубже 20-25 м, где температура пород горного массива равна среднегодовой температуре воздуха на дневной поверхности для данного района. Для большинства районов Донбасса величина среднегодовой температуры составляет около 8°C , а величина геотермической ступени находится в пределах 32-35 м/ $^{\circ}\text{C}$. Естественная температура горного массива с глубиной нарастает и изменяется по линейному закону. На предельно достигнутых в Донбассе глубинах ведения горных работ она достигла 45°C . В соответствии с требованиями Правил безопасности в угольных шахтах температура воздуха в горных выработках, где производятся горные работы и находятся горнорабочие, не должна превышать 26°C . Температура поступающего с дневной поверхности в шахту атмосферного воздуха подвержена суточным и сезонным колебаниям и для условий Донбасса может изменяться от $+35$ до -35°C . Вследствие наличия разности температур движущегося по горным выработкам воздуха и естественной температуры горного массива имеет место постоянный теплообмен между ними, в результате которого температура стенки горной выработки со временем изменяется и устанавливается практически равной температуре омывающего ее воздуха. В зимний период во избежание обмерзания проводников и расстрелов и предупреждения возможных аварий подъема подаваемый в шахту воздух подогревается до температуры $+2^{\circ}\text{C}$. При опускании воздуха на глубину увеличивается высота столба воздуха, вследствие чего возрастает атмосферное давление и температура воздуха. Увеличение высоты столба воздуха на каждые 100 м приводит к росту атмосферного давления на 10 мм рт. ст. и температуры воздуха на 1°C . Наличие капеза в стволе приводит к изменению температуры движущегося воздуха за счет испарения воды и возрастания его влажности. За счет теплообмена со стенками ствола и горных выработок по ходу воздушной струи вокруг них формируется теплоуравнивающая рубашка (далее по тексту-ТР) горных пород, температура которых на некотором расстоянии от стенки выработки равна естественной температуре горных пород на соответствующей глубине, а температура стенки выработки близка к температуре движущегося воздуха. ТР в значительной степени сглаживает сезонные колебания температуры воздуха и снижает влияние адиабатического сжатия воздуха, но формируется длительный период, а теплообмен с воздухом в выработке математически описывается разработанными школой А. Н. Щербаня сложными зависимостями, учитывающими период существования выработки (до года, от 1 года до 10 и более 10 лет) [1]. Формирова-

ние ТР горной выработки в значительной степени изменяет величину теплового потока из горного массива в выработку и интенсивность инфракрасной радиации. Величина последней зависит от абсолютной температуры нагретого (излучающего) и более холодного (облучаемого) тел и определяется зависимостью Стефана-Больцмана. В строящейся на глубоком горизонте горной выработке в первую очередь представляет интерес интенсивность инфракрасного облучения шахтера в свежевскрытой призабойной зоне. Максимальная интенсивность инфракрасного облучения горнорабочего в зависимости от температуры стенки выработки составит:

$$f(T) = C \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 \right] \quad (1)$$

Здесь: $T_p = 273 + t_h$ - абсолютная естественная температура горного массива, $T_g = 273 + 36.6$ - абсолютная температура человека, F - площадь облучаемой поверхности человека (принимается равной 1.6 м^2), $C_0 = 5.67, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - постоянная излучения абсолютно черного тела. В общем случае уравнение Стефана-Больцмана содержит φ -средний угловой коэффициент облучаемой поверхности относительно излучающей поверхности и степень черноты ε . Для горной выработки в любом пункте ее длины (цилиндрическая поверхность) и в призабойной части ее (сфера) средний угловой коэффициент $\varphi = 1$. Для горных пород на больших глубинах степень черноты приближается к единице. Для предварительных расчетов обе эти величины приняты равными единице, а обозначающие их индексы исключены из расчетной формулы.

График изменения интенсивности ИФК облучения в зависимости от абсолютной температуры излучателя (горного массива) представлен на рис. 1.

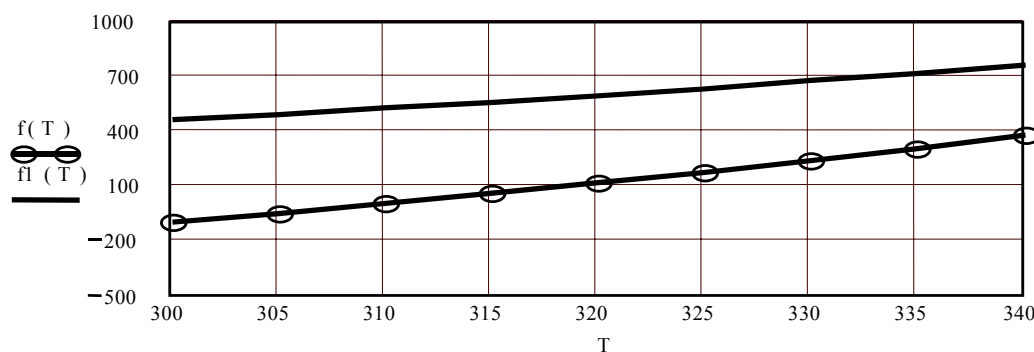


Рис.1. Изменение интегральной плотности инфракрасного излучения горного массива в выработку $f_1(T)$ и интенсивности облучения человека $f(T)$

Цифры по оси ординат графика отражают интенсивность ИФК излучения в выработку в $\text{Вт}/\text{м}^2$ (относятся к верхней линии графика) и мощность облучения человека в Вт (нижняя линия графика). По оси абсцисс отложена величина абсолютной температуры.

Приведенные на графике данные расчета свидетельствуют о том, что при нормируемой ПБ температуре воздуха 26°C горный массив, окружающий выработку, поглощает около 100 Вт излучаемой человеком энергии, при температуре стенки 37°C эта мощность падает до нуля (нет ни нагрева, ни охлаждения).

Но при температуре стенки около 67°C мощность ИФК облучения человека составит около 400 Вт.

Приведенные величины интенсивности получены без учета влияния на человека тепловыделений в выработку от работающих машин и механизмов и тепла окислительных процессов. Они соответствуют моменту вскрытия массива с естественной температурой и свидетельствуют о том, что без предварительного снижения его температуры или применения специальных средств защиты человека ведение горных работ на больших глубинах невозможно.

Заблаговременно снизить температуру горного массива можно несколькими способами:

- охлаждением горного массива шахты в целом или отдельного ее блока с помощью сети горных выработок подсечного горизонта, расположенного ниже предельной глубины разработки угольных пластов [2];

- орошением груди забоя и призабойного пространства проводимой выработки;

- охлаждением горных пород по трассе проведения горной выработки с помощью серии опережающих ее параллельных скважин, буримых из специальной камеры;

- охлаждением горных пород по периметру проводимой выработки при выбуривании горных пород и выносе тепла буровой пульпой;

- охлаждением горного массива по трассе выработки за счет опережающей подготовительной забой скважины.

Заметим, что все упомянутые выше способы снижения температуры стенок горной выработки базируются на применении охлажденной воды в качестве носителя холода. Ниже будет показано, что на больших глубинах ведения горных работ охлажденный воздух даже при интенсивной вентиляции не способен справиться с отводом тепла горного массива в приемлемые, диктуемые требованиями обеспечить определенные темпы проходки выработки, сроки времени.

Решение проблем скоростной проходки горных выработок возможно при применении робототехники. При современном уровне развития машиностроения имеется возможность применения электродвигателей с кремнийорганической изоляцией, обеспечивающей работу двигателя с температурой нагрева обмотки до 220°C . Аппаратура управления на кремниевых микросхемах и полупроводниковых приборах работоспособна при температуре до 120°C . Двигатели с кремнийорганической изоляцией применялись при бурении Кольской сверхглубокой скважины. В Японии, в зоне активной вулканической деятельности, велись горные работы без присутствия людей по породам с температурой 90°C . Для условий Донбасса температура горных пород на максимальных глубинах залегания разведанных угольных пластов достигает 75°C . К сожалению, требуемой для работы при таких температурах техники в Украине нет и не будет создано в обозримом будущем, а дефицит угля для решения проблем обеспечения энергоносителями коксохимии, металлургии, электроэнергетики и теплоснабжения в Украине существует на протяжении всего периода ее независимости. Поэтому ниже рассматриваются некоторые аспекты проведения подготовительных горных выработок без применения специальной техники и дорогостоящих импортных установок, валюты на приобретение которых Украина не имеет. В

данной статье рассматриваются некоторые аспекты нормализации микроклимата в горизонтальной или наклонной горной выработке, достигаемой путем охлаждения горного массива водой, подаваемой в опережающую подготовительный забой скважину, пробуренную по трассе проводимой выработки.

Проходка любой горной выработки на глубоком горизонте начинается с уже пройденной, существующей определенный период времени выработки, горный массив вокруг которой в какой-то степени охлажден за счет выноса тепла проветриваемой ее воздушной струей. Поэтому устье начинаемой проходкой выработки будет находиться в зоне действия ТР, и первые метры выработки могут быть пройдены без применения специальных средств нормализации микроклимата. Технология проведения горной выработки предусматривается проектом в зависимости от физико-механических параметров горных пород, геометрических размеров и назначения выработки. Что же касается параметров опережающей подготовительный забой скважины для охлаждения горного массива по трассе проходки, то такие скважины в практике проходки горных выработок не применяются и методика их расчета отсутствует. Понятно, что они должны быть определены с учетом естественной температуры горного массива, теплофизических характеристик слагающих его пород, размера сечения выработки, проектной скорости проходки выработки. Более того, в качестве расчетного параметра должен быть задан требуемый радиус ТР вокруг скважины в зоне груди подготовительного забоя и температура стенки выработки, образующейся в момент разрушения горного массива взрывом или вскрытия рабочим органом комбайна. Эти данные будут исходными для определения величины параметров выноса тепла горного массива из зоны проходки горной выработки.

К сожалению, несмотря на наличие мощного аналитического аппарата тепловых расчетов для горных выработок шахт, методика и доступный для инженерных расчетов метод решения этой задачи не разработаны. Поэтому ниже со ссылкой на рис.2 приводятся базирующиеся на использовании закона Фурье расчеты передачи тепла теплопроводностью. В связи с необходимостью решать задачу с использованием систем дифференциальных уравнений (в том числе дифференциальных уравнений в частных производных) для получения численных значений искомых величин ниже используется метод граничных значений состояния массива и хорошо отработанный аппарат решения сложных аналитических задач MathCAD 11 Enterprise Edition. В некоторых случаях используется разработанный школой А. Н. Щербаня аналитический аппарат расчета теплообмена для горных выработок со сроком существования менее года.

Особенности приведенной ниже на рис. 2 схемы охлаждения заключаются в следующем:

- рассматривается вариант охлаждения горного массива по трассе проведения горной выработки с применением одиночной скважины, располагаемой примерно по центру выработки;
- одна и та же скважина выполняет функцию подачи холода для охлаждения массива и отвода извлеченного из него тепла;
- для обеспечения эффективного охлаждения массива в зоне забоя выработки применена схема прямой подачи холодной воды, обеспечивающей ее непосредственный контакт со стенкой скважины;

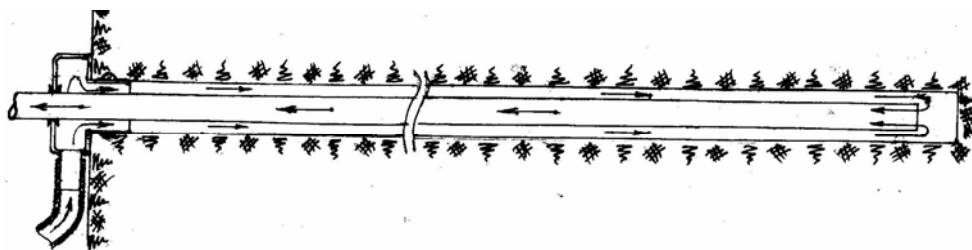


Рис.2. Схема охлаждения горного массива водой с помощью скважины, опережающей забой подготовительной выработки

- с целью обеспечения максимального выноса тепла в единице объема воды ее температура на выходе из скважины должна быть близкой по величине естественной температуре массива. Это достигается отводом нагретой воды по расположенной по центру скважины трубе, выполненной из материала с низкой теплопроводностью.

С учетом перспективы использования тепла горного массива для технологических целей и условий эксплуатации в подземных условиях в скважине предлагается применить для этих целей свинчивающуюся из отдельных секций стеклотекстолитовую трубу.

Работы по охлаждению водой горного массива по трассе проведения подготовительной выработки с помощью опережающей скважины никто не производил, поэтому использовать уже имеющиеся сведения не представляется возможным. В литературе по бурению глубоких скважин имеются некоторые сведения по тепловым расчетам, но они выполнялись для промывки скважин, для которой, как правило, применяются специальные глинистые растворы, а не вода. Объектом охлаждения в таких расчетах является буровой инструмент, а не значительные объемы горного массива вокруг скважины. Попытка изложить методику теплового расчета скважин системы отвода тепла земной коры приведена в [3]. Но поскольку эта работа является продолжением развития научных основ тепловых расчетов и написана школой А. Н. Щербаня, то тепловой расчет скважины предлагается вести по тем же аналитическим зависимостям, которые предложены для горных выработок.

То, что расчеты придется производить для неустановившегося процесса теплообмена горного массива и омывающей стенки скважины водой, является неоспоримым фактом. Но прежде чем их производить попробуем определить некоторые целевые параметры теплового расчета. В качестве отправного пункта в таких расчетах примем во внимание, что омывающая стенки скважины вода является эффективно действующим холодоносителем, вследствие чего стенка скважины быстро приобретает температуру текущей воды. Но ее преимущества перед воздухом в выносе тепла горного массива не могут быть полностью реализованы по той простой причине, что эффект быстрого снижения температуры стенки скважины не сопровождается увеличением величины теплового потока из горного массива, поскольку термическое сопротивление TR , образующейся вокруг скважины, начинает играть роль ограничителя теплового потока. Вода действительно резко увеличивает коэффициент теплоотдачи стенки скважины, но отводить нечего, поскольку из-за увеличения термического сопротивления

горного массива тепловой поток падает. Учитывая эти обстоятельства, попробуем выяснить реальные возможности охлаждения горного массива с помощью одной скважины. Для начала оценим возможность охлаждения горного массива в пределах объема выработки, ограниченного сечением вчерне.

Эквивалентный радиус такого сечения определяется зависимостью

$$R_0 = \frac{2 \cdot F}{U}. \text{ Здесь } F \text{ - площадь сечения выработки и } U \text{ - ее периметр. Поскольку}$$

основная масса проводимых капитальных горных выработок имеет арочную форму, то периметр выработки $U = 3.8 \cdot \sqrt{F}$ и эквивалентный радиус ее $R_0 = 0.526 \cdot \sqrt{F}$. Примем величину площади сечения проводимой выработки

$F = 15 \text{ м}^2$, близкую к типовым для квершлагов и откаточных штреков угольных шахт Донбасса. Эквивалентный радиус такой выработки составит 2 м. Зададимся условием, что к моменту вскрытия взрывом или проходческим комбайном охлаждаемого горного массива в пределах заданного сечения выработки вчерне температура обнажившейся стенки составит 26°C . Тепловые расчеты для горной выработки представляют сложную научную задачу, поскольку имеет место неустановившийся процесс теплообмена с изменяющимися в пространстве и времени параметрами [4]. При решении этой задачи для горной выработки, стенки которой охлаждаются проветривающим ее воздухом, принимают ряд ограничений. Среди них одним из первых является предположение, что температура охлаждающего воздуха является неизменной во времени и пространстве. Такое предположение вполне допустимо, поскольку приращение температуры и воздуха на 1 м. длины выработки составляет сотые доли градуса. Изменение температуры воздуха в выработке происходит вследствие теплообмена с горным массивом при огромной площади стенок выработок, но сравнительно небольшом коэффициенте их теплоотдачи, на длине выработки в сотни метров. Опережающая забой скважина по технологическим причинам должна быть сравнительно небольшой по длине, на которой имеет место практически полный перепад температуры от естественной величины ее для горного массива до температуры охлаждающей воды, поэтому принять температуру охлаждающей воды одинаковой по всей длине скважины невозможно. Площадь поверхности скважины невелика, но коэффициент теплоотдачи при турбулентном режиме движения воды в скважине может превышать таковой для воздуха на два порядка. Объемная теплоемкость воды по сравнению таковой для воздуха в 4000 раз больше. Это обстоятельство приведет к изменению критериев Фурье и Био и некоторому упрощению расчетных зависимостей. Тем не менее, определение параметров нестационарной теплопроводности горного массива придется вести с использованием дифференциальных уравнений в частных производных. Для цилиндрического тела бесконечной длины, каким в расчете представляется горная выработка, эти уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial t}{\partial R} \right) \quad (2)$$

$$t = t_n \text{ при } \tau = 0; \quad (3)$$

$$t \rightarrow t_n \text{ при } R \rightarrow \infty, \quad \tau > 0; \quad (4)$$

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial R} - \alpha \cdot (t - t_n) = 0 \text{ при } R = R_0 = \frac{2 \cdot F}{U} \quad (5)$$

Здесь: (2)-дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах, (3) - закон начального распределения температур в горном массиве, (4) - условие неограниченности массива в радиальном направлении и (5) - закон теплообмена поверхности выработок с воздушной струей при $t_n = \text{const}$.

Для получения конечных зависимостей в безразмерном виде, определяющих относительную температуру любой точки массива в любой момент времени, используется безразмерная температура, определяемая выражением

$$\vartheta = \frac{t - t_e}{t_n - t_e} \quad (6)$$

Для решения дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных применяется метод преобразования Лапласа, сущность которого заключается в приведении дифференциального уравнения в частных производных от R и τ к обыкновенным дифференциальным уравнениям от R путем замены функции $f(\tau)$ ее изображением $T(s)$:

$$T(s) = \int_0^{\infty} f(\tau) \cdot e^{s\tau} d\tau \quad (7)$$

Изображения для значительного числа функций, встречающихся на практике, приведены в литературе по операционному исчислению. Решение уравнений, составленных из изображений функций, сводятся к решению дифференциального уравнения от одной переменной R . Переход от полученного решения $T(s)$ к оригиналу осуществляется по таблицам, если получено его табличное решение, либо с помощью теоремы разложения. Если после выполнения перечисленных выше операций решение не получено, то прибегают к решению общего для перехода от изображения к оригиналу интеграла

$$\mathcal{A}(R, \tau) = \frac{1}{2\pi \cdot i} \int_{\sigma - i\infty}^{\sigma + i\infty} e^{s\tau} T_{R,s} ds \quad (8)$$

Замена температурных функций их изображениями приводит к получению уравнения Бесселя с мнимым аргументом, которое подстановкой $T = u + \frac{1}{s}$,

$\frac{s}{a} R^2 = x^2$ приводится к виду:

$$x^2 u'' + xu' - x^2 = 0 \quad (9)$$

Решением такого уравнения есть бесселевы функции мнимого аргумента первого и второго рода нулевого порядка. Аналитический аппарат этих расчетов известен и используется специалистами-математиками, но труднодоступен для научных и инженерных кадров горнодобывающей промышленности, поэтому желательно получить интересующие нас параметры теплового процесса теплообмена в охлаждающей горный массив скважине более простым методом. Для этого попробуем избежать расчетов промежуточных параметров теплооб-

мена во времени и пространстве, воспользовавшись конечными результатами таких расчетов, вытекающих из общих для протяженных цилиндрических тел закономерностей. В цилиндрическом протяженном теле, в качестве которого может служить как горная выработка, так и охлаждающая скважина, при установившемся процессе теплообмена температура горного массива по радиусу изменяется по логарифмическому закону:

$$t_r = t_p - (t_p - t_c) \cdot \frac{\ln(r/r_2)}{\ln(r_1/r_2)} \quad (10)$$

Установлению такого распределения температур предшествовал вынос определенного количества тепла из рассматриваемого объема массива. Начальная температура горного массива равна его естественной температуре, то есть зависит от глубины залегания. Распределение температуры при новом установившемся режиме зависит от разности температур на внешней и внутренней границах теплоуравнивающей рубашки. Представляющими практический интерес величинами являются величина выноса тепла из горного массива в объеме образовавшейся ТР и линейный тепловой поток при наличии ТР. Эти величины определяют требуемый расход охлаждающей воды и необходимую интенсивность подачи холода для поддержания установившегося теплового режима горного массива. Понятно, что величина требуемого выноса тепла из ТР зависит от разности температур горного массива и поверхности внутренней границы рубашки, удельной теплоемкости горной породы, а линейный тепловой поток - еще и от коэффициента теплопроводности слагающей горный массив. Теплообмен текущей в скважине охлаждающей воды с породным массивом имеет нестационарный характер и для любого момента времени определяется для участка длиной dx зависимостью $dQ = k_r \cdot U \cdot (t_n - t) \cdot dx$. Здесь U - периметр скважины, t_n - естественная температура пород горного массива на глубине ведения горных работ, t - температура воды на расстоянии x от устья скважины, k_r - коэффициент нестационарного теплообмена. Тепловыделение dQ в элементарном участке скважины расходуется на повышение теплосодержания воды, что приведет к повышению ее температуры на величину dt , т. е. $dQ = G \cdot c \cdot dt$. В принятом выше предположении об отсутствии утечек тепла через стенку водоотводящей трубы из качественного термоизолирующего материала величина теплосъема со стенки скважины и повышения теплосодержания охлаждающей воды окажутся равными, т. е.

$$G \cdot c \cdot dt = k_r \cdot U \cdot (t_n - t) \cdot dx \quad (11)$$

Перепишем это равенство в виде $\frac{dt}{dx} + \frac{k_r \cdot U}{G \cdot c} \cdot t = \frac{k_r \cdot U \cdot t_n}{G \cdot c}$. (12)

Получено дифференциальное линейное уравнение первого порядка. Решение этого уравнения имеет вид $t = e^{-\int \frac{k_r \cdot U}{G \cdot c} dz} \cdot \left[\int \frac{k_r \cdot U \cdot t_n}{G \cdot c} \cdot e^{\int \frac{k_r \cdot U}{G \cdot c} dz} \cdot dz + K \right]$. (13)

Хотя приведенное выше уравнение является интегральным и значительно проще исходного дифференциального уравнения в частных производных, для

получения конечного результата расчета еще необходимо учесть конвективный теплообмен по закону Ньютона, для чего придется воспользоваться системой переноса координат. В итоге окажется необходимым выполнить большой объем вычислений для получения решения частного случая. На этапе предварительной оценки возможности применения схемы охлаждения горного массива водой с применением опережающей забой подготовительной выработки скважины выполнение такого рода трудоемких расчетов нецелесообразно. Желательно получить более полную интегральную оценку, которую в данном случае может дать ответ на вопрос: какое количество тепла необходимо удалить из окружающего скважину горного массива для охлаждения его до заданной температуры и при каких параметрах охлаждающей воды (температуре и расходе ее) будет обеспечен требуемый результат. Это позволит оценить требуемые параметры скважины (диаметр и длину), после чего можно целенаправленно решать вопрос о времени охлаждения. Нами предлагается, не нарушая требований закона сохранения энергии, решить эту задачу исходя из приведенной ниже концепции [6].

До начала работ по проведению горной выработки и даже в процессе их выполнения естественная температура горного массива на некотором расстоянии впереди подготовительного забоя остается неизменной. Предполагаемое охлаждение горного массива охлаждаемой водой опережающей скважиной должно привести к созданию теплоуравняющей рубашки, внутренняя поверхность которой имеет заданную (например, равную нормируемой ПБ для воздуха температуру 26°C). Поскольку период формирования ТР должен составлять незначительный промежуток времени, то притоком тепла из недр Земли в горную выработку за этот промежуток времени можно пренебречь, а рассчитывать только отвод тепла, содержащегося в горном массиве. В этом случае необходимой отвод тепла для формирования теплоуравняющей рубашки единичной длины можно определить как изменение количества тепла в ней за период перехода массива из стационарного состояния с естественной температурой в новое, принимаемое в качестве стационарного состояние пород ТР, сформировавшееся в результате охлаждающего действия скважины. Поскольку никаких дополнительных источников энергии в объеме ТР нет, то распределение температуры пород горного массива в пределах ТР будет подчиняться логарифмическому закону. Поэтому в качестве первого этапа решения поставленной задачи определим величину радиуса ТР, необходимой для обеспечения заданной температуры стенки будущей выработки. Расчеты выполним с применением системы MathCAD Enterprise 11. В качестве исходных величин примем гидравлический радиус выработки $R=2$ м, температуру горного массива в районе будущей стенки выработки $t_r=26^{\circ}\text{C}$, температуру охлаждающей воды в скважине t_s от 4°C до 16°C , естественную температуру пород горного массива примем равной $40, 50, 60$ и 70°C соответственно. Расчетные зависимости, таблицы и графики результатов расчетов приведены ниже на рис. 3. На рисунке по оси ординат приведены расчетные величины внешнего радиуса ТР. По оси абсцисс приведены величины температуры охлаждающей воды, подаваемой в скважину.

$$R := 2 \quad r1 := 0.1 \quad ts := 5 \quad tp1 := 40 \quad tp2 := 50 \quad tp3 := 60 \quad tp4 := 70 \quad tr := 26 \quad ts := 4, 5.. 16$$

$$f1(ts) := R \cdot e^{\frac{tp1-ts}{tr-ts}}$$

$$f2(ts) := R \cdot e^{\frac{tp2-ts}{tr-ts}}$$

$$f3(ts) := R \cdot e^{\frac{tp3-ts}{tr-ts}}$$

$$f4(ts) := R \cdot e^{\frac{tp4-ts}{tr-ts}}$$

ts =	f1(ts) =	f2(ts) =	f3(ts) =	f4(ts) =
4	10.273	16.185	25.498	40.171
5	10.589	17.048	27.445	44.185
6	10.948	18.05	29.759	49.065
7	11.359	19.227	32.545	55.088
8	11.833	20.625	35.947	62.652
9	12.387	22.307	40.171	72.34
10	13.042	24.365	45.52	85.042
11	13.825	26.927	52.448	102.154
12	14.778	30.188	61.665	125.965
13	15.96	34.443	74.331	160.415
14	17.458	40.171	92.433	212.685
15	19.412	48.181	119.588	296.826
16	22.046	59.928	162.902	442.813

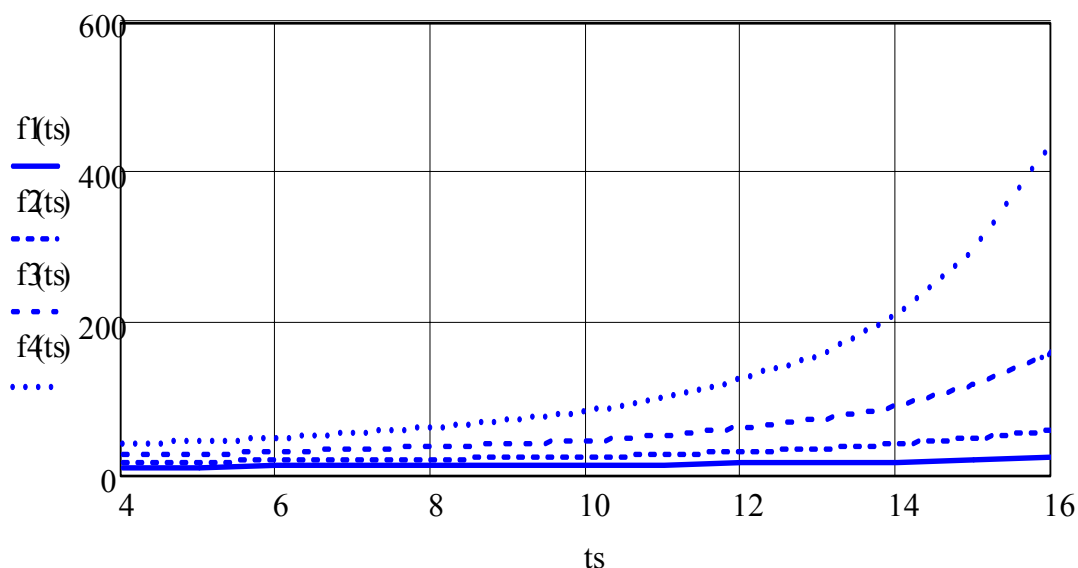


Рис.3. Результаты расчета радиуса ТР выработки в функции температуры охлаждающей воды при естественной температуре горных пород 40, 50, 60 и 70°C

Приведенные на рис.3. в таблицах и графиках данные расчета дают информацию о необходимой величине радиуса ТР и характере изменения температуры по радиусу ТР при формировании ее путем охлаждения пород горного массива охлажденной до соответствующей температуры водой. Для примера выберем строку таблицы, соответствующую температуре охлаждающей воды 5°C. Окажется, что для обеспечения расчетной температуры стенки выработки 26°C при эквивалентном радиусе ее 2 м потребуется создать ТР радиусом 10.6 м при естественной температуре горных пород 40°C. Для достижения того же эффекта в массиве с естественной температурой 50, 60 и 70°C соответственно

потребуется создать ТР радиусом 17.05, 27.45 и 44.19 м. Понятно, что размер ТР будет существенно возрастать как с ростом естественной температуры горных пород, так и с ростом температуры охлаждающей воды. Характер изменения этих параметров хорошо виден на рис.3, из которого следует, что радиус ТР чрезвычайно сильно зависит от температуры охлаждающей воды. Не увлекаясь пока предельно высокими температурами горных пород, ниже рассмотрим в качестве примера условия предварительного охлаждения горных пород скважиной, в которую поступает вода с температурой 5°C, а естественная температура горного массива составляет 40°C.

Применение воды в качестве средства охлаждения горного массива коренным образом меняет физику процесса охлаждения. Температура поверхности скважины за короткий период времени (практически мгновенно) становится равной температуре воды. Понятно, что вследствие притока тепла из массива в скважину температура воды по длине ее будет изменяться и при малых расходах воды на некотором расстоянии от входа в скважину практически станет равной естественной температуре пород массива. На начальном этапе исследования охлаждения горных пород водой, протекающей по скважине, будем рассматривать формирование ТР единичной длины (1м). Определим, какое количество тепла необходимо удалить из ТР единичной длины радиусом 10.6 м при охлаждении скважины водой с температурой 5°C. Для этого придется определить распределение температуры по радиусу ТР, воспользовавшись зависимостью (10). Разбив ТР на коаксиальные цилиндры небольшой толщины, вычислим теплосодержание в каждом цилиндре. Количество тепла в соответствующих слоях охлажденной зоны горного массива для участка единичной длины определяется интегральной зависимостью

$$Q_c = 2 \cdot \pi \cdot t_c \cdot c \cdot G \cdot \int_r^{r+\Delta r} r \cdot dr \quad (14)$$

Начальное содержание тепла в слое массива с естественной температурой определим, воспользовавшись интегральной зависимостью

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot t_p \cdot c \cdot G \cdot \int_r^{r+\Delta r} r \cdot dr \quad (15)$$

Представляющая интерес величина выноса тепла из соответствующего слоя охлажденной до расчетной температуры зоны горного массива есть разность теплосодержаний до и после охлаждения и определяется зависимостью

$$\Delta Q = 2 \cdot \pi \cdot c \cdot G \cdot (t_p - t_c) \cdot \int_r^{r+\Delta r} r \cdot dr \quad (16)$$

В приведенных выше зависимостях (14)-(16) t_p и t_c соответственно температуры слоя (естественная и после охлаждения), c - массовая теплоемкость горной породы, G - масса кубометра горной породы.

Практический интерес представляет не только характер изменения теплосодержания слоя горной породы, но и общая величина тепловыноса из объема охлажденной зоны единичной длины. Она может быть определена как сумма разностей теплосодержаний слоев зоны, определяемых зависимостью (16).

Mathcad 11 Enterprise содержит позволяющий выполнить эту процедуру оператор суммирования вида:

$$s := \begin{cases} 0 & \text{if } r < a \\ \sum_{i=1}^n f(\Delta Q) & \text{otherwise} \end{cases}$$

использованный нами в приводимых расчетах и графических построениях. Прогнозные расчеты выполнены для песчаника, естественная температура горных пород принята 40°C .

$$\begin{aligned} r1 &:= 0.1 & ts &:= 5 & tp1 &:= 40 & tp2 &:= 50 & tp3 &:= 60 & tp4 &:= 70 & c &:= 0.204 \\ rp1 &:= 10.6 & rp2 &:= 17 & rp3 &:= 27.5 & rp4 &:= 44.2 & G &:= 2340 & k &:= 0.0001 \end{aligned}$$

$$f1(r) := \begin{cases} tp1 - (tp1 - ts) \cdot \frac{\ln\left(\frac{r}{rp1}\right)}{\ln\left(\frac{r1}{rp1}\right)} & \end{cases} \quad f2(r) := \int_r^{r+0.1} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad f3(r) := k \cdot c \cdot G \cdot f1(r) \cdot f2(r)$$

$$f4(r) := k \cdot c \cdot G \cdot tp1 \cdot f2(r) \quad f5(r) := k \cdot c \cdot G \cdot f2(r) \cdot (tp1 - f1(r))$$

$r := 0.1, 0.2.. 10.6$

r =	f1(r) =	f2(r) =	f3(r) =	f4(r) =	f5(r) =
0.1	5	0.094	0.022	0.18	0.157
0.2	10.202	0.157	0.076	0.3	0.223
0.3	13.245	0.22	0.139	0.42	0.281
0.4	15.404	0.283	0.208	0.54	0.332
0.5	17.079	0.346	0.282	0.66	0.378
0.6	18.447	0.408	0.36	0.78	0.42
0.7	19.604	0.471	0.441	0.9	0.459
0.8	20.607	0.534	0.525	1.02	0.494
0.9	21.491	0.597	0.612	1.14	0.527
1	22.281	0.66	0.702	1.26	0.558
1.1	22.997	0.723	0.793	1.38	0.586
1.2	23.65	0.785	0.887	1.5	0.613
1.3	24.25	0.848	0.982	1.62	0.638
1.4	24.807	0.911	1.079	1.74	0.661
1.5	25.324	0.974	1.177	1.86	0.682
1.6	25.809	1.037	1.277	1.98	0.702

$$s(r) := \begin{cases} 0 & \text{if } r < 0.2 \\ \sum_{i=1}^{(r-0.1) \cdot 10} f5\left(\frac{i}{10}\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad s(r) \quad f6(r) := s(r) + f5(r)$$

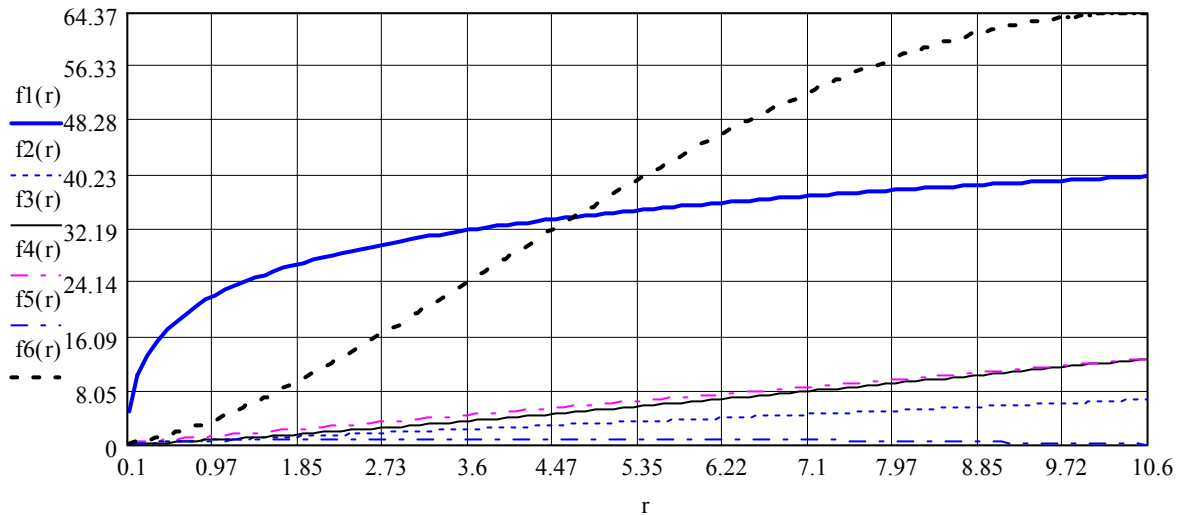


Рис.4 Изменение температуры охлаждаемой зоны $f1(r)$, площади сечения ее слоев $f2(r)$, теплосодержания слоев при пониженной $f3(r)$ и естественной температуре горных пород $f4(r)$, удельного $f5(r)$ и суммарного количества тепла $f6(r)$, подлежащего удалению при охлаждении горного массива водой скважины, опережающей забой подготовительной выработки. Естественная температура горного массива 40°C .

С целью экономии объема статьи таблицы подсчета суммарного количества тепла, подлежащего выносу при формировании охлажденной зоны, исключены из рисунка 4, но график $f6(r)$ иллюстрирует характер изменения величины подлежащего выносу тепла. С учетом принятого в расчетах коэффициента k величина выноса тепла с участка охлаждаемой зоны единичной длины составляет 6,5 гигакалорий. Для оценки параметров тепловыноса при формировании охлажденной зоны такой же скважиной в горных породах с естественной температурой $50, 60$ и 70°C по той же методике произведены расчеты, итоговые результаты которых в виде графиков представлены ниже на рис 5. 6 и 7.

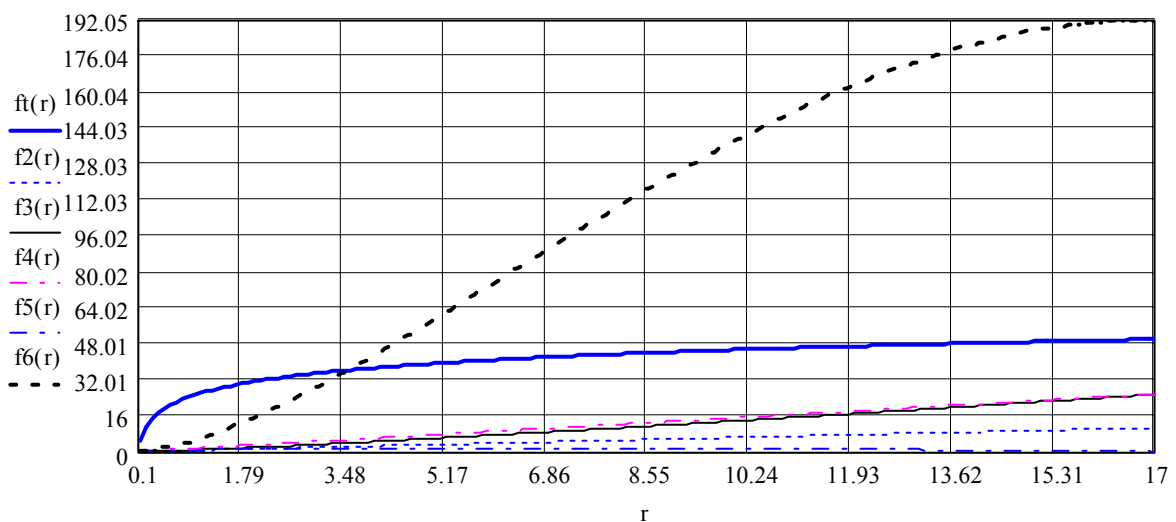


Рис.5. Результаты расчета параметров формирования зоны охлаждения при естественной температуре массива горных пород 50°C

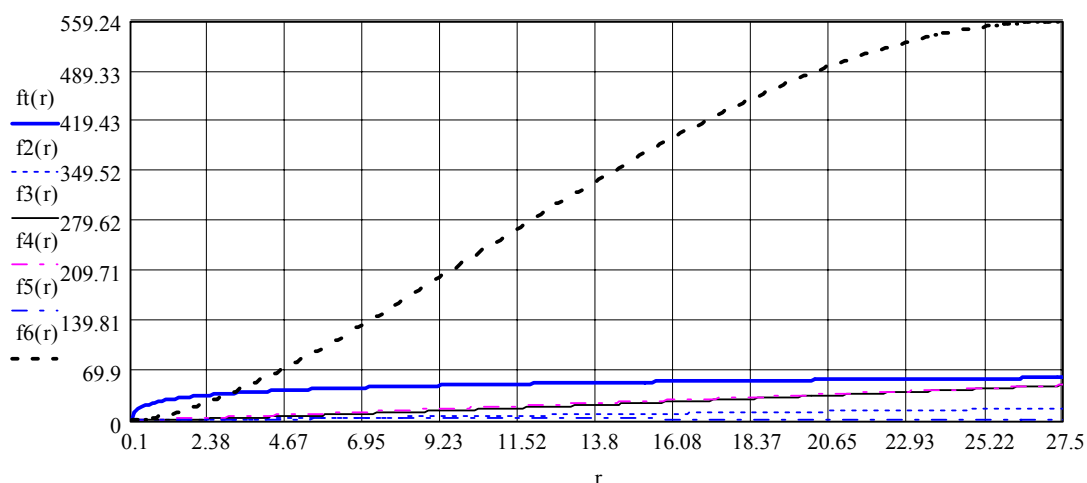


Рис.6. Результаты расчета параметров формирования зоны охлаждения при естественной температуре массива горных пород 60°C

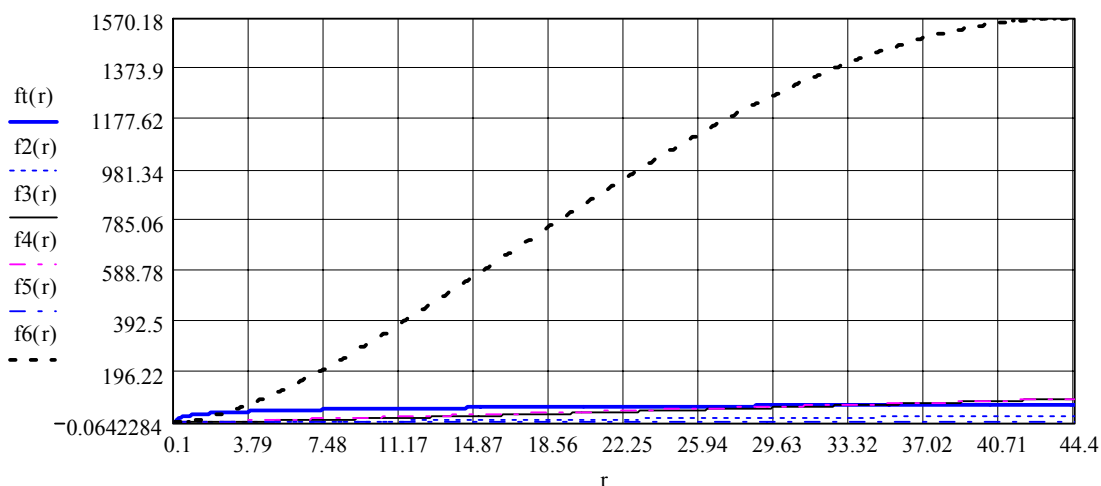


Рис.7. Результаты расчета параметров формирования зоны охлаждения при естественной температуре массива горных пород 70°C

Результаты расчетов наглядно иллюстрируют характер изменения тепловых параметров массива горных пород при его охлаждении, причем некоторые из них кажутся неожиданными. Размеры ТР, обеспечивающих получение заданной температуры стенки горной выработки при вскрытии ее после охлаждения опережающей скважиной, оказались достаточно большими и сильно зависящими от начальной температуры охлаждающей воды, Температура горных пород нелинейно изменяется вблизи скважины и медленно повышается с ростом радиуса ТР, количество тепла в пределах будущей ТР сильно возрастает с ростом ее радиуса, а количество тепла, подлежащего выносу из объема будущей теплоуравнивающей рубашки, оказалась сравнительно небольшим. Понятно, что приводимые в статье расчеты носят предварительный характер и не учитывают приток тепла из недр Земли в объем проводимой выработки за период ее строительства, но величина этого притока по общепризнанным научной общественностью данным исследований Гуттенберга [5] оказалась не слишком пугающей, что дает основание рассчитывать на успешное преодоление этого фактора влияния на микроклимат горной выработки.

Оценим полученные расчетные величины с точки зрения их приемлемости для практической реализации [7]. Выше приведены результаты предварительных расчетов охлаждения горного массива с помощью скважины, опережающей забой подготовительной выработки для самых благоприятных условий, когда температура поступающей в скважину воды составляет 5 °С. Расчетный радиус охлажденной зоны, обеспечивающий получение температуры стенки выработки 26 °С при ее вскрытии, оказался равным 10,6, 17, 27,5 и 44,2 м для горного массива с естественной температурой пород 40, 50, 60 и 70°С соответственно. Расчетная величина выноса тепла из участка ТР единичной длины для рассмотренного варианта составляет 0,643, 1,92, 5,59 и 15,7 Гкал соответственно.

Расчетная величина количества тепла в ТР до начала охлаждения горного массива составляла 6, 22, 70 и 212 Гкал, то есть по результатам предварительного расчета для создания обеспечивающей расчетную температуру стенки горной выработки требуется удалить из ТР порядка 7-10% ее первоначального количества тепла. В расчетах везде фигурировал один и тот же радиус скважины 0,1м. Если принять, что средняя температура вытекающей из скважины воды будет составлять порядка 27, 34, 45 и 52°С для естественной температуры горного массива 40, 50, 60 и 70°С, то для выноса подлежащего удалению из ТР количества тепла потребуется 28, 66, 140 и 330 кубометров холодной воды с температурой 5 °С. Если учесть частичное уменьшение площади сечения потока в скважине за счет оборудования ее трубой для отвода нагретой воды, то и в этом случае площадь живого сечения потока воды составит около 0,04 кв.м. Приняв из условий обеспечения герметичности уплотнений трубы в скважине требование небольшого перепада давления воды при сохранении герметичности и достаточной для эффективного теплообмена его турбулизации (скорость движения воды до 1 м/с), получим, что скважина способна пропустить за сутки порядка 3500 кубометров воды, что на порядок превышает требуемый по расчету ее дебит. На данном этапе исследований преждевременно утверждать, что предлагаемый способ обеспечения приемлемых параметров микроклимата горной выработки в периоде строительства окажется достаточным в условиях повышенных естественных температур вплоть до предельных глубин залегания угольных пластов. Нужно продолжить исследования по установлению реальной скорости процесса теплообмена не только в скважине, но и при орошении стенки выработки за оболочкой радиационного кондиционера, а также при орошении поверхности призабойной зоны подготовительной выработки.

Пока можно сделать лишь предварительные выводы о перспективности применения предлагаемого способа нормализации тепловых условий подготовительных выработок глубоких шахт в период их строительства. Проблема эта сложная как с точки зрения научной, так и прикладной, ибо даже при наличии финансирования на приобретение сложной дорогостоящей мощной зарубежной холодильной техники для шахт требуемый микроклимат горных выработок на глубоких горизонтах не может быть обеспечен за счет доставки холода в горные выработки воздухом.

Авторы надеются опубликовать результаты дальнейших исследований по решению задач рассматриваемой проблемы и приглашают лиц, заинтересованных в решении проблемы добычи угля на больших глубинах и обеспечении энергетической независимости Украины, принять участие в их решении.

Выводы

1. Ведение горных работ по вскрытию и подготовке к выемке запасов угля на глубоких горизонтах невозможно как из-за отсутствия в шахтах Донбасса соответствующей холодильной техники, так и из-за исчерпания ресурса доставки холода в горные выработки воздухом.

2. Для решения проблемы нормализации тепловых условий в горных выработках глубоких горизонтов в период их строительства предлагается применять систему нормализации микроклимата, основанную на ускоренном формировании охлажденной оболочки горных пород вокруг проводимых выработок и доставки холода водой.

3. Применение воды в качестве средства доставки холода позволяет наряду с ускоренным формированием охлажденной оболочки горных пород вокруг выработок значительно сократить приток тепла в горные выработки и вынести на-гора излученное тепло нагретого горного массива.

4. Переход на использование воды в качестве основного средства доставки холода в шахту открывает возможность использования холода аммиачных и бромисто-литиевых холодильных установок, установленных на дневной поверхности, и альтернативных естественных источников холода зимнего периода, водоемов и водоносных горизонтов.

5. Выполненные авторами статьи предварительные расчеты по нормализации микроклимата проводимых на глубоких горизонтах горных выработок показывают, что для ускоренного формирования теплоуравняющих оболочек горных выработок требуется извлечь из горного массива сравнительно небольшую, составляющую 7-10 %, часть содержащегося в них запаса тепла.

6. Рекомендуемые в статье схемные решения и пригодная для инженерных расчетов методика определения тепловых параметров горного массива позволяет в значительной степени ускорить и упростить решение задач горной теплофизики, в том числе требующих применения сложного аппарата математической физики.

Список литературы

1. Щербань А. Н., Кремнев О. А.. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт. Том 1,2. Издат. АН УССР, Киев, 1959. -430 с,1960.-348 с.
2. Бойко В. А.. Оценка теплового потенциала горного массива глубокой шахты Донбасса и возможностей типовой схемы нормализации условий труда. Сборник научных трудов Национального горного университета, №16, с. 113-124, -Днепропетровск, 2003
3. Щербань А. Н., Цырульников А. С., Мерзляков Э. И., Рыженко И. А. Системы извлечения тепла земной коры и методы их расчета. Киев, Наукова думка, 1986.-238 с.
4. Бойко В. А. Структура и математическая модель системы охлаждения горного массива глубокой шахты. Науковий вісник НГУ № 9, с. 63-69, Днепропетровск, 2004.
5. Гутенберг Б. Физика земных недр.-М.:Издательство иностр. литературы, 1963.- 263
6. Бойко В.А., Бойко А. В. Способ управляемого извлечения тепла горного массива глубокой шахты Донбасса. Сб. научн. трудов НГУ №22, -с. 186-192. Днепропетровск, 2005.
7. Бойко В. А., Бойко О. А. Разработка способа и средств формирования теплозащитной оболочки горных выработок глубокой шахты и оценка влияния ее параметров на теплоприток из горного массива. Материалы международной конференции “Форум горняков 2009”, секция “Рудничная аэрология и безопасность труда”, с.57-73, Дн-ск, НГУ, 2009.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Голіньком В.І.
Надійшла до редакції 22.10.10*