

5. Jiang J., Xia Z., Zhang H. et al. Charge storage and transport in high density polyethylene and low density polyethylene Proceedings of 9 International Symposium on Electrets. Shanghai, China. 1996. P. 128.
6. Кравцов А.Г., Гольдаде В.А., Зотов С.В. Полимерные электретные фильтроматериалы для защиты органов дыхания. /Под науч. ред. Л.С. Пинчука. – Гомель: ИММС НАНБ, 2003. – 204 с.
7. Электроформование волокнистых материалов (ЭФМ-процесс). – М.: Нефть и газ, 1997. – 297 с.
8. Галиханов М.Ф. Влияние наполнителя на поляризуемость полярного полимера в коронном разряде. / М.Ф. Галиханов, Д.А. Еремеев, Р.Я. Дебердеев // Вестник Казанского технологического университета. – 2003. – №2. – С. 374–378.
9. ГОСТ 25209-82 „Пластмассы и пленки полимерные. Методы определения поверхностных зарядов электретов“. Введ. 01.07.83. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 6 с.

Рассмотрен вопрос защиты органов дыхания рабочих от аэрозолей. Определено, что для эффективной защиты необходимо использовать пористые фильтрующие материалы, которые соответствуют требованиям стандартов и не влияют на работоспособность работников. Это становится возможным

при наличии электрических сил на поверхности фильтрующего материала. Исследован процесс зарядки фильтрующего материала и описаны методы проведения исследований. Определены основные зависимости заряда фильтрующего материала от параметров загрязнителей окружающей среды и процесса зарядки.

Ключевые слова: *фильтрующий материал, поверхностный заряд, электрет, потенциал, окружающая среда*

The problem of workers' respiratory organs defense from aerosols is considered. It is certain that for the effective defense it is necessary to use porous filtering materials meeting standards which don't influence the workers' capacity for work. The presence of electric forces on the surface of filtering material makes it possible. It has been investigated the charging process of filtering material and described methods of researches realization. Basic dependences of filtering material charge are ascertained according to the parameters of an environment and the charging process.

Keywords: *filtering material, surface charge, electrets, potential, environmental area*

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.І. Голіньком. Дата надходження рукопису 05.11.10

УДК 622.272.3: 622.418: 628.518

© Бойко В.А., Бойко О.А., 2010

В.А. Бойко, О.А. Бойко

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРНОГО МАССИВА ГЛУБОКОЙ ШАХТЫ С ПОМОЩЬЮ СКВАЖИНЫ, ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ ЗАБОЙ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ

V.A. Boyko, O.A. Boyko

ANALYTICAL EVALUATION OF THE DEGREE OF ROCK MASSIF COOLING IN DEEP MINE BY MEANS OF BOREHOLE PRECEDING THE FACE OF THE DEVELOPMENT HEADING

Разработана математическая модель процесса охлаждения пород горного массива по трассе проходки подготовительной выработки как способа нормализации микроклимата горной выработки глубокой шахты. Охлаждение горного массива осуществляется способом выноса тепла водой из скважины, опережающей забой подготовительной выработки. С использованием аппарата математической физики проведено аналитическое описание процесса теплоотдачи поверхности стенок за счет естественной температуры горных пород, окружающих скважину, и конвективного теплообмена воды в скважине по закону Ньютона. Проведен расчет количества тепла, подлежащего извлечению из горного массива, для создания теплоуравнивающей оболочки выработки.

Ключевые слова: *горный массив, охлаждение, нормализация тепловых условий, скважина, вода, теплообмен*

Переживаемый мировым сообществом экономический кризис еще раз подтвердил, что для страны с устаревшими энергоемкими технологиями производства, какой является Украина, главным препятствием на пути роста национального валового продукта и улучшения материального благосостояния населения страны является отсутствие необходимого количества энергоносителей. Украина оказалась крупным должником Международного валютного фонда и продолжает за-

нимать валюту, основная часть которой уходит на оплату приобретаемого природного газа, угля и нефти. Попытки сократить потребление природного газа привели к несомненным успехам, ибо объем потребления его по сравнению с советскими временами сократился практически наполовину, тем не менее финансовая ситуация не претерпела существенных изменений из-за значительного роста цены газа. Крупных работ по разведке и развитию добычи природного газа Украина не

проводит, вследствие чего за последние годы объем добычи природного газа на территории страны сократился почти на 3 млрд кубометров в год и покрывает, даже при существенно урезанном потреблении газа промышленностью, лишь около 18% потребности народного хозяйства. Основная масса потребляемой страной нефти практически полностью покупная, что не вызывает удивления, поскольку на момент обретения страной независимости разведанные запасы нефти на ее территории составляли лишь 230 млн тонн, а годовое потребление с учетом переработки нефти на экспорт достигало 38 млн тонн. Теперь годовой объем перерабатываемой Украиной нефти упал до 23 млн тонн.

Самые существенные изменения в динамике добычи энергоносителей в стране произошли с углем. В начале 70-х годов прошлого столетия Донбасс достиг рекордного уровня добычи угля в 218 млн тонн, но уже к моменту обретения независимости он упал до 174 млн тонн, а за последовавшие 19 лет снизился до 70 млн тонн. Потребление угля промышленностью страны при этом не претерпело существенных изменений, поскольку производство чугуна, стали и проката, являющихся основными статьями экспорта Украины, не сократилось. Это привело к тому, что Украина вынуждена покупать уголь за рубежом – у Польши, России, Германии. Прошедший год ознаменовался чрезвычайным событием: Украина в лице СКМ стала собственником угольного объединения с годовой добычей угля 7 млн тонн на территории США. Парадоксальным фактом такого события является наличие разведанных еще полстолетия назад запасов угля в Донбассе более 100 млрд тонн, достаточных для того, чтобы полностью обеспечить потребности Украины в энергоносителях на ближайшие 5 столетий. Следует, однако, заметить, что проблема добычи угля в Донбассе за годы независимости страны существенно осложнилась. Развал СССР привел к тому, что заводы горного машиностроения Украины оказались неспособными обеспечить производство горной техники, необходимой для нормальной работы шахт, шахтный фонд значительно устарел, горные работы ушли на значительную глубину, что сопровождалось ростом температуры вмещающих горных пород. В то же время произошло разграбление доставшихся в наследство от СССР систем центрального кондиционирования шахт: на момент обретения независимости таких систем действовало 57, а в настоящее время осталось лишь 2 системы – на шахте им. А.А. Скочинского и на шахте им. А.Ф. Засядько. В итоге число шахт, ведущих добычу угля на глубине более 1000 м, сократилось до 31, а на ряде глубоких шахт Донбасса температура горных пород достигла 45⁰С, что практически исключило возможность ведения горных работ в них. В Германии такая температура горных пород имеет место на глубине 1300 м, но нормализацию тепловых условий на глубоких горизонтах обеспечивают мощные холодильные установки, обеспечивающие подачу в шахту 8–10 млн Вт холода. Украина такой холодильной техники не про-

изводит и из-за дефицита бюджета не имеет возможности приобрести ее за рубежом.

Существует еще один путь решения проблемы энергоносителей – использование атомной энергии. Украина имеет достаточные запасы урановых руд на территории Днепропетровской и Кировоградской областей и могла бы существенно увеличить производство электроэнергии на атомных электростанциях. Но для этого необходимо построить новые АЭС или добавить блоки на действующих и обеспечить их теплообразующими элементами. Уранодержащую и циркониевую руду Украина добывает, производит циркониевый прокат и первичную обработку окисленных урановых руд, но все это передается России, которая осуществляет производство ТВЭЛов для собственных нужд и на экспорт, в том числе для продажи Украине. Отсутствие хранилищ для отработанных ТВЭЛов и их покупка за рубежом для замены в действующих реакторах существенно удорожают производство электроэнергии на АЭС. Выработка электроэнергии в Украине в настоящее время составляет 126 млрд кВт-ч (около 9% производства ее СССР перед развалом). Вследствие кризиса и падения промышленного производства этого количества электроэнергии пока достаточно для удовлетворения потребностей страны и даже для продажи Литве, Беларуси, Молдове. При этом необходимо учесть, что составляющий основную статью получения валюты на международном рынке металл производится по старой технологии с использованием дорогостоящих покупных кокса и природного газа. Для перехода по примеру Франции на новые технологии, позволяющие получить металл высокого качества, требуется огромное количество дешевой электроэнергии, которую пока способны давать лишь АЭС, но в обозримом будущем строительство предприятий по производству реакторов и ТВЭЛов для АЭС силами Украины не предусматривается.

В сложившихся условиях проблема обеспечения Украины энергоносителями на современном этапе может решаться лишь за счет существенного увеличения добычи угля, перевода на уголь всех действующих электростанций, строительства теплоцентралей, освоения энерготехнологических методов переработки угля для получения горючих газов и синтетического топлива для двигателей внутреннего сгорания. Для этого нужно строить новые шахты и вести добычу угля на больших глубинах. Понятно, что при современном состоянии угольной промышленности, технологии ведения горных работ и техники нормализации микроклимата горных выработок эта задача оказалась трудно решаемой, энергоемкой и экономически нецелесообразной. Ничего лучшего, как избавиться от очередных 29 шахт путем выставления их для приватизации, правительство Украины не придумало. В настоящее время лишь около 34 млн тонн добычи угля обеспечивают шахты, принадлежащие государству, и столько же дают шахты, попавшие в собственность олигархов. Но никаких работ по созданию новых мощностей по добыче угля ни государство, ни собственники не ведут. Государство не имеет денег в бюджете для строительства новых шахт, а собственники нашли безотказный способ получать

большие прибыли от эксплуатации шахт, взятых у государства в аренду. При этом они расходуют еще около 7 млрд гривен бюджетных ассигнований под предлогом затрат на реконструкцию и модернизацию, но ничего этого не делают. Более того, даже компенсации за гибель и травмирование шахтеров перекладываются на государство. При такой политике в отношении к угольной промышленности в ближайшей перспективе недалек ее полный развал. Поэтому лежащий в недрах Донбасса уголь может остаться нетронутым и недоступным при энергетическом голоде страны и, вызванном им, снижении уровня жизни и дороговизне транспорта, электроэнергии, отопления, коммунальных услуг. Поэтому проблема добычи угля на больших глубинах становится жизненно важной, определяющей не только уровень технического прогресса и благосостояния страны, но и степень ее независимости.

Создание водородной бомбы оказалось неизмеримо более доступным, чем разработка способа получения энергии за счет управляемого синтеза водорода. Над этим трудится огромный отряд ученых развитых стран, но перспективы освоения этого способа получения энергии неизменно отодвигаются все дальше. Украина не ведет таких работ и ждать подарков от добрых соседей не может, поэтому должна решать свои энергетические проблемы за счет добычи угля и использования энергии распада урана.

Применительно к углю требуется уже теперь на этапе предварительной проработки технических, технологических и экономических аспектов проблемы исходить из концепции создания на основе глубоких шахт энерготехнологических комплексов, решающих задачу не только добычи угля, но и использования энергии шахтного метана и извлечения тепла Земли.

Такой подход к решению проблемы добычи угля на больших глубинах требует проведения научного поиска и научно-исследовательских работ с учетом новых моментов, среди которых следующие:

- существующая технология и техника создания нормальных тепловых условий в глубоких шахтах за счет применения системы охлаждения воздуха и выноса тепла горного массива проветриваемым горные выработки воздухом уже практически исчерпала свои возможности и становится экономически нецелесообразной;
- удаляемое из шахты рудничным воздухом тепло практически невозможно извлечь на выходе из шахты из-за огромного расхода воздуха на проветривание шахты и низкого его теплового потенциала;
- функции доставки холода в горные выработки шахты и выноса тепла горного массива из шахты должны быть переданы воде, объемная теплоемкость которой в 4000 раз выше таковой для воздуха;
- большая глубина шахт при применении разомкнутых систем подачи охлажденной и нагретой воды повлечет большие расходы электроэнергии на ее циркуляцию, поэтому система должна быть объединенной, выполняющей обе функции;
- выносимое нагретой в шахте водой тепло должно быть использовано как источник энергии для

нужд инфраструктуры и производства холода, подаваемого в шахту.

Принимая во внимание приведенные выше моменты, следует ориентироваться на создание системы нормализации тепловых условий в горных выработках, использующей в качестве холодо- и теплоносителя один и тот же поток воды, доставляющий в шахту холод, полученный от работающей на дневной поверхности холодильной установки (а в холодный период года – естественный холод среды на дневной поверхности) и выносящий на дневную поверхность тепло горного массива. Требование экономичности транспортирования тепла и холода диктует необходимость применения высокопрочного U-образного трубопровода, снабженного на горизонте действующего околоствольного двора двумя водяными теплообменниками: на входе свежей струи – теплообменником съема холода, на выходе исходящей – теплообменником передачи тепла циркулирующему в трубопроводе потоку воды. Такая схема исключает необходимость применения насосов высокого давления и обеспечивает движение потока воды в трубопроводе лишь за счет работы небольшого насоса на входе в трубопровод на дневной поверхности, создающего перепад давления, достаточный для преодоления сопротивления трения воды о стенки трубопровода. Понятно, что на дневной поверхности с трубопроводом подачи воды должны быть сопряжены два комплекса – комплекс приема горячей воды и использования вынесенного из шахты тепла, а также комплекс охлаждения воды и подачи ее в трубопровод. Поскольку оба эти комплекса располагаются на дневной поверхности шахты, где поток воды разомкнут и открыт, то основные требования к их оборудованию преимущественно будут заключаться в обеспечении качественной термоизоляции для исключения потерь тепла и холода соответственно.

Предлагаемая схема холодоснабжения шахты снимает требования применения мощных шахтных холодильных машин и может быть реализована на производимых в Украине мощных холодильных машинах общепромышленного применения, предназначенных для предприятий химической, пищевой и других отраслей промышленности. Понятно, что монтируемый в стволах шахты трубопровод подачи тепла и холода должен иметь высокую прочность и качественную термоизоляцию.

Подземная часть системы нормализации тепловых условий в горных выработках глубокой шахты должна обеспечить охлаждение воздуха до требуемых Правилами безопасности в угольных шахтах норм. Для выполнения этой функции требуется обеспечить вынос тепла, выделяющегося из окружающих горные выработки нагретых горных пород, образующегося при технологических процессах добычи угля и за счет окислительных процессов, а также за счет адиабатического процесса сжатия поступающего в шахту воздуха. Общепринятая в мировой практике добычи угля в глубоких шахтах система нормализации тепловых условий в горных выработках эти функции возлагала на охлаж-

денный воздух, проветривающий сеть горных выработок. Поскольку воздух имеет небольшую плотность и теплоемкость, а скорость его движения и температура в горных выработках по тем или иным причинам нормативно ограничены, то интенсивность выноса тепла из горных выработок потоком проветривающего горные выработки воздуха оказалась ограниченной, и период охлаждения стенок горных выработок продолжался многие годы и даже десятилетия. Поскольку естественная температура горных пород в шахтах увеличивается с глубиной ведения добычи угля и в глубоких шахтах оказывается высокой, то она является основным фактором, определяющим параметры микроклимата горных выработок. По мере снижения температуры стенок горных выработок за счет охлаждения пород горного массива интенсивность теплопритока в горные выработки снижается. Происходит это как за счет уменьшения разности температур проветривающего выработку воздуха и стенок выработки, так и за счет возрастания термического сопротивления горных пород тепловому потоку из-за увеличения размера формирующейся вокруг выработки охлажденной зоны горного массива, получившей в горной теплофизике название теплоуравнивающей рубашки (далее в тексте – ТР). Изучение процесса формирования ТР начато школой академика А.Н. Щербаня еще в 60-е годы прошлого столетия [1], но в то время максимальная глубина ведения горных работ в шахтах Донбасса лишь немногим превысила 1000 м, теплопритоки из горного массива в горные выработки были сравнительно небольшими. Поэтому возможность обеспечения требуемых параметров микроклимата рудничного воздуха в глубоких шахтах за счет применения систем кондиционирования не подвергалась сомнению.

Школа А.Н. Щербаня стала теперь достоянием истории, плановые научно-исследовательские работы по нормализации тепловых условий не ведутся, а возросшая с уходом горных работ на большие глубины естественная температура горных пород осложнила тепловые условия труда, сделала непригодными для нормализации микроклимата стандартные системы кондиционирования воздуха в шахтах и осложнила тепловые расчеты по обоснованию параметров холодоподачи, поскольку протекающие в системе „горный массив – воздух“ имеют место нестационарные тепловые процессы, описываемые сложными уравнениями математической физики. Даже простейшая система „горная выработка – окружающий ее массив горных пород“ при неподвижном воздухе описывается уравнением теплопередачи Фурье, представляющим собой дифференциальное уравнение второй степени в частных производных. Движение потока воздуха в горной выработке приводит к усилению теплообмена и выносу тепла, описываемого законом Ньютона для теплопередачи. Это приводит к усложнению дифференциального уравнения: оно перестает быть стандартным и не поддается решению общепринятыми, применяемыми в высшей математике, методами. К сожалению, уровень подготовки специалистов для горной промышленности далек от идеала, решать такие задачи они не обучены, а имеющие такие знания выпускники физико-математических факультетов по известным причинам

материального характера лишены возможности быть альтруистами и бесплатно помогать горнякам. Поэтому на работающих в горных вузах и научно-исследовательских учреждениях специалистов по аэрологии горных предприятий и кондиционированию воздуха в шахтах лежит задача не только самим проводить нужные исследования, но и разработать упрощенные методики расчетов, доступные для владеющих техникой расчетов на ПЭВМ горных инженеров. Эта задача частично выполняется в предлагаемой читателю статье.

Целью настоящей статьи является разработка методики тепловых расчетов нового для шахт способа охлаждения массива горных пород, дающего возможность быстро охладить стенки горных выработок, рассчитать параметры охлаждения горного массива таким образом, чтобы обеспечить приемлемые тепловые условия труда шахтеров, за короткий срок времени вынести тепло горного массива на дневную поверхность для его использования в качестве альтернативного источника энергии. Процессы теплообмена в горной выработке до сих пор рассматривались только при отводе тепла за счет потока проветривающего горные выработки воздуха. На глубоких горизонтах они исчерпали свои возможности из-за малой теплоемкости и объемной массы воздуха, поэтому предложено использовать для этих целей воду [2].

Вода может выполнить функции охлаждения огромных по размеру массивов горных пород с естественной температурой немногим ниже температуры кипения, но для этого, прежде всего, необходимо создать каналы для ее движения и контакта с горными породами. Желательно, чтобы каналы для охлаждения горного массива были закрытыми, рассчитанными на некоторое избыточное давление, что позволило бы осуществить циркуляцию воды в них с минимальным количеством источников давления и в значительной степени снизить влажность воздуха в горных выработках. Один из первых предложенных нами вариантов охлаждения горного массива и вывода нагретой воды на дневную поверхность предусматривал создание сети каналов, расположенных несколько ниже самого глубокого разрабатываемого пласта [3]. Система охлаждения целого блока шахты могла быть осуществлена с использованием всего лишь 2 блоковых скважин диаметром 2 м, вынесенных на 50 м за границы блока, и сети расположенных ниже пласта скважин, пробуренных параллельно пласту и образующих соединенную с блоковыми скважинами сеть. Такая система могла бы работать без насоса только за счет тяги, возникающей по закону Архимеда. К сожалению, такая система в Украине не может быть создана из-за отсутствия бурового робота, способного работать при повышенных температурах. Такой робот создан в Японии и осуществляет буровые работы при температуре горных пород до 90°C в зоне вулканического нарушения. В качестве канала для подачи воды, охлаждающей массив горных пород, могут служить скважины, пробуренные из забоя проводимой горной выработки. Для создания упорядоченного потока воды в скважине ее придется оснастить стеклотекстолитовой трубой, состоящей из нескольких легко соединяемых секций одинакового

диаметра. Схема циркуляції охолоджуючої води в скважині представлена на рис. 1.

На рисунку приведена схема подачі, при якій охолоджуюча вода поступає в скважину з підводячого трубопроводу через конус-обтюратор, рухається, омиваючи стінки скважини, від устя до її забою, розворачивається, поступає в відводячу

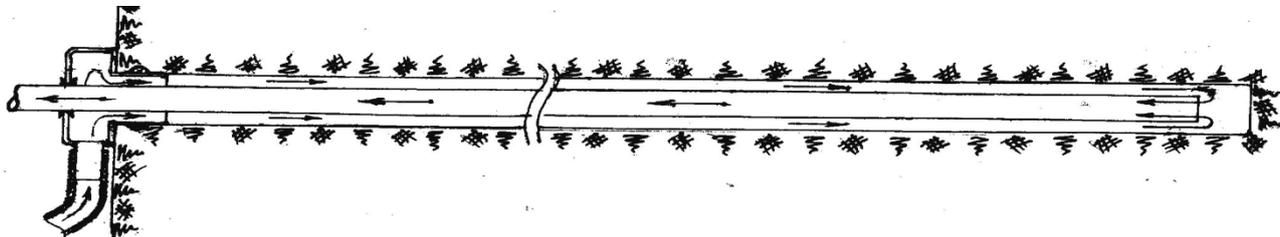


Рис. 1. Схема охолодження горного масива скважиною, опережаючої забой підготовительної вироботки

Методика розрахунку охолодження горного масива водою володіє деякими особливостями, обумовленими теплофізичними параметрами води. Якщо охолодження масиву горних порід здійснюється потоком повітря в вироботку або скважині, то в початковий момент після взривання шпурів або закінчення буріння скважини температура стінки вироботки (скважини) дорівнює природній температурі горної породи і приймається такою як початковий параметр в тепловому розрахунку. Якщо ж охолодження здійснюється водою, то внаслідок її великої теплоємності температура стінки охолоджуваної порожнини миттєво падає до величини температури охолоджуючої води, яка і приймається як початковий розрахунковий параметр. Це обставина слід врахувати і не вважати, що в розрахунках допущена помилка.

Розрахунок формування теплоізолюючої рубашки (далі в тексті для краткості – ТР) навколо вироботки (скважини) повинен починатися з визначення її радіуса. Ніяких рекомендацій по цьому параметру немає, оскільки при забезпеченні нормальних кліматических умов в горних вироботках завдяки подачі охолодженого повітря не ставилася задача створення ТР. Існують тільки проведені школою А.Н. Щербаня результати експериментальних спостережень по оцінці радіуса ТР, з яких випливає, що при провітрюванні вироботки охолодженим повітрям через 10–15 років навколо неї утворюється зона охолоджених горних порід товщиною приблизно 10–12 м. Слід звернути увагу, що дослідження велись в вироботку на глибині менше 1000 м, де природна температура горних порід становила не більше 35⁰С і завдання цілеспрямованого формування ТР, як засобу нормалізації теплового режиму горної вироботки і зменшення притоку тепла в неї з горного масиву, не ставилася. При веденні горних робіт на великих глибинах така задача виникає як умова безпечної доступності гірничих робітників до горної вироботки для виконання технологічних процесів по її проходці. Рекомендації по цьому питанню ще слід розробити на основі досліджень і розрахунків по оптимізації рас-

ходу енергії на нормалізацію мікроклімату горної вироботки глибокої шахти. На даному етапі досліджень поставимо перед собою практичний інтерес задачі: визначити параметри охолодженої зони горних порід навколо скважини з умов, що при відкритті вироботки вибуховими роботами або комбайном на розрахунковий переріз вночі температура поверхні горних порід (т.е. стінки вироботки) буде становити нормовану Правилами безпеки в вугільних шахтах 26⁰С. Для розв'язання цієї задачі потрібно визначити розрахунковий радіус ТР, необхідну величину відводу тепла з горного масиву в межах ТР, об'єм води для виносу цього кількості тепла, інтенсивність охолодження масиву горних порід і розрахунковий час виконання процесу охолодження (формування ТР). Розв'язання цього комплексу питань потребує виконання цільової науково-дослідницької роботи, методика виконання і результати якої не можуть бути викладені в рамках журнальної статті. Вкажемо лише, що потрібно розробити математичну модель процесу охолодження, яка буде зберігати рівняння Фур'є в частинних похідних, початкові і граничні умови. Оскільки відвід тепла потоком води описується рівнянням Ньютона, то математична модель ускладниться. Початкове диференціальне рівняння стане нестандартним і потребує спеціального методу розв'язання. Виконання такої великої роботи на початковому етапі робіт, коли не доведено сама можливість застосування такого методу охолодження, нецелесообразно. Тому як матеріалісти будемо розглядати очікувані результати процесу: почнемо подавати в скважину холодну воду, горна порода навколо скважини буде охолоджуватися, але поки ми ще не знаємо необхідну для процесу формування ТР довжину цієї скважини. Будемо вважати, що вона буде реально досяжною, почнемо підвигати забій, маючи впереди неї достатню довжину для формування ТР довжину скважини. Оскільки нам потрібно пройти вироботку, довжина якої становитиме сотні метрів, то, хоча теплової процес являється нестационарним, на кожен метр довжини вироботки буде витрачено приблизно одна і та ж кількість холоду для формування ТР. Отже, має сенс визначити винос тепла горного

массива для формирования ТР единичной (1м) длины, а дальше согласовывать темп подвигания забоя выработки и параметры подачи холода.

К достоверно известным параметрам и закономерностям процесса охлаждения горного массива водой отнесем температуру подаваемой для охлаждения воды (ее будем выбирать по возможности меньшей, исходя из параметров источника холода) и естественную температуру пород горного массива (она определяется глубиной ведения горных работ). При формировании ТР граница максимальной температуры по мере охлаждения массива отступает вглубь массива, но сама температура массива за пределами ТР остается прежней. Для любого периода формирования ТР распределение температуры внутри ТР подчиняется логарифмическому закону. Нас любой момент не интересует, поскольку мы задались условием, что хотим иметь заранее заданную температуру t_r свежескрытой после охлаждения стенки выработки. Примем эквивалентный радиус выработки вчерне $R=2$ м и определим требуемый размер ТР для естественной температуры горных пород $t_p=40, 50, 55$ и 60°C . Обозначив температуру стенки выработки t_c и приняв ее для участка скважины единичной длины вблизи устья скважины рав-

ной температуре охлаждающей воды $t_c=t_w$, запишем уравнение температурного поля ТР в виде равенства

$$\frac{t_p - t_r}{t_p - t_w} = \frac{\ln(rx/R)}{\ln(rx/r_1)} \quad (1)$$

Здесь r_x - искомый наружный радиус ТР, а r_1 -внутренний радиус оболочки (равен радиусу скважины). Из (1) найдем искомую величину r_x

$$r_x = \exp \left(\frac{\ln R - \frac{t_r \cdot \ln r_1}{t_p \cdot (t_p - t_w)}}{1 - \frac{t_r}{t_p \cdot (t_p - t_w)}} \right) \quad (2)$$

Дальнейшие расчеты произведем с использованием MathCAD 11 Enterprise. Примем радиус скважины равным 0,15 м. Учитывая специфику MathCAD, запишем в расчетные зависимости искомые радиусы ТР как функции температуры охлаждающей воды с цифровыми индексами, соответствующими таковым у естественной температуры массива горной породы.

Ниже приведены только графики результатов расчета по приведенной выше зависимости (2).

$$R := 2 \quad r_1 := 0.15 \quad t_w := 4..10 \quad t_{p1} := 40 \quad t_{p2} := 50 \quad t_{p3} := 55 \quad t_{p4} := 60 \quad t_r := 26$$

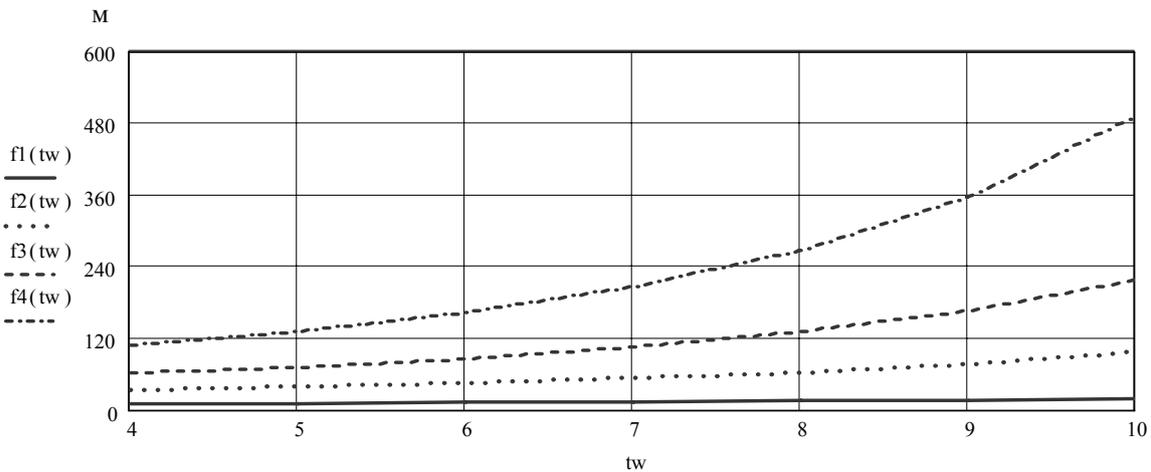


Рис. 2. Зависимость внешнего радиуса теплоуравнивающей рубашки от температуры охлаждающей воды в горном массиве с естественной температурой: $f_1(t_w)$ - 40°C ; $f_2(t_w)$ - 50°C ; $f_3(t_w)$ - 55°C ; $f_4(t_w)$ - 60°C .

Данные графиков рис. 2 свидетельствуют, что радиус ТР сильно возрастает с увеличением естественной температуры горных пород.

Величина выноса тепла из горного массива в объеме образовавшейся ТР и линейный тепловой поток при наличии ТР определяют требуемую для охлаждения величину и необходимую интенсивность подачи холода для поддержания установившегося квазистационарного теплового режима горного массива. Для определения этих величин необходимо знать радиальное распределение температуры в ТР.

Изменение температуры в ТР, представляющей собой протяженное цилиндрическое тело, получим после преобразований из той же логарифмической

зависимости (1) температурного поля теплоуравнивающей рубашки

$$t_r = t_p - (t_p - t_c) \cdot \frac{\ln(r/r_2)}{\ln(r_1/r_2)} \quad (3)$$

Установлению такого распределения температур предшествовал вынос определенного количества тепла из рассматриваемого объема массива. Теплообмен движущегося в скважине потока воды с породным массивом имеет нестационарный характер и для любого момента времени для участка длиной dx определяется зависимостью $dQ = k_r \cdot U \cdot (t_n - t) \cdot dx$. Здесь U - периметр скважины; t_n - естественная температу-

ра пород горного массива; 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. $dQ = G \cdot c \cdot dt$. Величина теплосъема со стенки скважины и повышение теплосодержания охлаждающей воды в соответствии с законом сохранения энергии равны между собой

$$G \cdot c \cdot dt = k_r \cdot U \cdot (t_n - t) \cdot dx. \quad (4)$$

$r1 := 0.15; \quad ts := 5; \quad tp1 := 50; \quad c := 0.204; \quad G := 2340; \quad rp1 := 11.246; \quad k := 0.0001;$

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

$$f4(r) := k \cdot c \cdot G \cdot tp1 \cdot f2(r);$$

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

$$s(r) := \begin{cases} 0 & \text{if } r < 0.2 \\ \sum_{i=1}^{(r-0.1) \cdot 10} f5\left(\frac{i}{10}\right) & \text{otherwise} \end{cases}; \quad s(r) \quad n := 0.5; \quad f6(r) := (s(r) + f5(r)) \cdot n.$$

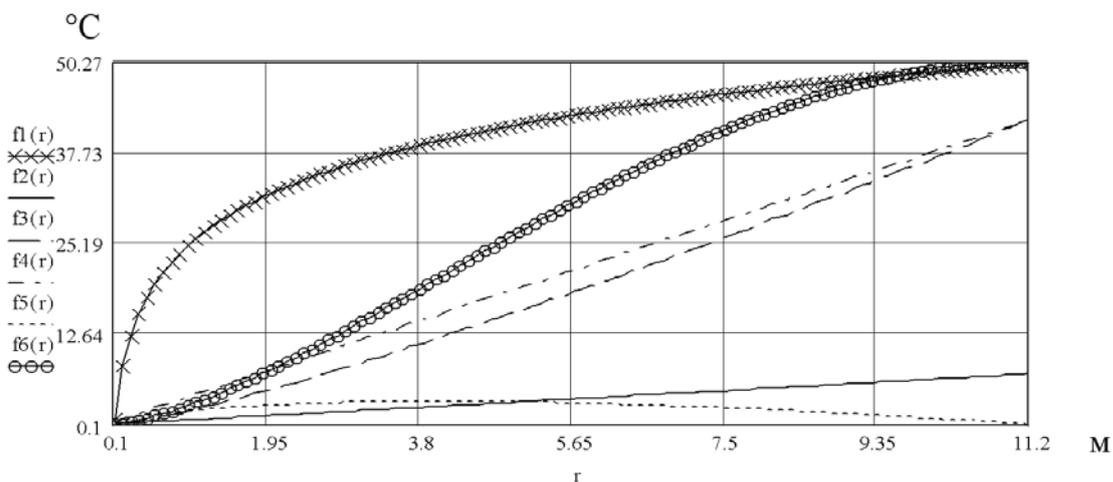


Рис. 3. Изменение количества тепла и выноса его из ТР горного массива, окружающего скважину: $f1(r)$ – температура горных пород в сформировавшейся ТР, °С; $f2(r)$ – площадь поперечного сечения цилиндрического кольца, м²; $f3(r)$ – количество теплоты в цилиндрическом кольце сформировавшейся ТР, ккал; $f4(x)$ – количество теплоты в цилиндрическом кольце горной породы при естественной температуре массива, ккал; $f5(r)$ – количество теплоты, подлежащее выносу из цилиндрического кольца при охлаждении массива, ккал; $f6(r)$ – количество теплоты, подлежащее выносу из ТР при ее формировании, ккал.

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 прибегнуть к применению одного из сложных методов решения нестан-

Перепишем это равенство в виде

$$\frac{dt}{dx} + \frac{k_r \cdot U}{G \cdot c} \cdot t = \frac{k_r \cdot U \cdot t_n}{G \cdot c}. \quad (5)$$

Получено дифференциальное линейное уравнение первого порядка.

Решение этого уравнения имеет вид

$$t = e^{-\int \frac{k_r \cdot U}{G \cdot c} dz} \cdot \left[\int \frac{k_r \cdot U \cdot t_n}{G \cdot c} \cdot e^{\int \frac{k_r \cdot U}{G \cdot c} dz} dz + K \right] \quad (6)$$

дартных дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных. Полученное решение будет справедливо для частного случая.

Необходима интегральная оценка, которая в данном случае может дать ответ на вопрос: какое количество тепла необходимо удалить из окружающего скважину горного массива для охлаждения его до за-

данной температуры и при каких параметрах охлаждения (температуре и расходе воды) будет обеспечен требуемый результат. Это позволит оценить требуемые параметры подачи холода, после чего можно целенаправленно решать вопрос о времени охлаждения подготовительной выработки. В качестве цели приводимого ниже расчета поставим представляющую практический интерес задачу – определить требуемую величину предварительного выноса тепла из окружающего скважину горного массива для обеспечения условия, что при вскрытии выработки взрывными работами или выемкой породы комбайном на полное сечение стенка выработки вчерне будет иметь заданную температуру. Результаты расчета с использованием MathCAD 11 приведены ниже на рис. 3.

Расчеты произведены с использованием аналитических зависимостей в виде, обусловленном поставленной задачей и спецификой MathCAD. Отсутствие полной математической модели изучаемого процесса вынуждает применить один из численных методов. В данном случае применен разностный метод, при котором горный массив ТР разбит на элементарные цилиндрические кольца малой толщины (0,1м). Для каждого кольца определена температура при сформировавшейся ТР (функция $f1(r)$), объем (функция $f2(r)$), количество тепла в сформировавшейся ТР (функция $f3(r)$) и при естественной температуре горного массива (функция $f4(r)$). Количество тепла, подлежащее удалению из каждого кольца, определено как разность теплосодержаний до и после формирования ТР и представлено функцией $f5(r)$. Наконец, произведено суммирование количества удаляемого тепла всех колец в объеме ТР, изменяющаяся величина которого по мере нарастания радиуса ТР представлена функцией $f6(r)$. Необходимость представить несколько графиков, отличающихся по величине функций, на компактном рисунке вынудила прибегнуть к вводу в расчетные зависимости масштабных коэффициента $k=0,0001$ при расчете количества тепла и коэффициента $n=0,5$ для построения графика $f6(r)$.

Выводы.

1. Предложен метод и средства, позволяющие решить проблему нормализации тепловых условий в горных выработках глубоких шахт Донбасса без применения мощных импортных установок для кондиционирования воздуха в шахтах.
2. Разработана методика расчета параметров тепловых процессов при охлаждении горного массива, окружающего горные выработки, без привлечения сложного математического аппарата решения нестандартных дифференциальных уравнений второй степени в частных производных. Перевод задачи в решение квазистационарных процессов для участка горной выработки единичной длины позволил определять тепловые параметры охлаждения горного массива вокруг выработки и расчет необходимой подачи холода без применения сложного аналитического аппарата силами ИТР шахт, владеющих техникой расчетов на ПЭВМ.
3. Расчеты параметров тепловых процессов при формировании теплоуравняющей рубашки горной выработки подтверждают возможность существенно-

го снижения притока тепла в горную выработку и обеспечение с помощью предложенного метода охлаждения горного массива параметров рудничного микроклимата на уровне нормируемых.

4. Применение предлагаемого способа охлаждения горного массива и формирования ТР позволит существенно снизить тепловую нагрузку на систему кондиционирования воздуха в глубоких шахтах.

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., Бойко О.А. Проблема нормализации микроклимата глубоких шахт Донбасса, способы и средства ее решения. Материалы международной конференции „Форум горняков 2009“, секция „Строительство шахт и подземных сооружений“, С. 142–153, Дн-ск, НГУ, 2009.
3. Бойко В.А., Бойко О.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.

Розроблено математичну модель процесу охолодження порід гірського масиву по трасі проходки підготовчої виробки як способу нормалізації мікроклімату гірничої виробки глибокої шахти. Охолодження гірського масиву здійснюється способом виносу тепла водою із свердловини, що випереджає вибій підготовчої виробки. З використанням апарату математичної фізики виконано аналітичний опис процесу віддачі тепла поверхню стінок за рахунок природної температури гірських порід, що оточують свердловину, і конвективного теплообміну води у свердловині за законом Ньютона. Розраховано кількість тепла, що підлягає витягу із гірського масиву, для створення теплорівнюючої оболонки виробки.

Ключові слова: *гірський масив, охолодження, нормалізація теплових умов, свердловина, вода, теплообмін*

The mathematical model of cooling action for rock massif on the way of penetration of development working as a way of deep mine excavation microclimate normalization. Cooling of the rock massif is carried out by means of water removing heat from borehole advanced the face of development working. With the help of mathematical physics apparatus it has been made an analytical description of the heat transfer process performed by the surface of the walls due to the natural temperature of rock surrounding the borehole and convective heat transfer of the water in the borehole according to the Newton law. It has been calculated the amount of heat to be abstracted from the massif to create a heat equalizing shell of development working.

Keywords: *rock massif, cooling, heat term equalizing, borehole, water, heat abstraction*

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.І. Голіньком. Дата надходження рукопису 27.10.10