

УДК 622.272.3: 622.418: 628.518

О.А. Бойко,
В.А. Бойко, д-р. техн. наук, проф.

Государственное высшее учебное заведение
„Национальный горный университет“, г. Днепропетровск,
Украина, e-mail: boykooo@yandex. RU

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОУРАВНИВАЮЩЕЙ ОБОЛОЧКИ ПОРОД ГОРНОГО МАССИВА НА ВЕЛИЧИНУ ПРИТОКА ТЕПЛА В ГОРНУЮ ВЫРАБОТКУ ГЛУБОКОЙ ШАХТЫ ДОНБАССА

О.А. Boyko,
V.A. Boyko, Dr. Sci. (Tech.), Professor

State Higher Educational Institution “National Mining
University”, Dnipropetrovsk, Ukraine,
e-mail: boykooo@yandex. RU

STUDY OF ROCK MASSIF HEAT EQUALIZING COVER INFLUENCE ON QUANTITY OF HEAT PENETRATION INTO HEADING OF A DEEP MINE OF DONBASS

Показано, что на современном этапе развития Украины ее энергетическую независимость могут обеспечить рост добычи угля и производства электроэнергии на АЭС. В развитие концепции решения проблемы добычи угля на глубоких горизонтах шахт Донбасса приведено обоснование возможных методов и средств нормализации тепловых условий при проходке горных выработок в породах с естественной температурой 40–70 °С. Проанализированы возможные способы ускоренного охлаждения массива горных пород вокруг горных выработок, разработана инженерная методика расчета параметров теплоуравнивающих оболочек горных выработок и произведена оценка удельного теплового потока в основных типах пород горного массива глубоких шахт Донбасса.

Ключевые слова: теплоуравнивающая оболочка, охлаждение массива горных пород, удельный тепловой поток

Рост национального валового продукта Украины и благосостояние населения страны неразрывно связаны с решением проблемы обеспечения страны доступными по стоимости энергоносителями. Отсутствие разведанных запасов природного газа и нефти на территории страны оставляет возможность решения проблемы обеспечения энергией за счет использования урана и угля. Украина имеет достаточные запасы урановых руд и могла бы по примеру Франции успешно их использовать для массового производства недорогой электроэнергии на АЭС, но не может этого сделать из-за отсутствия техники и технологии производства реакторов и ТВЭЛов, а также хранилищ для отработанных ядерных материалов. В известной степени прогрессу в этом направлении мешает печальный опыт Чернобыля. Из доступных для использования энергоносителей остается каменный уголь.

Возрастание глубины ведения горных работ, старение шахтного фонда страны, уничтожение полученных в наследство при обретении независимости систем центрального кондиционирования воздуха, действовавших на 57 глубоких шахтах Донбасса и обеспечивавших нормальные тепловые условия труда в горных выработках, привело к тому, что температура стенок горных выработок на ряде шахт достигла 45 °С. Результатом изменившегося микроклимата горных выработок глубоких шахт явился рост числа сердечно-сосудистых заболеваний и гибели шахтеров. По числу смертельных несчастных случаев на миллион тонн добычи угля Украина прочно занимает второе место после Китая. Уровень добычи угля в шахтах Донбасса в

настоящее время составляет лишь треть от достигнутого в 70-е годы прошлого столетия и покрывает 2/3 от необходимого для удовлетворения потребностей коксохимии, электроэнергетики и коммунального хозяйства, что вынуждает приобретать его по возрастающим ценам у России, Германии и Польши. Полный развал шахтостроения в стране привел к появлению необычного для Украины прецедента – приобретения у США угольного объединения производственной мощностью 7 млн тонн в год, но даже такое количество угля Украина не может доставить в Авдеевку из-за потери морского флота и отсутствия мощностей портовой перевалки угля. Разведанные запасы угля в Донбассе достаточны для обеспечения энергетических нужд страны на уровне 180–200 млн тонн в год на протяжении 5 столетий, но предпринимаемые руководством страны попытки увеличить добычу угля на шахтах Донбасса не могут привести к успеху из-за необходимости вести горные работы на больших глубинах. Предельная глубина залегания разведанных еще в 60-годы прошлого столетия запасов угля достигает 1850 м, а естественная температура горных пород на таких глубинах – 72–75 °С. Вести горные работы на таких глубинах Украина не готова по нескольким причинам, среди которых: отсутствие производства мощной холодильной техники для шахт, отсутствие валюты на приобретение такой техники у развитых стран, прекращение научно-исследовательских работ по проблеме шахты будущего и рост цен на электроэнергию, вследствие чего стоимость нормализации тепловых условий в горных выработках шахт ведет к непомерному росту себестоимости добываемого угля и убыточности угледобычи. Уже в настоящее время полови-

на добычи угля в Україні забезпечується шахтами, переданими в аренду або приватизованими. Намерення уряду в найближчий час провести повну приватизацію вугільних шахт пов'язано з перспективою припинення власної вугледобычи, оскільки ні один власник не виділяє коштів на оновлення шахтного фонду, науково-дослідницькі роботи по вдосконаленню техніки та технологій вугледобычи, придбання сучасної техніки для добычи угля та нормалізації мікроклімату гірних виробок на глибоких горизонтах. Ситуація стає особливо небезпечною в зв'язі з тим, що навіть в Німеччині, що виробляє та застосовує в глибоких шахтах холодильні установки, забезпечуючі подачу 8–12 млн Вт холоду при наявності гірних виробок мінімум в 2 рази більшого поперечного сечення, ніж на шахтах України, не вдається забезпечити необхідні для нормальної роботи шахтарів температурні параметри. Причиною цього є зростання тепловиділення з оточуючих виробок гірних порід внаслідок збільшення з глибиною їх природної температури та виснаження можливостей доставки холоду повітрям, провітрюючим гірні виробки шахт. Не секрет, що відсутність коксуючихся вугілля веде до зупинки коксохімії, скорочення виробництва металу за допомогою в країні енергоємних застарілих технологій, що позбавляє Україну основного джерела експорту та отримання валютних коштів з витіканням економічних наслідків та перспективою переходу в категорію розвинутих країн Африки.

Вихід з створеної ситуації слід шукати в швидкому пошуку шляхів відродження вугільної промисловості, розробці та застосуванні нових технологій переробки, що дозволяють отримувати газ, синтетичне паливо для двигунів внутрішнього згорання, сировину для хімічної промисловості та забезпечити економічну незалежність країни. Для цього необхідно в першу чергу забезпечити можливість добычи наявних в Донбасі запасів угля в складних гірно-геологічних умовах, пов'язаних з зростанням гірного тиску, газообильності гірних порід та угля, зростанням їх температури по мірі глибини гірних робіт на великі глибини. Боротьба з цими факторами небезпечності гірної виробки при добычі угля велася вже в шахтах середньої глибини, але провітрювання шахти успішно вирішувало дві задачі:

1. Розрідження виділяючогося в гірні виробки метану до безпечних концентрацій та його видалення з гірних виробок на поверхню (допоміжною мірою була дегазація розроблюваних пластів та спутників, винос на поверхню дренажної метаново-повітряної суміші).

2. Доставка холоду в гірні виробки, зниження температури повітря та стінок гірних виробок, винос виділяючогося в гірні виробки тепла окислювальних процесів, працюючих машин та механізмів, виділяючогося в об'єм гірної виробки тепла нагрітих гірних порід (допоміжною мірою є інтенсифікація охолодження стінок

провідних гірних виробок за рахунок охолодження повітря, провітрюючого виробку, з допомогою переміжних кондиціонерів).

На глибоких горизонтах вугільних шахт вентиляція виявляється неспроможною вирішити проблему нормалізації теплових умов, так як повітря з-за малої його теплоємності не може при допустимому перепаді температури перенести необхідну кількість холоду в виробку і, відповідно, видалити з неї виділяючеся тепло оточуючих виробок гірних порід. Виконані нами розрахунки по оцінці запасу тепла в об'ємі гірної маси глибокої шахти з розміром шахтного поля 5000 м по простяганню та 2500 м по падінню, проектуваною для виїмки вугільних пластів до граничної глибини 1850 м, показують, що теплової еквівалент гірної маси такої шахти складає близько 12 млн тонн угля [1]. Для виїмки такої кількості тепла, охолодженою до температури $+2^{\circ}\text{C}$ повітрям при діаметрі ствола 8 м та гранично допустимій швидкості руху повітря 8 м/с в виробках підсечного горизонту на граничній глибині, для охолодження гірних порід до $+26^{\circ}\text{C}$ потрібно було б витратити час близько 260 років. Зрозуміло, що попереднє охолодження маси гірних порід глибокої шахти за рахунок застосування охолодженого повітря не може бути вирішено по багатьох причинах: в першу чергу, на даному етапі неможливо проводити виробки підсечного горизонту, де температура гірних порід досягає $72\text{--}75^{\circ}\text{C}$, в другу, ніхто не погодиться вкладати гроші на такі тривалі терміни, в третю, для охолодження та подачі в шахту необхідної кількості повітря потрібно витратити величезну кількість електроенергії (порядку $70\text{--}75$ млрд кВт/ч) і, в четверту, все це доведеться зробити заради того, щоб викинути на поверхню в оточуюче середовище теплової еквівалент 12 млн тонн угля.

Наведені вище дані свідчать про те, що завдання виїмки та використання тепла гірної маси глибокої шахти не може бути вирішено за допомогою застосування типової схеми кондиціонування повітря. Наступні дослідження, результати яких наведені в [2], свідчать про те, що частинне завдання нормалізації умов праці при проведенні гірної виробки на глибокому горизонті не вирішується за рахунок застосування повітря як переносника холоду. Для забезпечення прийнятних по термінам виконання та підготовки до виїмки вугільних пластів темпів проходки гірних виробок на глибоких горизонтах потрібно, як мінімум, на 1–2 порядки збільшити інтенсивність подачі холоду. Для досягнення цих цілей рекомендується використовувати воду, теплоємність якої в 4000 разів більша такої у повітря [3]. В наведених вище публікаціях наведено дані про рекомендувані схеми та засоби нормалізації теплових умов в гірних виробках в період їх будівництва. Підготовлена мережа гірних виробок по завершенні її будівництва почне функціонувати та буде провітрюватися за рахунок загальношахтної вентиляції, що дозволить на порядок збільшити

личить скорость движения воздуха и коэффициент теплоотдачи стенок горных выработок. Здесь выполнение функции нормализации тепловых условий в горных выработках при выемке угля может быть осуществлено охлажденным воздухом, но при условии, что тепловыделение в горные выработки от работающих машин и механизмов, окислительных процессов и из окружающего горного массива не превысит способность выноса тепла проветривающим выработки воздухом. При этом следует иметь в виду, что с ростом глубины ведения горных работ преобладающим источником поступления тепла в горные выработки становятся нагретые горные породы.

Ниже рассматривается вопрос определения параметров теплопритока из горного массива в горные выработки и условий ограничения его величиной, допускающей, по окончании подготовки этажа, панели, выемочного участка и переходе на общешахтную схему проветривания, нормализацию параметров микроклимата горных выработок за счет применения типовой схемы кондиционирования воздуха в шахте.

Такая постановка задачи является шагом на пути к решению проблемы обеспечения нормативных параметров микроклимата в горных выработках и обеспечению возможности ведения работ по выемке подготовленных запасов угля. Идеальным вариантом решения проблемы было бы охлаждение горного массива до температуры, ниже допустимой (§621 „Правил безопасности в угольных шахтах“), с тем, чтобы горные породы поглощали тепловую энергию, образующуюся за счет окислительных процессов и работы горных машин и механизмов. Обеспечить такое состояние горного массива можно было бы при заблаговременной подсечке участка шахтного отвода серией каналов для течения воды ниже предельной глубины залегания угольных пластов, где, как указывалось выше, естественная температура горных пород достигает 75°C . При наличии сети каналов, охлаждение массива горных пород могло бы продолжаться несколько десятилетий, пока велось строительство шахты и выемка запасов угля на верхних горизонтах. Эквивалент вынесенного водой запаса тепла горного отвода шахты мог бы составить 12 млн тонн угля. Но создание сети выработок (скважин) подсечного горизонта невозможно без наличия специализированных робототехнических комплексов и, на данном этапе ведения горных работ, неосуществимо. В период проведения горных выработок отвод тепла и ускоренное охлаждение горного массива

возможно за счет выноса его водой (в приведенном списке литературы содержатся сведения о способах и средствах его осуществления). Но при ведении работ по выемке угля, применение охлаждения горного массива водой без существенного повышения влажности воздуха практически неосуществимо, в то время, как воздушная струя может доставить холод в любую зону, где находятся горнорабочие. Доставка холода ограничена его теплоемкостью, а прекратить приток тепла горного массива при его высокой естественной температуре невозможно. Поэтому, нужно решать вопрос ограничения притока тепла в горные выработки за счет термического сопротивления на его пути с тем, чтобы допустимый по пропускной способности выработок дебит воздуха мог доставить количество холода, недостаточное для обеспечения нормальных температурных условий.

С учетом изложенного выше, этапы решения поставленной задачи требуют определить:

1) количество тепла, подлежащего выносу из окружающей горную выработку массива, для формирования теплоуравняющей оболочки заданного размера (диаметра);

2) величину удельного теплового потока в выработку из окружающего ее горного массива на проектной глубине ведения работ при наличии теплоуравняющей оболочки заданного размера;

3) величину подачи холода в горную выработку, обеспечивающего сохранение нормативных температурных параметров микроклимата в горной выработке при удельном теплопритоке в нее, рассчитанном выше в п.2.

Поскольку речь идет о решении конкретной прикладной задачи, то исходные параметры – регион расположения шахты, проектная глубина ведения горных работ, тип пород, площадь сечения, длина, форма поперечного сечения и тип крепи горной выработки – известны (заданы или определяются по „Единой методике прогнозирования температурных условий в угольных шахтах“, разработанной МакНИИ). В приводимых ниже расчетах в первую очередь потребуются теплофизические характеристики горных пород шахт. В „Единой методике“ они приведены в табл.1.6, но, поскольку, параметры в ней приведены в технической системе единиц, а теперь предписано использовать систему СИ, то для удобства пользователей ниже в таблице помещены средние значения теплофизических характеристик горных пород для условий Донбасса в системе СИ.

Таблица

Средние значения теплофизических характеристик горных пород для условий Донбаса

Наименование горной породы	Плотность, γ , кг/м ³	Теплофизические свойства			Температура, °C		
		$a \cdot 10^7$, м ² /с	λ , Вт/(м. К)	c , Дж/(кг. К)	горной породы	воды, min	max
Песчаник	2440	12,10	2,560	855	70	5	20
Песч. сланцы	2570	8,14	1,770	905	70	5	20
Известняк	2478	4,44	0,985	882	70	5	20

Следует отметить, что еще в 60-е годы прошлого столетия научной школой академика А.Н. Щербаня выполнены экспериментальные исследования формирования теплоуравнивающей рубашки (ТР) горной выработки и дано аналитическое описание этого процесса. В результатах исследований отмечен длительный, составляющий десятилетия, период формирования ТР диаметром в десятки метров. Но поскольку глубина ведения горных работ в Донбассе в тот период еще только приближалась к 1000 м и проблема нормализации температурного режима горных выработок решалась за счет подачи охлажденного воздуха, то формирование ТР представляло интерес лишь с точки зрения описания физики процесса, а не практического применения в качестве средства нормализации микроклимата горных выработок на глубоких горизонтах. За истекшие 50–60 лет ситуация в корне изменилась, возможности нормализации микроклимата горных выработок на глубоких горизонтах за счет кондиционирования воздуха исчерпались, приходится вести поиск альтернативных средств и способов решения проблемы обеспечения приемлемых условий труда шахтеров, в число которых попали термоуравнивающие рубашки (оболочки) горных пород вокруг горных выработок. Предложенные школой А. Н. Щербаня аналитические зависимости для описания процесса формирования ТР верны по сути физики процесса, но сложны, поскольку учитывают изменяющиеся в процессе длительного периода формирования ТР коэффициенты нестационарного теплообмена, что привело к разработке сложных аналитических зависимостей, пригодных для периода до года, от года до 10 лет и для периода более 10 лет. Все дело заключается в том, что формирование ТР рассматривалось как результат теплообмена горного массива с воздушным потоком, проветривающим горную выработку. Предложенная нами концепция нормализации микроклимата горных выработок [5] предусматривает применение арсенала доступных для реализации задачи нормализации микроклимата горных выработок мероприятий за счет использования воды как холодоносителя, охлаждение массива горных пород орошением, охлаждение горных пород опережающими забой подготовительной выработки скважинами, защиту горнорабочих от перегрева с помощью радиационного кондиционера, применение способа предварительного тепло- и влагонасыщения. Все эти процессы имеют аналитическое описание той или иной степени сложности, но оказывается, что для решения поставленной задачи нет необходимости применять сложный аналитический аппарат решения дифференциальных уравнений в частных производных. Для этого достаточно обратить внимание на конечный результат процесса охлаждения горного массива. Если пренебречь процессом нагрева окружающего горного массива тепловым потоком из недр Земли, то окажется, что решается задача охлаждения окружающего выработку горного массива при стабильной разности температур внешней границы оболочки (она равна естественной температуре горного

массива на данной глубине ведения горных работ) и температуры охлаждаемой внутренней стенки выработки (скважины). Последняя задается условием среды охлаждения (при применении воды в качестве холодоносителя она практически мгновенно становится равной температуре воды, при применении в качестве холодоносителя охлажденного воздуха – потребуется значительный промежуток времени, пока температура стенки приблизится к температуре воздуха). Но в любой момент времени при формировании ТР процесс можно рассматривать как стационарный. В зависимости от количества удаленного из оболочки массива тепла изменяется диаметр оболочки, а закон распределения температур по радиусу оболочки для цилиндрической оболочки, какой является горная выработка, является одним и тем же и описывается логарифмической зависимостью (1) вида

$$t_r = t_p - (t_p - t_c) \cdot \frac{\ln(r/r_2)}{\ln(r_1/r_2)}. \quad (1)$$

Здесь: t_r – температура оболочки горного массива радиусом r ; t_p – естественная температура горной породы на расчетной глубине; t_c – температура охлаждаемой стенки выработки (скважины); r_1 – эквивалентный внутренний радиус охлаждаемой оболочки; r_2 – наружный радиус теплоуравнивающей оболочки. Понятно, что задаваемая в расчете величина радиуса r может изменяться в пределах от r_1 до r_2 , поскольку нас интересуют величины температуры внутри теплоуравнивающей оболочки. Величина эквивалентного радиуса внутренней стенки оболочки определяется как гидравлический радиус выработки любой принятой в проекте формы – прямоугольной, квадратной, круглой, трапециевидной или арочной. Площадь поперечного сечения выработки или диаметр буримой скважины заданы. Что касается внешнего радиуса теплоуравнивающей оболочки, то его размер может быть задан в зависимости от цели расчета. На основании результатов, выполненных учеными школы А. Н. Щербаня на шахтах Донбасса более 50 лет назад экспериментальных наблюдений, известно, что хотя теплоуравнивающая рубашка проветриваемой горной выработки может формироваться в течение десятилетий, но внешний диаметр ее не превышает 25–30 м. Исходя из срока существования горных выработок, зависящего от их назначения, можно считать, что представляющие интерес при нормализации тепловых условий в горных выработках процессы будут иметь место в течение не более 10 лет, а диаметры ТР не превысят 40–50 м.

Информация о распределении температуры в ТР любого радиуса дает возможность определить количество оставшегося тепла в ней. Проходка новой выработки начинается с уже действующей, окруженной частично охлажденными породами, то устье засекаемой выработки будет иметь несколько меньшую, чем естественная, температуру, но этот участок будет ко-

ротким и не окажет влияния на точность расчетов. Удобно вести расчеты для участка выработки единичной длины, тогда получим сведения о необходимом для формирования участка ТР единичной длины выносе тепла при охлаждении и тепловом потоке из горного массива в выработку (скважину), носящем название удельного теплового потока. Понятно, что ТР заданного размера даже при интенсивном охлаждении горной породы формируется в течение промежутка времени определенной длительности, в течение которого имеет место неустановившийся тепловой режим, описываемый дифференциальным уравнением второй степени в частных производных. Выше отмечалось, что при применении типовой системы кондиционирования воздуха формирование ТР занимает длительный период времени. В основе этого процесса лежит процесс теплообмена горного массива и потока воздуха в горной выработке, протекающий по закону Ньютона. Расчетная схема комплекса „горный массив–выработка (скважина)“ в виде цилиндрической стенки, термическое сопротивление R_c которой определяется зависимостью

$$R_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{dp}{2 \cdot R_0} \quad (2)$$

Здесь λ – коэффициент теплопроводности окружающей выработку горной породы; dp – расчетный диаметр ТР, а R_0 – эквивалентный радиус выработки. Но кроме термического сопротивления горной породы на пути теплового потока к среде находится последовательно включенное термическое сопротивление

R_{mc} „стенка – охлаждающая среда“, зависящее от теплофизических свойств и режима движения последней, определяемое выражением

$$R_{mc} = \frac{1}{\alpha \cdot 2 \pi \cdot R_0} \quad (3)$$

Общее термическое сопротивление удельному тепловому потоку из горного массива в охлаждающую среду равно сумме $R_c + R_{mc}$, а величина удельного теплового потока определяется выражением

$$qt = \frac{\pi \cdot (tp - tc)}{\frac{1}{\alpha \cdot 2 R_0} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{dp}{2 \cdot R_0}} \quad (4)$$

Количество тепла в ТР единичной длины определяется интегрированием функции распределения температуры по ее радиусу на площадь сечения, удельную плотность и удельную теплоемкость вмещающей горной породы. Аналитическое описание изменения удельного теплового потока при неустановившемся процессе теплообмена горного массива и охлаждающей среды $q(\tau)$ в работах школы А.Н. Щербаня и составленной на их основе „Единой методике прогнозирования температурных условий в угольных шахтах“ базируется на сложной зависимости (5), учитывающей изменение констант теплообмена во времени

$$f_1(\tau) := \frac{(tp - tv)}{\left(\frac{1}{2 \cdot \alpha \cdot R_0} + \frac{1}{\lambda}\right)} \cdot \left[\frac{\tau}{2 \cdot R_0} + \frac{2 \cdot \sqrt{\tau}}{\left(1 + \frac{\pi}{2 \cdot \alpha \cdot R_0}\right) \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} + \frac{\frac{\alpha \cdot 1}{\lambda}}{\left(\frac{\alpha \cdot 1}{\lambda} + \frac{1}{2 \cdot R_0}\right)^2 \cdot a} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot 1}{\lambda} + \frac{1}{2 \cdot R_0}\right)} - 1 \right] \right] \quad (5)$$

Здесь τ – среднее время охлаждения выработки в секундах. Расчеты с использованием зависимости (5) требуют выполнения огромного объема вычислений по определению изменяющихся во времени величин удельного теплового потока и последующего определения суммарного выноса тепла для формирования ТР. На стадии предварительных расчетов по определению требуемой величины подачи холода для формирования ТР вокруг горной выработки, процесс подсчета распределения температуры в ТР, распределения оставшегося в ней количества тепла и подлежащего выносу можно совместить с фиксированием результатов подсчетов в виде таблиц и графиков, применив программу компьютерного расчета. В выполненных ниже исследованиях расчетные обоснования выполнены с применением системы MathCAD 11 Enterprise Edition. При этом приняты во внимание следующие обстоятельства, существенно упрощающие процесс вычислений без ущерба для точности расчета, вытекающие из следующих соображений.

Поскольку длина проводимой выработки составляет сотни метров и темп проходки ее примерно постоянен, то начавшееся при охлаждении массива формирование ТР с применением интенсивного теплоотвода за счет использования холодной воды будет протекать в пределах участка выработки определенной длины. Предположим, что формирование ТР происходит за промежуток времени, примерно, 4 млн секунд. За это время, при темпе проходки 2м/сутки, будет пройдено 100 м выработки. Если общая длина проводимой выработки составляет 1000м, то в процессе проходки будет полностью сформирована ТР на участке выработки не менее 900м и только на заключительном участке проходки придется еще некоторое время продолжить работы по окончанию формирования ТР. Понятно, что при формировании ТР имеют место неустановившиеся тепловые процессы, а интенсивность процесса охлаждения будет максимальной в начальный период соприкосновения охлаждающей среды со свежееобнаженной стенкой выра-

ботки (скважины) с естественной температурой массива. По мере продвижения забоя выработки, при охлаждении вмещающих выработку горных пород, интенсивность теплопритока падает до определенной величины, но в целом любой участок ТР единичной длины при его формировании отдаст в охлаждающую среду одинаковое количество тепла. Значит, при стабильном темпе проходки выработки, в соответствии с законом сохранения энергии, на каждый погонный метр выработки было израсходовано практически одинаковое количество холода. Следовательно, можно полагать, что процесс формирования ТР протекал как стационарный процесс определенной интенсивности. Такое предположение позволяет существенно упростить расчеты и с учетом теплофизических параметров горных пород использовать результаты выполненных тепловых расчетов для одного типа породы при проектном обосновании охлаждения массива по другим типам пород. Заметим также, что в выполняемых нами тепловых расчетах ТР вместо интегрирования сложных функций используется суммирование при разбивке оболочки на цилиндры сравнительно небольшой толщины [6]. Ниже в качестве примера использования предложенной методики нормализации микроклимата горных выработок, проводимых на глубоких горизонтах шахт Донбасса, приведены некоторые результаты расчетов величин удельных тепловых потоков при наличии теплоуравнивающих оболочек, сформированных в горных породах с высокой теплопроводностью (типа песчаника). Применены схемы охлаждения горного массива

скважиной, опережающей забой подготовительной выработки, охлажденным воздухом, подаваемым вентилятором местного проветривания в период проходки выработки, а при включении ее в систему проветривания шахты – вентилятором главного проветривания. На рис. 1, в характерной для MathCAD 11 форме, приведены расчетные зависимости и графики результатов расчета величин удельного потока при охлаждении горного массива скважиной диаметром 0,3 м водой с температурой 5 и 20 °С при наличии теплоуравнивающей оболочки, диаметром от 2 до 10 м. Расчеты удельного теплового потока выполнены для песчаника с естественной температурой 40, 50, 60 и 70 °С в предположении, диаметр зоны постоянных температур изменяется по мере охлаждения горного массива охлаждающей водой, омывающей скважину при прямоточной схеме циркуляции. Вода из скважины уходит по трубе, изготовленной из теплоизоляционного материала, утечки тепла через стенку трубы не учитываются. Площадь сечения и охлаждающего выносящего тепло из скважины потока воды принята одинаковой, составляющей около 45% площади поперечного сечения скважины.

Расчеты произведены для трех диаметров скважины– 0,1; 0,3 и 1 м. Последний размер скважины не относится к типовым для бурения, но принят для рассмотрения из условия, что короткая часть скважины у ее устья может быть расширена комбайном или взрывом шпуров для ускоренного охлаждения орошением.

$$d1 := 0.3 \quad d2 := 2 \quad tp1 := 40 \quad tp2 := 50 \quad tp3 := 60 \quad tp4 := 70 \quad \alpha := 250 \quad tv1 := 5 \quad tv2 := 20 \\ \lambda := 2.56 \quad d2 := 2..10$$

$$f1(d2) := \frac{\pi(tp1 - tv1)}{\frac{1}{\alpha \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d2}{d1}\right)}$$

$$f2(d2) := \frac{\pi(tp2 - tv1)}{\frac{1}{\alpha \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d2}{d1}\right)}$$

$$f3(d2) := \frac{\pi(tp3 - tv1)}{\frac{1}{\alpha \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d2}{d1}\right)}$$

$$f4(d2) := \frac{\pi(tp4 - tv1)}{\frac{1}{\alpha \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d2}{d1}\right)}$$

$$f5(d2) := \frac{\pi(tp1 - tv2)}{\frac{1}{\alpha \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d2}{d1}\right)}$$

$$f6(d2) := \frac{\pi(tp2 - tv2)}{\frac{1}{\alpha \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d2}{d1}\right)}$$

$$f7(d2) := \frac{\pi(tp3 - tv2)}{\frac{1}{\alpha \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d2}{d1}\right)}$$

$$f8(d2) := \frac{\pi(tp4 - tv2)}{\frac{1}{\alpha \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d2}{d1}\right)}$$

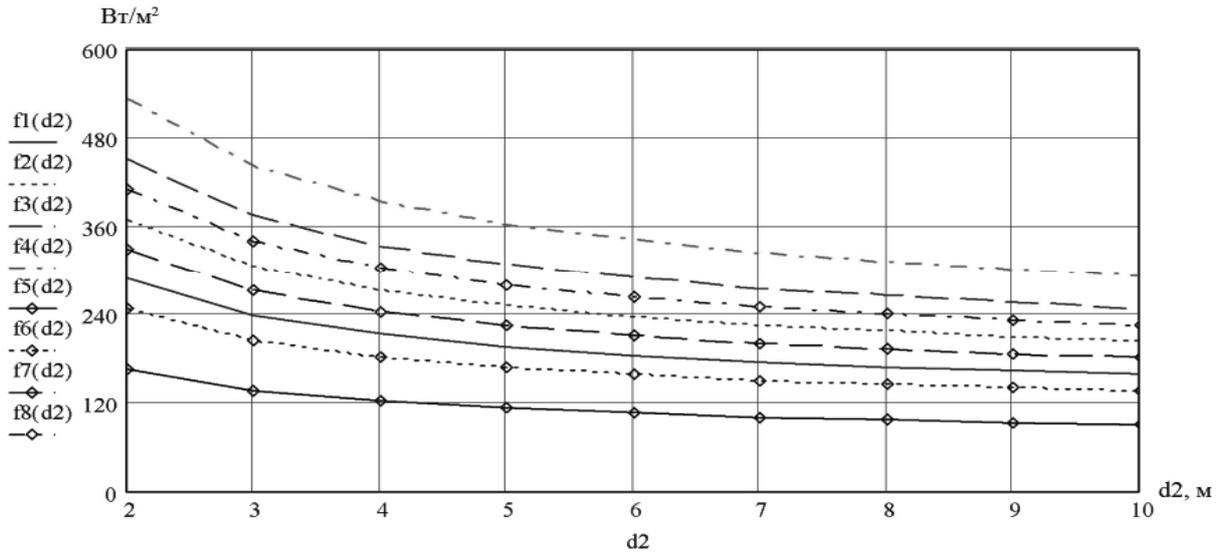


Рис. 1. Изменение величины удельного теплового потока в охлаждаемую водой скважину диаметром 0,3м, пробуренную по песчанику. Графики функций f_1, f_2, f_3, f_4 —для температур породы 40, 50, 60 и 70 °С и температуры воды 5 °С ; графики f_5, f_6, f_7, f_8 —для тех же температур породы, но при температуре воды 20 °С .

Результаты расчетов величин удельных тепловых потоков водоохлаждаемых скважин свидетельствуют о том, что для получения ощутимого эффекта охлаждения горных пород по трассе проходки горной выработки необходимо применять скважины сравнительно больших диаметров. Однако функцию снижения температуры стенок вскрываемой на полное сечение выработки они способны выполнить и при сравнительно небольших диаметрах скважин, буримых шахтными буровыми станками, обеспечивая возможность дальнейшего ведения проходки с применением других методов охлаждения горного массива. Ниже на рис. 2 приведены

результаты расчетов величины удельного теплового потока в квершлаг площадью поперечного сечения 14 м², пройденного по песчанику и закрепленного арочной крепью. Здесь рассматривается охлаждение горного массива вокруг выработки, осуществляемое воздухом, движущимся со скоростью 0,5; 1; 2 и 5 м/с. Поскольку с ростом глубины ведения горных работ изменяется атмосферное давление и температура воздуха, для получения однозначных результатов в качестве исходного параметра принята масса воздуха G_1, G_2, G_3, G_4 , соответствующая указанным выше скоростям движения воздуха в рассматриваемой выработке.

$$\begin{aligned}
 d1 &:= 4 & d &:= 4.5 & tp1 &:= 40 & G1 &:= 8.75 & G2 &:= 17.5 & G3 &:= 35 & G4 &:= 105 \\
 \varepsilon &:= 1.5 & tv1 &:= 10 & tv2 &:= 20 & \lambda &:= 2.5\epsilon & F &:= 14 & U &:= 3.8 \cdot \sqrt{F} & d &:= 4.5..20 \\
 U &= 14.218 ; & \alpha_1 &:= 2.32 \cdot \varepsilon \cdot (G1)^{0.8} \cdot \frac{U^{0.2}}{F} ; & \alpha_1 &= 2.397 & \alpha_2 &:= 2.32 \cdot \varepsilon \cdot (G2)^{0.8} \cdot \frac{U^{0.2}}{F} ; & \alpha_2 &= 4.173 ; \\
 \alpha_3 &:= 2.32 \cdot \varepsilon \cdot (G3)^{0.8} \cdot \frac{U^{0.2}}{F} ; & \alpha_3 &= 7.266 ; & \alpha_4 &:= 2.32 \cdot \varepsilon \cdot (G4)^{0.8} \cdot \frac{U^{0.2}}{F} ; & \alpha_4 &= 17.497 ; \\
 f1(d) &:= \frac{\pi \cdot (tp1 - tv1)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d}{d1}\right)} ; & f2(d) &:= \frac{\pi \cdot (tp1 - tv1)}{\frac{1}{\alpha_2 \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d}{d1}\right)} ; \\
 f3(d) &:= \frac{\pi \cdot (tp1 - tv1)}{\frac{1}{\alpha_3 \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d}{d1}\right)} ; & f4(d) &:= \frac{\pi \cdot (tp1 - tv1)}{\frac{1}{\alpha_4 \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d}{d1}\right)} ; \\
 f5(d) &:= \frac{\pi \cdot (tp1 - tv2)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d}{d1}\right)} ; & f6(d) &:= \frac{\pi \cdot (tp1 - tv2)}{\frac{1}{\alpha_2 \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d}{d1}\right)} ; \\
 f7(d) &:= \frac{\pi \cdot (tp1 - tv2)}{\frac{1}{\alpha_3 \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d}{d1}\right)} ; & f8(d) &:= \frac{\pi \cdot (tp1 - tv2)}{\frac{1}{\alpha_4 \cdot d1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d}{d1}\right)} .
 \end{aligned}$$

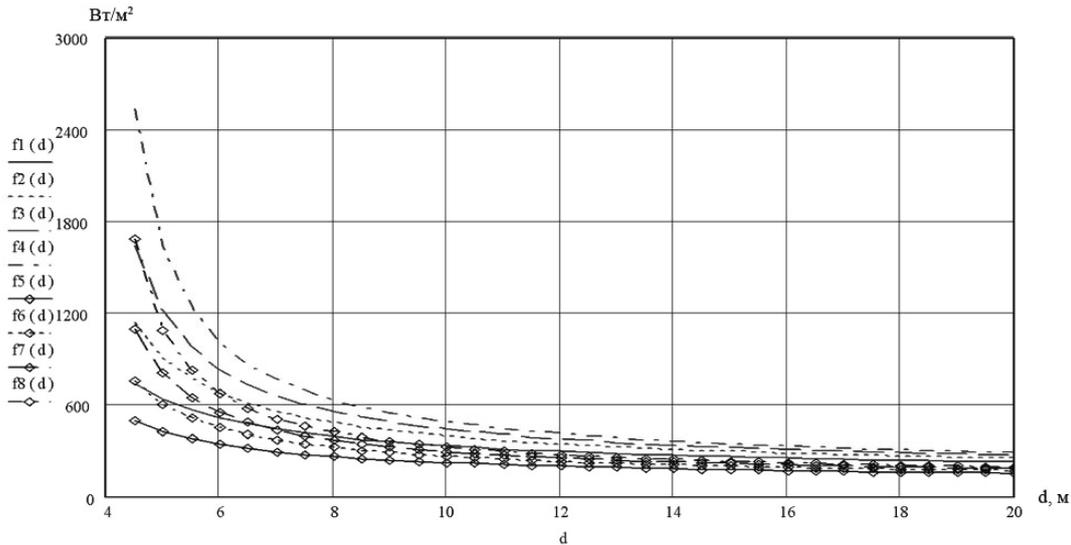


Рис. 2. Изменение удельного теплового потока в горную выработку при естественной температуре горного массива 40, 50, 60, 70 °C и температуре проветривающего выработку охлажденного воздуха 10 и 20 °C. Графики функций f_1, f_2, f_3, f_4 – для естественной температуры породы 40, 50, 60 и 70 °C и температуры воздуха 10 °C; графики f_5, f_6, f_7, f_8 – для тех же температур породы при температуре воздуха 20 °C

Приведенные на рис. 2 результаты расчетов свидетельствуют о том, что величина удельного теплового потока для проветриваемой охлажденным воздухом выработки значительно больше, чем для охлаждаемой водой скважины, хотя коэффициент теплоотдачи для скважины на порядок выше. Такое явление не должно вводить в заблуждение исследователя, поскольку оно объясняется несравнимо меньшей площадью поверхности теплообмена в скважине, чем в выработке. Площадь участвующей в теплообмене с горным массивом стенки скважины, диаметром 0,3 м на 1 метр ее длины, составляет лишь 0,942 м², а площадь теплообмена выработки такой же длины составляет 14,22 м². Вынос тепла горного массива охлаждающей скважину водой ограничивается малой площадью теплообмена, в то время, как в выработке при достаточно большой площади теплообмена вынос тепла горного массива лимитируется малой теплоемкостью воздуха. На стадии проходки выработки обеспечение эффективного охлаждения окружающего ее горного массива должно обеспечиваться за счет выбора рационального способа и средств извлечения и выноса тепла горного массива в короткий период времени. Но поскольку срок существования пройденной выработки определяется схемой вскрытия, подготовки и выемки запасов угля, то период ее существования может быть достаточно большим. В этом случае длительно будет существовать достаточно интенсивный приток тепла в выработку из горного массива, борьба с которым требует решения вопроса оптимизации параметров, способа нормализации микроклимата горных выработок глубоких шахт, учитывающих кроме рассмотренного выше притока тепла из горного массива также, не рассматривавшийся в приведенных выше исследованиях, фактор инфракрасного излучения.

Выводы:

1. Теплоуравнивающая рубашка (ТР) вокруг горной выработки формируется вследствие разности естественной температуры горного массива и температуры заполняющей выработку среды в результате возникновения теплового потока. Распределение температуры в объеме ТР подчиняется логарифмическому закону для цилиндрической стенки.
2. Величина удельного теплового потока в горной выработке зависит от разности естественной температуры горной породы, температуры воздушной среды в ней и термического сопротивления тепловому потоку, которое зависит от поперечного размера оболочки, теплопроводности горной породы и коэффициента теплоотдачи стенки выработки заполняющей ее среде.
3. Неподвижный воздух в выработке обладает незначительной теплопроводностью и способен выполнять задачу термоизолирующего слоя у стенки. С ростом скорости движения воздуха в выработке происходит турбулизация потока и рост коэффициента теплоотдачи, что приводит к снижению термического сопротивления тепловому потоку и возрастанию величины удельного теплового потока.
4. Величина коэффициента теплоотдачи в выработке, в пределах имеющего место в ней диапазона скоростей движения воздуха, находится в диапазоне от десятых долей до 25 Вт/(м² К).
5. Наличие воды в скважине или орошение стенки выработки водой приводит к возрастанию коэффициента теплоотдачи на один-два порядка по сравнению с воздухом. Поскольку вода обладает в 4000 раз большей объемной теплоемкостью чем воздух, то использование ее позволяет значительно ускорить процесс формирования ТР и обеспечить концентрированный вынос тепла на дневную поверхность.
6. Начало формирования ТР характеризуется возможностью возникновения удельного теплового потока

большой величины из-за ничтожного по толщине слоя охлажденной породы и, соответственно, малого термического сопротивления породы, но при отводе тепла воздухом не может в полном объеме реализоваться из-за малой теплоемкости воздуха, а при наличии воды в скважине – из-за малой поверхности ее стенки.

7. Наличие ТР толщиной 2–3 м ведет к значительному снижению величины удельного теплового потока в горную выработку, дальнейшее увеличение толщины ТР сравнительно слабо влияет на уменьшение величины удельного теплового потока. Наличие ТР вокруг скважины также приводит к снижению величины удельного теплового потока в нее, но, из-за малой поверхности теплообмена воды со стенками скважины, он изначально меньше по величине, чем для горной выработки с потоком воздуха.

8. Наличие ТР горной выработки достаточной величины ведет к существенному снижению притока тепла в нее и необходимой величины подачи холода, что позволит поддерживать нормируемые параметры микроклимата горной выработки, включенной в проветриваемую вентилятором главного проветривания вентиляционную сеть глубокой шахты, за счет холода, доставляемого воздухом.

Список литературы / References

1. *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 / В.А. Бойко, О.А. Бойко. – Днепропетровск: РВК НГУ, 2003. – с. 113–124

Boyko V.A. Estimation of thermal potential of rock massif of deep mine in Donbass and capabilities of standard scheme of work environment normalization: Sbornik nauchnykh trudov Natsionalnogo gornogo universytetu No.16 / V.A. Boyko, O.A. Boyko. – Dnepropetrovsk: RVK NGU, 2003. – P. 113–124

2. *Бойко В.А.* Проблема нормализации микроклимата глубоких шахт Донбасса, способы и средства ее решения: Материалы международной конференции „Форум горняков 2009“, секция „Строительство шахт и подземных сооружений“ / В.А. Бойко, О.А. Бойко. – Днепропетровск: НГУ, 2003. – с. 142–153

Boyko V.A. Problem of microclimate normalization in deep mines of Donbass, ways and means of solution: Materials of the International conference “Forum of miners 2009”, breakup group “Building of mines and underground constructions” / V.A. Boyko, O.A. Boyko. – Dnepropetrovsk: NGU, 2003. – P. 142–153

3. *Бойко В.А.* Способ и средства нормализации микроклимата горных выработок глубоких шахт в период их строительства: Збірник наукових праць Національного гірничого університету №32 / В.А. Бойко, О.А. Бойко. – Днепропетровск: РВК НГУ, 2009. – с. 214–225

Boyko V.A. Ways and means of microclimate normalization in mine tunnels of deep mines during their construction: Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnogo hirnychoho universytetu №32 / V.A. Boyko, O.A. Boyko. – Dnepropetrovsk: RVK NGU, 2009. – p. 214–225

4. *Бойко В.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“ / В.А. Бойко, О.А. Бойко. – Днепропетровск: НГУ, 2009. – с. 57–73. ISBN 978-966-350-155-0

Boyko V.A. Design of ways and means the heat equalizing cover of mine workings formation in a deep mine and estimation of influence of its parameters on heat penetration from rock massif: Materials of the International conference “Forum of miners 2009”, breakup group “Mine aerology and labor safety” / V.A. Boyko, O.A. Boyko. – Dnepropetrovsk: NGU, 2009. – P. 57–73. ISBN 978-966-350-155-0

5. *Бойко В.А.* Способ ускоренного формирования теплоуравнивающей рубашки горной выработки глубокой шахты: Збірник наукових праць національного гірничого університету №33, том 2, / В.А. Бойко, О.А. Бойко. – Днепропетровск: РВК НГУ, 2009. – с. 113–125

Boyko V.A. Way of accelerated formation of heat equalizing cover of mine workings in deep mine: Zbirnyk naukovykh prats natsionalnogo hirnychoho universytetu №33, tom 2, / V.A. Boyko, O.A. Boyko. – Dnepropetrovsk: RVK NGU, 2009. – P. 113–125

Показано, що на сучасному рівні розвитку України її енергетичну незалежність можуть забезпечити зростання видобутку вугілля та виробництва електроенергії на АЕС. У розвиток концепції вирішення проблеми видобутку вугілля на глибоких горизонтах шахт Донбасу приведено обґрунтування можливих методів і засобів нормалізації теплових умов при проходці гірничих виробок у породах з природною температурою 40–70 °С. Виконано аналіз можливих способів пришвидшеного охолодження гірських порід навколо гірничих виробок, розроблена інженерна методика розрахунку параметрів тепловирівнюючих оболонок гірничих виробок і виконана оцінка питомого теплового потоку в основних типах порід гірського масиву глибоких шахт Донбасу.

Ключові слова: *теповирівнююча оболонка, охолодження масиву гірських порід, питомий тепловий потік*

At the present stage of development of Ukraine, energy independence of the country can be ensured by growth of coal mining and nuclear electricity production. Solving problem of coal production in the deep horizons of the Donets Basin authors have substantiated possible methods and means of normalizing the thermal conditions of excavation work in rocks with natural temperature of 40–70 °C. Authors have analyzed possible ways of rocks cooling acceleration around mine workings. An engineering method for calculating of parameters of the heat equalizing cover of mine workings has been developed and the estimation of specific heat penetration in principal types of rock in deep mines of Donbass has been hold.

Keywords: *heat equalizing cover, cooling of rock massif, specific heat penetration*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Голіньком. Дата надходження рукопису 11.01.11