

Для підвищення безпеки підземних робіт здійснюється закладення виробленого простору, гідратація закладки супроводжується виділенням тепла. Розглядається спосіб зниження температури шляхом додавання до закладки здрібнених гірських порід. Це дозволяє знизити до 10 м зону впливу процесів гідратації закладки на температурний режим оточуючих гірничих виробок

Ключові слова: мікроклімат, нормалізація, провітрювання, закладка, гідратація, теплофізичні параметри, температура, вологість

Для повышения безопасности подземных работ производится закладка выработанного пространства, гидратация которой сопровождается выделением тепла. Рассмотрен способ снижения температуры путем добавления в закладочную смесь измельченных горных пород. Это позволяет снизить до 10 м зону влияния процессов гидратации закладки на температурный режим примыкающих горных выработок

Ключевые слова: микроклимат, нормализация, проветривание, закладка, гидратация, теплофизические параметры, температура, влажность

ВЛИЯНИЕ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ В ОЧИСТНЫХ КАМЕРАХ НА МИКРОКЛИМАТ ГЛУБОКИХ ШАХТ

А. А. Лапшин

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра рудничной аэрологии и охраны труда
Криворожский национальный университет
ул. Пушкина, 37, г. Кривой Рог, Украина, 50002
E-mail: alexandr.lapshin-ua@yandex.ru

1. Введение

В горнодобывающей промышленности применяются системы разработки месторождений с закладкой выработанного пространства. В качестве твердеющей закладки применяются смеси, включающие цемент, наполнители из песчано-гравийной смеси и воду. В процессе гидратации твердеющей закладки выделяется тепло, которое приводит к повышению температуры окружающих горных пород и воздуха, поступающего в зону горных работ при проветривании выработок.

Разработка богатых руд подземным способом на глубинах 1500–1700 м усложняется горнотехническими возможностями, среди которых отсутствие эффективной технологии, рациональных схем, возможности подъема руды и вентиляции шахт [1]. С увеличением глубины подземной разработки повышается температура горных пород и рудничного воздуха, достигающая на шахтах Кривбасса предельно-допустимой величины 26 °С, а на шахте «Эксплуатационная» ЗЖРК температура воздуха в горных выработках на рабочих горизонтах превышает 30 °С.

Высокая температура (больше 26 °С) и влажность воздуха (больше 85 %), повышенное атмосферное давление (800 мм рт. ст.), характерное для горных выработок глубоких шахт ухудшают условия и снижают производительность труда [2]. Такое состояние микроклимата современных глубоких шахт приводит к перегреву организма работающих, нарушению функционирования органов дыхания, что снижает сопротивляемость организма к заболеванию. Согласно Правилам безопасности, при температуре воздуха в

горных выработках свыше 26 °С должны применяться специальные меры для ее снижения.

Актуальность нормальных климатических условий в современных глубоких шахтах подтверждается еще и тем, что существующие методы нормализации атмосферы требуют дальнейшего усовершенствования. Это обусловлено изменением величины теплопоступлений от горных пород, влиянием влажности, работой технологического оборудования, влиянием теплоты гидратации новых закладочных материалов, повышением статического (потенциального) давления воздуха в результате его сжатия в подающих стволах. Рекомендованное ранее стационарное воздухоохладительное оборудование для угольных шахт не нашло широкого применения по технико-экономическим причинам и низкой эффективности [3].

Имеющие место случаи профессионального заболевания подземных горнорабочих, вызванные неудовлетворительными условиями труда, свидетельствуют о социальной проблеме в области климатологии шахт, актуальность которой обостряется с увеличением глубины разработки

2. Постановка проблемы

Для повышения безопасности подземных работ и сохранения земной поверхности от обрушений горные предприятия ведут добычу руды подземным способом с применением закладки отработанного пространства. Вместе с положительным решением проблемы безопасности горных работ и улучшения экологии при использовании систем с закладкой возникает про-

блема выделения тепла при гидратации закладочного материала [4, 5]. По данным исследований Сахновского В. Л. температура закладки в процессе гидратации превышает 40 °С. Выделяемое тепло передается окружающим горным породам и воздуху, который применяется для проветривания горных выработок.

Специалисты горных предприятий, научно-исследовательских и проектных институтов ведут поиск способов и средств повышения эффективности процессов закладки отработанных камер, а также снижения выделения тепла при её гидратации.

3. Цели и задачи исследования

Целью работы является научное обоснование и разработка нового способа снижения тепловыделений в процессе гидратации твердеющей закладки.

Задачи исследования:

- 1) исследование теплофизических свойств горных пород и закладочных материалов;
- 2) определение температуры горных пород, примыкающих к заложённым камерам;
- 3) определение температуры на поверхности закладки;
- 4) разработка рекомендаций по снижению влияния твердеющей закладки на микроклимат глубоких шахт.

4. Анализ исследований и публикаций

Решению проблемы создания нормальных тепловых условий в горных выработках шахт посвящены исследования многих национально-исследовательских, учебных и проектных институтов: Макеевского научно-исследовательского института (МакНИИ), Донецкого научно-исследовательского угольного института (ДонУГИ), Донецкого политехнического института, Национального горного университета, Криворожского национального университета.

В МакНИИ авторами Кузиным В. А., Алабьевым В. Р. и др. создано «Руководство по выбору горно-технических способов нормализации климатических условий на выемочных участках глубоких шахт» [6].

В институте геотехнической механики НАН Украины разработаны научные основы создания способа охлаждения воздуха и закладки выработанного пространства глубоких шахт.

В Научно-исследовательском институте безопасности труда в горной промышленности, в частности Сахновским В. Л., Куроченко В. М. проведены исследования тепловых условий и рекомендованы средства нормализации микроклимата в шахтах Запорожского железорудного комбината. В Криворожском национальном университете Лапшиным А. Е., Ошмянским И. Б., Лапшиным А. А. и др. разработаны «Способы и средства повышения эффективности проветривания и нормализации микроклимата в глубоких железорудных шахтах» и «Руководство по проектированию вентиляции рудных шахт» [7].

Для повышения безопасности ведения горных работ подземным способом производят закладку выработанного пространства с использованием в качестве закладочных материалов цемента, песка и воды [8, 9].

В качестве альтернативных компонентов закладки используют отходы обогатительных фабрик – шлам и тепловых электростанций – золу [10, 11]. В процессе твердения закладочных материалов в отработанных камерах выделяется тепло, что оказывает влияние на тепловой режим горных выработок. Исследования процесса оттаивания в мерзлых породах свидетельствует о влиянии закладки на температуру окружающего породного массива [12, 13].

Большой объем проведенных исследований в области климатических условий в шахтах свидетельствует об актуальности данной проблемы. Анализ научной периодики за последние годы подтвердил интерес ученых в исследовании влияния твердеющей закладки на тепловой режим шахт. Вместе с этим остаются нерешенными вопросы связанные с определением и регулированием границ влияния процессов твердения закладки на температурное поле окружающих горных пород.

5. Исследование теплофизических свойств горных пород и закладочных материалов

Решение проблемы снижения тепловыделений в примыкающие горные выработки в процессе гидратации закладочного материала требует предварительно изучения теплофизических свойств горных пород и закладочных материалов [14, 15]. Лабораторные исследования по определению теплофизических свойств, а именно коэффициента температуропроводности α , м²/с; теплопроводности λ , Вт/мК; теплоемкости c , кДж/кгК, крепости f обозначены первой задачей и производились с образцами и производились с образцами, представленными геологическими службами шахт Криворожского железорудного комбината (КЖРК) и Запорожским железорудным комбинатом (ЗЖРК).

Определение коэффициента температуропроводности α производилось двумя методом регулярного режима, разработанного профессором Кондратьевым Г. М. Этот метод позволяет производить автоматическую запись снятия кривых регулярного теплового режима горных пород при незначительной затрате времени на эксперимент и обеспечивает достаточную для практики точность замера (до 5 %). В результате обработки записанных кривых можно непосредственно получить численные значения термических констант. Теоретические принципы, положенные в основу регулярного режима, заключаются в том, что тело в процессе охлаждения проходит три стадии температур.

В первой стадии, когда нагретое тело до определенной температуры помещается в среду с постоянной температурой, распределение поля температур внутри самого тела носит случайный характер. Эта стадия носит название нестационарного теплового режима. Через некоторое время поле температур начинает выравниваться, тело переходит в стадию упорядоченного охлаждения, которая называется регулярным режимом. Теперь распределение температур для различных точек системы становится неизменным и не зависит от первичного состояния системы. Далее регулярный режим переходит постепенно в стадию стационарного теплового режима, когда устанавливается равенство

между температурой всех точек системы и температурой окружающей среды.

Пусть тело произвольной геометрической формы и размера охлаждается в среде с постоянной температурой. Тогда для него можно написать известное уравнение теплопроводности Фурье

$$\frac{du}{d\tau} = \alpha \nabla^2 u, \tag{1}$$

где $u=f(x, y, z, \tau)$ – температура тела; τ – время; α – коэффициент температуропроводности; ∇^2 – оператор Лапласа, который в декартовой системе координат x, y, z имеет вид

$$\nabla^2 = \frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{d^2u}{dz^2}.$$

Решив уравнение (1) при граничных условиях:

$$\lambda \left(\frac{du}{dn} \right)_{n=0} + \alpha(u_1 - t) = 0, \tag{2}$$

$$(u)_{\tau=0} = f(x, y, z), \tag{3}$$

где n – нормаль к поверхности тела; α – коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности; u_1 – температура на поверхности тела; t – температура окружающей среды.

При решении уравнения для упрощения вместо температуры будем брать температурные разности Δt , определяя их как

$$\Delta t = u - t, \tag{4}$$

где Δt – температура в произвольной точке тела, отсчитываемая от постоянной температуры окружающей среды.

Общее решение уравнения (1) будет иметь вид

$$\Delta t = \sum_{i=0}^{\infty} \Delta t_i = \sum_{i=0}^{\infty} A_i U_i e^{-m_i \tau}, \tag{5}$$

где A_i – постоянные, зависящие от начального распределения температур и формы тела; U_i – функции координат, характеризующие распределение температур в теле; m_i – постоянные, представляющие собой ряд положительных чисел, подчиняющихся условию $m_1 < m_2 < m_3 \dots$ и зависящих от формы, размеров, взаимного расположения частей системы, условий теплообмена на границах системы и от теплофизических характеристик тела.

Это решение единственное, если оно удовлетворяет граничным условиям (2), (3).

Ряд (5) быстро сходится с увеличением времени охлаждения; каждый последующий член ряда весьма мал по сравнению с предыдущим, а сумма всех последующих членов пренебрежительно мала по сравнению с первым членом. Поэтому в уравнении (5) можно ограничиться только первым членом ряда. Тогда решением уравнения (1) будет

$$\Delta t = A_1 U_1 e^{-m\tau}, \tag{6}$$

где $\tau \geq \tau_1$.

Уравнение (6) представляет собой экспоненту; A_1 входит в выражение в виде постоянного множителя,

а стадия охлаждения носит название регулярного теплового режима.

Прологарифмировав формулу (6), получим

$$\ln \Delta t = m\tau + f(x, y, z), \tag{7}$$

где $f(x, y, z)$ – функция координат точки, тогда

$$\frac{-\partial(\ln \Delta t_i)}{\partial \tau} = m. \tag{8}$$

Исходя из вышеизложенного, характер всех процессов охлаждения тел можно сформулировать следующим образом. Регулярный режим наступает по истечении достаточного времени начала охлаждения тела и характеризуется тем, что для любой точки тела логарифм разности температур в этой точке и окружающей среды изменяется со временем по линейному закону, причем величина изменения логарифма этой разности для любой точки тела будет одной и той же, равной m . В теории регулярного теплового режима m носит название темпа охлаждения тела. Темп охлаждения характеризует скорость протекания процесса и является основной искомой величиной при проведении экспериментов по методам регулярного теплового режима.

Величину темпа регулярного охлаждения можно определить, выбрав на прямой регулярного режима охлаждения две произвольные точки 1 и 2 для двух моментов времени τ_1 и τ_2 ($\tau_1 < \tau_2$) с соответствующими значениями температур t_1 и t_2 ($t_1 > t_2$).

Тогда m можно вычислить по формуле

$$m = \frac{\ln t_1 - \ln t_2}{\tau_2 - \tau_1}. \tag{9}$$

Таким образом, режим охлаждения является зависимостью экспоненциальной.

На рис. 1 приведен график изменения температуры со временем в произвольной точке тела в полулогарифмических координатах $\ln \Delta t = f(\tau)$ на оси абсцисс отложено время охлаждения, а на оси ординат (логарифмическая шкала) – логарифм разности температур точки тела и окружающей среды.

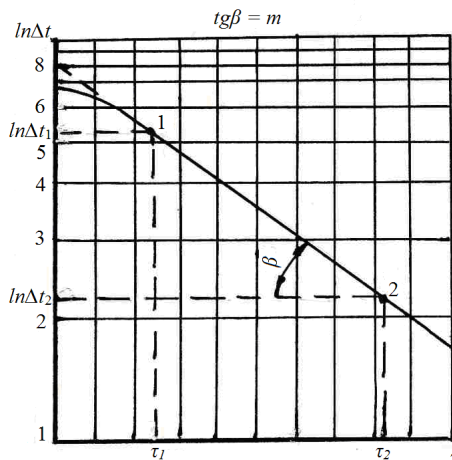


Рис. 1. График охлаждения образца в полулогарифмических координатах $\ln \Delta t$

Пользуясь уравнением (9), можно, зная температуру в два периода времени, определить значение m . Затем в соответствии с теорией Кондратьева Г. М. вычислить величину коэффициента температуропроводности α из уравнения

$$\alpha = K_{\phi} \cdot m,$$

где K_{ϕ} – коэффициент, зависящий от формы и размера тела. В связи с тем, что исследуемые образцы (руда, порода) достаточно плотны, то их влагоемкость в процессе калориметрирования практически не меняется. Установка для определения термических параметров горных пород по методике Кондратьева Г. М. (первый метод), позже усовершенствованной Щербанем А. Н., состоит из:

- сушильного шкафа с терморегулятором для нагрева образца до определённой температуры (обычно 100°C);
- водяного термостата типа ТС-15м, который обеспечивает граничные условия во время опыта ($t = \text{const}, \alpha \rightarrow \infty$);
- самозаписывающего измерительного прибора температурной разности, состоящего из термопары (медь-константан), магнитного усилителя (МУ) и самозаписывающего гальванометра типа СГ-1.

Методика исследования заключалась в охлаждении предварительно нагретого образца, записи моментов времени τ и соответствующих им отсчетов разности температур по гальванометру. Моменты времени τ и соответствующие им отсчеты разности температур по гальванометру фиксировались автоматически. Схема автоматической установки для исследования теплофизических характеристик горных пород, приведена на рис. 2.

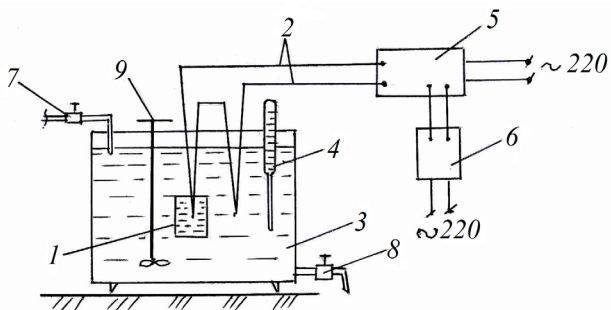


Рис. 2. Схема автоматической установки для определения теплофизических характеристик горных пород:

- 1 – образец горной породы; 2 – термопара;
- 3 – термостат; 4 – термометр; 5 – магнитный усилитель;
- 6 – самопишущий прибор; 7 – впускной кран;
- 8 – выпускной кран; 9 – мешалка

Температура в сушильном шкафу во время анализов была постоянной (100 °С), образцы были весьма плотными, а время их охлаждения непродолжительное (1,5–3 мин), что позволяло считать, что все они испытывались абсолютно сухими (каждый образец выдерживался в сушильном шкафу 1 час). Образцам придавалась форма цилиндра диаметром 40–50 мм или параллелепипеда шириной сторон 40–60 мм и высотой 60–100 мм. По продольной оси образца просверливался

канал диаметром 4 мм, длиной 50 мм, в который помещался спай термопары. Для лучшего контакта спая термопары с образцом в канал вводилась капля ртути.

Техника эксперимента состояла в следующем. В предварительно нагретый в сушильном шкафу образец 1 вставлялась термопара 2 и он помещался в термостат 3, где поддерживалась постоянная температура (20 °С), контролируемая ртутным термометром 4. При этом холодный спай термопары покрывали защитным слоем нитроэмали или помещали в запаянную стеклянную трубочку, в которую наливали ртуть и опускали в воду. Для соблюдения условий $t = \text{const}$ через термостат 3 пропусклась проточная вода из водопровода. Температура проточной воды в термостате изменяется на очень незначительную величину и практически в истечении опыта остаётся постоянной. Дифференциальная термопара через магнитный усилитель 5 была подключена к самозаписывающему гальванометру 6. Для устранения погрешностей, связанных с изменением характеристик переменного тока, применяется стабилизатор напряжения. При подготовке образцов пород обращалось внимание на чистоту обработки поверхностей, однородность структуры, отсутствие трещин. Скорость протяжки ленты самопишущего гальванометра СГ-1 1620 мм/ч и 3240 мм/ч. Во всех опытах запись точек графика охлаждения образца на ленте СГ-1 производилась автоматически через интервал 20 с. Обработка опытных данных состояла в пересчете записанного на ленте гальванометра графика охлаждения образца в координатах $\ln \Delta t = f(\tau)u(\tau_2 - \tau_1)$, а затем по формуле (9) определялся темп охлаждения « m ».

Всего было исследовано 7 образцов, при этом исследования были трехкратными. Три образца представляли метаморфические породы: сланцы кварц-гематит-хлорит-серицитовые, кварциты гематит-мартитовые и руда гематит-мартитовая. Все эти образцы были взяты с этажа 840/1040 м «Эксплуатационная» ЗЖРК. Исследовались также 4 образца закладки примерно одинакового состава, представленного в табл. 1.

Таблица 1

Состав закладки для ЗЖРК

Компоненты	Номер состава			
	1	2	3	4
Расход материала на 1м ³ закладки, кг				
Доменный гранулированный шлак, активность >200 мг, тонкость помола – 55 % частиц 0,074 мм.	500	400	300	200
Положский песок	1350-1400	1450-1500	1550-1600	1650-1700
Цемент М 400	10-15	6-8	4-6	1-2
Вода	400-450	400-450	400-450	400
Прочность закладки в 3-месячном возрасте, кг/см ²	75-85	55-65	30-40	10-20
Основность закладки	0,14	0,11	0,08	0,055

В качестве иллюстрации приводится график охлаждения образца горной породы, построенный по ре-

зультатам экспериментальных данных рис. 3. Так как точность определения коэффициента температуропроводности методом регулярного режима находится в пределах 3–6 %, то результаты исследования можно считать удовлетворительными.

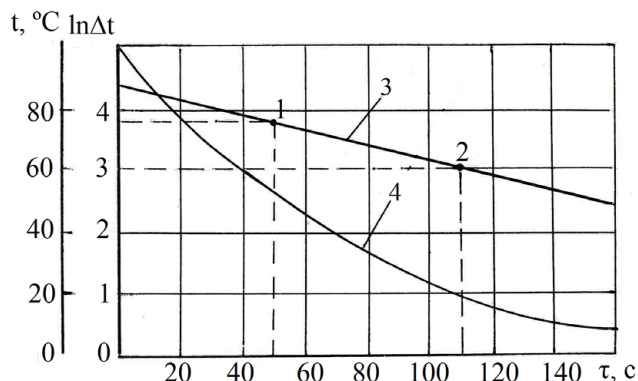


Рис. 3. График охлаждения образца горной породы в термостате: 1, 2 – моменты времени регистрации температур; 3 – функция от времени τ , $f(\tau)$; 4 – изменение температуры образца горной породы в термостате

Определение удельной теплоемкости «С» производилось с помощью прибора Реньо, который имел электрический нагреватель с термометром (второй метод). Исследуемый образец взвешивался на аналитических весах и помещался в водяной нагреватель, где прогревался в кипящей воде 30 мин. Затем прогретый образец быстро помещался в калориметр, температура воды в котором изменялась с точностью до 0,2 °С. Затем фиксировалась максимальная температура, которая соответствовала и температуре образца в этот момент. Перед опытом измерялась масса воды, которая заливалась в калориметр. Температура кипящей дистиллированной воды определялась по таблице температуры кипения воды в зависимости от барометрического давления. При этом учитывался водяной эквивалент калориметра $C_0 \cdot K$, где K – масса калориметра с мешалкой, C_0 – удельная теплоемкость латуни (в нашем случае $K \cdot C_0 = 0,251 \cdot 0,094 = 0,0236$).

Величина удельной теплоемкости испытуемого образца определялась по формуле

$$C = \frac{(M + K \cdot C_0) \cdot (t_n - t_H)}{m_B \cdot (t_K - t_M)}, \quad (10)$$

где M – масса воды в калориметре, кг; t_M – температура воды максимальная, °С; t_H – начальная температура воды, °С; t_K – температура воды при кипении, °С; m_B – масса образца, кг.

С учетом поправок на фактическое время действия нагревателя теплопроводность λ , температуропроводность α и удельная теплоемкость C рассчитываются по формулам:

$$\lambda = \frac{x^2}{2\Delta t_m} \left[1 + 0,5 \frac{\Delta t_0}{\Delta t_m} + 0,37 \left(\frac{\Delta t_0}{\Delta t_m} \right)^2 \right], \text{ Вт/м}\cdot\text{К}, \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{x^2}{2\Delta t_m} \left[1 + 0,5 \frac{\Delta t_0}{\Delta t_m} + 0,42 \left(\frac{\Delta t_0}{\Delta t_m} \right)^2 \right], \text{ м}^2/\text{с}. \quad (12)$$

$$C = \frac{\lambda}{\alpha \rho}, \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}, \quad (13)$$

где λ – теплопроводность, Вт/мК; α – температуропроводность, м²/с; C – теплоемкость, кДж/кгК; ρ – плотность тела, кг/м³; x – расстояние от нагревателя до контрольной термопары, м; Δt_m – максимальное время повышения температуры окружающей среды, К; Δt_0 – время работы нагревателя, с.

Результаты исследований теплофизических свойств пород сведены в табл. 2.

Таблица 2
Теплофизические свойства горных пород и закладочных материалов

№ п/п	Наименование пород	Метод определения	Коэффициент крепости, f	λ , Вт/м·К	C, кДж/кгК	$a \cdot 10^{-7}$ м ² /с
1	2	3	4	5	6	7
1	Сланцы кварц-гематит-хлорит-серпичитовые	1	7-9	2,10	0,20	3,20
		2	7-9	2,00	0,31	3,80
2	Кварциты гематит-мартиновые	1	14-15	5,23	0,22	6,40
		2	14-15	4,95	0,35	8,00
3	Руда гематитмартиновая	1	—	3,10	0,92	9,80
		2	—	3,50	0,77	12,00
Данные исследований Сахновского В. Л.						
1	Образец 1	1	—	0,99	0,99	4,4
2	Образец 2		—	1,01	0,92	4,1
3	Образец 3		—	1,3	1,0	5,9
4	Образец 4		—	0,9	1,3	3,8
Образцы закладки с добавлением 30 % пустых пород						
1	Образец 1	1	—	1,80	0,78	9,80
		2	—	1,90	0,80	10,00
2	Образец 2	1	—	1,84	0,76	10,10
		2	—	1,90	0,78	11,0
3	Образец 3	1	—	1,78	0,80	10,10
		2	—	1,80	0,82	9,00
4	Образец 4	1	—	1,82	0,79	10,40
		2	—	1,83	0,81	10,45

Для сравнения приводим данные определения теплофизических свойств закладочных материалов, полученных в ходе исследований, проведенных Сахновским В. Л. Результаты определения теплофизических свойств показывают, что добавление в состав закладочной смеси горных пород в объеме 30 % существенно изменяет теплофизические свойства образцов закладочных материалов. Так, теплопроводность, λ увеличилась в среднем в 1,7 раза, температуропроводность α в среднем увеличилась в 2,2 раза, а теплоемкость C уменьшилась в 1,3 раза. При замене в составе закладки кварцевого песка, коэффициент теплопроводности которого $\lambda = 0,814$ Вт/м·К, на пустую породу, фракцией до 40 мм из кварцита, имеющего коэффициент теплопро-

водности $\lambda = 5,2$ Вт/м·К, приводит к увеличению теплопроводности закладки в пределах $\lambda = 1,8 - 1,9$ Вт/м·К и снижению теплоемкости с 1,05 до 0,79 кДж/кг·К, что обуславливает более быструю передачу тепла в окружающие породы и приводит к снижению температуры закладки.

Второй задачей предусматривалось определение температуры горных пород, примыкающих к заложённым камерам. С этой целью производились промышленные исследования на ш. «Эксплуатационная» ЗЖРК.

Измерение температуры в массиве производились с помощью электротермометра ТЭТ-2, который позволял снимать показания в глубоких скважинах, пробуренных из горных выработок (рис. 4). Суть методики измерения температуры горной породы заключалась в том, что с помощью стыкуемых в штангу 4, звеньев эбонитовой трубки диаметром 10–20 мм в скважину 6, посылается на всю длину (20 м) датчик температуры 1. При этом датчик 1 и штангу 4 предварительно закрепляют на поверхность резиновой камеры 3, имеющей приклеенные к ней специальные удерживающие резиновые полоски-жимки 2. После этого насосом 9 в камеру 3 нагнетают воздух, который поступает туда через резиновую трубку 5.

Камера 3 раздувается, заполняя все сечение скважины 6, и прижимает датчик 1 к её стенке, обеспечивая надёжный тепловой контакт. Степень прижатия датчика контролируют манометром 7 и фиксируют запорным вентилем 8.

После снятия показаний на измерительном приборе 10 из камеры 3 частично выпускают воздух и перемещают датчик 1 в новую точку по направлению к устью скважины 6.

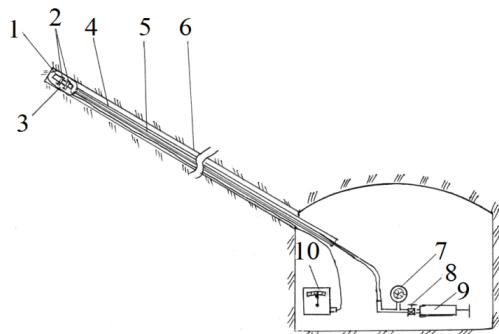


Рис. 4. Схема измерения температуры в скважинах:
1— датчик температуры; 2 — резиновые жимки; 3 — камера резиновая; 4 — штанга; 5 — резиновая трубка;
6 — скважина; 7 — манометр; 8 — запорный вентиль;
9 — ручной насос; 10 — прибор ТЭТ-2

Затем вновь подкачивают в камеру 3 воздух, контролируя давление манометром 7. Отсчет показаний электротермометра ТЭТ-2 производят не ранее чем через 5 мин после подкачивания камеры. Количество точек измерения температуры в скважине принимали в зависимости от ее длины и температурного градиента по длине.

Для производственных наблюдений был принят блок в этаже 840–815 м на шахте «Эксплуатационная» ЗЖРК. Этот блок имел следующие размеры: длина

по простиранию $x=60$ м; ширину вкрест простирания y , равную мощности рудной залежи колеблющейся в пределах 110–120 м³; высота z равна высоте этажа $h = 80$ м.

Вся руда из блока вынималась четырьмя очистными камерами, которые обрабатывались в следующей последовательности: 1/3 «с», 1/5 «с», 2/7 «ю», 2/9 «ю», где «с», «ю» обозначают расположение камер на север и юг соответственно. При этом к отбойке руды в последующей камере приступали примерно через 3 месяца после полной закладки выработанного пространства в последующей камере. Высота камер равна 120–135 м. В плане камеры ориентируются длинной стороной вкрест простирания залежи, которая по мощности в пределах блока обрабатывается двумя рядами камер.

Сверху и снизу блок граничит с неразрабатываемым массивом руды. Отбойку руды в камере вели вертикальными слоями на отрезную щель. Для этого из подэтажных буровых ортов примерно через каждые 3 м выбуривали параллельные веера скважин, диаметром 105 мм. Измерение температуры руды проводили в скважинах, пробуренных для отбойки руды в камере. Всего было исследовано 294 точки в 29 скважинах. При этом измерения проводили в 3 этапа в течение 2007–2009 гг. Результаты измерений в наиболее характерных точках приведены в табл. 3.

Анализ результатов измерений показал, что температура руды, примыкающей к твердеющей закладке, значительно повышается по сравнению с естественной температурой на исследуемых глубинах. Количество повышения температуры руды в значительной степени зависит от расстояния исследуемой точки до закладки, её возраста, величины площади контакта с ней, а так же от степени охлаждения массива вентиляционными потоками воздуха.

Как известно, если закладкой заполнить пустую камеру, то температура в процессе твердения закладки повышается и достигает максимума около 50 °С, в возрасте 3–6 месяцев [15]. Затем в течении 1,5 года температура понижается до уровня естественной.

Таблица 3

Результаты термометрии в скважинах камеры 1/3 «с»

Номера замеренных точек	Дата замера	Координаты замеренных точек, м			Температура, С	
		x	y	z	естественная	измеренная
1	25.11.07	43,0	39,0	80,0	24,7	22,3
2		37,4	39,0	74,5	24,8	22,8
3		20,2	49,0	68,7	29,9	25,8
4		20,6	67,0	69,5	24,9	25,0
5		19,3	67,0	68,0	24,9	30,1
6		25,3	67,0	74,7	24,9	27,1
7		26,5	67,0	64,0	25,0	25,4
8		20,2	70,0	70,2	24,9	30,4
9		25,3	70,0	63,8	25,0	31,4
10		30,0	70,0	62,0	25,0	31,4
11		16,0	67,0	66,0	24,9	30,2
12		16,7	70,0	66,7	24,3	30,4
13	8.01.08	17,4	13,0	32,4	25,5	25,4
14		19,5	55,0	25,5	25,6	26,3
15		30,0	60,0	26,0	25,6	23,0

Из табл. 3 видно, что температура руды разбуриваемого массива меняется во времени в довольно значительном интервале. Это в свою очередь отражается на температуре рудничного воздуха на рабочих местах машинистов буровых станков. Такое повышение температуры руды в забоях при проходке буровых выработок может увеличиваться на 5–10 °С.

Термометрию, согласно поставленной третьей задаче, предусматривающей определение температуры на поверхности закладки, проводили в камерах 1/3 «с» и 1/5 «с», а так же 2/7 «ю» и 2/9 «ю», расположенных в этаже 840–815 м. Расчетные параметры камер приведены в табл. 4.

Таблица 4

Индекс камеры	Сроки закладки	Расчетные параметры		
		Высота, м	Ширина, м	Средняя длина, м
1/3 «с»	1,2 квартал	110	31	53
1/5 «с»	4 квартал	110	39,7	43,5
2/9 «ю»	4 квартал	135	36	36
2/7 «ю»	1,2 квартал	110	30,4	36,2

Заполнение камер 1/3с и 2/7 «ю» производилось в 1 и 2 кварталах 2008 г., а камер 1/5 «с» и 2/9 «ю» в 4 квартале 2008 г. наблюдение за температурой производилось в течении 2008–2009 гг. Результаты термометрии в скважинах камеры 1/5 «с» приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты термометрии в скважинах камеры 1/5 «с»

№ п/п замерных станций	1	2	3	4	5	6	7	8	
Координаты, м	x	29	27	26	23	23	22	20	18
	y	70	70	70	70	70	70	70	70
	z	79	78	76	74	73	72	70	69
Даты замеров	Температура горных пород, примыкающих к закладке °С								
	25.09.2008	26	-	-	-	-	-	-	-
	09.10.2008	25	27	28	29	29	30	30	30
	10.12.2008	27	28	28	30	30	30	30	30
Естественная температура горных пород, °С	25	25	25	25	25	25	25	25	

Результаты исследований проводимые на ЗЖРК показали, что эта температура может достигать 30 °С и описывается зависимостью

$$Q_3 = \frac{t_{3max} - t_n}{t_{3(\tau)} - t_n}, \tag{14}$$

где $t_{3(\tau)}$ – температура закладки на определеннй момент времени; t_{3max} – максимальная температура закладки; t_n – естественная температура закладки.

Вследующие 2–3 месяца температура в камере повышается до своего максимума, а потом в течении 2–3 месяцев она остается неизменяемой и в дальнейшем происходит остывание массива твердеющей закладки, которое может длиться 1,5–2 месяца. Результаты этих

исследований приведены на рис. 5. В связи с тем, что максимальная температура закладки для различных условий может принимать разные значения, то её величина заменена безразмерной t_3 .

Формула (14) дает возможность определить температуру закладки на любой момент времени:

$$t_{3(\tau)} = t_n + Q_3(t_{3max} - t_n). \tag{15}$$

Для разработки рекомендаций по снижению влияния твердеющей закладки на микроклимат глубоких шахт, в соответствии с четвертой задачей, было установлено, что температура твердеющей закладки зависит от её состава.

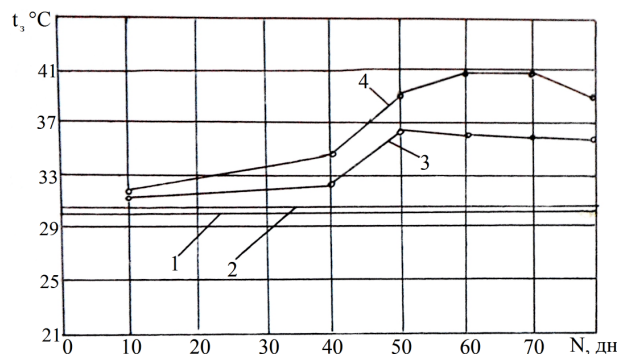


Рис. 5. Динамика температуры твердеющей закладки отработанной камеры 1/5 «с»: 1 — естественная температура горных пород на глубине 927 м; 2 — температура рудничного воздуха, поступающего в камеру; 3 — температура рудничного воздуха в камере; 4 — температура твердеющей закладки в камере с течением времени

На рис. 6 приведены расчетные значения безразмерных температур t_3 , которые достигают максимума на 3–5 месяца после заполнения и согласуются с фактическими данными, приведенными на рис. 5.

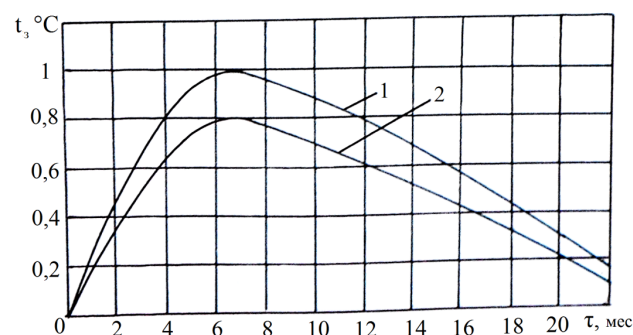


Рис. 6. Изменение безразмерной температуры от времени гидратации: 1 — без добавления горных пород в состав закладки; 2 — с добавлением горных пород

Важным фактором, влияющим на величину температуры твердеющей закладки, является состав её материалов. Исходя из результатов определения теплофизических свойств горных пород (табл. 2), которые свидетельствуют, что с заменой Положского песка горными породами наблюдается снижение термических параметров закладки. Исходя из этого, нами

совместно с сотрудниками лаборатории научно-исследовательского горнорудного института (НИГРИ, Кривой Рог, Украина) и руководством Запорожского железорудного комбината (ЗЖРК, Украина), рекомендованы составы закладочных материалов, в которых присутствуют молотый шлак, доломит и измельченные горные породы.

Рекомендованные составы значительно снижают влияние закладки при ее гидратации на температурный режим зоны горных работ, что подтверждается результатами исследований, приведенных на рис. 7.

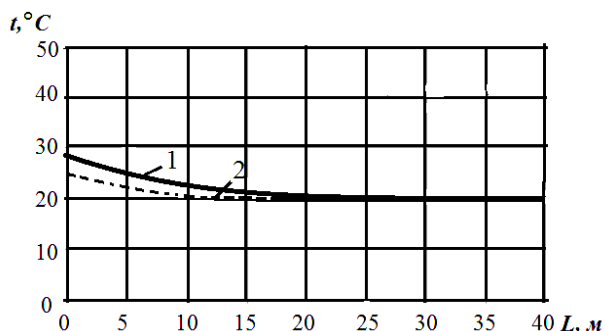


Рис. 7. Изменение температуры горных пород, примыкающих к массивам твердеющей закладки при температуре окружающей среды 20 °С:
1 – без добавления горных пород;
2 – с добавлением горных пород

Из рис. 7 следует, что использование горных пород в качестве альтернативного компонента закладки позволяет уменьшить количество тепла, выделяемого при её гидратации. При этом зона влияния теплоты гидратации на окружающий массив горных пород не превышает 10 м.

6. Апробация результатов исследований

Полученные результаты исследований теплофизических свойств горных пород и закладочных материалов, а также влияния твердеющей закладки на микроклимат глубоких шахт были внедрены в «Проекты вентиляции шахты «Эксплуатационная» ЗАО ЗЖРК при поэтапном включении в эксплуатацию рудных площадей Переверзевского месторождения на годовую производительность до 2,5 млн тонн руды». А также при разработке «Проекта вентиляционной системы шахты «Эксплуатационная» ЗАО ЗЖРК для обеспечения проветривания рабочих мест на этаже 840–1040 м Южно-Белозерского месторождения на максимальную производительность 4 млн тонн/год». Разработанные проекты внедряются в производство.

7. Выводы

1. В результате исследования образцов горных пород и образцов закладки с добавками горных пород, определены их коэффициент теплопроводности, удельная теплоёмкость и коэффициент температуропроводности.
2. В результате проведенных исследований установлено, что влияние теплоты гидратации закладки на окружающий массив пород не превышает 10 м.
3. Снижение термических параметров закладки достигается изменением ее состава путем добавления измельченных горных пород массовой долей 30–40 % на 1 м³ закладочной смеси.
4. Внедрение результатов исследований в проекты вентиляции шахты «Эксплуатационная» ЗАО ЗЖРК позволяют обеспечить необходимые санитарно-гигиенические условия на рабочих местах глубоких горизонтов шахты и значительно снизить эксплуатационные затраты на производство закладочных работ.

Литература

1. Ступнік, М. І. Комбіновані способи подальшої розробки залізорудних родовищ Криворізького басейну [Текст] / М. І. Ступнік, С. В. Письменний // Вісник Криворізького національного університету. – 2012. – Вип. 95 (1) – С. 3–7.
2. Сморгочков, Ю. П. Обеспечение комфортных условий труда в туниковых выработках при буровзрывном способе проходки. [Текст] / Ю. П. Сморгочков, Г. О. Петрунин // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 7. – С. 31–34.
3. Алексеенко, С. А. Альтернативный энергосберегающий способ и подземная система кондиционирования рудничного воздуха для глубоких угольных шахт [Текст] / С. А. Алексеенко, И. А. Шайхлисламова // Холодильная техника и технология. – 2005. – Вып. 5. – С. 15 – 19.
4. Казаков, Б. П. Влияние закладочных работ на формирование теплового режима в горных выработках в условиях рудников ОАО «Норильский никель» [Текст] / Б. П. Казаков, А. В. Шалимов, А. В. Зайцев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2012. – № 2. – С. 110–114.
5. Лапшин, А. А. Проблема теплового режима глубоких железорудных шахт и создание эффективных способов его нормализации [Текст] / А. А. Лапшин, А. Е. Лапшин, И. Б. Ошмянский // Форум горняков – Днепропетровск : НГУ, 2008. – С. 98 –105.
6. Кузин, В. А. Руководство по выбору горнотехнических способов нормализации климатических условий на выемочных участках глубоких шахт [Текст] / В. А. Кузин, В. Р. Алабьев, С. А. Песок, А. С. Розенберг. – Донецк: Макеевка-Донбасс, 1995. – 44 с.
7. Лапшин, А. А. Настанова з проектування вентиляції рудних шахт [Текст] / А. А. Лапшин, І. Б. Ошмянський, О. С. Лапшин та ін. – Кривий Ріг: КНУ, 2011. – 111 с.
8. Kortnik, J. Backfilling waste material composites environmental impact assessment [Text] / J. Kortnik // South African Institute of Mining and Metallurgy. – 2003. – P. 519–524.
9. Krupnik, L. A. Backfilling technology in Kazakhstan mines [Text] / L. A. Krupnik, Y. N. Shaposhnik, S. N. Shaposhnik, A. K. Tur-sunbaeva // Journal of Mining Science. – 2013. – P. 82–89.

10. Ward, C. R. The use of coal combustion products in mine backfill applications [Text] / C. R. Ward, D. French, J. Jankowski // Co-operative Research Centre for Coal in Sustainable Development. – 2007. – P. 341–371.
11. Ляшенко, В. И. Совершенствование технологии закладочных работ при подземной разработке урановых месторождений. [Текст] / В. И. Ляшенко, Н. И. Дядечкин // Известия вузов. Горный журнал. – 2011. – № 2. – С. 9–17.
12. Ghoreishi-Madiseh, S. A. Numerical modeling of thawing in frozen rocks of underground mines caused by backfilling [Text] / S. A. Ghoreishi-Madiseh, F. Hassani, F. Abbasy, A. Mohammadian // International journal of rock mechanics and mining sciences. – 2011. – P. 1068–1076.
13. Галкин, А. Ф. Регулирование теплового режима при проходке выработок в мерзлых породах [Текст] / А. Ф. Галкин // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 7. – С. 17–21.
14. Андреев, М. Н. Разработка состава закладочного материала и испытания его прочностных свойств. [Текст] / М. Н. Андреев, Э. И. Богуславский // Записки горного института. – 2011. – Т. 189. – С. 130–133.
15. Zhang, H. B. Study of the mechanism of backfill and surrounding rock of open stope during subsequent backfill mining [Text] / H. B. Zhang, Y. J. Chen // Advanced material research. – 2013. – P. 452–456.

В даній статті на основі аналізу існуючих методик оцінки пофракційної ефективності уловлювання твердих частинок в циклонних апаратах була розвинута фізична модель та вирішена задача математичного моделювання процесу очистки неоднорідних газових систем в циклонному пиловловлювачі. Проведені експериментальні дослідження циклонного пиловловлювача та перевірена адекватність розробленої математичної моделі

Ключові слова: циклонний пиловловлювач, жалюзійний елемент, пиловловлювання, аеродинамічний опір, фракційна ефективність

В данной статье на основе анализа существующих методик оценки пофракционной эффективности улавливания твердых частиц в циклонных аппаратах была развита физическая модель и решена задача математического моделирования процесса очистки неоднородных газовых систем в циклонном пылеуловителе. Проведены экспериментальные исследования циклонного пылеуловителя и проверена адекватность разработанной математической модели

Ключевые слова: циклонный пылеуловитель, жалюзийный элемент, пылеулавливание, аэродинамическое сопротивление, фракционная эффективность

УДК 621.928.93

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗАПИЛЕНИХ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ В ЦИКЛОННОМУ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІ

Д. О. Серебрянський

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України
вул. Желябова, 2а, м. Київ, Україна, 03680
e-mail: fordima@ukr.net

С. В. Плашихін
Асистент*

E-mail: plashihin@rambler.ru

Ю. О. Безносик

Кандидат технічних наук, доцент*
E-mail: yu_beznosyk@ukr.net

О. М. Набок *

*Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: alex2shae@mail.ru

1. Вступ

Інтенсивний розвиток різних галузей промисловості в двадцять першому столітті призвів до значного погіршення екологічної обстановки. Одним з основ-

них джерел забруднення атмосфери є пилові викиди цементної, коксохімічної, металургійної, паперової та іншої промисловості. Також значна кількість пилу виділяється при роботі котельень, що працюють на вугіллі та машинобудівному виробництві.