

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕСТАЦИОНАРНОГО
ТЕПЛООБМЕНА В ВЫРАБОТАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ
ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ**

д.т.н. Кузин В.А. (ДонГУУ)

Наведені результати досліджень з обґрунтування математичних моделей та розрахункові формули для коефіцієнтів нестационарного теплообміну у виробленому просторі лав при різних способах управління покрівлею.

**THE STUDYING OF PROCESSES OF NON-STATIONARY HEAT
EXCHANGE IN THE PRODUCED SPACE OF THE DEVELOPED PLOTS**

Kuzin V.A.

Result of researches on a substantiation of mathematical models and settlement formulas for factors of non-stationary heat exchange in the produced space of mine of managing lavas are resulted at various methods by a roof.

Результаты тепловых съемок, проведенных на шахтах Донбасса, говорят о возрастающем с глубиной влиянии теплопритоков из горного массива в тепловом балансе выработок. При этом тепловой баланс воздухоподающих выработок достаточно изучен, методы их теплового расчета широко апробированы и дают хорошие результаты [1–3]. Однако в лавах и участковых выработках с исходящей вентиляционной струей наблюдаются значительные отклонения замеренных и расчетных значений температуры воздуха [3, 4]. Это обусловлено теплопритоками из выработанного пространства (ВП) лав, которые зависят от технологии ведения очистных работ на выемочных участках, залегания разрабатываемых пластов, недостаточной изученности процессов теплообмена между породами ВП и утечками воздуха. Только в лавах с различной технологией выемки и управлением кровлей отклонения замеренных и расчетных температур может составлять 1,5–5,0°C. С увеличением глубины разработки влияние теплопритоков воздуха из ВП возрастает [5–7]. В связи с этим в последние 15–20 лет XX столетия в МакНИИ были выполнены широкие исследования теплообменных процессов в ВП лав и участковых выработках с исходящей струей воздуха [4,6,7].

Совершенствование основного в горной теплофизике метода расчета тепловыделений из горного массива, базирующегося на методе коэффициента нестационарного теплообмена [1–4], должно осуществляться на более реалистических математических моделях нестационарного теплообмена в ВП. В этих моделях должны учитываться анизотропия горных пород, неоднородность начального температурного поля в массиве, наличие источников (стоков) тепла, изменение вдоль выработки и по сечению коэффициентов теплообмена, отличие реальной формы выработок от паспортной и др. Рассмотрим эти модели при управлении кровлей в лавах полным обрушением и плавным спусканием [6,7].

1. Нестационарный теплообмен при управлении кровлей полным обрушением.

Постановка задачи. При полном обрушении кровли образуется система фильтрационных каналов с развитой поверхностью. Выработанное пространство может быть представлено в виде пористой сферы с системой каналов, ориентированных по направлению движения фильтрующегося потока [8].

Скорость фильтрации утечек воздуха в каждом сечении ВП является величиной переменной – максимальной на границе с лавой и уменьшающейся в направлении вглубь ВП, где она приближается к нулю при $l = L_{пр}$, где $L_{пр}$ – ширина зоны утечек воздуха, м

$$v'_{\phi} = \frac{dG}{\rho p z d\ell},$$

где dG – расход воздуха, протекающего в данный момент через объем выработанного пространства, кг/с; ρ – плотность воздуха кг/м³; p – пористость выработанного пространства; z – высота зоны обрушения пород кровли, м.

Нагрев утечек воздуха определяется разностью между температурой обрушенных пород и утечками, размерами породных кусков, теплофизическими характеристиками пород, скоростью подвигания очистного забоя, длиной пути и скоростью фильтрации утечек. Закономерность распределения воздуха в зоне утечек нелинейная и зависит от физико-механических свойств обрушаемых пород, способа охраны выработок на выемочном участке [9].

Определение коэффициента нестационарного теплообмена. В результате моделирования процесса нестационарного теплообмена при фильтрации теплоносителя через слой неподвижной руды получено критериальное уравнение в пределах чисел Рейнольдса (Re) от 250 до 1400 и Фурье (F_0) от 0,7 до 10 [10]

$$Ku_{\tau} = 4,3 \cdot 10^{-4} Re^{0,8} F_0^{-0,44}, \quad (1)$$

где

$$Ku_{\tau} = \frac{K_{\tau n} \cdot d_{\phi}}{\lambda_n}; \quad (2)$$

$$Re = \frac{V_{\phi} d_{cp}}{\nu}; \quad F_0 = \frac{a_n \cdot \tau}{d_{\phi}^2}, \quad (3)$$

Ku_{τ} – критерий нестационарного теплообмена; $K_{\tau n}$ – коэффициент нестационарного теплообмена дисперсного слоя с фильтратом; Вт/(м²·К); d_{ϕ} – эквивалентный диаметр канала в слое, м; $d_{\phi} \approx 0,35 d_{cp}^{1,15}$; d_{cp} – средний размер кусков породы, м; a_n – коэффициент температуропроводности кусков породы, м²/с; λ_n – коэффициент теплопроводности кусков породы, Вт/(м·К); τ – время проветривания, с; V_{ϕ} – скорость фильтрации воздуха через дисперсный слой, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с.

Для шахт Донбасса в возможном диапазоне изменения расчетных показателей $a = 7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\tau = 6-800 \text{ ч}$; $d = 0,1-0,5 \text{ м}$ и $V_{\phi} = 0,12-0,03 \text{ м/с}$, критерии F_0 и Re принимают значения в диапазонах соответственно $0,7-90$ и $300-1200$, т. е. эти условия удовлетворительно описываются зависимостью (1). При подстановке в нее формул (2) и (3) выражение для коэффициента нестационарного теплообмена обрушенных пород выработанного пространства, проветриваемых в течение времени τ , воздухом со скоростью V_{ϕ} , примет вид [7]:

$$K_{\tau} = 2,1 \cdot 10^{-4} \frac{d_{\phi}^{0,8} \lambda V_{\phi}^{0,8}}{\nu^{0,8} a^{0,44} \tau^{0,44}}. \quad (4)$$

Исходя из геометрии фильтрационного движения воздуха через обрушенные породы, известные схемы проветривания выемочных участков можно свести в три группы: возвратноточная на выработанное пространство, возвратноточная на массив угля и прямоточные схемы проветривания [5,6].

С учетом закономерностей воздухораспределения в выработанном пространстве [9] получены зависимости для определения коэффициента нестационарного теплообмена обрушенных пород с фильтрующимся воздухом. Для элементарной струи воздуха, притекающего в вентиляционный штрек на расстоянии l от лавы, формулы для коэффициента $K_{\tau 1}$ в зависимости от схемы проветривания участка имеют следующий вид [5,7]:

– возвратноточная на выработанное пространство схема проветривания

$$K_{\tau 1} = 2,1 \cdot 10^{-4} \frac{G_{\text{ym}}^{0,8} [1 - \exp(-\delta l)]^{0,8} d^{0,78} \lambda}{\rho^{0,8} m^{0,8} l^{0,8} \left(\tau_{\text{ГР}} + \frac{86400 l}{V_{\text{Л}}} \right)^{0,44} \nu^{0,8} a^{0,44}}; \quad (5)$$

– прямоточные на выработанное пространство схема проветривания

$$K_{\tau 1} = 2,1 \cdot 10^{-4} \frac{G_{\text{ym}}^{0,8} d^{0,78} \lambda \exp(-0,8 \delta l)^{0,8}}{\nu^{0,8} a^{0,44} \rho^{0,8} m^{0,8} l^{0,8}} \int_0^1 \frac{[\exp(\delta \xi) - 1]^{0,8} \cdot d \xi}{\xi^{0,8} \left(\tau_{\text{ГР}} + \frac{86400 \xi}{V'_{\text{Л}}} \right)^{0,44}}; \quad (6)$$

– возвратноточная на массив угля схема проветривания

$$K_{\tau 1} = 0,43 \cdot 10^{-8} \frac{G_{\text{ym}}^{0,8} V_{\text{Л}}^{0,44} d^{0,78} \lambda [1 - \exp(-\delta l)]^{0,8}}{\nu^{0,8} a^{0,44} \rho^{0,8} m^{0,8} l^{1,8}} \left[\left(\frac{86400 l}{V_{\text{Л}}} + \tau_{\text{ГР}} \right)^{0,56} - \tau_{\text{ГР}}^{0,56} \right], \quad (7)$$

где G_{ym} – величина утечек воздуха через выработанное пространство, кг/с; d – средний диаметр обрушенных кусков породы, м; δ – коэффициент, учитывающий воздухораспределение по длине штрека, м^{-1} ; для условий Донбасса $\delta = 0,04-0,05 \text{ м}^{-1}$; m – мощность пласта, м; $V_{\text{Л}}$ – скорость движения лавы, м/с;

$\tau_{гр}$ – время, учитывающее неодновременность выемки угля по длине лавы, с;
 ξ – переменная интегрирования.

При определении температуры утечек воздуха из выработанного пространства для упрощения расчета целесообразно использовать среднеинтегральное по длине зоны утечек значение коэффициента нестационарного теплообмена:

$$K_{\tau} = \frac{\int_0^{L_n} K_{\tau_1} \cdot dl}{\int_0^{L_n} dl}, \quad (8)$$

где L_n – длина участка вентиляционной выработки, на котором наблюдаются приточки воздуха из выработанного пространства, м.

Подставляя зависимость (5) в формулу (8) после ее интегрирования с использованием численных методов анализа получено выражение для расчета среднеинтегрального коэффициента нестационарного теплообмена обрушенных пород с фильтрующимся воздухом для возвратноточной на выработанное пространство схемы проветривания

$$K_{\tau_{вм}} = 0,79 \cdot 10^{-6} \frac{G_{\text{ym}}^{0,8} \delta^{1,24} V_{\text{л}}^{0,44} d^{0,78} \lambda}{\rho^{0,8} m^{0,8} \nu^{0,8} a^{0,44}}; \quad (9)$$

Более сложно протекают процессы теплообмена при прямоточных схемах проветривания выемочных участков. В этих случаях скорость фильтрации воздуха через обрушенные породы (V_{ϕ}) и время проветривания обрушенных пород по длине пути фильтрации (τ_{ϕ}) являются переменными. С учетом геометрии фильтрации утечек и закономерностей воздухораспределения в выработанном пространстве [9]:

$$G_{\phi} = G_{\text{уч}} - G_n \exp(-\delta l); \quad (10)$$

где $G_{\text{уч}}$ – расход воздуха на выемочном участке, кг/с; G_n – количество воздуха, поступающего из ВП на вентиляционный штрек, кг/с; l – удаление линий утечек воздуха в ВП от очистного забоя, м.

Формула (6) для коэффициента нестационарного теплообмена при прямоточной схеме проветривания, в котором интеграл определен численно при $\tau_{гр} = 0$, $0 \leq \delta l \leq 5$ и средних значениях теплофизических характеристик пород и воздуха, примет вид:

$$K_{\tau_{1nm}} = \begin{cases} 0,03 \cdot 10^{-4} \frac{G_{\text{ym}}^{0,8} d^{0,78} \lambda V_{\text{л}}^{0,44} \exp(-0,8\delta l) \delta^{0,83}}{\nu^{0,8} a^{0,44} \rho^{0,8} m^{0,8} l^{0,41}}, & 0 \leq \delta l \leq 1 \\ 0,02 \cdot 10^{-4} \frac{G_{\text{ym}}^{0,8} d^{0,78} \lambda V_{\text{л}}^{0,44} \exp(-0,29\delta l) \delta^{-0,24}}{\nu^{0,8} a^{0,44} \rho^{0,8} m^{0,21}}, & 1 \leq \delta l \leq 5 \end{cases} \quad (11)$$

При возвратноточной на массив схеме проветривания выемочного участка, для упрощения расчетной зависимости коэффициента нестационарного теплообмена использован метод теплового баланса для всего объема проветриваемой зоны выработанного пространства [4, 11]. Принято, что коэффициент K_{τ} является постоянной величиной во всем объеме проветриваемой зоны выработанного пространства. На основании расчетного анализа для реальных шахтных условий при $\tau_{гр} = 0$ и ряда преобразований формула (7) для всей зоны утечек может быть представлена в виде:

$$K_{\tau_{вм}} = 2,91 \cdot 10^{-6} \frac{G_{ум}^{0,8} V_{л}^{0,44} d^{0,78} \lambda \delta^{1,24}}{v^{0,8} \rho^{0,8} m^{0,8} a^{0,44}}. \quad (12)$$

2. Нестационарный теплообмен между породами выработанного пространства и утечками воздуха при плавном опускании кровли (удержании на кострах).

Формулировка математической модели. Расчетная схема теплообмена при перечисленных способах управления кровлей в лавах приведена на рис. 1. В модели приняты следующие конкретизирующие допущения относительно геометрии, скорости движения утечек воздуха и структуры теплообмена в выработанном пространстве.

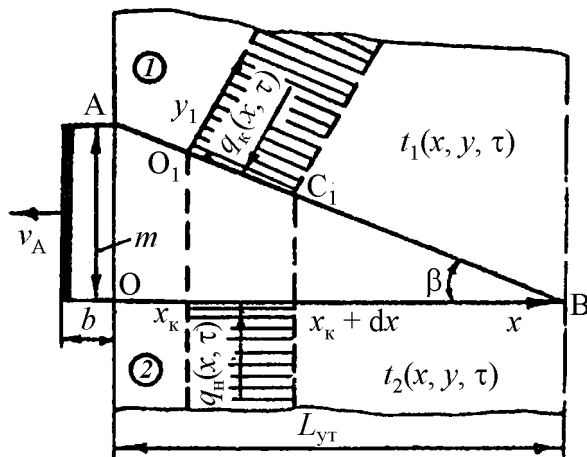


Рис. 1. Расчетная схема теплообмена между породами выработанного пространства и утечками воздуха при управления кровлей плавным опусканием

ВП имеет форму треугольника и движется со средней скоростью $V_{л} = \text{const}$; области 1 и 2 теплофизически однородны и имеют постоянные различные эффективные значения параметров $\lambda_i = \text{const}$; $a_i = \text{const}$; $i = 1, 2$; $\lambda_1 \neq \lambda_2$; $a_1 \neq a_2$.

Температура пород (t_n) в областях 1 и 2 определяется геотермией шахтного поля и глубиной работ H [2]:

$$t_1 \Big|_{\tau=0} = t_2 \Big|_{\tau=0} = t_n(H),$$

где $H = (H_1 + H_2)/2$; H_1, H_2 – глубина от поверхности верхней и нижней отметки лавы, м.

Средняя скорость движения утечек воздуха изменяется линейно от $V_{ym} = V_0$ при $x = 0$ до $V_{ym} = 0$ при $x = L_{ym}$ ($L_{ym} = L_{OB}$ – ширина зоны утечек); V_0 – средняя скорость движения воздуха в призабойном пространстве лавы. Поскольку характерная для Донбасса мощность пласта $m \approx 1$ м, а $L_{ym} \approx 20$ м, имеем, что $\sin\beta = m/AB = \operatorname{tg}\beta \approx 5 \cdot 10^{-2} \ll 1$, $\cos\beta = 1$ и $AO \approx OB = L_{ym}$. Таким образом, площади поверхностей теплообмена почвы и кровли с утечками являются одинаковыми.

Температурные поля в кровле $t_1(x, y_1, \tau)$ и в почве $t_2(x, y_2, \tau)$ и их тепловые потоки $g_k(x, \tau)$ и $q_n(x, \tau)$ к воздуху в утечках описываются одинаковыми функциями, отличающимися лишь теплофизическими параметрами пород кровли и почвы.

Для градиентов температуры вдоль лавы имеем

$$\frac{dt_i}{dx} \sim \frac{t_n(H) - t_b}{0,5m}; \quad \frac{dt_i}{dz} \sim \frac{t_n(H_1) - t_n(H_2)}{L_L},$$

где t_b – температура воздуха; H_1, H_2, H – соответственно минимальная, максимальная и средняя глубина работ на участке; L_L – длина лавы ($L_L = 120\text{--}250$ м).

Таким образом, $\frac{dt_i}{dx} \ll \frac{dt_i}{dz}$, $i = 1, 2$, т. е. теплоперенос в почве и кровле принимаем одномерным.

В начальный момент времени $\tau = 0$ и элемент сечения dx на рисунке совпадает с OA и при движении лавы влево при $\tau = L_{ym}/V_L = \tau_k$ занимает положение $x = x_k$. При $\tau > \tau_k$ выделенный на рисунке элемент выходит из зоны контакта с воздухом.

Характер движения утечек воздуха через ВП турбулентный, кроме области, примыкающей к точке В. Для определения коэффициента теплообмена $\alpha_{ВП} = \alpha_{ВП}(x)$ воспользуемся аналогией Рейнольдса, которая устанавливает линейную зависимость между этим коэффициентом, скоростью движения воздуха и коэффициентом аэродинамического сопротивления [12]. Поскольку $\alpha_{ВП} \sim V_{ym}(x)$, то можно записать, что $\alpha_{ВП}$ изменяется линейно от $\alpha_{ВП}(0) = \alpha_0$ до $\alpha_{ВП}(L_{ym}) = 0$. Максимальное значение $\alpha_{ВП}$ можно считать равным коэффициенту теплообмена в лаве α_L , который определяется известными методами [2,3].

Таким образом, задача сводится к определению температурного поля в выделенном сечении (см. рис. 1) при коэффициенте теплообмена $\alpha_{ВП}(\tau)$, изменяющимся во времени.

Изложенное позволяет дать следующую математическую формулировку задачи теплообмена между породами выработанного пространства и утечками воздуха:

$$\frac{dt_i}{d\tau} = a_i \frac{d^2 t_i}{dy_i^2}, \quad \tau \in (0, \tau_L), \quad y_i \in (0, \infty), \quad i = 1, 2; \quad (13)$$

$$t_i = t_i(y_i, \tau), \quad t_i = t_i(y_i, 0) = t_n(H) = \text{const}, \quad y_i \in (0, \infty), \quad (14)$$

$$q_i = \lambda_i \left. \frac{dt_i}{dy} \right|_{y_i=0} = \alpha_{\text{вп}}(\tau) [t_i(0, \tau) - t_{\text{гТ}}], \quad \tau \in (0, \tau_L). \quad (15)$$

Так как коэффициенты нестационарного теплообмена между породами кровли и почвы определяются по формулам [1]:

$$K_{\tau}^{(1)} = q_1(\tau) [t_n(H) - t_{\text{ym}}]^{-1}, \quad K_{\tau}^{(2)} = q_2(\tau) [t_n(H) - t_{\text{ym}}]^{-1}, \quad (16)$$

то из (16) и (13) – (15) следует, что достаточно найти один из них, а второй определится изменением величин теплофизических параметров. Поэтому индекс «i» в этих формулах можно опустить.

В соответствии с принятым допущением,

$$V_{\text{ym}} = V_{\text{ym}}(x) = V_0 \left(1 - \frac{x}{L_{\text{ym}}}\right), \quad (17)$$

а $\alpha_{\text{вп}} \sim V_{\text{ym}}$, т.е. $\alpha_{\text{вп}}(x) = CV_{\text{ym}}(x)$, где C – размерная постоянная, можно записать:

$$\alpha_{\text{вп}}(x) = \alpha_0 \left(1 - \frac{x}{L_{\text{ym}}}\right) = \alpha_0 \left(1 - \frac{V_{\text{л}} \tau}{L_{\text{ym}}}\right) = \alpha_{\text{вп}}(\tau). \quad (18)$$

Выражение (18) конкретизирует граничное условие третьего рода (15), конкретизируя математическую модель теплообмена.

Определение коэффициента нестационарного теплообмена. Определение коэффициента K_{τ} между вмещающими породами и утечками воздуха является основной задачей методики тепловых расчетов [2,3,5]. Определение $t(y, \tau)$, из краевой задачи (13)–(15) с учетом (18) весьма затруднено, так как условие (15) относит краевую задачу теплообмена к классу задач с переменным коэффициентом теплообмена, аналитические решения которых получены для небольшого числа частных случаев.

Для решения применен новый метод решения задач теплообмена с переменным коэффициентом α [13]. Он представляет собой аналог метода Дюамеля [11], примененного к $\alpha(\tau)$. Согласно этому методу получено решение (13)–(15) при $\alpha(\tau) = \alpha = \text{const}$.

В этом случае решение этой задачи известно [14]:

$$\Theta(y, \tau) = \frac{t_n - t(y, \tau)}{t_n - t_{\text{вум}}} = \text{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) - \exp\left(\frac{\alpha}{\lambda}y + \frac{\alpha^2}{\varepsilon^2}\tau\right) \cdot \text{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{\alpha\tau}} + \frac{\alpha}{\varepsilon}\sqrt{\tau}\right), \quad (19)$$

где $\Theta(y, \tau)$ – безразмерная температура в области $y > 0$; $\varepsilon = \sqrt{\lambda(\rho c)}$ – термическая активность.

По формуле (16) находим, обозначая коэффициент нестационарного теплообмена при $\alpha = \text{const}$, $K_{\tau, \alpha}$:

$$K_{\tau, \alpha} = \alpha(1 - \Theta_{cm}(\tau)), \quad (20)$$

$$\Theta_{cm}(\tau) = \Theta(y, \tau)_{y=0} = 1 - \exp\left(\frac{\alpha}{\varepsilon}\right)^2 \tau \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha}{\varepsilon}\sqrt{\tau}\right).$$

Введем функцию

$$W(z) = \exp(z^2)\operatorname{erfc}(z), \quad z = \frac{\alpha}{\varepsilon}\sqrt{\tau}. \quad (21)$$

Тогда (20) примет вид:

$$K_{\tau, \alpha} = \alpha W(z). \quad (22)$$

Если перейти к переменному коэффициенту $\alpha = \alpha(\tau)$:

$$\alpha \rightarrow \alpha(\tau), \quad K_{\tau, \alpha} \rightarrow K_{\tau}(\tau) = \alpha(\tau) \mathcal{W}[z(\tau)], \quad (23)$$

где $\mathcal{W}[z(\tau)]$ – вид функции $W\left(\frac{\alpha}{\varepsilon}\sqrt{\tau}\right)$ при переменном коэффициенте теплообмена.

Поскольку коэффициент нестационарного теплообмена используется далее при расчете температуры утечек воздуха на выходе из выработанного пространства лавы, необходимо найти его среднее по выработанному пространству значение. Функция $\mathcal{W}[z(\tau)]$ может быть найдена методом расчета и имеет следующий вид [7]:

$$\mathcal{W}[z(\tau)] = \exp[z^2(\tau)]\operatorname{erfc}[z(\tau)], \quad (24)$$

$$z(\tau) = \frac{1}{\varepsilon} \left[\int_0^{\tau} \alpha^2(\tau') d\tau' \right]^{0,5}. \quad (25)$$

Таким образом, формула (23) принимает вид:

$$K_{\tau}(\tau) = \alpha(\tau) \exp[z^2(\tau)]\operatorname{erfc}[z(\tau)]. \quad (26)$$

Среднее по выработанному пространству значение коэффициента нестационарного теплообмена $K_{\tau, cp}$ определяется, с учетом связи $x = V_{\text{л}}\tau$, по формуле

$$K_{\tau, cp} = \frac{1}{L_{\text{ym}}} \int_0^{L_{\text{ym}}} K_{\tau} \left(\frac{x}{V_{\text{л}}} \right) dx = \frac{1}{\tau_L} \int_0^{\tau_i} K_{\tau}(\tau) d\tau. \quad (27)$$

Подставив в формулу (27) выражения (23)-(26), получим

$$K_{\tau, cp} = \alpha_0 \int_0^1 (1 - \xi) \mathcal{W}[z(\xi)] d\xi, \quad \xi = \frac{x}{L_{\text{ym}}}, \quad (28)$$

где

$$z(\xi) = \frac{1}{\varepsilon} \left[\int_0^{\xi/V_L} \alpha^2(\tau) d\tau \right]^{0,5} = \frac{\alpha_0}{\varepsilon} \left(\frac{L_{ym}}{3V_L} \right)^{0,5} [1 - 1(1 - \xi)^3]^{0,5}. \quad (29)$$

Выражение (29) можно представить в виде

$$z(\xi) = Z_0 \varphi(\xi), \quad (30)$$

где

$$z_0 = \frac{\alpha_0}{\varepsilon} \left(\frac{L_{ym}}{3V_L} \right)^{0,5} = 0,577 \sqrt{F_{OL}}, \quad F_{OL} = \left(\frac{\alpha_0}{\varepsilon} \right)^2 \tau_L, \quad \xi = \frac{x}{L_{ym}}, \quad \tau_L = \left(\frac{L_{ym}}{V_L} \right),$$

а формулу (20) в виде

$$K_{\tau, cp} = \alpha_0 A(Z_0), \quad (31)$$

где $A(Z_0) = \int_0^1 (1 - \xi)^3 \varphi[Z_0 \varphi(\xi)] d\xi$.

Интеграл в формуле (31) вычисляется численно, величина его зависит от параметра Z_0 , имеющего смысл характерного безразмерного времени охлаждения вмещающих пласт пород. Его величина зависит от теплофизических характеристик пород ($\varepsilon = \sqrt{\lambda \rho c}$), ширины зоны утечек L_{ym} , скорости подвигания лавы V_L , скорости движения воздуха в лаве (что определяет α_0), т. е. всех основных параметров выемочного участка. Анализ показывает, что при любых возможных значениях этих параметров значение $Z_0 \in [0,1; 40]$. В крайних случаях, которые имеют лишь теоретический интерес, из (31) имеем

$$A(Z_0) \rightarrow 0,5 \text{ при } Z_0 \rightarrow 0; \quad A(Z_0) \rightarrow 0 \text{ при } Z_0 \rightarrow \infty.$$

Интеграл $A(Z_0)$ вычислен на ПЭВМ для значений Z_0 в диапазоне $[0,1; 40]$. Полученные значения приведены в таблице.

Таблица.

Значения функции $A(Z_0)$ в зависимости от параметра Z_0

Z_0	0,1	0,25	0,50	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0
$A(Z_0)$	0,399	0,347	0,280	0,233	0,198	0,121	0,086	0,066
Z_0	5,0	7,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	40,0
$A(Z_0)$	0,054	0,039	0,028	0,019	0,015	0,012	0,010	0,008

По данным таблицы построена номограмма и получена приближенная (максимальная относительная погрешность не более 11%) формула:

$$A(Z_0) = \begin{cases} 0,40 - 0,27(z_0 - 0,1) & z_0 \in [0,1; 0,75] \\ 0,23 - 0,09(z_0 - 0,75) & z_0 \in [0,75; 2,0] \\ 0,141 - [0,0154 - (0,01z_0 - 0,141)^2]^{0,5} & z_0 \in [2,0; 15,0] \\ 0,019 - 0,00044(z_0 - 15) & z_0 \in [15,0; 50,0] \end{cases} \quad (32)$$

Если породы почвы и кровли пласта имеют разные теплофизические характеристики, коэффициенты нестационарного теплообмена в этом случае определяются по формуле

$$K_{\tau, \text{cp}} = 0,5\alpha_0[A(Z_k) + A(Z_n)], \quad (33)$$

где α_0 – коэффициент теплоотдачи в лаве, Вт(м²·К).

Значения функций $A(Z_k)$ и $A(Z_n)$ рассчитываются по формуле (32), при $Z_0 = Z_k$ и $Z_0 = Z_n$, соответственно.

Результаты проверенных расчетов и замеров температуры воздуха в лавах и выработках с исходящей струей воздуха, выполненных на глубоких шахтах Донбасса, отличаются незначительно, максимальные отклонения составляют от 0,6 до 1,2°С. Это свидетельствует о достаточной обоснованности принятых математических моделей теплообмена в выработанном пространстве выемочных участков. Материалы выполненных исследований использованы при разработке нормативных документов для угольной отрасли по прогнозированию температурных условий в глубоких шахтах, при оценке технологических схем разработки пластов по тепловому фактору, при выборе горнотехнических способов и средств нормализации климатических условий на выемочных участках глубоких горизонтов [2, 15-17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербань А.Н., Кремнев О.А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт. – К.: изд. АН УССР, 1959. Том 1. – 279 с.
2. Единая методика прогнозирования температурных условий в угольных шахтах. Под редакцией Кузина В.А., Хохотвы Н.Н. – Макеевка: МакНИИ, 1979. – 196 с.
3. Щербань А.Н., Кремнев О.А., Журавленко В.Я. Справочное руководство по тепловым расчетам шахты и проектированию установок для охлаждения рудничного воздуха. – М.: Недра, 1977. – 500 с.
4. Кузин В.А. Исследование и разработка методов прогноза теплового режима вентиляционных выработок глубоких шахт // Разработка месторождений полезных ископаемых: Респ. межвед. научно-техн. сб-к: Техніка, 1987. – Вып. 77. – С. 84–89.
5. Кузин В.А. Методы прогноза и способы регулирования теплового режима вентиляционных горизонтов глубоких угольных шахт. Дис... докт. техн. наук. – М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1993. – 40 с.
6. Разработать методику теплового расчета выработок с исходящей вентиляционной струей воздуха. Отчет по НИР. Кузин В.А. – Макеевка: МакНИИ, 1980, Том 1. – 107 с., Том 2. – 148 с.
7. Исследовать тепломассообменные процессы на вентиляционных горизонтах с исходящей струей воздуха шахт, разрабатывающих крутые пласты. Отчет по НИР. Кузин В.А. – Макеевка: МакНИИ, 1984, Том 1. – 114 с., Том 2. – 102 с.
8. Милетич А.Ф. Утечки воздуха и их расчет при проветривании шахт. – М.: Недра, 1968. – 125 с.

9. Бусыгин К.К., Попов И.Н., Зинченко Н.Н. Закономерности изменения концентрации метана в выработанном пространстве вблизи очистной выработки // Вентиляция шахт и рудников. – Л.: ЛГИ, 1978. – Вып. 5. – С. 131–137.
10. Николаев Ю.Н. Исследование нестационарного теплообмена в слое кусков руды // Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых Севера. Тез. докладов. – Л. ЛГИ, 1970. – С. 38-39.
11. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972. – 736 с.
12. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепломассообмена. – М.: Высшая школа, 1974. – 328 с.
13. Венгеров И.Р. Метод пересчета для решения задач горной теплофизики // Создание безопасных условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. – Макеевка: МакНИИ, 1985. – С. 50–52.
14. Лыков А.В. Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
15. Методика прогнозирования температурных условий в выработках вентиляционных горизонтов глубоких шахт. / Кузин В.А., Пучков М.М., Фандеев М.М. и др. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 1984. – 61 с.
16. Технологические схемы разработки пластов на угольных шахтах. Ч. 1. Технологические схемы и пояснительная записка Ч. 2. Набор модулей. – М.: ИГД им. Скочинского, 1991. – 207 с.
17. Руководство по выбору горнотехнических способов нормализации климатических условий на выемочных участках глубоких шахт. / Кузин В.А., Алабьев В.Р., Песок С.А., Розенберг А.С., Пирич Т.И. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 1995. – 44 с.