

УДК 622.272 ; 551.345 ; 536.24

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ШАХТ СЕВЕРА

Ю. Д. Дядькин, Ю. А. Буденный

Физическая модель тепловых процессов в горных выработках и массиве мерзлых, оттаивающих и промерзающих пород при современном уровне исследований может быть сформулирована следующим образом [Буденный, 1965; Дядькин, 1964]: температура рудничного воздуха t изменяется по длине выработок x и во времени τ в результате тепло- и массообмена его с породным массивом, транспортируемым по выработкам полезным ископаемым и находящимся в выработках льдом (водой), а также под влиянием «абсолютных» тепловыделений и колебаний температуры t_0 и относительной влажности ϕ_0 в начале вентиляционного пути. При этом лишь интенсивность «абсолютных» тепловыделений можно считать постоянной во времени.

Теплообмен вентиляционной струи с породным массивом протекает с переменной интенсивностью и периодическим изменением направления теплового потока. В периоды оттаивания пород на глубину R_T и их последующего промерзания величину теплового потока обуславливают не только взаимные изменения t и T , но и агрегатные переходы лед — вода — лед. Фазовые отставания температурных колебаний $\delta_t(x)$ и $\delta_{T,\tau}(R)$ усложняют динамику теплообменных процессов.

Теплоотдача транспортируемого ископаемого также является переменной. Ее интенсивность зависит от температуры воздушного потока, начальной температуры и степени охлаждения или нагревания (и оттаивания) добытой горной массы на пути от забоев к рассматриваемой выработке.

Интенсивность оттаивания льда или замерзания воды в выработке, а следовательно, и продолжительность этих процессов определяются уровнем температуры $t(x, \tau)$ и, в свою очередь, оказывают влияние на ее изменение во времени. Количество льда и воды во многих выработках целиком обусловлено предшествующим ходом массообменных процессов.

Процессы массообмена являются знакопеременными во времени и при $t > 0$ сопровождаются агрегатными переходами вода—пар—вода, а при $t < 0$ — превращениями лед—пар—лед.

Температура горных пород T изменяется во времени τ , с удалением от выработок R и по длине их цепи x . Температурный режим породного массива и интенсивность его нестационарной теплопроводности, оттаивания и промерзания определяются теплофизическими свойствами пород, их льдистостью, начальной естественной температурой и тепловым режимом выработок. В любой момент температурное поле пород обуславливается не только температурой рудничного воздуха, интенсивностью теплообмена, массообмена и «абсолютных» тепловыделений, но и их изменениями за весь предшествующий период проветривания выработки.

Определение органически связанных между собой температуры воздушного потока $t(x, \tau)$, температуры пород $T(x, R, T)$ и глубины их оттаивания $R_T(x, \tau)$ — единая и весьма сложная трехмерная теплофизическая задача с переменными граничными условиями (рис. 1). Для приближенного

ее решения примем следующие допущения: 1) породный массив вокруг выработки рассматривается как однородный и изотропный; действительная неоднородность состава пород и неравномерность распределения в них льда приближенно учитываются при выборе их характеристик; 2) реальное поперечное сечение выработки заменяется круглым с эквивалентным радиусом; 3) тепловые потоки в прилегающих к выработке породах в направлении ее оси признаются несущественными, поскольку

$$\frac{\partial T(x, R, \tau)}{\partial x} \ll \frac{\partial T(x, R, \tau)}{\partial R}; \quad (1)$$

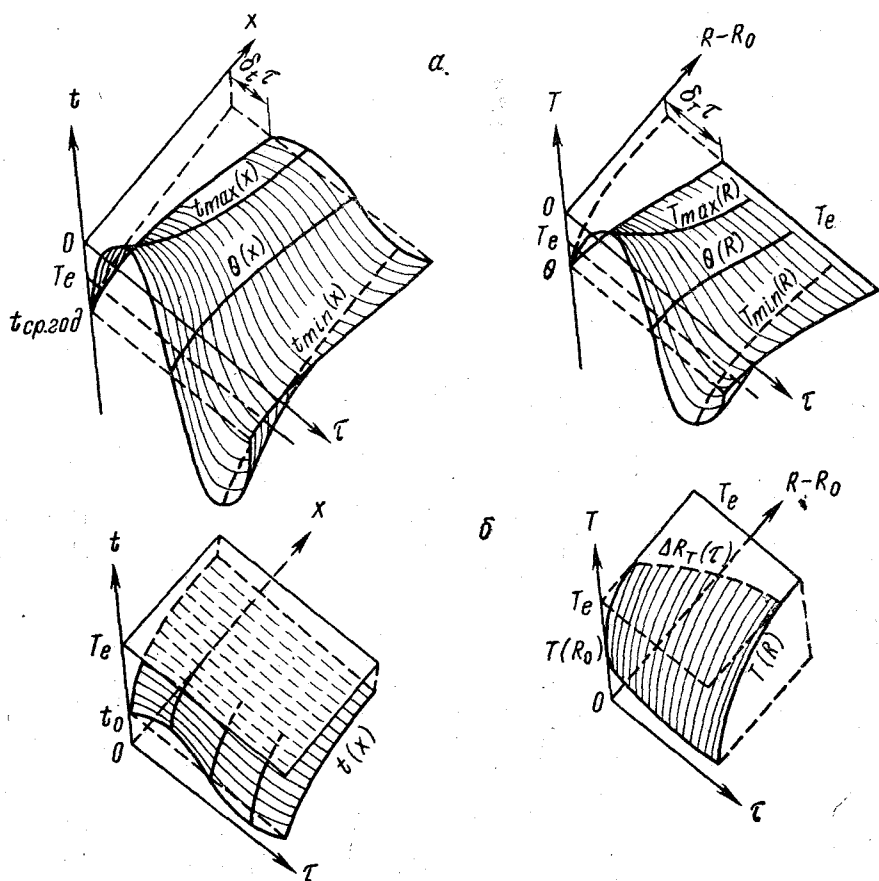


Рис. 1. Геометрическая интерпретация функций $t(x, \tau)$ и $T(x, R, \tau)$ в условиях шахт Севера (а) и глубоких шахт (б).

T_e — естественная температура породного массива; $\theta(R)$ — среднегодовая температура окружающих выработки пород; $\theta(x)$ — среднегодовая температура пород вблизи выработки: $\theta(x) \approx t_{ср. год}$; R_0 — эквивалентный радиус выработки; $\Delta R_T(\tau)$ — распространение температурных колебаний в окружающем выработку породном массиве.

4) среднемесячные температуры поступающего в выработки воздуха изменяются в течение года по закону

$$t_0(\tau) = t_{ср. год} + A \sin \frac{2\pi\tau'}{\omega}, \quad ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

где $t_0(\tau) = t_{ср. год} \approx \theta$ при $\tau' = 0$; τ' — время, прошедшее после последнего перехода среднемесячных температур наружного воздуха через их среднегодовое значение, ч; ω — 8760 — период годовых колебаний, ч; A — ампли-

туда годовых колебаний * температуры воздуха, °С; θ — среднегодовая температура пород вблизи выработки, °С.

Первые три допущения являются в горной теплофизике общепринятыми, четвертое — характерно лишь для шахт Севера.

В общем виде дифференциальное уравнение теплового баланса на участке dx горной выработки в толще мерзлых пород можно записать как

$$Gc_p dt = dQ'_n + dQ_{арр} + dQ'_{тр} + dQ_{тр. арр} + dQ_x - dQ_{вх} + \sum g_a, \quad (3)$$

где G — количество проходящего по выработке воздуха, $кг/ч$; c_p — удельная теплоемкость воздуха, $ккал/кг \cdot град$; Q'_n и $Q'_{тр}$ — теплоотдача, соответственно, пород и транспортируемого ископаемого, связанная с изменением их температуры при льдистости $w_n \neq 0$ $ккал/ч$; $Q_{арр}$ и $Q_{тр. арр}$ — тепловыделения пород и транспортируемого ископаемого, связанные с изменением агрегатного состояния содержащейся в них воды, $ккал/ч$; Q_x — скрытая теплота, выделяемая при замерзании имеющейся в выработке воды (или поглощаемая при таянии льда), $ккал/ч$; $Q_{вх}$ — скрытая теплота, поглощаемая при увлажнении воздуха (или выделяемая при конденсации содержащейся в воздухе воды и выпадении инея), $ккал/ч$; $\sum g_a$ — «абсолютные» (не зависящие от температуры) тепловыделения, отнесенные к единице длины выработки, $ккал/ч$.

Для упрощения математического описания процесса теплообмена между рудничным воздухом и породным массивом принята следующая расчетная схема.

1. Знакопеременный годовой процесс теплообмена условно расчленяем на два монотонных. При этом за начало процесса принимаем момент перехода среднемесячных температур воздуха через значение θ

$$\tau' = 0 \text{ при } t = \theta. \quad (4)$$

2. Поглощение или выделение скрытой теплоты оттаивания или промерзания окружающих выработку пород учитываем коэффициентом интенсификации теплообмена

$$k_{арр} = \frac{Q'_n + Q_{арр}}{Q'_n}, \quad (5)$$

где Q'_n — тепловой поток от вентиляционной струи к породному массиву при льдистости $w_n = 0$, т. е. при отсутствии агрегатных переходов, $ккал/ч$.

Значения $k_{арр}$ при неизменных w_n , c_p , t и θ считаем постоянными.

С учетом изложенной схемы, уравнение (3) имеет вид

$$Gc_p dt = dQ_n + dQ_{тр} + dQ_x - dQ_{вх} + \sum g_a. \quad (6)$$

Теплоотдача породного массива на участке dx составит

$$dQ_n = k_\phi k_{арр} k_\tau (u - u_x) [t(x, \tau) - \theta(x, \sum \tau)] dx, \quad (7)$$

где k_τ — коэффициент нестационарного теплообмена, учитывающий изменение температурного поля окружающих выработку пород за время τ' при гармонических колебаниях температуры воздуха, $ккал/м^2 \cdot ч \cdot град$; k_ϕ — коэффициент формы, учитывающий увеличение поверхности теплообмена в зависимости от типа крепи, неровности кровли, боковых стенок и захламленности выработки; u — периметр поперечного сечения выработки, $м$; u_x — средняя ширина поверхности льда, отнесенная к единице длины выработки, $м$.

Теплоотдача транспортируемого по выработке ископаемого (угля, руды, породы), отнесенная к ее участку dx , по аналогии с теплоотдачей породного массива, составит

$$dQ_{тр} = k_{тр} u_{тр} [T_{тр} - t(x, \tau)] dx, \quad (8)$$

* Влияние суточных колебаний температуры воздуха не учитывается, так как они распространяются лишь на начало вентиляционного пути.

где $k_{\text{тр}}$ — коэффициент нестационарного теплообмена, учитывающий изменение температурного поля транспортируемого ископаемого и агрегатного состояния содержащейся в нем воды, $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$; $T_{\text{тр}}$ — начальная температура добытого ископаемого в забое, $^{\circ}\text{C}$; $u_{\text{тр}}$ — условная ширина поверхности транспортируемого ископаемого, отнесенная к единице длины выработки, м .

При доставке добытого ископаемого в вагонетках

$$u_{\text{тр}} \approx \frac{G_{\text{гр}} F_{\text{ваг}}}{g_{\text{ваг}} \sum l_{\text{гр}}}, \quad (9)$$

при конвейерном транспорте

$$u_{\text{тр}} \approx \frac{0,003 G_{\text{гр}}}{\gamma_{\text{п}} R_{\text{гр}} \sum l_{\text{гр}}}, \quad (10)$$

где $G_{\text{гр}}$ — часовой грузопоток по выработке, $\text{т}/\text{ч}$; $R_{\text{ваг}}$ — площадь внешней поверхности кузова груженной вагонетки (включая открытую поверхность транспортируемого ископаемого), м^2 ; $\gamma_{\text{п}}$ — вес угля, руды или породы в вагонетке, т ; $R_{\text{гр}}$ — средний эквивалентный радиус куска транспортируемого ископаемого, м ; $\sum l_{\text{гр}}$ — общая длина пути транспортировки ископаемого, м .

Скрытую теплоту, выделяемую при замерзании воды, находящейся на участке dx выработки (или поглощаемая при таянии льда), можно записать в виде

$$dQ_x = \alpha_x u_x [0 - t(x, \tau)] dx = -\alpha_x u_x t(x, \tau) dx, \quad (11)$$

где α_x — коэффициент теплоотдачи поверхности воды (льда), $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$.

Скрытая теплота, связанная с изменением влагосодержания воздуха на участке dx ,

$$dQ_{\text{вх}} = G (r + r') n \varphi_{\text{ср}} \frac{760}{p_{\text{ср}}} dt, \quad (12)$$

где r и r' — скрытая теплота соответственно испарения и плавления 1 г воды, отнесенная к 1 кг воздуха, $\text{ккал}/\text{кг}$; n — коэффициент из приближенной зависимости влагосодержания воздуха от температуры при влажности, равной 1, и давления 760 мм рт. ст.; $\varphi_{\text{ср}}$ — средняя относительная влажность воздуха в выработке, доли единицы; $p_{\text{ср}}$ — среднее барометрическое давление воздуха в выработке, мм рт. ст.

Значения коэффициента n выбираются в зависимости от уровня температур в выработке:

Диапазон t , $^{\circ}\text{C}$	$n = f(t)$	Диапазон t , $^{\circ}\text{C}$	$n = f(t)$
(-40) — 30	0,01	15 — 20	0,83
(-30) — 20	0,045	15 — 25	0,95
(-20) — 10	0,095	20 — 25	1,10
(-10) — 0	0,19	20 — 30	1,32
0 — 10	0,40	25 — 30	1,40
5 — 15	0,53	25 — 35	1,69
10 — 15	0,56	30 — 35	1,87
10 — 20	0,72	30 — 40	2,02

Представление «абсолютных» тепловыделений $\sum g_a$ общеизвестно [Щербань, Кремнев, 1959]. Подставив в уравнение (6) значения входящих в него величин

$$dt(x, \tau) = \frac{1}{G \left[c_p \mp (r + r') n \varphi_{\text{ср}} \frac{760}{p_{\text{ср}}} \right]} \left\{ k_{\text{ф}} k_{\text{агр}} k_{\text{т}} (u - u_x) [\theta(x, \sum \tau) - t(x, \tau)] + k_{\text{тр}} u_{\text{тр}} [T_{\text{тр}} - t(x, \tau)] - \alpha_x u_x t(x, \tau) + \sum g_a \right\} dx. \quad (13)$$

и решив полученное дифференциальное уравнение, определим температуру рудничного воздуха в момент времени τ в конце любого участка выработки длиной l

$$t_{\kappa} = t_0 e^{-A'l} - Bkl + \left(B\theta_0 + \frac{B+BK}{A} \right) (1 - e^{-A'l}), \quad (14)$$

где

$$A = \frac{k_{\phi} k_{\text{арр}} k_{\tau} (u - u_x) + k_{\text{тр}} u_{\text{тр}} + \alpha_x u_x}{G \left[c_p + (r + r') n \varphi_{\text{ср}} \frac{760}{P_{\text{ср}}} \right]}; \quad (15)$$

$$B = \frac{k_{\phi} k_{\text{арр}} k_{\tau} (u - u_x)}{k_{\phi} k_{\text{арр}} k_{\tau} (u - u_x) + k_{\text{тр}} u_{\text{тр}} + \alpha_x u_x}; \quad (16)$$

$$B = \frac{\sum g_a + k_{\text{тр}} u_{\text{тр}} T_{\text{тр}}}{G \left[c_p + (r + r') n \varphi_{\text{ср}} \frac{760}{P_{\text{ср}}} \right]}; \quad (17)$$

$$K = \frac{\theta_0 - \theta_{\kappa}}{l}. \quad (18)$$

Для расчета t_{κ} необходимо предварительно определить среднегодовую температуру пород θ вблизи выработки в данном ее пункте. Формула для θ ($x, \sum \tau$) получена аналогично формулам (14)–(18) и имеет вид

$$\theta_{\kappa} = \theta_0 e^{-A'l} - B'K'l + \left(B'T_0 + \frac{B'+B'K'}{A'} \right) (1 - e^{-A'l}), \quad (19)$$

где

$$A' = \frac{k_{\phi} k_{\Sigma \tau} u + k_{\text{тр}} u_{\text{тр}}}{G' \left[c_p + (r + r') n \varphi'_{\text{ср}} \frac{760}{P'_{\text{ср}}} \right]}; \quad (20)$$

$$B' = \frac{k_{\phi} k_{\Sigma \tau} u}{k_{\phi} k_{\Sigma \tau} u + k_{\text{тр}} u_{\text{тр}}}; \quad (21)$$

$$B' = \frac{\sum g_a + k_{\text{тр}} u_{\text{тр}} T_{\text{тр}}}{G' \left[c_p + (r + r') n \varphi'_{\text{ср}} \frac{760}{P'_{\text{ср}}} \right]}; \quad (22)$$

$$K' = \frac{T_0 - T_{\kappa}}{l}. \quad (23)$$

Формулы (14) и (19) легко преобразовать для обратных тепловых расчетов, т. е. определения необходимых значений t_0 и θ_0 в начале выработки, обеспечивающих заданный уровень температур t_{κ} и θ_{κ} в конце выработки

$$t_0 = t_{\kappa} e^{A'l} + Bkl - \left(B\theta_{\kappa} + \frac{B+BK}{A'} \right) (e^{A'l} - 1), \quad (24)$$

$$\theta_0 = \theta_{\kappa} e^{A'l} + B'K'l - \left(B'T_{\kappa} + \frac{B'+B'K'}{A'} \right) (e^{A'l} - 1). \quad (25)$$

Функции k_{τ} и $k_{\text{арр}}$ раскрывались методом гидротепловой аналогии. В результате исследований на гидроинтеграторе В. С. Лукьянова получены эмпирические зависимости для определения k_{τ} и $k_{\text{арр}}$ по принятой расчетной схеме. Было решено около 50 задач при различных граничных условиях. При обработке результатов решения использовались критерии Кирпичева Ku_{τ} , Био Bi , Фурье Fo и Коссовича Ko , и безразмерные параметры $\frac{T_e}{\theta}$, $\frac{A}{\theta}$, $\frac{t}{T_e}$, $\frac{t}{\theta}$, $\frac{\tau'}{\omega}$ (T_e — естественная температура пород в глубине массива, °С). Как видно из рис. 2, в глубоких шахтах температура рудничного воздуха

не превышает T_e и, следовательно, тепловой поток имеет одностороннее направление — от массива пород к воздуху. В этом случае функция k_τ непрерывна в течение всего времени взаимодействия. В условиях Севера функция k_τ в течение года дважды изменяется по закону, близкому к котангенциальному. Периоды изменения функции определяются моментами перехода температур рудничного воздуха через значение среднегодовой температуры породного массива θ . При этом коэффициент нестационарного теплообмена выражает, как правило, эффективный тепловой поток, направленный к рудничному воздуху или породному массиву, так как колебания температур в «термически деятельной толще» обуславливают многократное изменение град T по величине и направлению.

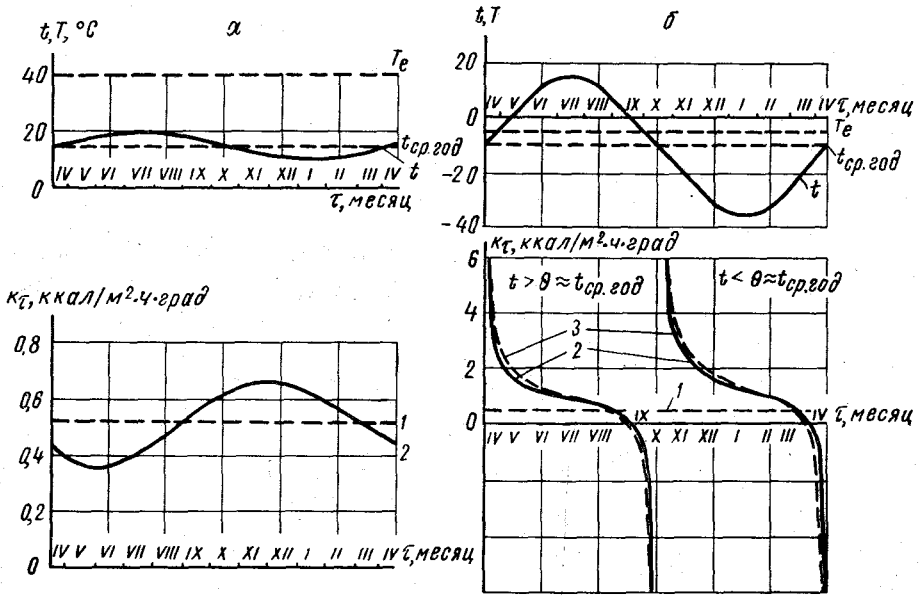


Рис. 2. Изменение коэффициента нестационарного теплообмена при различных законах изменения температуры воздуха в условиях глубоких шахт (а) и шахт Северо-Востока (б):

1 — при $t = \text{const}$; 2 — при гармонических колебаниях t ; 3 — расчетные по формулам (26) — (29). Третий год эксплуатации выработки, результаты решения на гидроинтеграторе при $\lambda_{II} = 2,0 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$; $c_{II} \gamma_{II} = 500 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град}$; $R_0 = 1,5 \text{ м}$; $\alpha = 10 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$.

В результате обработки данных моделирования получены следующие эмпирические выражения для определения k_τ при гармоническом законе изменения температуры воздуха. При $t > \theta$

$$k_\tau = \frac{0,8 + 0,58\lambda_{II}}{0,82 + 0,45R_0} \left[0,64 + 0,01\alpha + 0,1 \frac{T_e}{\theta} + n \text{ctg} \frac{2\pi(\tau' - \delta_t\tau)}{\omega} \right]; \quad (26)$$

$$n = 0,3 + 0,007\alpha + 0,36 \frac{\tau' - \delta_t\tau}{\omega}; \quad (27)$$

при $t < \theta$

$$k_\tau = \frac{0,8 + 0,58\lambda_{II}}{0,82 + 0,45R_0} \left[1,02 + 0,01\alpha - 0,26 \frac{T_e}{\theta} + n \text{ctg} \frac{2\pi(\tau' - \delta_t\tau)}{\omega} \right]; \quad (28)$$

$$n = 0,46 + 0,009\alpha - 0,36 \frac{\tau' - \delta_t\tau}{\omega}, \quad (29)$$

где λ_{II} — коэффициент теплопроводности пород, $\text{ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$; R_0 — эквивалентный радиус выработки, м ; α — коэффициент теплоотдачи, $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$; $\delta_t\tau$ — фазовое отставание сезонных колебаний температуры воздуха по длине вентиляционного пути, ч .

Эмпирические выражения (26) — (29) целесообразны при следующих пределах изменений величин

$$F_0 > 10; \quad 5 \leq Bi \leq 20;$$

$$0,3 \leq \frac{\tau' - \delta t \tau}{\omega} \leq 0,45; \quad 0,1 \leq \frac{T_e}{\theta} \leq 1,0.$$

Рис. 3 подтверждает правомерность положения расчетной схемы о практическом постоянстве величины $k_{арп}$ при неизменных $w_{п}$, t , T_e и $c_{п}$ (теплоемкость пород).

В результате исследований получена безразмерная зависимость

$$k_{арп} = 1 + 0,093 \left(\frac{w_{п}}{c_{п}} \right)^{0,73} (-T_e t)^{-0,36} \quad (30)$$

при $t = \text{const}$.

При гармоническом законе изменения t

$$k_{арп} =$$

$$= 1 + 0,093 \left(\frac{w_{п}}{c_{п}} \right)^{0,73} (-\theta t'), \quad (31)$$

где t' — средневзвешенное значение температуры воздуха в выработках, начиная с $t > 0$.

Теплообмен между рудничным воздухом и транспортируемым ископаемым аналогичен процессу теплообмена с породным массивом при постоянной или монотонно изменяющейся температуре воздуха. При этом транспортируемое ископаемое можно рассматривать как цилиндрическое тело, обтекаемое вентиляционной струей. Анализ строгого решения данной задачи показал, что приближенно величину $k_{тр}$ можно рассчитывать для транспортируемого угля

$$k_{тр} \approx k_{арп} [5 - 0,0004 (\sum l_{тр} - x_{тр})]; \quad (32)$$

для транспортируемых руды и пород

$$k_{тр} \approx k_{арп} [13 - 0,001 (\sum l_{тр} - x_{тр})], \quad (33)$$

где $x_{тр}$ — расстояние от начала вентиляционного пути до середины расчетного участка, м.

В результате моделирования процессов теплообмена при $t = \text{const}$ получено выражение для определения $k_{\Sigma\tau}$ при $\sum \tau = 1 \div 10$ лет

$$K_{\Sigma\tau} = 0,75 \frac{\alpha^{0,06} \lambda_{п}^{0,71}}{R_0^{0,48}} \left(\frac{c_{п} \gamma_{п}}{\sum \tau} \right)^{0,23}; \quad (34)$$

при $\sum \tau > 10$ лет

$$k_{\Sigma\tau} = 0,63 \frac{\alpha^{0,05} \lambda_{п}^{0,77}}{R_0^{0,59}} \left(\frac{c_{п} \gamma_{п}}{\sum \tau} \right)^{0,18}. \quad (35)$$

При определении k_{τ} и $k_{\Sigma\tau}$ коэффициент теплоотдачи от породного массива к воздушному потоку необходимо рассчитывать с учетом термического сопротивления крепи

$$\alpha = \frac{1}{u} \left[\alpha_{кр} (u - u_{кр}) + \frac{u_{кр}}{\frac{1}{\alpha_{кр}} + \frac{\delta_{кр}}{\lambda_{кр}}} \right], \quad (36)$$

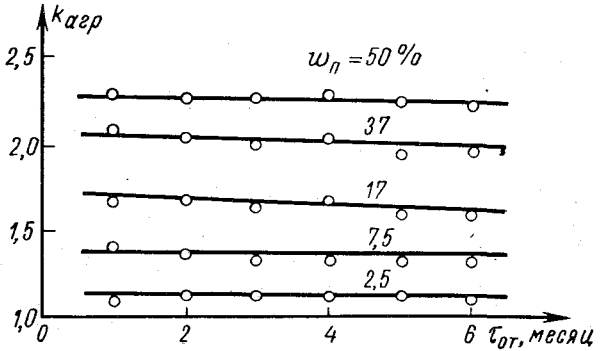


Рис. 3. Изменение коэффициента интенсификации теплообмена $k_{арп}$ в зависимости от влажности породного массива $w_{п}$ и времени его оттаивания $\tau_{от}$ при $\lambda_{п} = 2,0$ ккал/м·ч·град; $c_{п} \gamma_{п} = 600$ ккал/м³·град; $t = 10,0^{\circ} \text{C}$; $T = -5,0^{\circ} \text{C}$.

где $\alpha_{кр}$ определяется по известной формуле [Щербань, Кремнев, 1959]; $\delta_{кр}$ — толщина крепи, м; $u_{кр}$ — закрепленная часть периметра выработки, м; $\lambda_{кр}$ — коэффициент теплопроводности материала крепи, ккал/м·ч·град.

Практическое использование рекомендуемых расчетных формул возможно лишь при наличии достаточно надежных данных о значениях многочисленных исходных величин. Часть из них ($c_p = 0,24$, $r = 0,59$, $r' = 0,08$ и $\omega = 8760$) можно считать постоянными. Методика определения R_0 , α_x , $P_{ср}$, $\Phi_{ср}$ общеизвестна [Щербань, Кремнев, 1959; Дядькин, 1964]. Значения l , u , $\sum \tau$, $R_{тр}$, $g_{вар}$, $F_{вар}$, $G_{тр}$, $\sum l_{тр}$, $u_{кр}$, $\delta_{кр}$, $\lambda_{кр}$ выбираются по данным действующих шахт и рудников или из проектов; T_0 — по материалам геотермических исследований, $w_{п}$, $\gamma_{п}$, $\lambda_{п}$ и $c_{п}$ — по результатам специальных испытаний пород.

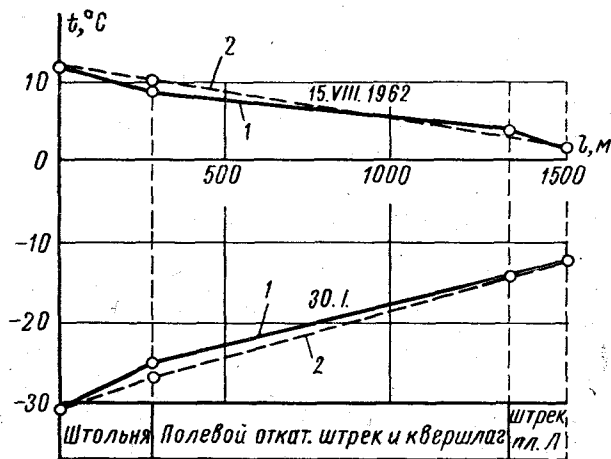
Коэффициент k_f можно принимать для бетонной крепи примерно равным 1,0; для сплошной деревянной примерно 1,1; для крепления вразбежку 1,2; незакрепленной выработки 1,5.

В выработках, пройденных по пластам угля, необходимо учесть неоднородное строение породного массива. Расчетное значение коэффициента теплопроводности пород в этом случае определяется выражением

$$\lambda_{п} \approx \frac{\lambda' (u - u_y) + \lambda_y u_y}{u - 0,5u_y}, \quad (37)$$

Рис. 4. Изменение температуры воздуха по цепи выработок шахты Центральной (Сангары, Якутская АССР).

1 — по замерам; 2 — по расчетам.



где λ_y и λ' — коэффициенты теплопроводности угля и вмещающих пород; u_y — часть периметра выработки по угольному пласту.

Расчетная влажность трещиноватого породного массива с учетом ледяных включений

$$w_{п} \approx w + \frac{3\delta_x}{\Delta_x} 100, \quad (38)$$

где δ_x — средняя толщина ледяных прожилков; m ; Δ_x — среднее расстояние между трещинами (размер отдельностей), м.

Выражения (37) и (38) сглаживают погрешность допущения об однородности и изотропности породного массива.

Фазовое отставание сезонных колебаний температуры воздуха на расстоянии x от начала вентиляционного пути, при $G \geq 50\,000$ кг/ч можно рассчитывать как

$$\delta_{t\tau} \approx 0,5 \frac{x10^5}{G}, \quad \text{ч.} \quad (39)$$

Большой объем проверочных тепловых расчетов, выполненных для шахт Сангарского (рис. 4), Аркагалинского угольных месторождений и рудников «Валькумей», им. Матросова, «Иульгин» и «Эге-Хая», показывает, что расчетные формулы правильно отражают основные закономерности теплового режима выработок и дают результаты, достаточно близкие к данным непосредственных замеров температуры рудничного воздуха в различных условиях.

При исходных температурах поступающего в шахту воздуха t_0 , близких к среднемесячным значениям, погрешность тепловых расчетов по рекомендуемым формулам, как правило, не превосходит $\pm 0,5-1,0^\circ\text{C}$. Следовательно, изложенный расчетный метод можно рекомендовать для практического использования.

ЛИТЕРАТУРА

Буденный Ю. А. Теплообмен между породным массивом и рудничным воздухом при гармоническом законе изменения температуры воздуха. В сб. Процессы тепло- и массообмена в мерзл. горн. породах. Наука, 1965.

Дядкин Ю. Д. Метод теплового расчета подземных выработок в толще многолетнемерзлых пород. В сб. Тепл. процессы в мерзл. горн. породах. Наука, 1964.

Щербань А. Н., Кремнев О. А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт. Изд-во АН УССР, 1959.