

alternative methods. We have suggested the way of improvement of the method for determination of the industrial wastes danger degree.

**Originality.** We have proposed and substantiated transition from sanitary to ecological standardization. It will allow us to exclude the discrepancies in the results of the calculation for the same wastes and to prevent violations of the requirements for handling hazardous wastes.

**Practical Implementation.** The way of improvement of the regulatory procedure for determination of waste

hazard class proposed in this work will improve the accuracy of the procedure and will prevent the understatement of ecological tax amounts for coal-mining wastes disposal in the environment.

**Keywords:** *mining wastes, heavy metals, danger class of wastes, sanitary regulations, wastes management*

*Рекомендовано к публікації докт. техн. наук В.С. Колесником. Дата надходження рукопису 03.07.13.*

УДК 622.788.36.5

А.А. Лапшин, канд. техн. наук, доц.

Государственное высшее учебное заведение „Криворожский национальный университет“, г.Кривой Рог, Украина, e-mail: alexandr.lapshin-ua@yandex.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НОРМАЛИЗАЦИИ МИКРОКЛИМАТА В ГЛУБОКИХ РУДНЫХ ШАХТАХ

A.A. Lapshin, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.

State Higher Educational Institution “Kryvyi Rih National University”, Kryvyi Rih, Ukraine, e-mail: alexandr.lapshin-ua@yandex.ru

## MATHEMATICAL SIMULATION OF MICROCLIMATE NORMALISATION PROCESSES IN DEEP ORE MINES

**Цель.** Прогноз процессов нормализации микроклимата в воздухоподающих выработках рудных шахт путем создания математической модели.

**Методика.** Научный анализ и обобщение ранее выполненных теоретических и экспериментальных исследований по вопросам нормализации микроклимата при подземной разработке рудных месторождений; теоретические исследования и математическое моделирование теплообменных процессов в воздухоподающих выработках шахт; использование фундаментальных положений физики, аэро- и гидродинамики, необходимых для разработки способов регулирования теплового режима в глубоких рудных шахтах.

**Результаты.** Обоснована необходимость математического моделирования процессов нормализации микроклимата при движении воздуха в выработках шахт с применением современных средств вычислительной техники. Проведен анализ известных методов математического моделирования теплообменных процессов в выработках глубоких шахт. Построена математическая модель процессов нормализации микроклимата, происходящих при движении воздуха в горных выработках, которая позволяет прогнозировать состояние теплового режима с целью последующего его регулирования.

**Научная новизна.** Научная новизна предложенного в работе метода – использование метеорологических факторов, в частности температуры, влажности, барометрического давления и конденсации водяных паров, как основных параметров изменения микроклимата в глубоких шахтах.

**Практическая значимость.** Создание способа математического моделирования теплообменных процессов при движении воздуха в горных выработках, который позволяет регулировать тепловой режим в глубоких рудных шахтах.

**Ключевые слова:** *горная выработка, микроклимат, моделирование, теплообмен, конденсация, температура, тепловой режим*

**Постановка проблемы.** Разработка рудных месторождений в глубоких шахтах Кривбасса и Запорожского железорудного комбината (ЗЖРК) сопровождается ухудшением условий труда вследствие повышения температуры воздуха в горных выработках до 28–30°C. Согласно требованиям „Правил без-

опасности...“ при температуре воздуха больше 26°C необходимо применять меры по её снижению. Разработка способов нормализации микроклимата в глубоких шахтах требует научного обоснования теплообменных процессов в горных выработках [1]. Учитывая воздействия различных факторов на теплообменные процессы, большая часть которых порой даже неконтролируема, можно прийти к естественному

выводу о необходимости построения их математических моделей с применением вычислительной техники [2]. Представленные в работе исследования выполнены в соответствии с важными научными и практическими заданиями, направленными на создание надлежащих безопасных и здоровых условий труда, предотвращение несчастных случаев и профессиональных заболеваний, обозначенных национальными программами.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Теоретическим и экспериментальным исследованиям теплообменных процессов, происходящих в горных выработках шахт, посвящены многочисленные работы различных авторов. В работах А.Н. Щербаня даны методы тепловых расчетов в горных выработках, в очистных забоях, при выемке угля с бетонной и гидравлической закладкой выработанного пространства. В этих работах не учитывается обводненность горного массива и его охлаждение вследствие дренажа воды. Кроме того, не принимается в решение задачи изменение скорости воздуха и его давления, что отражается на качестве полученных результатов. О.А. Кремнев получил зависимости изменения процессов тепло- и массообмена в камерах орошения и охлаждения воздуха, в частности, им получены более точные зависимости для определения температуры воздуха, монотонно изменяющейся во времени, при отсутствии испарения влаги. Но, как показывает практика, изменение температуры и испарение влаги в горных выработках наблюдается постоянно. А.Ф. Воропаев предложил зависимость, которая приближенно описывает распределение температур в охлаждаемом горном массиве. Однако использование этой зависимости не позволяет получить точные данные тепловых режимов при контактах горного массива с воздушным потоком. Работы А.А. Ягельского посвящены вопросам теплового режима в тупиковых выработках, им составлена система уравнений, которая отражает процесс нагревания вентиляционной струи в воздуховоде и не позволяет характеризовать процессы теплообмена при движении воздуха в горных выработках. Работы Ю.Д. Дядькина посвящены условиям теплообмена в очистных забоях глубоких шахт. Представленные в работах методы не учитывают изменения метеорологических параметров воздуха при движении его по горным выработкам, что не позволяет прогнозировать тепловой режим с последующим его регулированием. В.Г. Перепелицей разработан способ охлаждения воздуха и закладки выработанного пространства глубоких шахт. Расчетами, выполненными для широкого диапазона горно-геологических условий добычи угля, доказана возможность снижения температуры воздуха в среднем на 8°C с использованием закладки выработанного пространства брикетированным материалом, охлажденным до температуры -10°C. Данный метод распространяется для условий разработки месторождений с закладкой выработанного пространства, что неприемлемо для условий систем разработки с обрушением налегающих пород. Многочисленные исследова-

ния, посвященные актуальному вопросу регулирования тепловых режимов в шахтах, являются справедливыми для условий разработки месторождений на глубинах до 1000 м. В связи с переходом разработки месторождений на большие глубины, вопросы регулирования теплового режима требуют дальнейшего совершенствования.

**Выделение нерешенной проблемы.** Сложность теплообменных процессов в глубоких железорудных шахтах, связанных с неконтролируемым изменением метеорологических параметров воздуха при движении его в горных выработках, не позволяет производить эффективное регулирование тепловых режимов. В связи с этим в рассматриваемых условиях как один из возможных путей решения проблемы расчета и регулирования тепловых режимов в глубоких железорудных шахтах может использоваться применение математического моделирования на базе современных средств вычислительной техники. Создание такой математической модели позволит учесть влияние изменений параметров микроклимата на условия труда и на их основе производить прогнозирование теплового режима глубоких шахт.

**Формулирование цели работы.** Разработка богатых руд подземным способом на глубинах 1500–1700 м усложняется горнотехническими возможностями, среди которых и возможности вентиляции шахт. С увеличением глубины подземной разработки повышается температура горных пород и рудничного воздуха, достигающая на шахтах Кривбасса предельно допустимой величины 26°C, а на шахте „Эксплуатационная“ Запорожского железорудного комбината температура воздуха в горных выработках на рабочих горизонтах превышает 30°C. Высокая температура (больше 26°C) и влажность воздуха (больше 80%), повышенное атмосферное давление (800 мм. рт. ст.), характерные для горных выработок глубоких шахт, ухудшают условия труда, приводят к перегреву организма, нарушению работы органов дыхания, что снижает сопротивляемость организма заболеваниям.

Разработка новых эффективных методов нормализации микроклимата и создания благоприятных условий труда требует научно обоснованных подходов к решению проблемы регулирования тепловых режимов и вентиляции горных выработок. В связи с этим, **целью** работы является создание математических моделей с учетом изменения метеорологических параметров воздуха при его движении по горным выработкам, что позволит осуществлять прогнозирование и регулирование тепловых режимов в глубоких шахтах.

**Изложение основного материала.** Теплообменные процессы, происходящие в глубоких шахтах, обуславливают изменение параметров рудничного воздуха при его движении по горным выработкам. В шахтных стволах и других вертикальных выработках происходит сжатие (при движении воздуха вниз) и расширение (при движении воздуха вверх) вентиляционной струи при одновременном теплообмене с окружающими горными породами. В горизонтальных выработках происходит теплообмен между руд-

ничим воздухом и горными породами, усугубляемый тепловыделением от машин и механизмов.

По мере проветривания выработок воздухом, температура которого ниже температуры окружающих горных пород, в породном массиве образуется охлажденная зона. Ширина охлажденной зоны зависит от многих факторов, а именно: срока существования выработки, теплофизических свойств породного массива, величины геотермической ступени и прочее.

На рис. 1 представлена общая схема проветривания выработки воздухом. Согласно этой схеме, вначале охлаждаемый воздух подается сверху вниз по вертикальному стволу шахты на глубину  $H$  (I участок). Затем он движется, по горизонтальной выработке длиной  $L$  (II участок) и, наконец, поднимается вверх на поверхность шахты (III участок).

Для I-ого участка математическая модель, описывающая нестационарный теплообменный процесс, представится в виде дифференциального уравнения в частных производных первого порядка [3,4]

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = w_1 \frac{\partial t_1}{\partial z} - \frac{\alpha_1 \cdot \Pi_1}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot s_1} (t_1 - t_{1c}), \quad (0 \leq z \leq H), \quad (1)$$

где  $t$  – температура воздуха, °C;  $t_{1c}$  – температура стенки ствола шахты, °C;  $\tau$  – время, с;  $w_1$  – скорость воздуха, м/с;  $c_1$  – теплоемкость воздуха, Дж/кг°C;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>°C;  $\Pi_1, s_1$  – периметр и площадь поперечного сечения ствола шахты (м, м<sup>2</sup>) соответственно.

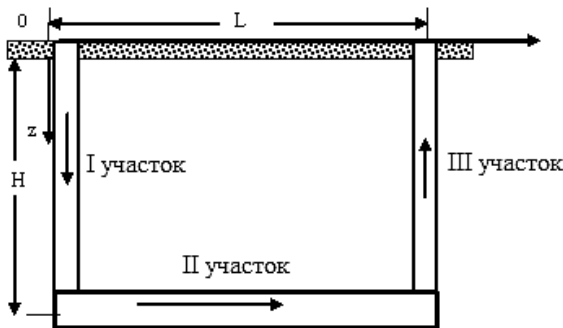


Рис. 1. Схема движения воздуха в горных выработках:  $H$  – глубина ствола шахты (длина I и III участка);  $L$  – длина горизонтальной выработки (длина II участка);  $z$  – текущая координата при движении воздуха по стволу вниз

Если воспользоваться уравнением неразрывности  $\rho$  [4]

$$c_1 \cdot \rho_1 \cdot w_1 = G_0, \quad (2)$$

где  $G_0$  – массовый расход воздуха, поступающего в ствол шахты, кг/с, то уравнение (1) примет вид

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = - \frac{1}{\rho_1 \cdot s_1} (G_0 \frac{\partial t_1}{\partial z} + \frac{\alpha_1 \cdot \Pi_1}{c_1} (t_1 - t_{1c})), \quad (0 \leq z \leq H). \quad (3)$$

Для однозначного решения поставленной задачи необходимо также задать начальное и граничное условия температуры воздуха по времени  $\tau = 0$  и по высоте ствола  $z = 0$

$$t_1(\tau = 0) = t_{1c}; \quad (4)$$

$$t_1(z = 0) = t_0. \quad (5)$$

Так как воздух движется сверху вниз, то в уравнении (1) необходимо учесть возрастание температуры стенок ствола шахты с глубиной, начиная от температуры нейтральной зоны. Сама же зависимость может быть аппроксимирована линейной функцией

$$t_{1c} = t_n + k \cdot z, \quad (6)$$

где  $t_n$  – температура нейтрального слоя, °C,  $k$  – коэффициент, учитывающий возрастание температуры, °C/м.

Кроме того, по мере увеличения глубины увеличивается плотность воздуха, что определяется формулой [5]

$$\rho_1 = \rho_0 \cdot e^{\frac{z}{h_0}}, \quad (7)$$

где  $\rho_0$  – плотность воздуха на поверхности земли, кг/м<sup>3</sup>,  $h_0 = \frac{p_0}{\rho_0 g}$ ;  $p_0$  – барометрическое давление на поверхности земли, Па;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Анализ зависимости плотности воздуха от глубины шахты показывает, что при рассматриваемых глубинах шахт (порядка 1,5 км) зависимость (7) может быть аппроксимирована с достаточной точностью линейной функцией

$$\rho_1 = \rho_0 \cdot (1 + l \cdot z), \quad (8)$$

где  $l$  – параметр, характеризующий скорость возрастания относительной плотности воздуха, 1/м.

На рис.2 представлены графики зависимости плотности воздуха от глубины ствола шахты

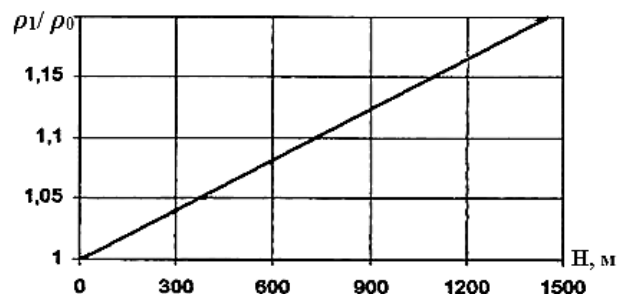


Рис. 2. Зависимость относительной плотности воздуха  $\rho_1/\rho_0$  от глубины шахты  $H, м$

Анализ графика, представленного на рис.2, показывает, что с увеличением глубины разработки

относительная плотность воздуха линейно возрастает.

С учетом формул (6) и (8) уравнение (3) примет вид

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = -\frac{1}{s_1 \cdot \rho_0 \cdot (1+l \cdot z)} \left( G_0 \frac{\partial t_1}{\partial z} + \frac{\alpha_1 \cdot \Pi_1}{c_1} (t_1 - t_n - k \cdot z) \right), \quad (0 \leq z \leq H), \quad (9)$$

а начальное условие (4) запишется так

$$t_1(\tau = 0) = t_n + k \cdot z. \quad (10)$$

Уравнение (9), с учетом условий (5) и (10), является математической моделью нестационарного процесса теплообмена на I-ом участке, то есть при движении воздуха сверху вниз по стволу шахты.

На II-ом участке, при движении воздуха по горизонтальной выработке, математическая модель процесса теплообмена задается уравнением

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau} = -\frac{1}{s_2 \cdot \rho_0 \cdot (1+l \cdot H)} \left( G_0 \frac{\partial t_2}{\partial x} + \frac{\alpha_2 \cdot \Pi_2}{c_2} (t_2 - t_n - k \cdot H) \right). \quad (11)$$

При этом, очевидно, должны выполняться начальное и граничное условия температуры воздуха по времени  $\tau = 0$  и по длине горизонтальной выработки  $z = H$

$$t_2(\tau = 0) = t_n + k \cdot H; \quad (12)$$

$$t_2(z = H) = t_1(z = H). \quad (13)$$

Второе условие указывает на равенство температур при переходе воздуха из первого участка во второй.

На III-ем участке движение воздуха происходит снизу вверх, что позволяет записать математическую модель процесса теплообмена в виде уравнения [4]

$$\frac{\partial t_3}{\partial \tau} = -\frac{1}{s_3 \cdot \rho_0 \cdot (1+l \cdot z)} \left( G_0 \frac{\partial t_3}{\partial z} - \frac{\alpha_3 \cdot \Pi_3}{c_3} (t_3 - t_n - k \cdot z) \right), \quad (0 \leq z \leq H) \quad (14)$$

с соблюдением начального и граничного условий

$$t_3(\tau = 0) = t_n + k \cdot z; \quad (15)$$

$$t_3(z = H) = t_2(z = H). \quad (16)$$

Таким образом, процесс теплообмена при прохождении охлажденного воздуха по горным выработкам описывается дифференциальными уравнениями в частных производных первого порядка (9), (11) и (14) с учетом начальных и граничных условий (5), (10), (12), (13), (15) и (16), что, в целом, и представляет математическую модель исследуемого процесса теплообмена.

Анализ построенной модели процесса теплообмена позволяет сделать вывод о ее сложности как для решения, так и для последующего применения. Вместе с тем, при движении охлажденного воздуха по

горным выработкам через некоторое время устанавливается стационарное распределение температур, которое больше всего интересует на практике.

Поэтому целесообразно приведение математической модели к стационарному виду, что достигается приравниванием производных по времени нулю.

На I-ом участке

$$\frac{dt_1}{dz} = -\frac{\alpha_1 \cdot \Pi_1}{c_1 \cdot G_0} (t_1 - t_n - k \cdot z),$$

при

$$t_1(z = 0) = t_0. \quad (17)$$

На II-ом участке

$$w_2 \frac{dt_2}{dx} = -\frac{\alpha_2 \cdot \Pi_2}{c_2 \cdot G_0} (t_2 - t_n - k \cdot H),$$

при

$$t_2(x = 0) = t_1(z = H). \quad (18)$$

На III-ем участке

$$w_3 \frac{dt_3}{dz} = -\frac{\alpha_3 \cdot \Pi_3}{c_3 \cdot G_0} (t_3 - t_n - k \cdot z),$$

при

$$t_3(z = H) = t_2(x = L). \quad (19)$$

Уравнения (17)–(19) являются линейными дифференциальными уравнениями первого порядка и допускают аналитические решения.

Так как дифференциальное уравнение (17) является линейным с постоянными коэффициентами, то для его решения воспользуемся интегрирующим множителем. Прежде всего, введем новое обозначение и сделаем замену переменной

$$b_1 = -\frac{\alpha_1 \cdot \Pi_1}{c_1 \cdot G_0}, \quad \theta_1 = t_1 - t_n - k \cdot z. \quad (20)$$

Тогда задача Коши примет вид

$$\frac{d\theta_1}{dz} + b_1 \cdot \theta_1 = -k; \quad \theta_1(z = 0) = t_0 - t_n. \quad (21)$$

Пользуясь интегрирующим множителем  $e^{b_1 \cdot z}$ , получаем

$$\frac{d\theta_1 e^{b_1 z}}{dz} = -k e^{b_1 z}. \quad (22)$$

Уравнение (22) является дифференциальным уравнением с разделяющимися переменными. Поэтому последовательно решаем

$$d\theta_1 e^{b_1 z} = -k e^{b_1 z} dz; \quad \int d(\theta_1 e^{b_1 z}) = -k \int e^{b_1 z} dz;$$

$$\theta_1 e^{b_1 z} = -\frac{k}{b_1} e^{b_1 z} + C; \quad \theta_1 = -\frac{k}{b_1} + C e^{-b_1 z}.$$

Учитывая граничное условие (21), находим

$$\theta_1 = -\frac{k}{b_1} + (t_0 - t_n + \frac{k}{b_1}) \cdot e^{-b_1 z}.$$

С учетом замены (20) окончательно получаем стационарное распределение температуры на I-ом участке по длине ствола шахты [6]

$$t_1 = t_n - \frac{k}{b_1} + k \cdot z + (t_0 - t_n + \frac{k}{b_1}) \cdot e^{-b_1 z}. \quad (23)$$

На II-ом участке задача Коши (18) после замены

$$b_2 = \frac{\alpha_2 \cdot \Pi_2}{c_2 \cdot G_0}, \quad \theta_1 = t_2 - t_n - k \cdot H \quad (24)$$

принимает вид

$$\frac{d\theta_1}{dz} + b_1 \cdot \theta_1 = -k; \quad (25)$$

$$\theta_2(x=0) = -\frac{k}{b_1} + (t_0 - t_n + \frac{k}{b_1}) \cdot e^{-b_1 z}.$$

Как и для I-ого участка, с помощью интегрирующего множителя находим решение задачи Коши (25)

$$\theta_2 = ((t_0 - t_n + \frac{k}{b_1}) e^{-b_1 H} - \frac{k}{b_1}) e^{-b_2 x}. \quad (26)$$

С учетом (24) решение (26) принимает вид

$$t_2 = t_n + k \cdot H + ((t_0 - t_n + \frac{k}{b_1}) e^{-b_1 H} - \frac{k}{b_1}) e^{-b_2 x}. \quad (27)$$

Формула (27) описывает распределение температуры воздуха при его движении на II-ом участке.

На III-ем участке после замены

$$b_3 = \frac{\alpha_3 \cdot \Pi_3}{c_3 \cdot G_0}; \quad \theta_3 = t_3 - t_n - k \cdot z \quad (28)$$

задача Коши (19) принимает вид

$$\frac{d\theta_3}{dz} = -b_3 \cdot \theta_3 = -k; \quad (29)$$

$$\theta_3(z=H) = ((t_0 - t_n + \frac{k}{b_1}) e^{-b_1 H} - \frac{k}{b_1}) e^{-b_2 L}.$$

С помощью интегрирующего множителя находим решение задачи Коши (29)

$$\theta_3 = \frac{k}{b_3} + (-\frac{k}{b_3} + ((t_0 - t_n + \frac{k}{b_1}) e^{-b_1 H} - \frac{k}{b_1}) e^{-b_2 L}) e^{-b_3(H-z)}. \quad (30)$$

С учетом замены (28) решение (30) принимает вид

$$t_3 = t_n + \frac{k}{b_3} + k \cdot z + (-\frac{k}{b_3} + ((t_0 - t_n + \frac{k}{b_1}) e^{-b_1 H} - \frac{k}{b_1}) e^{-b_2 L}) e^{-b_3(z-H)}. \quad (31)$$

Формула (31) описывает распределение температуры воздуха при его движении на III-ем участке. Таким образом, формулы (23), (27) и (31) позволяют рассчитать стационарное распределение температуры воздуха в горной выработке, показанной на рис. 1.

Для удобства расчетов полученные формулы представлены ниже

$$t_1(z) = t_n - \frac{k}{b_1} + k \cdot z + (t_0 - t_n + \frac{k}{b_1}) e^{-b_1 z}, \quad (0 \leq z \leq H);$$

$$t_2(x) = t_n + k \cdot H + ((t_0 - t_n + \frac{k}{b_1}) e^{-b_1 H} - \frac{k}{b_1}) e^{-b_2 x}, \quad (0 \leq x \leq L);$$

$$t_3(z) = t_n + \frac{k}{b_3} + k \cdot z + (-\frac{k}{b_3} + ((t_0 - t_n + \frac{k}{b_1}) e^{-b_1 H} - \frac{k}{b_1}) e^{-b_2 L}) e^{-b_3(z-H)}, \quad (0 \leq z \leq H).$$

Ниже приведены исходные данные для расчета температуры воздуха, проходящего по горной выработке, изображенной на рис. 1:  $t_n = 11 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $k = 0,02 \text{ }^\circ\text{C/м}$ ;  $R_1 = 1,5 \text{ м}$ ;  $c_1 = 1 \text{ кДж/кг}^\circ\text{C}$ ;  $H = 1000 \text{ м}$ ;  $c_2 = 1 \text{ кДж/кг}^\circ\text{C}$ ;  $h_2 = 3 \text{ м}$ ;  $l_2 = 5 \text{ м}$ ;  $L = 1000 \text{ м}$ ;  $R_3 = 1,5 \text{ м}$ ;  $c_3 = 1 \text{ кДж/кг}^\circ\text{C}$ .

На рис.3 представлен график зависимости температуры стенки ствола шахты от его глубины.

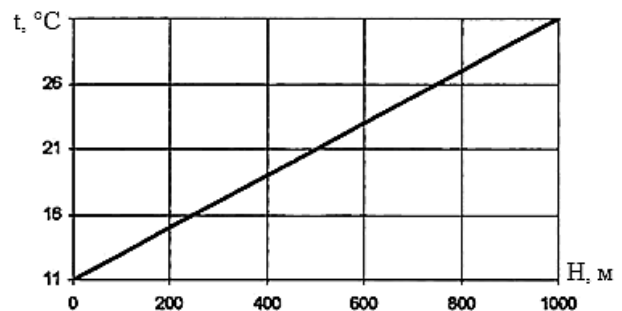


Рис. 3. Изменение температуры стенки ствола шахты  $t, \text{ }^\circ\text{C}$  в зависимости от глубины ствола  $H, \text{ м}$

Анализ представленного графика показывает, что эта температура изменяется линейно от температуры нейтральной зоны ( $11^\circ\text{C}$ ) до  $31^\circ\text{C}$  на глубине  $1000 \text{ м}$ .

Для оценки коэффициента теплоотдачи, входящего в формулы, воспользуемся методикой [3]. Принимая во внимание, что скорость движения воздуха составляет величину порядка  $8 \text{ м/с}$ , радиус ствола  $1,5 \text{ м}$

и усредненная кинематическая вязкость воздуха  $20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , находим число Рейнольдса

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} = \frac{8 \cdot 3}{20 \cdot 10^{-6}} = 1,2 \cdot 10^6.$$

Такая величина числа Рейнольдса соответствует развитому турбулентному течению. Поэтому, далее находим число Нуссельта по формуле [7]

$$Nu = 0,018 \cdot Re^{0,8} = 0,018 \cdot (1,2 \cdot 10^6)^{0,8} = 1314,1.$$

И, наконец, учитывая, что средний коэффициент теплопроводности воздуха при рассматриваемых температурах составляет величину порядка  $0,028 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ , находим коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{°C}$

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{d} = 1314,1 \cdot \frac{0,028}{3} = 12,3.$$

На рис. 4, 5 и 6 представлены результаты расчетов согласно исходным данным.

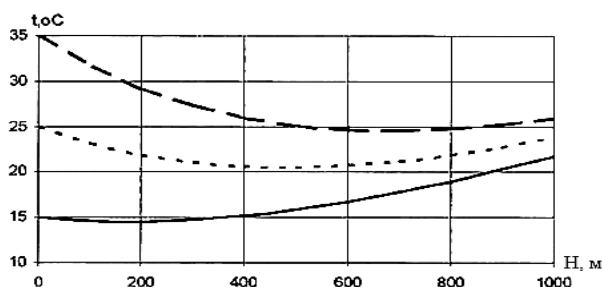


Рис. 4. Зависимость температуры воздуха  $t, \text{°C}$  от глубины ствола  $H, \text{м}$  для различных входных температур при движении воздуха вниз по стволу шахты (I участок):  
 —  $t = 15\text{°C}$ ;    - - - - -  $t = 25\text{°C}$  ;  
 - - - - -  $t = 35\text{°C}$

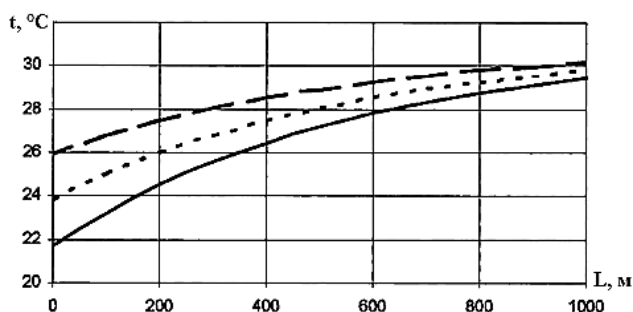


Рис. 5. Зависимость температуры воздуха  $t, \text{°C}$  от длины горизонтальной выработки  $l, \text{м}$  на глубине воздухоподающего ствола шахты  $H$  (II участок) для различных входных температур воздуха: —  $t = 15\text{°C}$ ; - - - - -  $t = 25\text{°C}$  ;  
 - - - - -  $t = 35\text{°C}$

Анализ графиков рис. 4 показывает, что при движении воздуха по стволу шахты сверху вниз его температура  $t$  сначала падает, а затем начинает возрастать. Если входная температура высокая, в нашем случае  $35\text{°C}$ , то наблюдается снижение температуры до  $24\text{°C}$  на глубине порядка  $700 \text{ м}$ , с последующим ее возрастанием до  $26\text{°C}$  на глубине  $1000 \text{ м}$ .

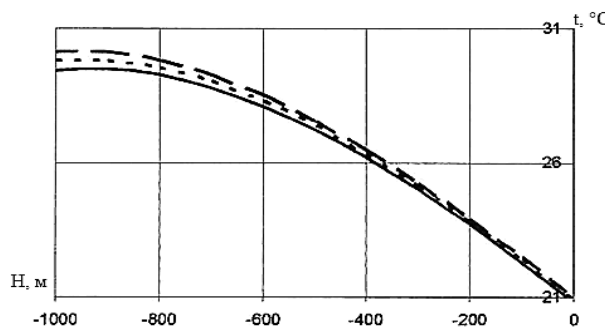


Рис. 6. Зависимость температуры воздуха  $t, \text{°C}$  от глубины  $H, \text{м}$  по воздухоподающему стволу шахты (III участок) для различных входных температур при движении воздуха вверх  
 —  $t = 15\text{°C}$ ;    - - - - -  $t = 25\text{°C}$  ;  
 - - - - -  $t = 35\text{°C}$

При последующем движении воздуха по горизонтальной выработке на глубине  $H = 1000 \text{ м}$  наблюдается возрастание его температуры  $t$ , вплоть до  $28\text{--}30\text{°C}$ , на расстоянии  $1000 \text{ м}$ , что показано на графиках рис. 5.

Анализ графиков рис.6 показывает, что при движении воздуха снизу вверх по стволу шахты его температура уменьшается практически до  $21\text{°C}$  на поверхности шахты, независимо от величины входной температуры.

На рис. 7 представлены объединенные графики изменения температуры воздуха в зависимости от длины выработок независимо от их расположения для разных входных температур.

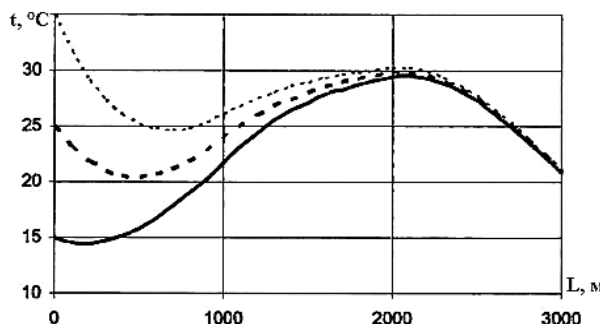


Рис. 7. Зависимость температуры воздуха  $t, \text{°C}$  от длины выработок  $L, \text{м}$  для различных входных температур: —  $t = 15\text{°C}$ ; - - - - -  $t = 25\text{°C}$  ;  
 - - - - -  $t = 35\text{°C}$

На рис. 7 проміжок на горизонтальній осі  $L$  від 0 до 1000 м відповідає русу повітря вниз по стволу шахти, від 1000 до 2000 м – русу повітря по горизонтальній виработці, від 2000 до 3000 м – русу повітря вгору по стволу шахти.

**Висновок та напрямки подальших досліджень.** Проведено математичне моделювання теплообмінного процесу в гірних виробках, охолоджуваному рудничним повітрям, що дозволяє організувати чисельний експеримент, в ході якого можна дослідити особливості протікання розглянутого процесу. Напрямки подальших досліджень пов'язані з розв'язанням проблеми створення умов роботи в виробках, що відповідають санітарно-гігієнічним нормам.

### Список літератури / References

1. Галкин. А.Ф. Тепловой режим подземных сооружений Севера / Галкин А.Ф. – Новосибирск: Наука, 2000. – 304 с.

Galkin, A.F. (2000), *Teplovoiy rezhym podzemnykh sooruzheniy severa* [Thermal Regime of Underground Constructions at North] Science, Novosibirsk, Russia.

2. Белоцерковский О.М. Новое в численном моделировании: алгоритмы, вычислительные эксперименты, результаты / Белоцерковский О.М. – М.: Наука, 2000. – 247с.

Belotserkovskii, O.M. (2000), *Novoye v chislennom modelirovaniy: algoritmy, vychislitelnye eksperimenty, rezultaty* [New in the Numerical Modeling: Algorithms, Computational Experiments, Results], Nauka, Moscow, Russia.

3. Самарский А.А. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. / А.А. Самарский, А.П. Михайлов – М.: Физматлит, 2001. – 320 р.

Samarsky, A.A. and Mikhailov A.P. (2001), *Matematicheskoye modelirovaniye. Idei. Metody. Primery.* [Mathematical simulation. Ideas. Methods. Examples] PhysMathLit, Moscow, Russia.

4. Трушков В.В. Обыкновенные дифференциальные уравнения / Трушков В.В. – Переславль-Залесский: Университет города Переславля, 2006. – 287с.

Trushkov, V.V. (2006), *Obyknovennyye differentsyalnye uravneniya* [Ordinary Differential Equations: Manual for High Schools], University of Pereslavl, Pereslavl, Russia.

5. Кудинов В.А. Техническая термодинамика / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. – М.: Высшая школа, 2000. – 261 с.

Kudinov, V.A. and Kartashov, E.M. (2000), *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical thermodynamic], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.

6. Карминский В.Д. Техническая термодинамика и теплопередача / Карминский В.Д. – М.: Маршрут, 2005. – 224 с.

Karaminsky, V.D. (2005), *Tekhnicheskaya termodynamika i teploperedacha* [Technical Thermodynamic and Heat-Transfer], Marshrut, Moscow, Russia.

7. Бибенина Т.П. Гидравлика. Техническая гидромеханика / Бибенина Т.П. – Екатеринбург: УГГУ, 2006. – 180 с.

Bebenina, T.P. (2006), *Gidravlika. Tekhnicheskaya gidromekhanika* [Hydraulics. Technical hydromechanics], USMU, Ekaterinburg, Russia.

**Мета.** Прогноз процесів нормалізації мікроклімату в повітроподаючих виробках рудничних шахт шляхом створення математичної моделі.

**Методика.** Науковий аналіз та узагальнення раніше виконаних теоретичних і експериментальних досліджень з питань нормалізації мікроклімату при підземній розробці рудних родовищ; теоретичні дослідження й математичне моделювання теплообмінних процесів у повітроподаючих виробках шахт; використання фундаментальних положень фізики, аеродинаміки, необхідних для розробки способів регулювання теплового режиму у глибоких рудних шахтах.

**Результати.** Обґрунтована необхідність математичного моделювання процесів нормалізації мікроклімату під час руху повітря у виробках шахт із застосуванням сучасних засобів обчислювальної техніки. Проведений аналіз відомих методів математичного моделювання теплообмінних процесів у виробках глибоких шахт. Побудована математична модель процесів нормалізації мікроклімату, що відбуваються під час руху повітря в гірничих виробках, яка дозволяє прогнозувати стан теплового режиму з метою подальшого його регулювання.

**Наукова новизна.** Наукова новизна запропонованого в роботі методу – використання метеорологічних факторів, зокрема температури, вологості, барометричного тиску та конденсації водяної пари, як основних параметрів змінення мікроклімату у глибоких шахтах.

**Практична значимість.** Розроблення методу математичного моделювання теплообмінних процесів під час руху повітря в гірничих виробках, що дозволяє регулювати тепловий режим у глибоких рудних шахтах.

**Ключові слова:** гірничі виробки, мікроклімат, моделювання, теплообмін, конденсація, температура, тепловий режим

**Purpose.** Prognosis of microclimate normalization processes in the air-supply mine workings of deep ore mines through the creation of mathematical model.

**Methodology.** Scientific analysis and synthesis of previously executed theoretical and experimental studies on issues of microclimate normalization during underground mining of ore deposits; theoretical researches and mathematical simulation of heat-exchange processes in the air-supply workings of mines; use of fundamental principles of physics, aerodynamic and hydrodynamics, which are necessary for development of the ways of regulation the thermal regime in the deep ore mines.

**Findings.** The necessity of the microclimate normalization processes mathematical simulation using modern computer technology was justified. We have analyzed the known methods of mathematical simula-

tion of heat-exchange processes in deep ore mines workings. Mathematical model of the microclimate normalization processes occurring at air motion in mine workings was constructed. It allows us to predict the state of the thermal regime with a view of its subsequent regulation.

**Originality.** The use of meteorological factors, including temperature, humidity, barometric pressure and water vapor condensation as the basic parameters of microclimate changes in deep mines.

**Practical value.** Creation of the method for mathematical simulation of heat-exchange processes occurring in the air that moves in mine workings, allowing us to adjust the thermal regime in the deep ore mines.

**Keywords:** *mine working, microclimate, modeling, heat-exchange, condensation, temperature, thermal regime*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук  
А.О. Гурінім. Дата надходження рукопису 21.07.13.*