УДК 622.788.36.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА В ЗОНЕ ГОРНЫХ РАБОТ

А.А.ЛАПШИН, *д-р. техн. наук, доцент, alexandr.lapshin-ua@yandex.ru*
Криворожский национальный университет, Украина

Статья посвящена решению актуальной проблемы нормализации микроклимата в глубоких железорудных шахтах Кривбасса и Запорожского железорудного комбината (ЗЖРК). Исследования теплообменных процессов в горных выработках глубоких рудных шахт Кривбасса и ЗЖРК засвидетельствовали значительное изменение температуры воздуха. Причем, как правило, в зоне горных работ температура воздуха превышает допустимые значения 26 °С и на глубинах 1200-1500 м достигает 28-30 °С.

Представлен способ нормализации тепловых условий в зоне горных работ за счет его охлаждения в камере орошения. Приведены математические модели теплообменных процессов камеры орошения, позволяющие путем имитационного моделирования устанавливать тепловые режимы, соответствующие санитарно-гигиеническим нормам ведения горных работ в условиях глубоких железорудных шахт.

***Ключевые слова*:** зона горных работ, камера орошения, моделирование, теплообмен, воздух, температура.

Анализ результатов обследования теплообменных процессов при прохождении рудничного воздуха по горным выработкам глубоких рудных шахт Кривбасса и Запорожского железорудного комбината показал, что в зоне горных работ температура воздуха превышает допустимые значения (26 °С) и на глубинах 1200-1500 м достигает 28-30 °С. В качестве одного из возможных способов нормализации микроклимата предложено кондиционирование рудничного воздуха непосредственно в зоне горных работ с охлаждением его в подземной камере орошения, расположенной в зоне горных работ (рис.1) [5].

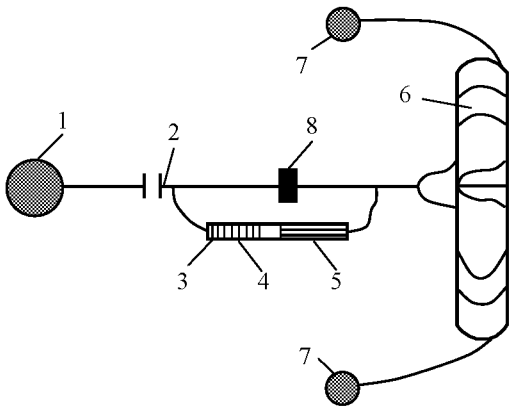


Рис.1. Схема охлаждения рудничного воздуха в подземной камере орошения, расположенной в зоне горных работ

Согласно представленной схеме воздух поступает в шахту по стволу 1, затем по главному квершлагу 2 направляется в камеру орошения 3, расположенную в зоне горных работ 6, где происходит его охлаждение с помощью оросительных форсунок 4 и конденсатора 5. После проветривания зоны горных работ воздух выходит из шахты по вентиляционным стволам 7. Регулирование расхода воздуха в камере орошения 3 осуществляется с помощью автоматически действующей перемычки 8.

Математическое моделирование охлаждения можно представить в виде уравнений, которые характеризуют изменение температуры потока воздуха во времени, обусловленное, во-первых, движением потока, а, во-вторых, теплопередачей. При этом целесообразно с учетом особенностей протекания процесса «мокрого» охлаждения воздуха принять структуры потоков теплоносителей (воздуха и воды) в виде модели идеального перемешивания. Тогда уравнения, описывающие этот температурный режим, соответствуют тепло-

обменнику, математическая модель которого представляет собой неоднородную систему двух линейных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами

$$c_1\gamma_1 V_1 \frac{dt_1}{d\tau} = c_1\gamma_1 Q_1(t_{1н} - t_1) - kS(t_1 - t_2);$$

$$c_2\gamma_2 V_2 \frac{dt_2}{d\tau} = c_2\gamma_2 Q_2(t_{2н} - t_2) + kS(t_1 - t_2), \quad (1)$$

где V_1 и V_2 – объем, который занимают соответственно воздух и вода в камере орошения, м^3; c_1 и c_2 – удельная теплоемкость воздуха и воды соответственно, Дж/(кг·К); γ_1 и γ_2 – плотность воздуха и воды, соответственно, кг/м^3; Q_1 и Q_2 – объемный расход воздуха и воды соответственно, м^3/с; $t_{1н}$ и $t_{2н}$, – начальная температура воздуха и воды соответственно, °C; t_1 и t_2 – температура воздуха и воды, °C; S – площадь поверхности воды, контактирующей с воздухом, м^2; k – коэффициент теплопередачи от воздуха к воде, Вт/(м^2·К).

Для однозначности решения должны выполняться начальные условия

$$t_1(\tau = 0) = t_{1н}, \quad t_2(\tau = 0) = t_{2н}. \quad (2)$$

Принимая во внимание, что рассматривается охлаждение воздуха, не насыщенного водяными парами, необходимо выделить диапазон температур, в котором охлаждение воздуха будет происходить без изменения агрегатного состояния водяных паров, входящих в него. С этой целью необходимо найти температуру воздуха, которая соответствует точке росы,

$$t_{1р} = t_{1н} + 18{,}52 \ln \varphi_н, \quad (3)$$

где $\varphi_н$ – начальная относительная влажность воздуха, поступающего в оросительную камеру.

Таким образом, формула (3) определяет граничное значение температуры воздуха, до которой происходит охлаждение воздуха без выпадения из него влаги. Площадь поверхности воды, которая контактирует с охлаждаемым воздухом,

$$S = N_к S_к, \quad (4)$$

где $S_к$ – площадь поверхности капли, м^2; $N_к$ – число капель, содержащихся в охлаждающей воде камеры орошения.

Объем, который занимает охлаждающая вода в камере орошения,

$$V_2 = V_0 \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2}, \quad (5)$$

где V_0 – объем камеры орошения, м^3.

Число капель

$$N_k = V_2 / V_к, \quad (6)$$

где $V_к$ – объем капли, м^3.

Если капля имеет сферическую форму, то

$$S_к = 4\pi R^2, \quad V_к = \frac{4}{3}\pi R^3, \quad (7)$$

где R – радиус капли воды, м.

С учетом (4)-(7) можно записать

$$S = 3\frac{V_0}{R}\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2}. \tag{8}$$

Принимая во внимание, что $V_1 = V_0\dfrac{Q_1}{Q_1 + Q_2}$, систему дифференциальных уравнений (1) можно записать в виде

$$\frac{dt_1}{d\tau} = b_0(t_{1н} - t_1) - b_1(t_1 - t_2);$$

$$\frac{dt_2}{d\tau} = b_0(t_{2н} - t_2) + b_2(t_1 - t_2), \tag{9}$$

где $b_0 = \dfrac{Q_1 + Q_2}{V_0}$, $b_1 = \dfrac{3kQ_2}{c_1\gamma_1 Q_1 R}$, $b_2 = \dfrac{3k}{c_2\gamma_2 R}$.

Для решения системы (9) целесообразно перейти к отклонениям температур от начальных значений:

$$\theta_1 = t_{1н} - t_1; \quad \theta_2 = t_{2н} - t_2; \quad \theta_н = t_{1н} - t_{2н}. \tag{10}$$

Тогда

$$t_1 - t_2 = \theta_2 - \theta_1 + \theta_н. \tag{11}$$

Подставляя (1θ) и (11) в систему дифференциальных уравнений (9), получим

$$\frac{d\theta_1}{d\tau} = -a_1\theta_1 + b_1\theta_2 + b_1\theta_н; \tag{12}$$

$$\frac{d\theta_2}{d\tau} = b_2\theta_1 - a_2\theta_2 - b_2\theta_н,$$

где $a_i = b_0 + b_i$, $i = 1,2$.

Начальные условия (2) принимают вид

$$\theta_1(\tau = 0) = 0; \quad \theta_2(\tau = 0) = 0. \tag{13}$$

Решение системы дифференциальных уравнений (12) находится путем сведения его к дифференциальному уравнению второго порядка [4]. Для этого продифференцируем первое уравнение системы (11):

$$\frac{d^2\theta_1}{d\tau^2} = -b_1\frac{d\theta_1}{d\tau} + b_1\frac{d\theta_2}{d\tau}.$$

Далее подставим в это уравнение производную из второго уравнения:

$$\frac{d^2\theta_1}{d\tau^2} = -a_1\frac{d\theta_1}{d\tau} + b_1(b_2\theta_1 - a_2\theta_2 - b_2\theta_н).$$

И, наконец, подставим сюда θ_2 из первого уравнения системы (12), что после перегруппировки даст неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами

$$\frac{d^2\theta_1}{d\tau^2} + (a_1 + a_2)\frac{d\theta_1}{d\tau} + (a_1a_2 - b_1b_2)\theta_1 = b_0b_1\theta_н. \tag{14}$$

Решение этого уравнения будем искать в виде суммы общего решения однородного уравнения

$$\frac{d^2\theta_1}{d\tau^2}+(A_1+A_2)\frac{d\theta_1}{d\tau}+(A_1A_2-B_1B_2)\theta_1=0 \qquad (15)$$

и частного решения неоднородного уравнения (14), т.е.

$$\theta_1=\theta_0+\tilde{\theta}. \qquad (16)$$

Для нахождения общего решения уравнения (15) запишем его характеристическое уравнение

$$k^2+(a_1+a_2)k+(a_1a_2-b_1b_2)=0. \qquad (17)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$k_{1,2}=\frac{-(a_1+a_2)\pm\sqrt{D}}{2},$$

где $D=(a_1+a_2)^2-4(a_1a_2-b_1b_2)=(a_1-a_2)^2+4b_1b_2=(b_1+b_2)^2$.

Тогда

$$k_{1,2}=\frac{-(a_1+a_2)\pm(b_1+b_2)}{2}=\frac{-(2b_0+b_1+b_2)\pm(b_1+b_2)}{2}. \qquad (18)$$

Из (18) получим $k_1=-b_0$; $k_2=-b_0-b_1-b_2$.

Согласно найденным корням характеристического уравнения (17), общее решение уравнения (15) имеет вид

$$\theta_0=C_1e^{-b_0\cdot\tau}+C_2e^{-(b_0+b_1+b_2)\tau}, \qquad (19)$$

где C_1 и C_2 – произвольные постоянные.

Частное решение (16) ищем в виде

$$\tilde{\theta}=C\,(C=\text{const}). \qquad (20)$$

Подставим (20) в (14), запишем

$$(b_0+b_1+b_2)C=b_1\theta_н.$$

Откуда частное решение уравнения (14)

$$C=\frac{b_1}{b_0+b_1+b_2}\theta_н.$$

Таким образом, общее решение уравнения (14) имеет вид

$$\theta_1=C_1e^{-b_0\cdot\tau}+c_2e^{-(b_0+b_1+b_2)\cdot\tau}+\frac{b_1}{b_0+b_1+b_2}\theta_н. \qquad (21)$$

Для нахождения второго решения θ_2 системы (12) воспользуемся первым уравнением $\theta_2=\frac{1}{b_1}(\frac{d\theta_1}{d\tau}+a_1\theta_1)-\theta_н$ и с учетом (21) получим

$$\theta_2=C_1e^{-b_0\tau}-C_2\frac{b_2}{b_1}e^{-(b_0+b_1+b_2)\tau}-\frac{b_2}{b_0+b_1+b_2}\theta_н. \qquad (22)$$

Для нахождения произвольных постоянных величин, которые содержатся в решениях (21) и (22), воспользуемся начальными условиями (13):

$$C_1 + C_2 + \frac{b_1}{b_0 + b_1 + b_2}\theta_н = 0;$$

$$C_1 + C_2 + \frac{b_1}{b_0 + b_1 + b_2}\theta_н = 0. \qquad (23)$$

Решая систему линейных алгебраических уравнений (23), относительно произвольных постоянных величин, находим

$$C_1 = 0; \quad C_2 = -\frac{b_1}{b_0 + b_1 + b_2}\theta_н. \qquad (24)$$

Подставим найденные постоянные величины (24) в общие решения (21) и (22). Тогда

$$\theta_1 = \theta_н \frac{b_1}{b_0 + b_1 + b_2}(1 - e^{-(b_0+b_1+b_2)\tau}); \qquad (25)$$

$$\theta_2 = -\theta_н \frac{b_2}{b_0 + b_1 + b_2}(1 - e^{-(b_0+b_1+b_2)\tau}).$$

Учитывая замену (10), окончательно запишем формулы для расчета температур воздуха и воды, если температура точки росы не достигается:

$$t_1 = t_{1н} - (t_{1н} - t_{2н})\frac{b_1}{b_0 + b_1 + b_2}(1 - e^{-(b_0+b_1+b_2)\tau}); \qquad (26)$$

$$t_2 = t_{2н} + (t_{1н} - t_{2н})\frac{b_2}{b_0 + b_1 + b_2}(1 - e^{-(b_0+b_1+b_2)\tau}).$$

Формулы (26) описывают изменения температуры воздуха и воды как теплоносителей в камере орошения. Однако необходимо отметить, что охлаждение воздуха, как и нагревание воды, происходит в течение времени пребывания в оросительной камере [1]. Время пребывания воздуха и воды в оросительной камере

$$\tau_0 = V_0 / Q_1 + Q_2. \qquad (27)$$

Тогда, учитывая размерности, можно обозначить

$$b_0 = \frac{1}{\tau_0}; \quad b_1 = \frac{1}{\tau_1}; \quad b_2 = \frac{1}{\tau_2}, \qquad (28)$$

где τ_1, τ_2 – параметры, имеющие размерность времени, с.

Параметры, введенные согласно (28), являются характеристиками времени, связанного с теплопередачей в оросительной камере. Тогда формула

$$b = b_0 + b_1 + b_2 = \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \qquad (29)$$

определяет величину, которую можно назвать постоянной охлаждения оросительной камеры. С другой стороны, формула (29) показывает, что три фактора, характеризуемые параметрами τ_0, τ_1 и τ_2, действуют одновременно. Величина, обратная (29),

$$\overline{\tau} = \frac{1}{\frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}}, \tag{30}$$

является характеристикой оросительной камеры, связанной со временем охлаждения в ней воздуха [2].

С учетом (29) решения (30) примут вид

$$t_1 = t_{1н} - (t_{1н} - t_{2н})\frac{b_1}{b}(1 - e^{-b\tau}),$$

$$t_2 = t_{2н} + (t_{1н} - t_{2н})\frac{b_2}{b}(1 - e^{-b\tau}). \tag{31}$$

Вместе с тем, учитывая, что рассматривается охлаждение ненасыщенного воздуха, должно выполняться условие того, что температура воздуха, рассчитываемая по формуле (31), будет выше точки росы. Таким образом, для расчета конечной температуры воздуха необходимо пользоваться условием

$$\tau \geq \tau_р, \tag{32}$$

где $\tau_р$ – время достижения температуры точки росы, с,

$$\tau_р = -b^{-1}\ln\left(1 - \left(\frac{t_{1н} - t_{1р}}{t_{1н} - t_{2н}}\frac{b}{b_1}\right)\right). \tag{33}$$

В случае, когда при охлаждении воздуха достигается температура ниже точки росы, происходит конденсация водяных паров из воздуха, что приводит к изменению параметров воздуха и воды. Принимая структуры потоков воздуха и воды в виде модели «идеального перемешивания», математическую модель для случая насыщенного парами воды воздуха можно записать в виде системы двух дифференциальных уравнений первого порядка ($\tau_р \leq \tau$):

$$c_1\gamma_1 V_1\frac{dt_1}{d\tau} = -r\gamma_1 Q_1\left[d(t_{1р}) - d(t_1)\right] + c_1\gamma_1 Q_1(t_{1р} - t_1) - kS(t_1 - t_2); \tag{34}$$

$$c_2\gamma_2 V_2\frac{dt_2}{d\tau} = c_2\gamma_2 Q_2\left[t_2(\tau_р) - t_2\right] + kS(t_1 - t_2),$$

где r – теплота парообразования, Дж/кг; $t_2(\tau_р)$ – температура охлаждающей воды при температуре воздуха, равной температуре точки росы $t_р$, °С.

Из решений (31) путем подстановки ($\tau = \tau_р$) и последующего деления второго уравнения на первое, находим

$$t_2(\tau_р) = (t_{1н} - t_{1р})\frac{b_2}{b_1}. \tag{35}$$

С учетом (35) система (34) может быть записана в виде

$$c_1\gamma_1 V_1\frac{dt_1}{d\tau} = \gamma_1 Q_1(c_1 - \mu r)(t_{1р} - t_1) - kS(t_1 - t_2);$$

$$c_2\gamma_2 V_2\frac{dt_2}{d\tau} = c_2\gamma_2 Q_2(t_{2н} + (t_{1н} - t_{1р})\frac{b_2}{b_1} - t_2) + kS(t_1 - t_2). \tag{36}$$

В результате получаем систему двух линейных дифференциальных уравнений первого порядка (36) [3]. Для получения однозначного решения необходимо добавить начальные условия

$$t_1(\tau_р) = t_р; \quad t_2(\tau_р) = t_{2н} + (t_{1н} - t_{1р})\frac{b_2}{b_1}. \tag{37}$$

Для удобства решения представим систему (36) в виде

$$\frac{dt_1}{d\tau} = b_0(1 - \frac{\mu r}{c_1})(t_{1р} - t_1) - b_1(t_1 - t_2); \tag{38}$$

$$\frac{dt_2}{d\tau} = b_0\left[t_{2н} + (t_{1н} - t_{1р})\frac{b_2}{b_1} - t_2\right] + b_2(t_1 - t_2).$$

Произведем замену переменных

$$\theta_1 = t_{1р} - t_1,\ \theta_2 = t_{2н} + (t_{1н} - t_{1р})\frac{b_2}{b_1} - t_2;\ \theta_н = t_{1р} - t_{2н} - (t_{1н} - t_{1р})\frac{b_2}{b_1}.$$

Тогда система уравнений (38) примет вид

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_1}{d\tau} &= -(b_0(1-\frac{\mu r}{c_1}) + b_1)\theta_1 + b_1\theta_2 + b_1\theta_н; \\ \frac{d\theta_2}{d\tau} &= b_2\theta_1 - (b_0 + b_2)\theta_2 - b_2\theta_н \end{aligned} \tag{39}$$

при начальных условиях

$$\theta_1(\tau = \tau_р) = 0; \quad \theta_2(\tau = \tau_р) = 0. \tag{40}$$

Решение системы дифференциальных уравнений (39) находится путем сведения его к дифференциальному уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2\theta_1}{d\tau^2} + \left[b_0(2 - \frac{\mu r}{c_1}) + b_1 + b_2\right]\frac{d\theta_1}{d\tau} + b_0\left[(1 - \frac{\mu r}{c_1})(b_0 + b_2) + b_1\right]\theta_1 = b_0 b_1 \theta_н. \tag{41}$$

Решение уравнения (41) будем искать в виде $\theta_1 = \theta_0 + \tilde{\theta}$, где $\theta_о$ – общее решение однородного уравнения; $\tilde{\theta}$ – частное решение неоднородного уравнения (41). Имеем

$$\frac{d^2\theta_1}{d\tau^2} + \left[b_0(2 - \frac{\mu r}{c_1}) + b_1 + b_2\right]\frac{d\theta_1}{d\tau} + b_0\left[(1 - \frac{\mu r}{c_1})(b_0 + b_2) + b_1\right]\theta_1 = 0. \tag{42}$$

Для нахождения $\theta_о$ составим характеристическое уравнение

$$k^2 + \left[b_0(2 - \frac{\mu r}{c_1}) + b_1 + b_2\right]k + b_0\left[(1 - \frac{\mu r}{c_1})(b_0 + b_2) + b_1\right] = 0. \tag{43}$$

Корни этого уравнения найдем как решение квадратного уравнения

$$k_{1,2} = 0{,}5(a \pm \sqrt{D}), \tag{44}$$

где $a = b_0\frac{\mu r}{c_1} - b_1 - b_2$, $D = (-b_0\frac{\mu r}{c_1} + b_1 - b_2)^2 + 4b_1b_2$.

Учитывая, что корни (44) действительные и различные, общее решение уравнения (42) может быть записано в виде

$$\theta_0 = C_1 e^{k_1 \tau} + C_2 e^{k_2 \tau}, \tag{45}$$

где C_1 и C_2 – произвольные постоянные.

Частное решение уравнения (41) ищем в виде постоянной функции $\widetilde{\theta} = C$, что дает

$$\widetilde{\theta} = \theta_н \frac{b_1}{\left(1 - \frac{\mu r}{c_1}\right)(b_0 + b_2) + b_1}. \tag{46}$$

Тогда общее решение уравнения (45)

$$\theta_1 = C_1 e^{k_1 \tau} + C_2 e^{k_2 \tau} + \theta_н \frac{b_1}{\left(1 - \frac{\mu r}{c_1}\right)(b_0 + b_2) + b_1}. \tag{47}$$

Из первого уравнения системы (39) находим

$$\theta_2 = \frac{1}{b_1}\left(\frac{d\,\theta_1}{d\tau} + \left(b_0\left(1 - \frac{\mu r}{c_1}\right) + b_1\right)\theta_1 - b_1\theta_н\right). \tag{48}$$

Подставим (47) в (48), тогда

$$\theta_2 = \frac{a - \sqrt{D}}{2b_1} C_1 e^{k_1 \tau} + \frac{a + \sqrt{D}}{2b_1} C_2 e^{k_2 \tau} - \theta_н \frac{\left(1 - \frac{\mu r}{c_1}\right) b_2}{\left(1 - \frac{\mu r}{c_1}\right)(b_0 + b_2) + b_1}. \tag{50}$$

Для нахождения произвольных постоянных величин, входящих в решения (47) и (49), необходимо воспользоваться начальными условиями (40). Подставляя (47) и (49) в (40), получим систему двух линейных алгебраических уравнений относительно C_1 и C_2:

$$C_1 e^{k_1 \tau_p} + C_2 e^{k_2 \tau_p} = -\theta_н \frac{b_1}{\left(1 - \frac{\mu r}{c_1}\right)(b_0 + b_2) + b_1}; \tag{49}$$

$$C_1 \frac{a - \sqrt{D}}{2b_1} e^{k_1 \tau_p} + C_2 \frac{a + \sqrt{D}}{2b_1} e^{k_2 \tau_p} = \theta_н \frac{\left(1 - \frac{\mu r}{c_1}\right) b_2}{\left(1 - \frac{\mu r}{c_1}\right)(b_0 + b_2) + b_1}.$$

Решая систему (50), запишем

$$C_1 = -\theta_н \frac{b_1}{2\sqrt{D}} \frac{-b_0 \frac{\mu r}{c_1} + b_1 + \left(1 - \frac{2\mu r}{c_1}\right) b_2 + \sqrt{D}}{\left(1 - \frac{\mu r}{c_1}\right)(b_0 + b_2) + b_1} e^{-k_1 \tau_p},$$

$$C_2 = \theta_н \frac{b_1}{2\sqrt{D}} \frac{-b_0 \frac{\mu r}{c_1} + b_1 + \left(1 - \frac{2\mu r}{c_1}\right) b_2 - \sqrt{D}}{\left(1 - \frac{\mu r}{c_1}\right)(b_0 + b_2) + b_1} e^{-k_2 \tau_p}.$$

Подставляя C_1 и C_2 в (47) и (49), найдем

$$\theta_1 = \theta_н \frac{b_1}{\left(1-\frac{\mu r}{c_1}\right)(b_0+b_2)+b_1}\left[\frac{1}{2\sqrt{D}}\left(a+\frac{2\mu r}{c_1}b_2-\sqrt{D}\right)\right]e^{k_1(\tau-\tau_р)} - \left(a+\frac{2\mu r}{c_1}b_2+\sqrt{D}\right)e^{k_2(\tau-\tau_р)}+1; \quad (51)$$

$$0_2 = \frac{\theta_н}{(1-\frac{\mu r}{c_1})(b_0+b_2)+b_1}\left[\frac{1}{4\sqrt{D}}(a+2b_2+\sqrt{D})(a+2(\frac{\mu r}{c_1}-1)b_2+\sqrt{D}\right]e^{k_1(\tau-\tau_p)} +$$

$$+(a+2b_2+\sqrt{D})\left[a+2\left(\frac{\mu r}{c_1}-1\right)b_2-\sqrt{D}\right]e^{k_2(\tau-\tau_p)} - \left(1-\frac{\mu r}{c_1}\right)b_2. \quad (52)$$

В дальнейшем для удобства исследования температуры воздуха на выходе из камеры орошения целесообразно представить формулы (25) и (51) в безразмерном виде

$$\theta'_{1к} = \frac{b'_1}{1+b'_1+b'_2}\left(1-e^{-(1+b'_1+b'_2)}\right); \quad (53)$$

$$\theta''_{1к} = \frac{b'_1}{\left(1-\frac{\mu r}{c_1}\right)(1+b'_2)+b'_1}\left(\frac{1}{2\sqrt{D'}}(a'-\sqrt{D'})e^{k'_1(1-\tau'_p)} - (a'+\sqrt{D'})e^{k'_2(1-\tau'_p)}\right)+1, \quad (54)$$

где

$$b'_1=\frac{b_1}{b_0};\ b'_2=\frac{b_2}{b_0};\ \tau'_1=\frac{1}{b'_1};\ \tau'_2=\frac{1}{b'_2};\ \theta'_{1k}=\frac{\theta_{1k}}{\theta_н};\ \theta''_{1k}=\frac{\theta_{1pk}}{\theta_{1н}};\ \theta_{1рк}=t_p-t_{1к};\ a'=\frac{a}{b_0};$$

$$k'_{1,2}=0{,}5\left(\frac{\mu r}{c_1}-b'_1-b'_2\pm\sqrt{D'}\right);\ D'=\left(-\frac{\mu r}{c_1}+b'_1-b'_2\right)^2+4b'_1b'_2;$$

$$\tau'_p=-\ln\left(1-\frac{\theta'_{1p}}{\mu b'_1(1+\mu b'_1+b'_2)}\right)\frac{1}{1+\mu b'_1+b'_2}.$$

На рис.2 представлены результаты расчетов безразмерных температур по формулам (53) и (54) при заданном сочетании параметров (φ = 0,8; $t_{1н}$ = 20 °С; $t_{2н}$ = 10 °С). В формуле (53) принято $b'_2=4;\ b'_2=2;\ b'_2=1\frac{1}{3}$ (кривые 1, 2 и 3 соответственно), а в формуле (54) – $b'_1=4;\ b'_1=2;\ b'_1=1\frac{1}{3}$ (кривые 1, 2 и 3 соответственно).

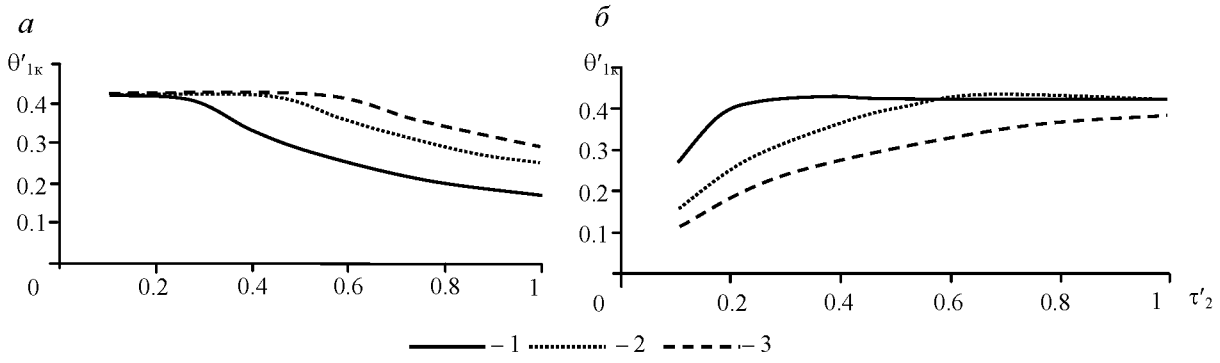


Рис.2. Результаты расчетов по формулам: *а* и б – соответственно по формулам (53) и (54)

Анализ графиков рис.2, *а* показывает, что при увеличении относительного времени теплопередачи от охлаждаемого воздуха к воде относительная температура воздуха падает, причем при возрастании относительного времени теплопередачи от воды к воздуху падение относительной температуры уменьшается. В свою очередь, анализ графиков рис.2, *б* показывает, что при увеличении относительного времени теплопередачи от воды к воздуху относительная температура воздуха растет, причем при возрастании относительного времени теплопередачи от воздуха к воде наблюдается уменьшение относительной температуры. Изменение характера кривых на представленных рисунках (в частности изменение интенсивности охлаждения) объясняется достижением охлаждаемым воздухом температуры точки росы.

Использование математических моделей теплообменных процессов камеры орошения с учетом изменения агрегатного состояния водяных паров, находящихся в рудничном воздухе, позволяет путем имитационного моделирования устанавливать такие тепловые режимы в выработках, которые соответствуют санитарно-гигиеническим нормам ведения горных работ в условиях глубоких железорудных шахт.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Михеев М.А.* Основы теплопередачи / М.А.Михеев, И.М.Михеева. М., 1977. 343 с.
2. *Повх И.Л.* Техническая гидромеханика. Л., 1969. 524 с.
3. *Понтрягин Л.С.* Обыкновенные дифференциальные уравнения. М., 1982. 391 с.
4. *Самарский А.А.* Вычислительный эксперимент / А.А.Самарский, Ю.П.Попов. М., 1988. 279 с.
5. *Щербань А.Н.* Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт / А.Н.Щербань, О.А.Кремнев. Киев, 1960. Т.1. 345 с.

REFERENCES

1. *Mikheev M.A., Mikheeva I.M.* Osnovy teploperedachi (*Fundamentals of heat transfer*). Moscow, 1977, p.343.
2. *Povkh I.L.* Tekhnicheskaya gidromekhanika (*Technical hydromechanics*). Leningrad, 1969, p.524.
3. *Pontryagin L.S.* Obyknovennye differentsial'nye uravneniya (*Ordinary differential equations*). Moscow, 1982, p.391.
4. *Samarskii A.A., Popov Yu.P.* Vychislitel'nyi eksperiment (*Computational experiment*). Moscow, 1988, p.279.
5. *Shcherban' A.N., Kremnev O.A.* Nauchnye osnovy rascheta i regulirovaniya teplovogo rezhima glubokikh shakht (*Scientific bases of calculation and control of the thermal regime of deep mines*). Kiev, 1960. Vol.1, p.345

MATHEMATICAL MODELING OF MINE AIR CONDITIONING IN THE ZONE OF MINE WORKS

A.A.LAPSHIN, *Dr. in Engineering Sciences, Associate Professor, alexandr.lapshin-ua@yandex.ru*
National University of Krivoy Rog, Ukraine

The article addresses the topical problem of normalizing the microclimate in the deep ore mines of the Krivbas and Zaporozhsky iron ore mines. Studies of heat exchange processes in the mine workings of the deep ore mines of Krivbas and Zaporozhsky iron ore have shown considerable changes in air temperature. Moreover, as a rule, in the zone of mining works, the air temperature exceeds the permissible values of 26 °C, and at depths of 1200-1500 m reaches 28-30 °C.

A method of normalization of the thermal conditions in the zone of mining works due to cooling in the irrigation chamber is presented. A mathematical model of heat exchange processes in the irrigation chamber, which allows, by simulation modeling, to establish thermal regimes corresponding to the sanitary and hygienic norms of mining operations in the conditions of deep iron ore mines, is presented.

Key words: zone mining works, irrigation chamber, modeling, heat exchange, air, temperature.