



МЕТОД РАСЧЕТА ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА

Ш. И. Ониани

Руководитель лаборатории горной теплофизики; Институт горной механики имени Г. А. Цулукидзе Академия Наук Грузинской ССР, Тбилиси, СССР

О. А. Ланчава, С. Л. Болквадзе

Научные сотрудники той же лаборатории

В связи с освоением глубоких горизонтов шахт и рудников возникла проблема прогноза и регулирования тепловлажностных параметров вентиляционной струи, которая остается актуальной по сей день. Для оптимального решения вопросов тепловлажностного кондиционирования рудничного воздуха необходимо дальнейшее развитие и уточнение методов прогнозирования климатических условий глубоких шахт.

Теоретические основы горной теплофизики были созданы авторами работ /1-4/, которые в последствии были развиты в работах /5-9/. Заметим предварительно, что все методы базируются на решениях уравнений теплового баланса. Авторы работ /5, 7/ справедливо отмечают о несостоятельности существования расчетных зависимостей для вертикальных, наклонных, горизонтальных, очистных выработок, а также их дифференциации в зависимости от времени проветривания.

Здесь же необходимо заметить, что наличие и значимость тех или иных факторов, влияющих на процесс теплообмена между горным массивом и рудничным воздухом не должны служить поводом для создания множества расчетных методик, ибо физическая модель процесса является общей для любых горных выработок. Поэтому, горные выработки, с точки зрения методов определения тепловлажностных параметров вентиляционной струи, следует различать только по условиям проветривания. Следовательно, принципиально должны лишь различаться методы расчета для тупиковых выработок и для выработок, проветриваемых сквозной струей.

Влияние массообмена на тепловые процессы в шахтах всегда считалось существенным, однако разными авторами оно учитывалось по разному и не всегда корректно, чаще всего эмпирически. Исключение составляют лишь работы /6,7,8/. В работах /6,7/ решено дифференциальное уравнение теплового баланса, где влагосодержание рудничного воздуха принято в виде полного дифференциала от координаты и температуры. Однако, в расчетных формулах фигурируют экспериментальные значения относительной влажности по длине выработки, что фактически сужает область применения предложенных методов и лишает их признак общности.

В работе /8/ впервые решены дифференциальные уравнения теплового и материального балансов, в результате получены расчетные формулы для определения температуры и потенциала массопереноса рудничного воздуха. Однако, формулы эти

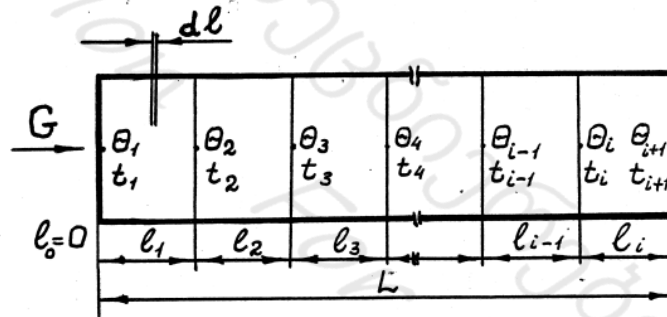
являются весьма громоздкими и справедливы лишь при соблюдении условия $\alpha = \alpha_m$, поэтому их практическое применение ограничено и связано с определенными неудобствами.

Для элементарной длины dl (рисунок) горной выработки, проветриваемой сквозной струей, энергетический и массовый балансы имеют вид

$$G c_p dt + G z dx = k_{\tau} U (t_0 \pm \sigma l \sin \psi - t) dl - k_{\tau} U_{\tau} (t_{\tau} - t) dl \pm \frac{G l \sin \psi}{427} dl + \frac{\sum Q_m}{k} dl + q_0 U dl, \quad (I)$$

$$G c_m d\theta = k_{\tau m} U (\theta - \theta_0) dl + \frac{\sum W_m}{L} dl, \quad (2)$$

где G - масса рудничного воздуха, проходящего по выработке в единицу времени; c_p , c_m - изобарная теплоемкость и изотермическая массоемкость воздуха; dt , $d\theta$ - приращения температуры и потенциала массопереноса воздуха в результате теплообмена; $-$ удельная теплота фазового перехода вода-пар; dx - приращение влагосодержания воздуха;



Принципиальная схема к расчету климатических параметров воздуха в цепи горных выработок

K_{τ} , $K_{\tau m}$ - коэффициенты нестационарного тепло- и массо- обмена; U - периметр горной выработки; t_0 , θ_0 - естественная температура и естественный потенциал массопереноса горного массива; σ - геотермический градиент; ψ - угол наклона выработки; t , θ - температура и потенциал массопереноса воздушной струи; K_{τ} - коэффициент теплопередачи трубопровода, расположенного в выработке; U_{τ} - периметр трубопровода; t_{τ} - средняя температура потока жидкости в трубопроводе; $\sum Q_m$, $\sum W_m$ - сумма тепловыделений и массовыделений от местных источников, к которым в данном случае отнесена и массоотдача от свободной поверхности шахтной воды; L - длина цепи горных выработок; q_0 - удельное тепловыделение от окислительных процессов.

Условия однозначности

$$\tau > 0, l = l_{i-1}, t = t_i, \theta = \theta_i, \quad (3)$$

где τ – время протекания процесса;

$$i = 1, 2, 3, \dots, n.$$

После несложных преобразований уравнения (1) и (2) соответственно принимают вид

$$\frac{dt + \frac{z}{c_p} dx}{M - \pi t \pm \kappa} = d\ell, \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{A(\theta_0 - \theta) + B} = d\ell, \quad (5)$$

где

$$M = \frac{1}{G c_p} \left(\kappa_{\tau} U t_0 + \kappa_{\tau} U_{\tau} t_{\tau} + \frac{\sum Q_m}{k} \right) + q_0 U;$$

$$\pi = \frac{1}{G c_p} (\kappa_{\tau} U + \kappa_{\tau} U_{\tau});$$

$$\kappa = \frac{\ell \sin \psi}{c_p} \left(\frac{\kappa_{\tau} U \theta}{G} + \frac{1}{427} \right);$$

$$A = \frac{\kappa_{\tau m} U}{G c_m};$$

$$B = \frac{\sum W_m}{k G c_m}.$$

Апроксимированная зависимость влагосодержания от относительной влажности, температуры и давления для шахтных условий имеет вид /10/

$$x = \frac{0,623 \varphi^n (t - \varepsilon)}{B - P_{cp}}, \quad (6)$$

где φ – относительная влажность воздуха;

n, ε – коэффициенты аппроксимаций;

B – барометрическое давление;

P_{cp} – среднее парциальное давление водяного пара.



Значения величин n , ε , P_{cp} в зависимости от пределов аппроксимации приведены в табл. 1.

Из определения химического потенциала массопереноса следует, что $\varphi = \exp \theta/RT$, где R - универсальная газовая постоянная; T - абсолютная температура. С учетом этого, уравнение (6) принимает вид

$$x = B_1 (t - \varepsilon) \exp \frac{\theta}{RT}, \quad (7)$$

где

$$B_1 = \frac{0,623 n}{B - P_{cp}}.$$

Подстановка полного дифференциала от x из формулы (7) в уравнение (4) с учетом (5), приводит к выражению

$$\left\{ 1 + B_1 \exp \left[\frac{\theta_0 + \frac{B}{A} - C \exp(-A\ell)}{RT} \right] \right\} x \times \left\{ 1 + \frac{\theta_0 + \frac{B}{A} - C \exp(-A\ell)}{RT^2} \right\} =$$

$$= \left\{ \frac{B_1 \varepsilon AC}{RT} \exp \left[\frac{\theta_0 + \frac{B}{A} - C \exp(-A\ell)}{RT} \right] \right\} x \times \exp(-A\ell) + (M - \pi t \pm K) \} d\ell,$$

которое не имеет решение, обеспечивающее приемлемую точность.

Поэтому в настоящей работе избран иной путь. Поскольку численное значение T (К) в данном случае примерно на порядок выше по сравнению с t (°C), допускается, что приращение температуры на расчетном участке не оказывает существенного влияния на значение θ , а ε для взятого интервала изменения температуры является величиной постоянной. Поэтому после подстановки dx из формулы (7) уравнение (4) принимает вид

$$\frac{1 \pm \frac{\varepsilon}{cp} B_1 \exp \frac{\theta}{RT}}{M - \pi t \pm K} dt = d\ell. \quad (8)$$

Таблица I

Интервал изменения температуры	n	ϵ	$P_{\text{ср}}, \text{Па}$
0 - 15	71,3	-7,48	1065,8
5 - 20	95,7	-3,06	1486,8
10 - 25	126,6	1,33	2052,6
15 - 30	165,8	5,72	2777,3
20 - 35	214,7	10,09	3736,8
25 - 40	275,3	14,45	4973,7
30 - 45	349,3	18,79	6539,5
35 - 50	438,2	23,06	8513,1

Общие интегралы выражений (5) и (8) соответственно имеют

$$\theta = \theta_0 + \frac{B}{A} - C e^{-A\ell}, \quad (9)$$

$$\frac{1 + \frac{\alpha}{c_p} b_1 \exp \frac{\theta}{RT}}{n} \ln |M - \Pi t \pm K| = \ell + C. \quad (10)$$

С учетом условий однозначности и после введения обозначения

$$\mathcal{H}_{i, i+1} = \frac{\Pi}{1 + b_1 \frac{\alpha}{c_p} \exp \frac{\theta_{i+1, i}}{RT_{i, i+1}}} \quad (11)$$

получаются зависимости для определения потенциала массопереноса и температуры рудничного воздуха при прямом тепловом расчете

$$\theta_{i+1} = \theta_0 + \frac{B}{A} - (\theta_0 + \frac{B}{A} - \theta_i) e^{-A(\ell_i - \ell_{i-1})}, \quad (12)$$

$$t_{i+1} = \frac{M \pm K}{\Pi} - \left(\frac{M \pm K}{\Pi} - t_i \right) e^{-\mathcal{H}_i (\ell_i - \ell_{i-1})}. \quad (13)$$

Для обратного расчета эти формулы соответственно имеют вид

$$\theta_i = \theta_0 + \frac{B}{A} - (\theta_0 + \frac{B}{A} - \theta_{i+1}) e^{-A(\ell_{i-1} - \ell_i)}, \quad (14)$$

$$t_i = \frac{M \pm K}{\Pi} - \left(\frac{M \pm K}{\Pi} - t_{i+1} \right) e^{-\mathcal{H}_{i+1} (\ell_{i-1} - \ell_i)} \quad (15)$$



В формулах (13) и (14) знак "+" перед К относится случаю нисходящего движения, а знак "-" случаю восходящего движения воздуха.

Относительная влажность рудничного воздуха в i -той точке вычисляется по формуле

$$\varphi_i = e^{-\frac{\theta_i}{RT_i}} \quad (16)$$

Удобство практического применения предложенного метода рассмотрим на примере прямого расчета. Дело в том, что потенциал массопереноса воздуха является функцией двух переменных - температуры и относительной влажности? при вычислении потенциала по формуле (12) мы знаем лишь суммарное влияние этих двух переменных в виде θ_{i+1} . В отличие от других методов здесь для вычисления температуры по формуле (13) не требуется наличие значения относительной влажности в точке $(i+1)$, достаточно значение потенциала массопереноса в этой точке (т.е. знание суммарного эффекта φ и t) с помощью которого по формуле (II) вычисляется

$$\theta_i = \frac{\pi}{1 + \frac{z}{c_p} B_1 \exp \frac{\theta_{i+1}}{RT_i}}$$

затем, зная θ_{i+1} и T_{i+1} по формуле (16) можно вычислить значение относительной влажности в этой точке.

Таким образом, предложенный метод выгодно отличается от существующих и является общим для всех месторождений, поскольку в нем отсутствует необходимость применения предварительно определенных экспериментальных или иных значений относительной влажности воздуха.

Расчетные нами погрешности определений $\Delta\varphi$, обусловленные принятыми выше допущениями, для Ткибули-Шаорского и Ткварчельского каменноугольных месторождений, принимают значения, приведенные в табл. 2.

Из табл.2 следует, что даже в том случае, когда приращение температуры рудничного воздуха на расчетном участке достигает 5 градусов, погрешность определения приращений относительной влажности не превышает 10%. Следовательно, полученные с помощью предложенного метода конечные результаты будут достоверными для реальных шахтных условий.



Таблица 2

Приращение температуры воздуха на расчетном участке Δt , °C	Интервал изменения температуры, °C	Погрешность определения $\Delta \varphi$, %
1	10 - 40	2,9
2	10 - 40	4,8
3	10 - 40	6,8
4	10 - 40	8,5
5	10 - 40	10

ЛИТЕРАТУРА

1. Щербань А.Н. Основы теории и методы тепловых расчетов рудничного воздуха. М., Углетехиздат, 1953, стр.308.
2. Щербань А.Н., Кремнев О.А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт.; Том 1, Издательство АН УССР, Киев, 1959, стр. 430.
3. Щербань А. Н., Кремнев О.А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт. Том 2, Издательство АН УССР, Киев, 1960, стр.348.
4. Воропаев А.Ф. Управление тепловым режимом в глубоких шахтах. М., Госгортехиздат, 1961, стр.248.
5. Дядькин Ю. Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. М., Издательство Недр, 1968, стр.256.
6. Единая методика прогнозирования тепловых условий в угольных шахтах. Донбасс-Макеевка, Издательство МакНИИ, 1979, стр.196.
7. Кузин В.А., Хохотва Н.Н., Николаенко Л.В. Метод расчета тепловых условий в горных выработках глубоких шахт. В кн.: Охлаждение воздуха в угольных шахтах. Макеевка-Донбасс, Издательство МакНИИ, 1977.
8. Кремнев О.А., Дуравленко В.Я. Тепло- и массообмен в горном массиве и подземных сооружениях, Киев, Издательство Наукова думка, 1980, стр.384.
9. Медведев Б.И. Упрощенный метод теплового расчета цепи горных выработок. В кн.: Тепловые и механические процессы при разработке полезных ископаемых. М., 1965.
10. Свойства влажного воздуха при давлениях 500-100 мм.рт.ст., (авторы Щербань А.Н., Кремнев О.А., Титова Н.М.), М., Госгортехиздат, 1960.