

УДК 622.413
DOI 10.17513/use.38357

ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Попов В.И.

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Институт горного дела Севера имени Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, e-mail: popov.gtf@mail.ru

Целью работы является создание расчетной модели, адекватно описывающей процесс влагообмена между вентилируемым воздухом и поверхностью выработки с использованием функций равновесного содержания влаги в воздухе и окружающих породах. В первом случае можно говорить о кривой точек росы, в случае породного массива – о кривой содержания незамерзшей воды при отрицательных температурах. Представлена математическая модель процессов тепломассообмена влажного вентиляционного воздуха с поверхностью горной выработки криолитозоны с учетом конденсации паров влаги. Результаты решения по представленной математической модели получены методом конечных разностей. Конденсирующаяся на холодных стенках выработки влага, первоначально находящаяся в воздушной струе, существенно влияет на тепловой режим протяженной выработки. По мере прогрева стенок выработки за счет конвективного теплообмена и теплоты фазового превращения интенсивность процесса конденсации снижается. Циклический процесс увлажнения – иссушения поверхности выработки вкупе с морозным воздействием на нее может приводить к деградации поверхностного слоя. Результаты расчетов по представленной модели, основанной на учете функций равновесного содержания влаги в рудничной атмосфере и породном массиве, позволяют строить адекватные картины распределения влагосодержания и температуры в рудничном пространстве и окружающих породах.

Ключевые слова: конвективный теплообмен, математическое моделирование, конденсационные процессы, горная выработка, криолитозона

HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES DURING THE MOVEMENT OF HUMID AIR IN MINING WORKINGS OF THE PERMAFROST ZONE

Popov V.I.

Yakut Scientific Center of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, N.V. Cherskiy Institute of Mining of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: popov.gtf@mail.ru

The aim of the work is to create a computational model that adequately describes the process of moisture exchange between the ventilated air and the surface of the mine using the functions of the equilibrium moisture content in the air and surrounding rocks. In the first case, we can talk about the curve of dew points, in the case of a rock mass, about the curve of the content of unfrozen water at subzero temperatures. A mathematical model of the processes of heat and mass transfer of moist ventilation air with the surface of the cryolithozone mining, taking into account the condensation of moisture vapors, is presented. The results of the solution according to the presented mathematical model are obtained by the finite difference method. The moisture condensing on the cold walls of the mine, initially located in the air stream, significantly affects the thermal regime of the extended mine. As the walls of the mine warm up due to convective heat transfer and the heat of phase transformation, the intensity of the condensation process decreases. The cyclic process of humidification – drying of the surface of the mine, coupled with the frosty effect on it, can lead to degradation of the surface layer. The results of calculations based on the presented model based on taking into account the functions of the equilibrium moisture content in the mine atmosphere and rock mass allow us to build adequate pictures of the distribution of moisture content and temperature in the mine space and surrounding rocks.

Keywords: convective heat transfer, mathematical modeling, condensation processes, mine workings, cryolithozone

Введение

Динамика параметров рудничной атмосферы и определяющие ее состав сопутствующие явления в значительной степени определяют оптимальный режим проветривания и сохранности горных выработок, соответствие рудничной атмосферы санитарным нормам, а также другие условия, обеспечивающие безопасность

эксплуатации и проведения горных работ [1, с. 35; 2]. В условиях криолитозоны учет влияния паров влаги в рудничном воздухе приводит к необходимости рассмотрения их фазовых превращений. Этот момент существенно усложняет задачу конвективного теплопереноса рудничного воздуха, увеличивая фазовый состав рассматриваемой термодинамической системы и при-

вода к росту межкомпонентных взаимодействий. К подобным случаям можно отнести известный факт [3] нарушения пропускной способности вентиляционных стволов на рудниках ОАО «Алроса» за счет полойного обмерзания их поверхности конденсирующимися парами. Подобные явления успешно предотвращали, обеспечивая орошение стенок вентиляционных стволов концентрированными рассолами из карьерного пространства. Ранее исследователями установлено, что в условиях северных шахт и рудников процесс конденсации влаги в летний период эксплуатации проходит значительно интенсивнее, чем обратный ему процесс испарения в зимний период. Однако в условиях значительно более продолжительного зимнего периода велика вероятность иссушения поверхности горных выработок [4] и создания при этом условий для роста запыленности в выработке [5].

Целью работы является создание расчетной модели, адекватно описывающей процесс влагообмена между вентилируемым воздухом и поверхностью выработки с использованием функций равновесного содержания влаги в воздухе и окружающих породах.

Материалы и методы исследования

В данном контексте представлена математическая модель процесса конденсации влаги на стенках горной выработки, первоначально имеющей отрицательную температуру стенок. При этом, в отличие от ранних работ [5], используются функции равновесного содержания паров воды в рудничном воздухе и незамерзшей влаги в породном массиве, окружающем выработку, как известные из опыта и зависящие от температуры. Использование подобного базиса позволяет существенно повысить методическую точность и адекватность определения параметров состояния рудничной атмосферы выработок криолитозоны и породного массива.

Процесс понижения температуры потока влажного воздуха моделируется уравнением, учитывающим его теплообмен со стенками выработки.

$$\frac{\partial(Sc_2\rho_2T_2)}{\partial t} + \frac{\partial(V_2Sc_2\rho_2T_2)}{\partial z} = -\alpha_{12}P_{12}(T_2 - T_1) - L_f S \frac{\partial m}{\partial t}, \quad (1)$$

$$T_f = T_f(m).$$

Здесь первый член уравнения (1) представляет собой положительную динамику изменения температуры воздушного потока в выработке за счет конвективного переноса (второй член уравнения (1)); понижение температуры потока за счет теплообмена воздушного потока с поверхностью стенок выработки, имеющих отрицательную температуру, и третий член уравнения (1) определяет вклад теплоты фазовых переходов водяного пара в общий энергетический баланс.

Последнее уравнение в системе (1) представляет собой равновесное содержание влаги в рудничном воздухе для различных значений температуры.

Решение системы уравнений (1) строится по упрощенной вычислительной технологии расщепления по физическим процессам [6, с. 85], перечисленным абзацем выше:

а) движение потока воздуха

$$\frac{\partial(Sc_2\rho_2T_2)}{\partial t} + \frac{\partial(V_2Sc_2\rho_2T_2)}{\partial z} = 0;$$

б) конвективный теплообмен с поверхностью породного массива

$$\frac{\partial(Sc_2\rho_2T_2)}{\partial t} = -\alpha_{12}P_{12}(T_2 - T_1);$$

в) учет теплоты фазового перехода при конденсации пара

$$\frac{\partial(Sc_2\rho_2T_2)}{\partial t} = -L_f S \frac{\partial m}{\partial t},$$

$$T_f = T_f(m).$$

Для параметров уравнений (1 а, в) использованы следующие сокращения: T_1 – температура внутренней поверхности породного массива в выработке °С; S – величина поперечного сечения рудничной выработки в m^2 ; T_2 – температура входящего потока влажного воздуха °С; L_f – теплота фазового превращения при испарении поровой влаги или льда дж/кг; c_2 – теплоемкость рудничного воздуха с учетом содержащихся в нем компонентов дж/(кг.град); V_2 – средняя скорость воздушного потока рудничного воздуха м/с; m – весовое содержание влаги в воздухе kg/m^3 .

Геометрия расчетной области представляет собой внешний граничный контур с размерами 20 м на 20 м с размещенном в центре сечением квадратной выработки размерами с размерами 3 м на 3 м. Выработка и внешний контур размещены в плоскости (x, y) , движение воздушного потока

осуществляется вдоль оси z . Краевые условия по температуре имитируют тепловое взаимодействие поверхности выработки с потоком рудничного воздуха имеющей на входе в выработку при $z = 0$ температуру T_2 , меняющуюся по синусоидальному закону уравнения

$$T_2 = 2 + 14 \times \sin(2 \cdot \pi t / 8760 + \varphi). \quad (2)$$

Считаем, что распределения влаги и температуры в воздушном потоке являются однородными, не зависящими от координат (x, y), следовательно, на границах отсутствует их диффузионный перенос и в балансовых уравнениях (1, а, в) активны лишь конденсационные процессы на поверхностях контакта компонентов вдоль оси z .

Обобщенная математическая модель баланса тепла и влаги в мерзлом породном массиве, представленная в работе [7], адаптирована для рассматриваемого случая породного массива, вмещающего горную выработку. Модель состоит из двух уравнений диффузионного типа с источниковыми членами, отражающими влияние процессов промерзания – оттаивания [7]:

- уравнение кондуктивного переноса тепла в породном массиве

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = -\nabla(\lambda \nabla T) + L\rho I_f, \quad (3)$$

- уравнение диффузионного переноса влаги в породном массиве

$$\frac{\partial(w)}{\partial t} = -\nabla(k \nabla w) - I_f. \quad (4)$$

Уравнение (5) служит дополнительным соотношением, описывающим фазовое состояние незамерзшей влаги в зависимости от параметров породного массива, его температуры и концентрации порошкового раствора.

$$T_{1f} = T_{1f}(w, C). \quad (5)$$

Решение системы уравнений (3)–(5) осуществляется согласно алгоритму, изложенному в работе [7].

Для решения системы уравнений (3)–(5), так же как и ранее, использована процедура расщепления по физическим процессам в соответствии с [6, с. 85]. В качестве этих процессов выбраны: а) диффузионное выравнивание полей температуры и влажности и б) фазовый переход в термодинамических изолированных подсистемах, составляющих исходную физическую систему. Поэтому решение исходной задачи

(3)–(5) представляется в виде последовательного решения подзадач;

а) диффузии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(c\rho_{ck}T)}{\partial t} &= -\nabla J_T, \\ \frac{\partial(w)}{\partial t} &= -\nabla J_w; \end{aligned} \quad (6)$$

б) фазового перехода:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(c\rho_{ck}T)}{\partial t} &= L\rho_{ck}I_f, \\ \frac{\partial(w)}{\partial t} &= -I_f. \end{aligned} \quad (7)$$

Система уравнений (7) дополняется уравнением фазового состояния

$$T_{1f} = T_{1f}(w, C).$$

Для решения системы (6) с заданными граничными и начальными условиями использован конечно-разностный метод [7] с расщеплением по физическим процессам.

Система (7) определяет действие фазовых превращений на локальные содержания тепла и влаги [7]. Она представляет собой взаимосвязанные уравнения баланса тепла и влагосодержания для термодинамических изолированных подсистем, расположенных в узлах элементарных ячеек сетки W_h . Так как $I_f = -\partial m / \partial t$ мощность стока влаги (при превращении вода – лед), то, подставляя его во второе уравнение системы (7), получим для влажности

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial m}{\partial t}. \quad (8)$$

Решая последнее на каждом шаге по времени, получим

$$w_1 = w_0 + \Delta m, \quad (9)$$

где 0 и 1 относятся к нижнему и верхнему временным уровням.

Для определения стока влаги Δm на каждом временном шаге используем уравнение теплового баланса (первое уравнение из системы (7)), а также условие, что температура в зоне фазового перехода определяется диаграммой состояния раствора:

$$\begin{aligned} c_1\rho_1T_f - c_2\rho_2T_2 &= L\rho\Delta m, \\ T_{1f} &= T_{1f}(w, C). \end{aligned} \quad (10)$$

При этом переход $T_1 \rightarrow T_2$ определяется решением разностных аналогов системы

(6), и температура T_2 , отражая энергетический баланс процесса, носит фиктивный характер (не учитывает фазовый переход). Переход $T_2 \rightarrow T_{1F}$ определяется решением системы (10). Рассматривая путь $T_1 \rightarrow T_F$ полагаем с точностью до бесконечно малых величин первого порядка:

$$T_{1F} = T_1 + \frac{\partial T_{1F}}{\partial w} \Delta m, \quad (11)$$

которое определяет изменение состояния (температуры) в замкнутой подсистеме.

После подстановки выражения (11) в уравнение (10), получим, ограничиваясь членами со степенями Δm не выше первой:

$$\Delta m = - \frac{(c_1 T_1 - c_2 T_2)}{\left(L + T_1 (c_w - c_{Lod}) + c \frac{\partial T_{1F}}{\partial w} \right)}, \quad (12)$$

определяя тем самым интенсивность стока влаги в узле при промерзании. Данная методика применима как к фазовым превращениям лед – вода в породном массиве так и к задачам конденсации – испарения.

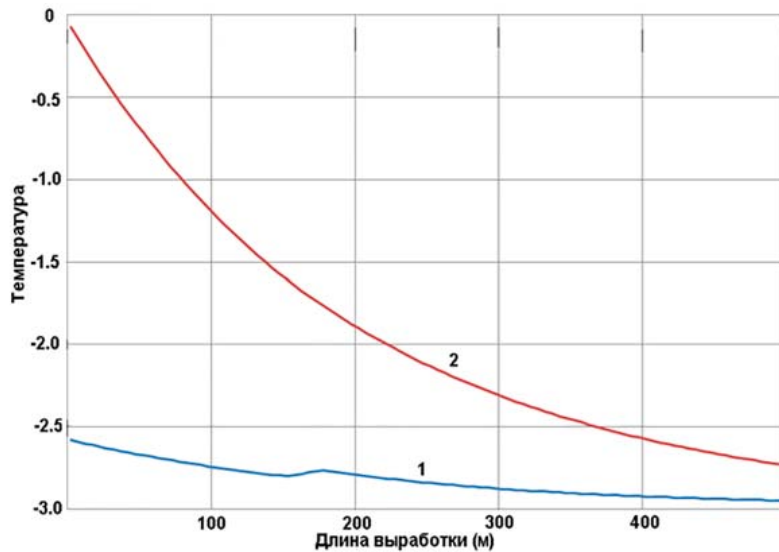


Рис. 1, а. Профиль значений температуры вдоль борта выработки (1) и температура потока воздуха на оси (z) (2)

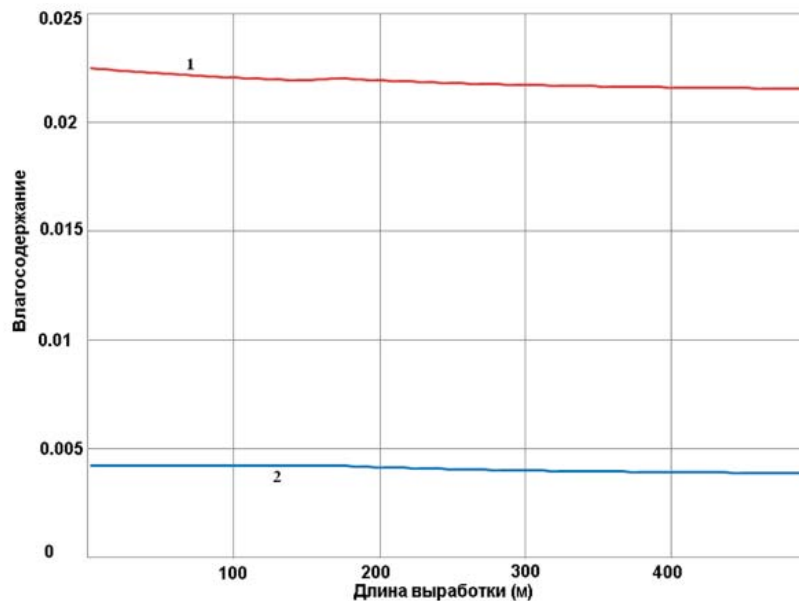


Рис. 1, б. Профиль значений влагосодержания вдоль борта выработки (1) и влагосодержание потока воздуха по оси (z) в (кг/м³) (2)

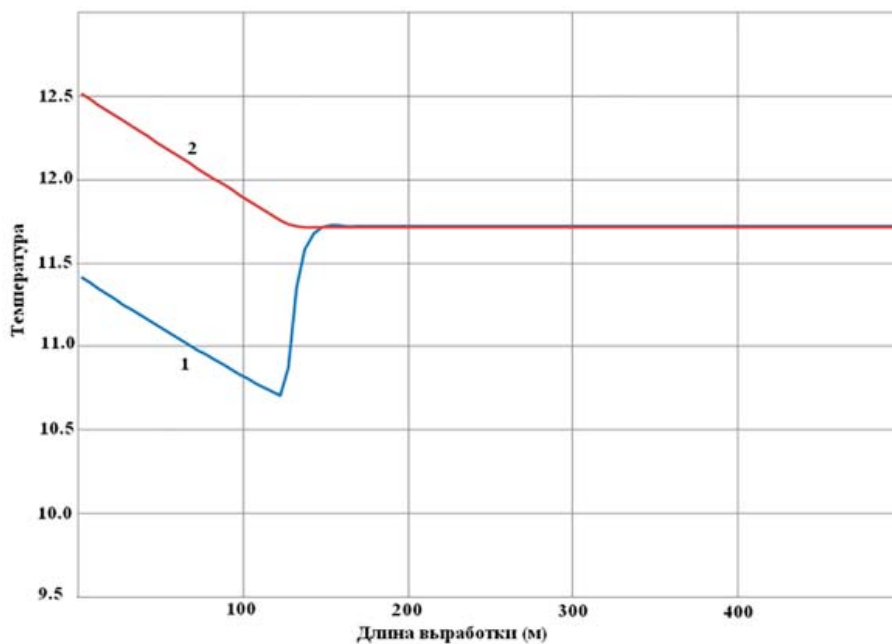


Рис. 2, а. Профиль значений температуры вдоль борта выработки (1) и температура потока воздуха на оси (z) (2)

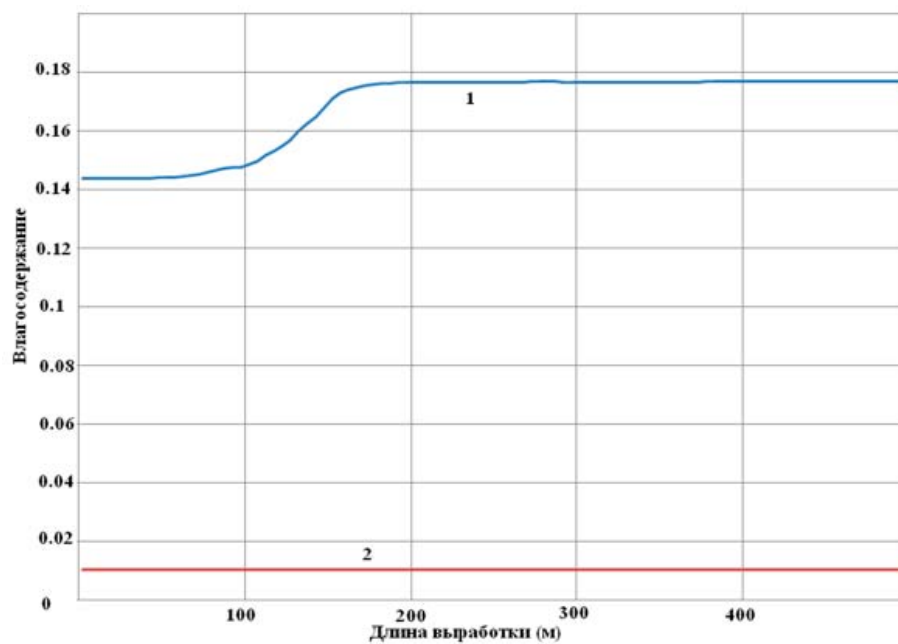


Рис. 2, б. Профиль значений влагосодержания вдоль борта выработки (1) и содержание влаги в потоке воздуха по оси (z) в (кг/м³) (2)

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1, а, показаны профили значений температуры рудничной атмосферы вдоль оси потока (z) и в борту выработки для начального периода времени ~ 1 ч. Аналогичные результаты для влагосодержания показаны на рис. 1, б. Расчеты показали

существенную зависимость интенсивности процесса от коэффициента теплоотдачи (скорости потока) и его входной температуры, то есть второй и третий члены уравнения (1), определяющие количество паровой влаги в единице объема поступающего в выработку воздуха в соответствии с уравнением состояния $T_f(m)$.

На графиках видно, что для начального периода времени характерно интенсивное охлаждение входящего воздушного потока, за счет конденсационных и теплообменных процессов на поверхности горной выработки. Конденсация влаги в рудничной атмосфере носит ограниченный характер и происходит в зоне 100–150 м от входа в выработку, сохраняя тенденцию к росту при наличии плюсового значения температуры воздушного потока на входе.

На рис. 2, а, показаны профили значений температуры рудничной атмосферы вдоль оси потока (z) и в борту выработки для периода времени ~ 1000 ч. Аналогичные результаты для влагосодержания показаны на рис. 2, б. Расчет процесса конденсации влаги из рудничного воздуха подтверждает локальный характер процесса, обусловленный формированием зон конденсации, где значения температуры потока, определяющие равновесное содержание влаги в рудничном воздухе и формирующиеся в условиях нестационарного теплообмена с поверхностью стенок выработки оказываются ниже их равновесных значений. Этот факт и вызывает выпадение влаги, формируя зоны конденсации влаги в выработках на входе в выработку, постепенно смещаясь по направлению движения рудничного воздуха. Длина участка конденсации способна к росту по мере увеличения температуры, влагосодержания и скорости воздушно-го потока.

В этом случае система близка к квазистационарному режиму теплообмена. Разница между температурой потока воздуха и температурой поверхности выработки составляет ~ 1 °С. Изменение температуры потока и стенки вдоль выработки носит линейный характер по ходу выработки. Из-за практически полного отсутствия конденсационных процессов влагосодержание в воздушном потоке меняется незначительно.

Заключение

Представлена математическая модель теплообменных процессов при движении влажного воздуха в горных выработках криолитозоны. Установлены законо-

мерности массообмена влаги, находящейся в рудничном воздухе и взаимодействующей с поверхностью породного массива при конденсационных процессах. Достоверность разработанной модели подтверждается использованием функций равновесного содержания паров воды в рудничном воздухе и незамерзшей влаги в породном массиве, окружающем выработку, как известных из опыта и зависящих от температуры, в соответствии с ранее изложенной методикой. Результатами моделирования процессов переноса в горной выработке установлена форма профилей температуры и содержания влаги в бортах горной выработки и на оси (z) в воздушном потоке. Установлены размеры областей выпадения конденсационной влаги и ее избыточного отложения. Результаты расчетов по представленной модели, основанной на учете функций равновесного содержания влаги в рудничной атмосфере и породном массиве, позволяют строить адекватные картины распределения влагосодержания и температуры в рудничном пространстве и окружающих породах.

Список литературы

1. Хохолов Ю.А., Соловьев Д.Е. Математическое моделирование тепловых процессов в горных выработках шахт и рудников Севера. Новосибирск: Гео, 2013. 185 с.
2. Галкин А.Ф. Повышение устойчивости горных выработок в криолитозоне // Записки Горного института: Санкт-Петербургский горный институт. 2014. Т. 207. С. 99–102.
3. Орлов А.О., Смирнов Ю.Г., Гусак С.А. Основные методические принципы обеспечения безопасности строительства подземных комплексов атомных станций малой мощности в условиях российской Арктики // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2017. № 5. С. 31–38.
4. Gambino G.F., Harrison J.P. Rock engineering design in frozen and thawing rock: Current approaches and future directions // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. P. 656–665. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.229.
5. Хохолов Ю.А., Курилко А.С. Математическое моделирование процессов теплообмена вентиляционного воздуха с горными породами в протяженных выработках шахт и рудников криолитозоны // Наука и образование. 2015. № 3. С. 50–54.
6. Марчук Г.И. Методы расщепления. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 264 с.
7. Попов В.И., Курилко А.С. Приближенный метод решения задач теплообмена при замерзании влаги в горных породах криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 12. С. 57–64.