

УДК 622.45:536.244

**МЕТОДИКА СОВМЕСТНОГО РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО И  
ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РЕЖИМОВ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СЕТИ  
ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК КРИОЛИТОЗОНЫ**

**Ю. А. Хохолов, Д. Е. Соловьев**

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,  
E-mail: solovjevde@igds.ysn.ru, проспект Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия*

Разработана методика, позволяющая прогнозировать расход воздуха, температуру воздуха и окружающих горных пород, ореолы протаивания во всех выработках сети с учетом поэтапного ввода новых выработок в систему вентиляции рудника или погашения отработавших.

*Тепловой режим, воздухораспределение, вентиляционная сеть, криолитозона*

Современная шахта (рудник) представляет собой сложную сеть горных выработок, суммарная протяженность которых может достигать десятков километров. В этой связи возникает проблема расчета воздухораспределения в сложных сетях для обеспечения нормальной и надежно функционирующей вентиляции как одного из основных факторов обеспечения безопасных и комфортных условий труда для горнорабочих. При этом необходимо учитывать нестационарное взаимовлияние процессов воздухораспределения и теплообмена в выработках сети с учетом фазовых переходов влаги в горных породах, что присуще шахтам и рудникам криолитозоны. В то же время в процессе эксплуатации шахт и рудников происходит постоянный ввод или погашение отдельных либо совокупности горных выработок, что непосредственно сказывается на вентиляционном и тепловом режимах.

Для решения поставленной задачи разработана методика и программный комплекс расчета теплового режима и воздухораспределения в шахтах и рудниках криолитозоны с учетом нестационарности сети горных выработок. В основу методики положены две математические модели. Первая из них описывает теплообмен в горных выработках криолитозоны с учетом фазовых переходов влаги в рудничном воздухе и горных породах и позволяет рассчитать ореолы протаивания вокруг выработок, что необходимо для оценки их устойчивости.

При расчетах температурного режима сети горных выработок применялась осесимметричная постановка задачи теплообмена воздуха в горных выработках с окружающим массивом пород. Уравнение сохранения энергии в выработке имеет вид

$$C_v \left( \frac{\partial T_v}{\partial t} + v \frac{\partial T_v}{\partial x} \right) = \frac{2\alpha}{R_v} (T_{st} - T_v) + \frac{Q}{\pi R_v^2}, \quad 0 < x \leq L, \quad (1)$$

где  $T_v$  — температура воздуха в выработке, °С;  $T_{st}$  — температура стенки выработки, °С;  $C_v$  — объемная эффективная теплоемкость влажного воздуха, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $t$  — время, с;  $v$  — скорость воздуха в выработке, м/с;  $x$  — продольная координата, м;  $\alpha$  — коэффициент теплообмена между рудничным воздухом и стенками выработки, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $Q$  — тепловыделения, поступающие в воздушную среду из различных источников тепла, расположенных в выработке, Вт/м;  $R_v$  и  $L$  — соответственно радиус и длина выработки, м.

Объемная эффективная теплоемкость воздуха рассчитывается с учетом влажности и температуры по формуле [1]

$$C_v = c_v \rho_v + (c_p + r n_1) \rho_p \varphi, \quad (2)$$

где  $c_v$ ,  $\rho_v$  ( $c_p$ ,  $\rho_p$ ) — удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)) и плотность (кг/м<sup>3</sup>) соответственно для сухого воздуха (пара);  $r$  — скрытая теплота парообразования, Дж/кг;  $n_1$  — коэффициент, зависящий от температуры, 1/°С;  $\varphi$  — относительная влажность воздуха, доли ед.

Коэффициент  $n_1$  учитывает зависимость влагосодержания, насыщенного водяными парами воздуха, от его температуры:

$$n_1 = \frac{0.777(T_v + 273.15) - 1}{T_v + 273.15}. \quad (3)$$

Плотность пара рассчитывается по формуле

$$\rho_p = \frac{600.36 \exp(0.0777 T_v)}{R_p (T_v + 273.15)}, \quad (4)$$

где  $R_p$  — газовая постоянная пара, Дж/(кг·К).

Распространение тепла в слое теплоизоляции описывается уравнением теплопроводности

$$c_{iz} \rho_{iz} \frac{\partial T_{iz}}{\partial t} = \frac{\lambda_{iz}}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[ R \frac{\partial T_{iz}}{\partial R} \right] + \lambda_{iz} \frac{\partial^2 T_{iz}}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq L, \quad R_v - \delta_{iz} < R < R_v, \quad (5)$$

здесь  $T_{iz}$  — температура теплоизоляции, °С;  $c_{iz}$ ,  $\rho_{iz}$  и  $\lambda_{iz}$  — соответственно удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)), плотность (кг/м<sup>3</sup>) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) теплоизоляции;  $R$  — радиальная координата, м;  $\delta_{iz}$  — толщина теплоизоляции, м.

Расчет изменения температуры в слое теплоизоляции в отличие от традиционно принятого подхода, когда изоляция рассматривается как термическое сопротивление, позволяет учесть инерционность распространения тепла в теплоизоляционном слое.

На границе раздела теплоизоляция — горная порода задается граничное условие IV рода:

$$\lambda_{iz} \frac{\partial T_{iz}}{\partial R} \Big|_{R=R_v} = \lambda \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_v}, \quad T_{iz} = T, \quad R = R_v, \quad (6)$$

где  $T$  — температура горных пород, °С;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности горных пород, Вт/(м·К).

На поверхности теплоизоляции задается граничное условие III рода

$$\alpha(T_{st} - T_v) = \lambda_{iz} \frac{\partial T_{iz}}{\partial R}, \quad R = R_v - \delta_{iz}. \quad (7)$$

Процесс распространения тепла в массиве горных пород с учетом фазовых переходов влаги описывается следующим двухмерным уравнением теплопроводности [2]:

$$[C(T) + L_f \omega \rho \delta(T - T^*)] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[ \lambda(T) R \frac{\partial T}{\partial R} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad 0 \leq x \leq L, \quad (8)$$

$$C = \begin{cases} c_1 \rho_1, & T < T^*; \\ c_2 \rho_2, & T > T^*; \end{cases} \quad \lambda = \begin{cases} \lambda_1, & T < T^*; \\ \lambda_2, & T > T^*; \end{cases} \quad (9)$$

где  $c_1, \rho_1, \lambda_1$  ( $c_2, \rho_2, \lambda_2$ ) — удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)), плотность (кг/м<sup>3</sup>) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) соответственно для мерзлых (талых) пород;  $L_f$  — скрытая теплота фазовых переходов, Дж/кг;  $\omega$  — весовая влажность пород, доли ед.;  $T^*$  — температура фазовых переходов, °С;  $\delta(T - T^*)$  — дельта-функция Дирака.

Численная реализация математической модели осуществлялась конечно-разностным методом суммарной аппроксимации, который сводит многомерную задачу к последовательному решению одномерных задач, которые аппроксимировались неявными разностными схемами сквозного счета [3, 4].

Вторая модель, используемая в методике, описывает распределение воздушных потоков в сети горных выработок с учетом температурных условий (естественной тяги) и работы вентиляторов. Расчет воздухораспределения в вентиляционных сетях основан на решении системы уравнений, составленной на основании первого и второго законов Кирхгофа для шахтных вентиляционных сетей.

Вследствие изменения температуры, давления и влажности воздуха в выработках сети плотность воздуха изменяется, в результате этого в каждом контуре сети неизбежно возникает тепловая тяга, которая определяется следующей зависимостью:

$$h_e = g \sum_{j \in f} \rho_j \Delta z, \quad \Delta z = z_1 - z_2, \quad (10)$$

где  $z_1, z_2$  — геодезическая высота в начале и в конце ветви, м;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_j$  — плотность воздуха в  $j$ -й ветви, кг/м<sup>3</sup>.

Переменная плотность воздуха оказывает влияние на все параметры движения воздуха. Его расход, аэродинамическое сопротивление и депрессия вентиляторов в этом случае выражаются через стандартную плотность воздуха в виде [5]

$$q = \frac{\rho_c}{\rho} q_c, \quad (11)$$

$$r = \frac{\rho}{\rho_c} r_c, \quad (12)$$

$$h = \frac{\rho}{\rho_c} h_c, \quad (13)$$

где  $q_c, r_c, h_c$  — расход воздуха (м<sup>3</sup>/с), аэродинамическое сопротивление (Н·с<sup>2</sup>/м<sup>8</sup>), депрессия (Па), соответствующие стандартной плотности воздуха.

Пусть задана вентиляционная сеть, содержащая  $m$  ветвей и  $n$  узлов, а также определены все независимые циклы. Закон сохранения массы воздушных потоков в узлах (I закон Кирхгофа) с учетом разности плотностей в ветвях будет иметь вид [5]

$$\sum_{j=0}^m a_{ij} q_j \frac{\rho_j}{\rho_c} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (14)$$

где

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-я ветвь входит в } i\text{-й узел,} \\ -1, & \text{если } j\text{-я ветвь выходит из } i\text{-го узла,} \\ 0, & \text{если } j\text{-я ветвь не связана с узлом } i, \end{cases}$$

$q_j$  — расход воздуха в  $j$ -й выработке, м<sup>3</sup>/с;  $\rho_j$  — плотность воздуха в  $j$ -й ветви, кг/м<sup>3</sup>.

Закон сохранения механической энергии воздушных потоков в контурах (II закон Кирхгофа) с учетом депрессий вентиляторов и естественной тяги [5]

$$\sum_{j=0}^m \tilde{s}_{ij} \frac{\rho_c}{\rho_j} r_j q_j^2 = \sum_{j=0}^m \varepsilon_{ij} \frac{\rho_j}{\rho_c} h_{vj} + g \sum \rho_i \Delta z_i, \quad i = 1, 2, \dots, m-n+1, \quad (15)$$

где

$$\tilde{s}_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если направление ребра } j \text{ совпадает с направлением обхода по } i\text{-му циклу,} \\ -1, & \text{если эти направления не совпадают,} \\ 0, & \text{если } j\text{-е ребро не входит в } i\text{-й цикл,} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если направление ребра } j \text{ совпадает с направлением обхода по } i\text{-му циклу,} \\ -1, & \text{если в } j\text{-й ветви вентилятор отсутствует или } j\text{-е ребро не входит в } i\text{-й цикл,} \\ 0, & \text{если направление ребра } j \text{ не совпадает с направлением обхода по } i\text{-му циклу,} \end{cases}$$

$h_{vj}$  — депрессия вентилятора в  $j$ -й ветви, Па;  $r_j$  — аэродинамическое сопротивление  $j$ -й выработки, Н·с<sup>2</sup>/м<sup>8</sup>.

Системы уравнений (14), (15), выведенные на основе законов Кирхгофа для вентиляционной сети, описывают процесс движения воздуха по сетям при заданных температурных условиях и глубине заложения каждой из выработок сети.

Первоначально направления движения воздуха по ветвям задаются произвольно и уточняются в ходе решения задачи. Для удобства зависимые ветви деревьев пронумерованы от 1 до  $n-1$ , а ветви-связи — от  $n$  до  $m$ . Используя (14), можно определить расходы воздуха зависимых ветвей через значения расходов воздуха ветвей-связей.



Используя рассчитанное распределение температур воздуха в сети, уточняется перераспределение расхода воздуха путем решения задачи воздухораспределения. Таким образом, на каждом шаге по времени решаются последовательно две задачи: воздухораспределения и тепловая.

При нестационарности топологии сети весь расчетный период работы рудника разбивается на отдельные этапы. В начале каждого происходит добавление в сеть новых ветвей и узлов, а в конце определенные ветви и узлы исключаются из сети. Добавление и удаление ветвей изменяет состояние сети и соответственно изменяются параметры уравнений законов Кирхгофа. Результаты расчетов температурных полей в выработке и окружающем массиве пород в конце  $i$ -го этапа работы рудника сохраняются и служат исходными данными при расчетах  $i + 1$  этапа.

Таким образом, методика позволяет прогнозировать расход воздуха, температуры воздуха и окружающих горных пород, ореолы протаивания во всех выработках сети.

С использованием разработанного программного комплекса проведены расчеты температурного и вентиляционного режимов при рассмотрении подземного варианта разработки Накынского поля при различных вариантах вскрытия и отработки двух рядом расположенных трубок “Нюрбинская” и “Ботубинская”.

На рис. 1 приведен один из вариантов схемы вентиляции, когда проветривание горных выработок осуществляется по фланговой схеме. Свежий воздух подается по клетевому стволу (КС) основной промышленной площадки рудника с выдачей исходящей струи через скиповой ствол (СС), а также через вспомогательный скиповой ствол (ВСС), расположенный на дополнительной промышленной площадке у трубки “Нюрбинская”.

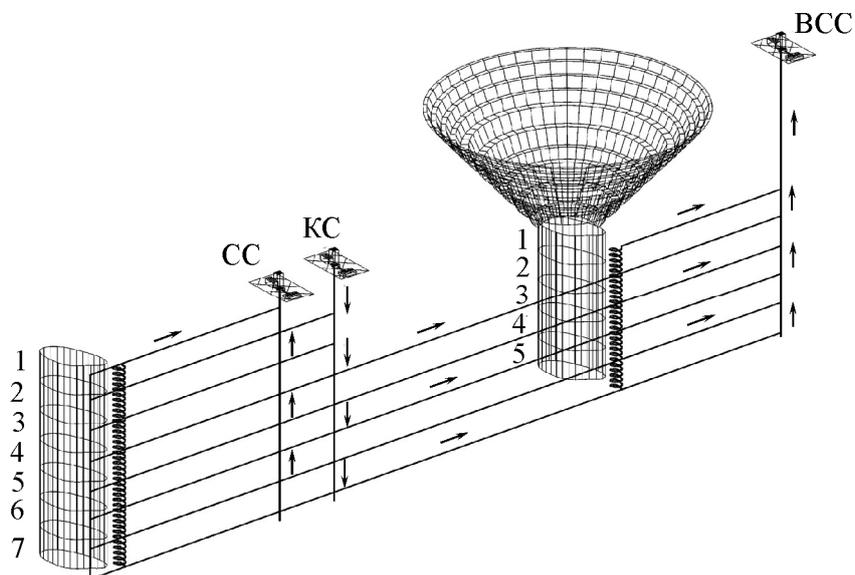


Рис. 1. Схема вскрытия месторождений

Всего на месторождениях трубок “Ботубинская” и “Нюрбинская” необходимо отработать 12 блоков, поэтому весь период работы рудника разбит на 12 этапов. В начале каждого из них при вводе блока в эксплуатацию в сеть добавляются новые ветви и узлы, а в конце этапа при отработке блока отдельные ветви и узлы удаляются из сети. В общей сложности вентиляционная сеть состоит из 111 ветвей и 64 узлов. По проекту температурный режим в подземной час-

ти рудника будет постоянный положительный (не менее  $2^{\circ}\text{C}$  на воздухоподаче ствола КС), поэтому, как только наружная температура воздуха станет меньше  $2^{\circ}\text{C}$ , включается калорифер, который поддерживает температуру поступающего воздуха на заданном уровне.

Поскольку в выработках поддерживается положительный температурный режим (не менее  $2^{\circ}\text{C}$  на воздухоподаче ствола КС) и расходы воздуха достаточно большие, происходит прогрессирующее протаивание окружающих мерзлых горных пород. Максимальная глубина оттаивания вокруг стволов на отметке +254 в конце их эксплуатации будет: для ствола КС — 10.5 м (рис. 2а), для ВСС — 8.2 м (рис. 2б), для ствола СС — 8.9 м. Наиболее интенсивное протаивание происходит в первые годы.

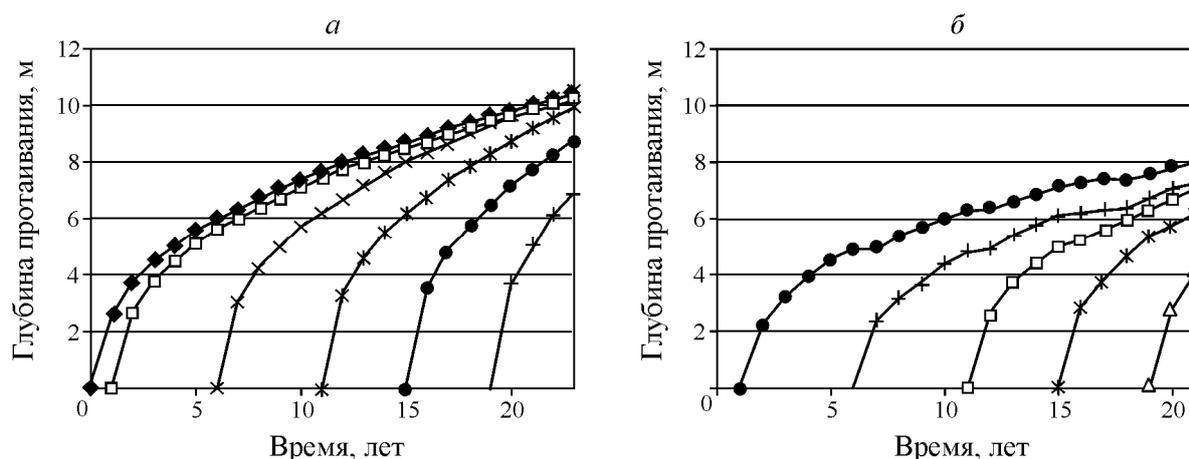


Рис. 2. Динамика глубины протаивания: а — вокруг КС: —●— отм. +254; —■— отм. +70; —×— отм. -130; —\*— отм. -230; —●— отм. -330; —+— отм. -430; б — вокруг ВСС: —●— отм. +254; —+— отм. -30; —■— отм. -130; —\*— отм. -230; —△— отм. -330

Согласно рис. 2б, интенсивность протаивания вокруг ствола ВСС на отметке +254 снижается в 6, 11-й и 17-й годы от начала эксплуатации рудника. На отметке -30 снижение интенсивности протаивания наблюдается в 11-й и 17-й годы. Подобная картина наблюдается и на скиповом стволе. Это связано с введением крупных блоков горных выработок в вентиляционную сеть; например, в 6-й и 11-й годы были введены новые выработки на горизонтах -30 и -130. В результате теплообмена с мерзлыми окружающими горными породами происходит интенсивное охлаждение вентиляционного воздуха, что приводит к временному уменьшению скорости протаивания пород вокруг воздуховыдающих стволов.

Результаты расчетов воздухораспределения показали, что расходы воздуха, подаваемого в горные выработки трубки “Нюрбинская” и “Ботуобинская”, к 10-му году эксплуатации рудника соответственно составили 188 и  $326 \text{ м}^3/\text{с}$ . Динамика изменения температуры воздуха в отдельных горных выработках в течение 1 года показана на рис. 3. В зимний период температура воздуха  $\approx 2^{\circ}\text{C}$ , а в летний воздух нагревается до  $19^{\circ}\text{C}$ .

Поддержание круглогодичного положительного температурного режима в выработках рудника позволяет улучшить санитарно-гигиенические условия труда горнорабочих, а также обеспечить приемлемые условия для работы машин механизмов. В то же время положительная температура воздуха в горных выработках приводит к интенсивному протаиванию мерзлых пород вокруг выработок, что отрицательно сказывается на их устойчивости.

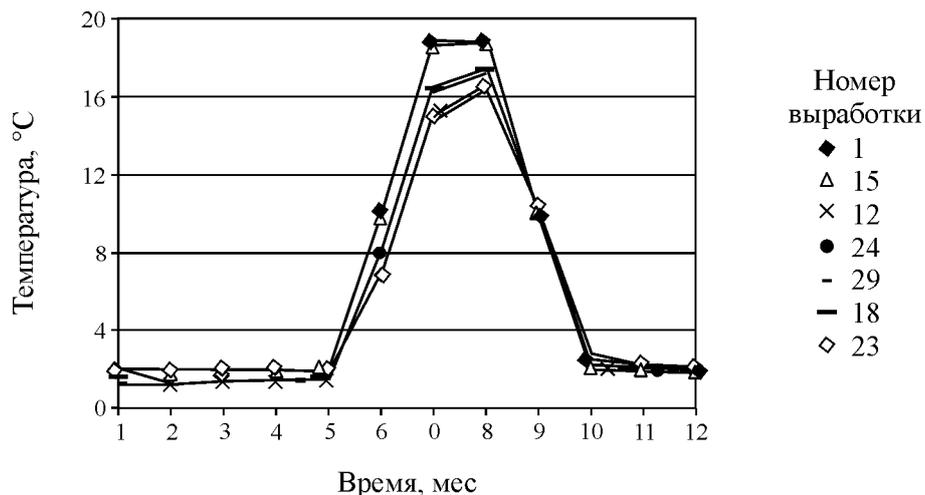


Рис. 3. Динамика температур воздуха в выработках на 5-й год эксплуатации

## ВЫВОДЫ

Разработана методика, позволяющая делать долгосрочный прогноз температурного и вентиляционного режимов развивающейся сети подземных горных выработок шахт и рудников криолитозоны, необходимый для формирования рекомендаций по управлению тепловыми процессами и соответствующих мер по обеспечению устойчивости горных выработок и комфортных условий труда горнорабочих.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дядькин Ю. Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. — М.: Недра, 1968.
2. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1977.
3. Самарский А. А., Моисеенко Б. Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // ЖВМ и МФ. — 1965. — Т. 5. — № 5.
4. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. — М.: Едиториал УРСС, 2003.
5. Ушаков К. З., Бурчаков А. С., Пучков Л. А., Медведев И. И. Аэрология горных предприятий. — М.: Недра, 1987.

Поступила в редакцию 21/V 2012