

УДК 622.413.3:536.244

Ю.А. Хохлов, В.В. Киселев

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛООБМЕНА В КАМЕРАХ ОЖИДАНИЯ
ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ СЕВЕРА**

Изложены результаты численных исследований на разработанной математической модели динамики формирования микроклимата в камерах ожидания рудников криолитозоны, в зависимости от геометрических размеров, количества укрываемых, изменений температуры и скорости движения наружного воздуха. Подтверждена предпосылка возможности обогрева теплоизолированных камер ожидания метаболическим теплом выделяемым укрываемыми в условиях охлаждаемого наружного климата.

Ключевые слова: рудники Севера, камеры ожидания, рудничный двор, криолитозона.

Неделя горняка

Как известно, рудники и шахты по степени риска жизни горнорабочих, возникновения профессиональных заболеваний, травматичности относятся к высокой категории. Положение в этом плане усугубляется с понижением горных работ и, соответственно, повышением горного давления, когда учащаются горные удары, вызывающие повреждение крепи, завалы выработок, сбой в работе транспорта, подъема, нарушение энергоснабжения и т.д. Кроме этого, нередко возрастает также количество внезапных прорывов пливуннов, подземных вод, газов и т.д., в связи с чем, соответственно, повышается риск нахождения горнорабочих под землей. Учащающиеся с каждым годом, по данным Министерства ЧС РФ природные, а также техногенные катастрофы могут вызвать повреждение ЛЭП и, как следствие этого, длительное обесточивание рудника, деформации копра и армировки стволов, пожар в надшахтном здании и т.д. В результате таких чрезвычайных ситуаций (ЧС), требующих вы-

полнения большого объема восстановительных работ, может стать невозможным своевременный подъем горнорабочих работающей смены в особенности глубоких рудников на поверхность и требуется временное укрытие их на длительный период в специально оборудованных камерах ожидания (КО), строительство которых производится во вновь строящихся рудниках в соответствии с проектами.

Необходимо отметить, что, как показало ранее проведенное обследование возведенных в рудниках Норильского ГМК КО, они, по нашему мнению, не всегда отвечали требованиям в плане их расположения и объемно-планировочных решений, удобства размещения горнорабочих, поддержания требуемых параметров микроклимата в условиях ЧС. В частности, не были решены вопросы эксплуатации таких сооружений, в том числе обогрева КО, без чего нельзя обойтись в зимний период. Для решения этих сложных и нестандартных вопросов руководством Но-

руильского ГМК были привлечены институты ЛенНИИРГ и ИГДС СО РАН.

Проведенными институтами многоплановыми исследованиями [1, 2] определены принципиальные положения, основные требования размещения и строительства, обоснованы их оптимальная вместимость (50 человек каждая), объемно-планировочные решения, параметры теплоизоляции, режимы эксплуатации применительно к экстремальным условиям глубоких рудников Норильского ГМК.

Для обогрева КО в зимний период ЛенНИИРГом [1, 2] было предложено использовать метаболическое тепло, выделяемое укрываемыми, а для снижения его рассеивания возводить теплоизоляцию на внутренние ограждения. Необходимо отметить, что в зимнее время, когда, например, при пожаре в стволе производится реверс вентиляционной струи в рудник будет поступать воздух с температурой до -50°C и расходом до $250\text{ м}^3/\text{сек}$. Проведенные расчеты показывают, что в этом случае уже через два часа в районе рудничного двора на километровой глубине (где естественная температура пород и воздуха положительные) температура может понизиться до -40°C и вследствие этого неизбежно переохлаждение горнорабочих, одетых в спецодежду с низким термическим сопротивлением.

Как уже отмечалось, основным требованием эксплуатации КО является обеспечение в них требуемых гигиенических норм обитания и, в частности, наиболее важного параметра — температурного режима. В связи с этим для прогноза динамики температурного режима КО в период их фактического заполнения укрываемыми в условиях ЧС была разработана математическая модель [1, 2], учитывающая основные факторы, влияющие на

формирование микроклимата: теплофизические характеристики материала перегородок и термическое сопротивление теплоизоляции внутренних ограждений КО, наружную температуру воздуха (в рудничном дворе), объем КО и площадь поверхности внутренних ограждений, степень заполнения людьми и количество подаваемого воздуха для вентиляции.

Из трех наиболее предпочтительных, по-нашему мнению, вариантов размещения КО в рудничных дворах рудников криолитозоны при разработке модели выбрана наиболее легко возводимая, путем проходки сбойки между двумя выработками рудничного двора (на глубине один километр) (рис. 1) с последующей установкой двух бетонных переемычек с герметичными дверьми, возведением теплоизоляции, оборудованную в соответствии с требованиями, предъявляемыми к подземным защитным сооружениям гражданской обороны [2].

Основное требование к КО — обеспечение комфортных температурных условий пребывания укрываемых горнорабочих работающей смены в условиях охлаждаемого наружного климата в зимний период безэнергетическими способами в течение пяти суток.

Принятые допущения: охлаждение внешних поверхностей КО (в зимний период) происходит равномерно с двух сторон (бетонных перегородок, имеющих одинаковую толщину); интенсивность тепловыделений укрываемых постоянная; КО имеет форму параллелепипеда; толщина и теплофизические свойства теплоизоляции постоянны в пределах рассматриваемой геометрической зоны; температура и относительная влажность воздуха одинаковы по всему объему КО; от-

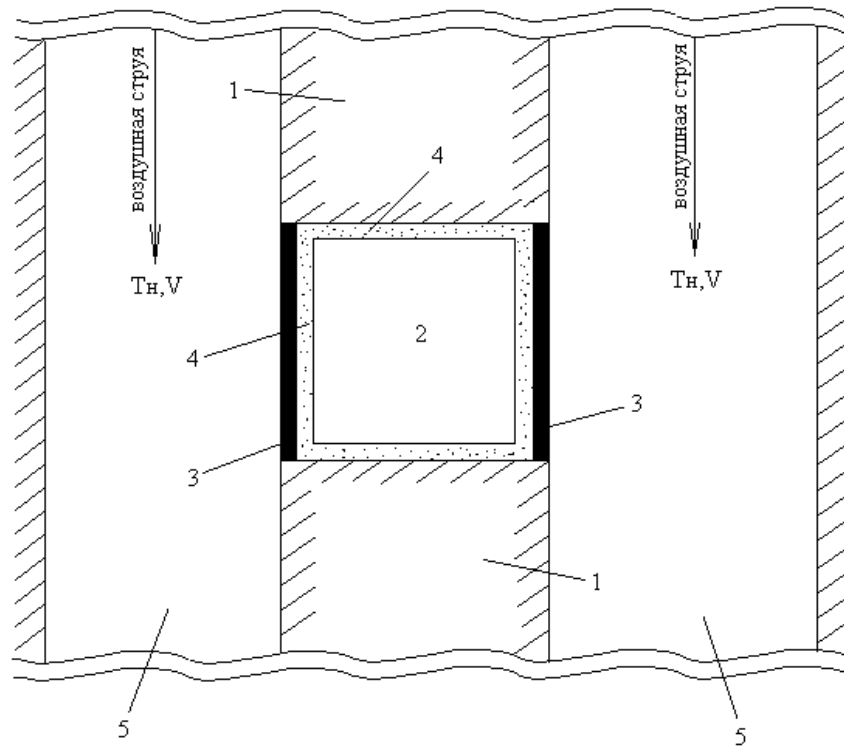


Рис. 1. Схема расположения камеры ожидания в руднике (план): 1 — целик; 2 — камера ожидания; 3 — бетонные перегородки; 4 — теплозащитное покрытие; 5 — подходы выработки

ток тепла из КО происходит в основном через охлаждаемые перегородки и в меньшей степени — через целики.

Уравнение теплового баланса в этом случае имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 Vc_B\rho_B \frac{\partial T_B}{\partial t} = & \alpha_1 S_1 (T_{CT_1} - T_B) - \\
 & - \alpha_3 S_3 (T_{CT_1} - T_B) + qK + \\
 & + c_B \rho_B G (T_H - T_B),
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

где V — объем камеры, м^3 ; $V = abh_K$, a — длина, м; b — ширина, м; h_K — высота, м; c_B — удельная теплоемкость воздуха, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; ρ — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; T_B — температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$; α_1 — коэффи-

циент теплообмена воздуха в камере с перегородками, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; S_1 — площадь поверхности внутренних ограждений, м^2 ; T_{CT_1} — температура внутренних ограждений, $^{\circ}\text{C}$; α_3 — коэффициент теплообмена воздуха в камере с целиком, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; S_3 — площадь поверхности камеры без перегородок, м^2 ; T_{CT_1} — температура поверхности целиков, потолка и пола, $^{\circ}\text{C}$; q — интенсивность выделения тепла одним человеком, Вт ; K — количество укрываемых горнорабочих; G — расход воздуха, предназначенного для подсыживания воздуха в КО, $\text{м}^3/\text{с}$; T_H — температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Теплоемкость воздуха рассчитывается с учетом влажности воздуха по формуле [3]:

$$C_B = C'_B + m\varphi \frac{760}{760 - 0,09Z}, \quad (2)$$

где C'_B — удельная теплоемкость сухого воздуха, Дж/(кг·К); r — теплота парообразования, Дж/г; p — коэффициент, учитывающий зависимость влагосодержания воздуха от температуры, определяется по таблице из работы [3]; φ — относительная влажность воздуха, доли ед.; Z — глубина заложения камеры, м.

Теплота парообразования зависит от температуры и определяется по формуле [4]:

$$r = 2500 - 2,23T_B. \quad (3)$$

Для моделирования тепловых процессов в бетонных перегородках применим уравнение теплопроводности:

$$c_n \rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_n \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < d, \quad (4)$$

где c_n — удельная теплоемкость материала перегородки, Дж/(кг·К); λ_n — коэффициент теплопроводности перегородки, Вт/(м·К); ρ_n — плотность материала перегородки, кг/м³; T — температура перегородки, °С. Обозначим:

$$T_{/x=0} = T_{CT}. \quad (5)$$

Вышеприведенные уравнения дополним следующими граничными условиями:

$$\lambda_n \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_1 (T_{CT} - T_B), \quad x = 0, \quad (6)$$

$$\lambda_n \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2 (T_n - T_{CT}), \quad x = d, \quad (7)$$

α_2 — коэффициент теплообмена перегородки с наружной стороны,

Вт/(м²·К); T_{CT_1} — температура стенки перегородки с наружной стороны, °С:

$$T_{CT_1} = T_{/x=d}. \quad (8)$$

Уравнение теплового баланса в камере (1) учитывает также теплообмен через целики, потолок и пол. Из предположения, что температура воздуха внутри КО одинакова по всему объему, следует, что интенсивность теплопередачи в массив горных пород через целики, пол и потолок равномерна. Уравнение теплопроводности для массива горных пород имеет вид:

$$c_m \rho_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2}, \quad 0 < y < y_G, \quad (9)$$

где c_m — удельная теплоемкость горных пород, Дж/(кг·К); ρ_m — плотность горных пород, кг/м³; T_m — температура горных пород, °С; λ_m — коэффициент теплопроводности горных пород, Вт/(м·К); y_G — глубина температурного влияния, м.

Граничные условия для уравнения теплопроводности имеют вид

$$\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial y} = \alpha_3 (T_m /_{y=0} - T_B), \quad y = 0, \quad (10)$$

$$T_m = T_E, \quad y = y_G, \quad (11)$$

где $T_m /_{y=0}$ — температура стенки целиков, потолка и пола, °С (соответствует обозначению в уравнении (1) T_{CT}); T_E — естественная температура горных пород, °С.

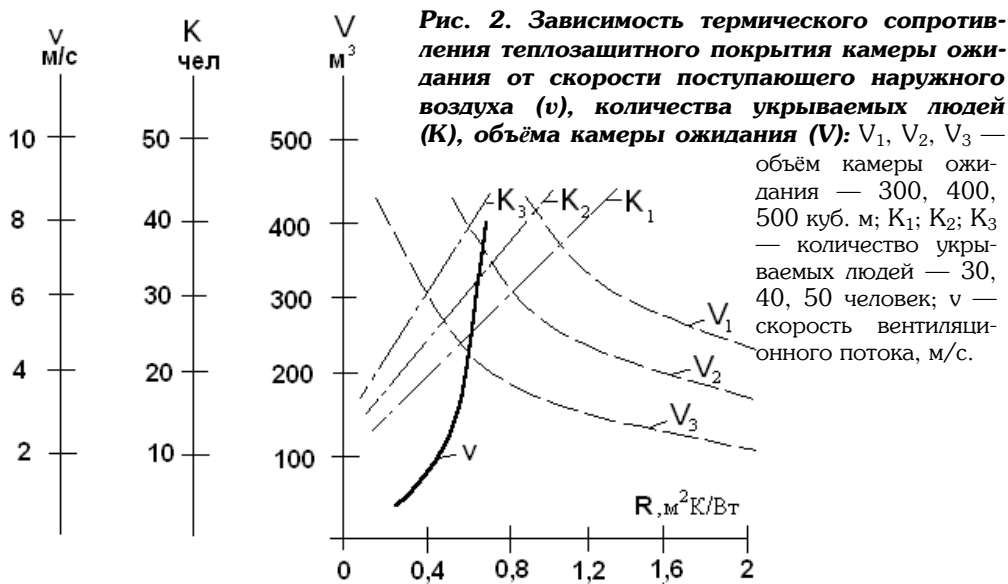
Начальные условия имеют вид:

$$T_B = T_n \quad (12)$$

$$T = T_n, \quad 0 < x < d, \quad (13)$$

$$T_m = T_n, \quad 0 < y < y_G. \quad (14)$$

Температура воздуха в КО при фактическом заполнении ее укрываемыми в условиях охлаждаемого наружного климата определяется решением вышеприведенных уравне-



ний с помощью метода разностных схем [5].

С помощью разработанной математической модели (и программы расчета, написанной на языке Fortran) были проведены численные исследования и прогнозные расчеты динамики формирования температурного режима в КО в зависимости от ее геометрических параметров, количества укрываемых, изменений температуры и скорости движения наружного воздуха [6].

Необходимо отметить, что программа позволяет так же определить такой важный для практики параметр, как необходимое термическое сопротивление теплоизоляции КО, без чего невозможно поддержание требуемого температурного режима. Это позволяет рассчитать состав смеси для возведения теплоизоляции и расход материалов.

Была выявлена так же зависимость термического сопротивления теплоизоляции внутренних ограждений КО от ее объема, количества укрываемых людей, скорости вентиляционного потока, которая представлена в гра-

фической форме на рис. 2. Как видно из графиков, повышение жесткости климата в рудничном дворе (увеличение скорости и снижение температуры вентиляционного потока) при реверсе вентиляционной струи в зимнее время потребует для поддержания нормативной температуры в КО (18°C) увеличения термического сопротивления теплоизоляции или увеличения плотности размещения укрываемых в КО.

Проведенные численные исследования на математических моделях позволили выявить особенности формирования температурного режима в КО. Проведенным техническим экспериментом на одном из рудников Норильского ГМК подтверждена возможность обогрева теплоизолированных КО метаболическим теплом. Таким образом есть основание утверждать, что КО возведенные, обустроенные и оборудованные в соответствии с разработанными требованиями при правильной эксплуатации в состоянии обеспечить безопасное и комфортное пребывание горнорабочих в

условиях ЧС даже при понижении температуры в рудничном дворе до -40°C . Разработанная методика

расчета температурного режима КО пригодна для практического использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин А.Ф., Киселев В.В., Хохолов Ю.А. Обеспечение нормативных параметров микроклимата в камерах ожидания глубоких рудников Севера при чрезвычайных ситуациях // Труды 3-ей Международной конференции «Экология и развитие Северо-запада России» — С.-Петербург, 1998. — С. 241-245.

2. Киселев В.В. Исследование и выбор рациональных способов регулирования теплового режима подземных сооружений специального назначения в условиях Севера: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. — Якутск, 1998. — 15 с.

3. Дядькин Ю.Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. — М., Недра, 1968. — 251 с.

4. Ларинов Н.Н. Теплотехника. — М., Стройиздат, 1985. — 432 с.

5. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983. — 616 с.

6. Киселев В.В., Хохолов Ю.А. Камеры ожидания в глубоких рудниках Севера для укрытия горнорабочих на время ликвидации аварий // Перспективные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. Труды VIII Международной научно-практической конференции — Новокузнецк, 2001. — С. 123-125. **ИДБ**

Коротко об авторах

Хохолов Ю.А. — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,
Киселев В.В. — кандидат технических наук, старший научный сотрудник.
Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАН,
E-mail: khokholov@igds.ysn.ru



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
КОРЯГА Михаил Георгиевич	Разработка технологических схем подземной добычи угля с использованием многофункциональных наклонно-горизонтальных скважин	25.00.22	к.т.н.