© Д.Е. Соловьев, Ю.А. Хохолов, А.С. Курилко, С.Д. Мордовской, Е.Е. Петров, 2012

УДК 622.45:536.244

Д.Е. Соловьев, Ю.А. Хохолов, А.С. Курилко, С.Д. Мордовской, Е.Е. Петров

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД БОРТА КАРЬЕРА «УДАЧНЫЙ» В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СКВАЖИН

Приведены результаты исследований температурного режима массива горных пород вокруг вентиляционных скважин, пройденных с уступа борта карьера для вентиляции строящегося рудника «Удачный».

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, температурное поле, математическая модель, теплообмен, уступ карьера, вентиляционные скважины.

В настоящее время месторождение «Удачная» отрабатывается открытым способом и одновременно ведется его подготовка к подземной отработке. Для проветривания наклонного съезда строящегося рудника с уступа борта карьера были пройдены вентиляционные скважины диаметром 1020 мм с горизонта +115 на отметку –188 м длиной 303 м каждая, которые обеспечивают выработки необходимым количеством свежего воздуха. Наклонный съезд предусматривается проветривать комбинированным способом, при этом вентиляторы располагают на отметке -188 м в устье вентиляционных скважин. При проходке свежий воздух поступает с отметки +115 м до отметки -180 м по вентиляционным скважинам и далее с помощью вентиляторов местного проветривания по наклонному съезду поступает в забой. В проекте сделан расчет количества воздуха, необходимого для проветривания наклонного съезда, которое составило 49 м^3/с, т.е. на одну скважину приходится примерно 25 м^3/с. Также предусматривался подогрев подаваемого воздуха в зимний период до -10 ^{0}С с помощью электрокалориферов. Расстояние между скважинами составляет 5 м, а крайняя скважина пройдена на расстоянии 12 м от кромки уступа борта карьера. Угол откоса равен 70°.

Поскольку вентиляционные скважины расположены близко к откосу уступа, их тепловое влияние в летний период может негативно сказаться на его устойчивости. Для прогноза температурного режима была разработана трехмерная математическая модель [1].

Математическая модель описывается трехмерным уравнением теплопроводности с учетом фазовых переходов влаги в породах, уравнениями сохранения энергии в выработках, граничными и начальными условиями:

$$\left[C(T) + L_{ф} \cdot \omega \cdot \rho \cdot \delta(T - T^*)\right]\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial x}\right] +$$

$$+\frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial z}\right], \quad (x, y, z) \in \Omega, \qquad (1)$$

где T – температура горных пород, °С; С, λ — соответственно объемная теплоемкость (Дж/(м^3·К)) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) горных пород; $L_ф$ — скрытая теплота фазовых переходов, Дж/кг; ω — весовая влажность пород, д.е.; ρ — плотность пород, кг/м^3; T^* — температура фазовых переходов, °С; $\delta(T\text{-}T^*)$ — дельта-функция Дирака.

На границах теплового влияния области Ω потоки тепла отсутствуют.

$$-\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial z}=0,\quad z=0,\quad 0\le x\le x_8,\quad 0\le y\le y_2; \tag{2}$$

$$\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial z}=0,\quad z=z_2,\quad 0\le x\le x_8,\quad 0\le y\le y_2. \tag{3}$$

$$-\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial x}=0,\quad x=0,\quad 0\le y\le y_2,\quad 0\le z\le z_2; \tag{4}$$

$$\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial y}=0,\quad y=0,\quad 0\le x\le x_8,\qquad 0\le z\le z_2. \tag{5}$$

На дневной поверхности теплообмен происходит по закону Ньютона:

$$\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial y}=\alpha_1\cdot(T-T_2),\quad y=y_2,\quad 0\le x\le x_5,\quad 0\le z\le z_2, \tag{6}$$

$$\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial y}=\alpha_1\cdot(T-T_2),\quad y=y_1,\quad x_6\le x\le x_7,\quad 0\le z\le z_2, \tag{7}$$

$$\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial n}=\alpha_1\cdot(T-T_2),\quad 0\le y\le y_1,\quad x_7\le x\le x_8,\quad 0\le z\le z_2, \tag{8}$$

$$\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial n}=\alpha_1\cdot(T-T_2),\quad y_1\le y\le y_2,\quad x_5\le x\le x_6,\quad 0\le z\le z_2, \tag{9}$$

где α_1- коэффициент теплообмена поверхности земли с атмосферным воздухом, Вт/(м^2·К); T_2 — температура наружного воздуха, °С.

Уравнение сохранения энергии для воздуха в первой выработке имеет вид:

$$C_в\cdot\left(\frac{\partial T_3}{\partial t}+v\cdot\frac{\partial T_3}{\partial y}\right)=\frac{\alpha}{S}\cdot\{2\cdot\int_{x_1}^{x_2}[T(x,y,z_1)-T_3]dx+$$

$$+2\cdot\int_0^{z_1}[T(x_1,y,z)+T(x_2,y,z)-2\cdot T_3]dz\}, \tag{10}$$

где T_3 — температура воздуха в первой выработке, °С; S – площадь сечения выработки, м^2.

Аналогично уравнение сохранения энергии для воздуха во второй выработке имеет вид:

$$C_в\cdot\left(\frac{\partial T_4}{\partial t}+v\cdot\frac{\partial T_4}{\partial y}\right)=\frac{\alpha}{S}\cdot\{2\cdot\int_{x_3}^{x_4}[T(x,y,z_1)-T_4]dx+$$

$$+2\cdot\int_0^{z_1}[T(x_3,y,z)+T(x_4,y,z)-2\cdot T_4]dz\}, \tag{11}$$

где T_4 — температура воздуха во второй выработке, °С.

Начальные распределения температур в окружающем массиве пород и в выработках, а также значения температуры воздуха на входе в выработку – задаются.

Коэффициент конвективного теплообмена поверхности грунта с атмосферным воздухом рассчитаем по формуле [2]:

$$\alpha_1 = \begin{cases} 6.16 + 4.19 \cdot v_в, \ 0 < v_в < 5; \\ 7.56 \cdot v_в^{0.78}, \ 5 < v_в < 30; \end{cases} \quad (12)$$

где $v_в$ — скорость ветра, м/с.

Для расчета α_1 необходимы данные о снежном покрове по месяцам, а именно высота снежного покрова и коэффициент теплопроводности снега. Коэффициент теплопроводности снежного покрова зависит от температуры и плотности. На основе большого объема экспериментальных материалов в работе [3] получены следующие осредненные зависимости для нахождения расчетных значений коэффициента теплопроводности снежного покрова:

$$\lambda_c = \begin{cases} 1.165 \cdot \rho_c, \ T_2 > -10°C; \\ 1.035 \cdot \rho_c, \ -10°C \geq T_2 \geq -20°C; \\ 0.907 \cdot \rho_c, \ T_2 < -20°C; \end{cases} \quad (13)$$

где ρ_c — плотность снежного покрова, г/см^3.

Поскольку угол откоса борта карьера составляет примерно 70°, коэффициент теплообмена α_1 на его поверхности рассчитан без учета снежного покрова, ввиду невозможности его удержания при такой крутизне.

Численная реализация математической модели осуществлялась конечно-разностным методом суммарной аппроксимации, который сводит многомерную задачу к последовательному решению одномерных задач. Одномерные задачи аппроксимировались неявными разностными схемами сквозного счета, при этом учет теплового взаимовлияния соседних выработок осуществляется методом итераций.

Были проведены численные расчеты на период до 10 лет эксплуатации скважин при естественном тепловом режиме и подогреве поступающего в скважины воздуха в зимний период до -10 ^{0}С. Параметры горных пород следующие: естественная температура –4 ^{0}С; теплопроводность талых и мерзлых пород соответственно 1,5 и 1,52 Вт/(м·К); теплоемкость сухой породы 980 Дж/(кг·К); плотность 2525 кг/м^3; влажность 2 %.

Как показали предварительные численные расчеты, вентиляционные скважины оказывают существенное влияние на температурный режим уступа карьера. Установлено, что наиболее интенсивные процессы протаивания горных пород происходят до глубины 3 м со стороны горизонтальной и наклонной поверхностей уступа. Ореолы протаивания вокруг скважин достигают 2,5 м. Между II скважиной и бортом уступа ореолы протаивания в летний период не смыкаются, однако происходят существенные колебания температур на глубине до 10 м. Наибольший прогрев будет происходить между скважинами у поверхности и до глубины 5 м. Начиная с 15 м изменения температур на дневной поверхности не оказывают на температурный режим пород значительного влияния.

В качестве примера на рис. 1 показаны температурные изолинии на конец лета 10-го года эксплуатации вентиляционных скважин при естественном тепловом режиме.

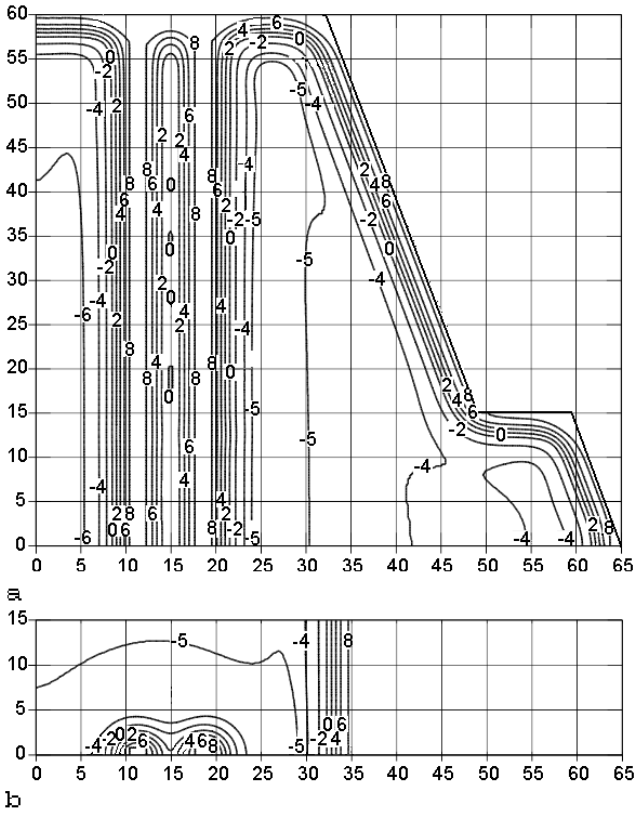

Рис. 1. Температурные изолинии в конце лета 10-го года при естественном тепловом режиме: а – вертикальное сечение, b – горизонтальное сечение на глубине 8 м

Как видно из графиков, к концу лета происходит протаивание пород со стороны склона борта и вокруг вентиляционных скважин на глубину до 3 м, а ореолы протаивания вокруг скважин смыкаются и температура пород в средней части составляет примерно 0 — +1 °С. Горные породы между I-й скважиной и бортом карьера находятся в мерзлом состоянии с температурой -5 °С.

При подогреве поступающего воздуха до -10 °С температура горных пород между скважиной и склоном борта карьера на этот же момент времени будет -3°С.

В 2007—2008 гг. сотрудниками лаборатории горной теплофизики ИГДС СО РАН и института «Якутнипроалмаз» проведены натурные наблюдения за тепловым режимом на строящемся руднике «Удачный», в том числе за температурным состоянием пород вокруг вентиляционных скважин, расположенных на уступе северного борта карьера. Были пробурены 4 геотермические скважины глубиной 20—40 м, в которых размещались термогирлянды. Замеры температур производились с периодичностью две недели в течение с апреля по декабрь 2008 г. Полученные результаты замеров были использованы для проверки адекватности разработанной математической модели. Совпадение расчетных и измеренных значений температур было удовлетворительным.

В качестве примера на рисунках 2 и 3 приведены распределения температуры горных пород по глубине, полученные по результатам наблюдений на замерных станциях ТС-3-40 (расположена посередине между вентиляционными скважинами), ТС-4-20 (расположена в 3 м от кромки уступа) и значений, полученных расчетным путем.

Сопоставление результатов расчетов температур горных пород вокруг вентиляционных скважин с данными непосредственных замеров показывают, что отклонение расчетных и измеренных температур горных пород на глубине

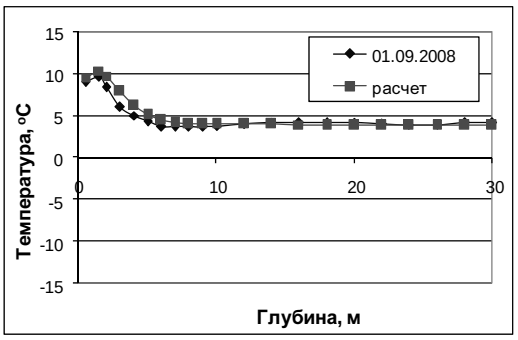

Рис. 2. Температура горных пород на измерительной станции ТС-3-40, расположенной между вентиляционными скважинами по данным замеров и результатам расчетов (01.09.2008)

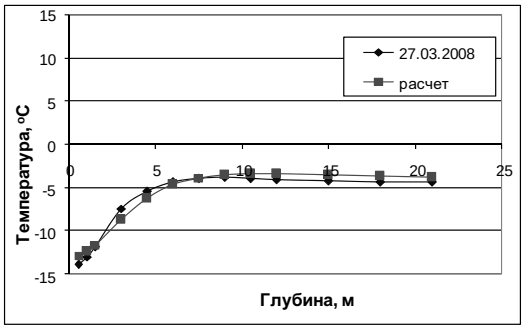

Рис. 3. Распределение температуры горных пород по глубине на измерительной станции ТС-4-20, расположенной в 3 м от кромки уступа по данным замеров и результатам расчетов (27.03.2008)

свыше 10 м находилось в пределах точности измерений температуры. На глубине до 4 м в зоне интенсивного влияния поверхности отклонение измеренных и расчетных температур не превышало 2 °С.

Расхождения между измеренными и расчетными значениями температур объясняются прежде всего тем, что при расчетах годовые изменения температуры атмосферного воздуха задавались по гармоническому закону с усредненными параметрами многолетних наблюдений. В действительности имеют место суточные и месячные отклонения температур от усредненных значений. Поэтому максимальные отклонения на 1—2 ^{0}С являются удовлетворительными.

Таким образом, как показали проведенные расчеты на период до 10 лет горные породы между вентиляционными скважинами и бортом карьера сохраняются в мерзлом состоянии круглый год и наличие скважин в данном случае не оказывает отрицательного влияния на устойчивость уступа, происходит лишь сезонное оттаивание пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хохолов, Ю.А.* Тепловое взаимодействие мерзлого массива пород и центрально-сближенных скважин, пройденных с уступа глубокого карьера / Ю.А. Хохолов, А.С. Курилко, Д.Е. Соловьев // Горн. информ. — аналит. бюллетень. -2008. — №7. — С.234-239.

2. *Куртенер, Д.А., Чудновский А.Ф.* Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте / Д.А. Куртенер, А.Ф. Чудновский. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969. — 299 с.

3. *Павлов А.В.* Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы / А.В. Павлов. — Новосибирск: Наука, 1980. — 240 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Соловьев Дмитрий Егорович — кандидат технических наук, e-mail: solovjevde@igds.ysn.ru,
Хохолов Юрий Аркадьевич — доктор технических наук, e-mail: khokholov@igds.ysn.ru,
Курилко Александр Сардокович — доктор технических наук, e-mail: a.s.kurilko@igds.ysn.ru,
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН,
Мордовской Сергей Денисович — доктор технических наук, e-mail:msd@mail.ru,
Петров Егор Егорович — доктор технических наук, профессор,
Северо-восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.