УДК 551.34:622.45:536.244

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ОЧИСТНОГО ПРОСТРАНСТВА ВЫСОКОМЕХАНИЗИРОВАННЫХ РОССЫПНЫХ ШАХТ КРИОЛИТОЗОНЫ

Курилко А.С., Соловьёв Д.Е.

ФГБУН «Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского» Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, e-mail: solovjevde@igds.ysn.ru

Существенное влияние на условия применения самоходного горного оборудования на россыпных шахтах криолитозоны оказывает класс устойчивости пород кровли, который в значительной степени зависит от температуры пород. Поскольку россыпи представляют собой рыхлые или сцементированные отложения обломочного материала, то одной из главных особенностей таких месторождений в условиях криолитозоны является зависимость прочностных свойств мерзлых рыхлых пород от температуры. При оттаивании содержащегося в песчано-глинистом заполнителе льда-цемента, мерзлые породы превращаются в сыпучую или пластичную массу. Эксплуатация самоходного горного оборудования в летний период будет сопровождаться интенсивным протаиванием мерзлых рыхлых пород из-за относительно больших объемов подаваемого в шахту теплого воздуха. Для того, чтобы обеспечить круглогодичную эксплуатацию высокомеханизированных россыпных шахт, требуется поддерживать соответствующий температурный режим во вмещающем выработки массиве горных пород, в том числе и в зоне ведения очистных работ. Для прогноза теплового режима в очистных выработках россыпных шахт криолитозоны и вмещающем их массиве горных пород была разработана трехмерная математическая модель. Результаты численных расчетов, которые проводились на примере условий россыпного месторождения алмазов «Солур», при различных исходных значениях технологических параметров, температуры вентиляционной струи и самоходного горно-шахтного оборудования, показали возможность круглогодичной эксплуатации шахты при определенных сочетаниях указанных параметров. Полученные при моделировании результаты могут быть использованы при составлении паспортов крепления очистных горных выработок и выборе конструктивных параметров системы разработки, тем самым обеспечивая создание безопасных условий при ведении горных работ на россыпных шахтах криолитозоны.

Ключевые слова: россыпная шахта, криолитозона, очистной забой, тепловой режим, математическое моделирование

MODELING OF THERMAL MODE IN STOPES OF HIGHLY MECHANIZED OF CRYOLITHOZONE PLACER MINES

Kurilko A.S., Solovev D.E.

Federal State Academic Institution «Chersky Mining Institute of the North» Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: solovjevde@igds.ysn.ru

A significant influence on the conditions for the application of self-propelled mining equipment on the placer mines of the cryolithozone is provided by the resistance class of the roof rocks, which largely depends on the temperature of the rocks. Since placers are friable or cemented deposits of detrital material, one of the main features of such deposits in terms of permafrost is the temperature dependence of the strength properties of frozen loose rocks. When the ice-cement contained in the sandy-clay aggregate is thawed, the frozen rocks turn into a loose or plastic mass. The exploitation of self-propelled mining equipment during the summer period will be accompanied by intensive thawing of frozen loose rocks because of the relatively large volumes of warm air supplied to the mine. In order to ensure the year-round operation of high-mechanized placer mines, it is required to maintain the appropriate temperature regime in the rock mass containing the mine, including in stopes. A three-dimensional mathematical model was developed for the prediction of the thermal regime in the clearing workings of placer mines in the cryolithozone and the surrounding rock mass. The results of numerical calculations, which were carried out on the example of the Solur diamond placer conditions, with different initial values of technological parameters, temperature of the air flow and self-propelled mining equipment, showed the possibility of year-round operation of the mine with certain combinations of these parameters. The results obtained in the simulation can be used in the preparation of the fastening passports for the treatment of mine workings and the selection of the design parameters of the development system, thereby ensuring the creation of safe conditions for mining in the placer mines of the cryolithozone.

Keywords: placer mine, cryolithozone, stope, temperature regime, math modeling

В районах Крайнего Севера добыча полезного ископаемого осложняется наличием многолетней мерзлоты и резко континентальным климатом (температура воздуха в зимний период понижается до –50 °С, а в летний доходит до +35 °С).

Температурный фактор оказывает значительное влияние на процессы горного производства, особенно отчетливо это выражается при разработке мерзлых россыпей [1, 2]. Тесная связь между прочностными свойствами и температурой является важнейшей особенностью мерзлых рыхлых пород. Изменение механических свойств мерзлых пород с изменением температуры обусловлено наличием в них льда-цемента,

который обладает отчетливо выраженными пластическими свойствами, резко меняющимися от температуры. Установлено, что прочность мерзлых рыхлых пород снижается более в чем 3 раза при повышении их температуры с минус 18 °С до минус 1 °С [3]. При оттаивании содержащегося в песчано-глинистом заполнителе льда-цемента мерзлые породы превращаются в сыпучую или пластичную массу. Этот негативный фактор приводит к тому, что небольшие россыпи отрабатываются сезонными россыпными шахтами с простыми технологиями отработки. В том числе и за рубежом, в частности на Аляске, где подземные горные работы ведутся только в зимний период с использованием переносного оборудования, а в летнее время производится промывка песков [4, 5].

На крупных россыпных шахтах значительно снизить себестоимость добычи песков и увеличить производительность труда позволяет применение самоходного горного оборудования (СГО) с дизельным приводом. При этом эксплуатация данного оборудования требует усиленной вентиляции выработок в связи с тем, что увеличивается загрязненность шахтного воздуха выхлопными газами.

Стоит отметить, что класс устойчивости пород кровли оказывает существенное влияние на условия применения СГО и определяется в соответствии с «Классификацией устойчивости массива многолетнемерзлых пород россыпных месторождений» [6], а также влияет на выбор системы разработки и ее параметров. Самоходное горное оборудование является абсолютным источником тепловыделений и вызывает локальное повышение температуры в горных выработках [7]. Данный фактор, а также поступление в шахту теплого воздуха приводит к повышению температуры вмещающего выработки массива горных пород и, соответственно, оказывает негативное влияние на устойчивость кровли выработок и тем самым может исключить возможность применения СГО на шахте [8]. Для того, чтобы обеспечить круглогодичную эксплуатацию высокомеханизированных россыпных шахт, требуется поддерживать соответствующий температурный режим во вмещающем выработки массиве горных пород, в том числе и в зоне ведения очистных работ. Прогноз температурного режима в очистном пространстве, методом математического моделирования, позволит установить возможность безопасной эксплуатации СГО на шахте в летний период. В связи с чем потребуется учёт применяемого самоходного горного оборудования с дизельным приводом, время нахождения этого оборудования в очистном забое, скорости смещения груди забоя и др.

С учётом вышеприведенных особенностей для прогноза теплового режима в очистных выработках россыпных шахт криолитозоны и вмещающем их массиве горных пород была разработана трехмерная математическая модель.

Математическая модель

Для решения поставленной задачи математическая модель строится в декартовой системе координат (x, y, z). Функция $T = T(x, y, z, t)$ определяет распределение температуры в исследуемом массиве горных пород на момент времени t.

Расчетная область Ω имеет сложную форму и состоит из взаимосвязанных полостей, представляющих собой горные выработки (рис. 1). В центре располагается очистная выработка (выработка № 2), по крайней правой выработке (выработка № 1) в очистной забой поступает свежая струя воздуха, по крайней левой (выработка № 3) из очистного забоя отводится загрязненный воздух.

Нестационарное трехмерное уравнение теплопроводности описывает процесс распространения тепла в массиве горных пород с учетом фазовых переходов влаги:

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

$$(x,y,z)\in\Omega, \qquad (1)$$

где T – температура горных пород, °С; С – объемная теплоемкость пород, Дж/(м^3×К); $L_{\text{ф}}$ – скрытая теплота фазовых переходов поровой влаги, Дж/кг; ρ – плотность горных пород, кг/м^3; ω – весовая влажность горных пород, д.е.; $\delta(T - T^*)$ – дельта-функция Дирака; T^* – температура фазовых переходов влаги в массиве горных пород, °С; λ – коэффициент теплопроводности горной породы, Вт/(м×К); t – время, с; x, y, z – координаты, м.

Коэффициенты теплоёмкости и теплопроводности разрывны и имеют вид

$$C(T)=\begin{cases} c_{\text{м}}\rho_{\text{м}};T<T^*; \\ c_{\text{т}}\rho_{\text{т}};T>T^*, \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda(T)=\begin{cases} \lambda_{\text{м}};T<T^*; \\ \lambda_{\text{т}};T>T^*, \end{cases} \quad (3)$$

где $c_{\text{м}}$, $\rho_{\text{м}}$, $\lambda_{\text{м}}$ ($c_{\text{т}}$, $\rho_{\text{т}}$, $\lambda_{\text{т}}$) – удельная теплоемкость (Дж/(кг×К)), плотность (кг/м^3) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м×К)) соответственно для мерзлых (талых) пород.

На боковых границах области Ω (границах теплового влияния) задаются граничные условия II рода (отсутствие потоков тепла):

$$\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial n}=0,$$
$$(x,y,z)\in\Gamma_{\text{вн}},\ 0<t<t_{\text{макс}}, \quad (4)$$

где $\frac{\partial}{\partial n}$ – обозначение внешней по отношению к области Ω нормали к границам $\Gamma_{\text{вн}}$.

На границе $\Gamma_{\text{в}}$ области Ω, состоящей из поверхностей, ограничивающих выработки № 1, 2, 3 задаётся граничное условие третьего рода, моделирующее конвективный теплообмен рудничного воздуха со стенками выработки:

$$\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial n}=\alpha\cdot\left(T-T_i\right),$$
$$(x,y,z)\in\Gamma_{\text{в}},\ 0<t<t_{\text{макс}}, \quad (5)$$

где α – коэффициент теплообмена между рудничным воздухом и стенками выработки, Вт/(м^2·К); T_i – температура воздуха в выработке °С, i = 1, 2, 3.

По сечению выработки температура воздуха усредняется. Кондуктивной составляющей можно пренебречь, поскольку конвективная теплопередача в воздухе намного больше.

Уравнение сохранения энергии для воздуха в выработке № 1 имеет вид

$$0{,}5\cdot S\cdot c_{\text{воз}}\cdot\rho_{\text{воз}}\cdot\left(\frac{\partial T_1}{\partial t}+v_{\text{воз}}\cdot\frac{\partial T_1}{\partial y}\right)=$$
$$\left[\int_{x3}^{x4}\left(\alpha\left(T(x,y,z_1)-T_1\right)\right)dx+\int_{x3}^{x4}\left(\alpha\left(T(x,y,z_2)-T_1\right)\right)dx+\right.$$
$$\left.\int_{z1}^{z2}\left(\alpha\left(T(x_3,y,z)-T_1\right)\right)dz+\int_{z1}^{z2}\left(\alpha\left(T(x_4,y,z)-T_1\right)\right)dz+\right],\ y_1\le y\le y_3, \quad (6)$$

где S – площадь поперечного сечения выработки, м^2; $c_{\text{воз}}$ – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); $\rho_{\text{воз}}$ – плотность воздуха, кг/м^3; $v_{\text{воз}}$ – скорость движения воздуха в выработке, м/с.

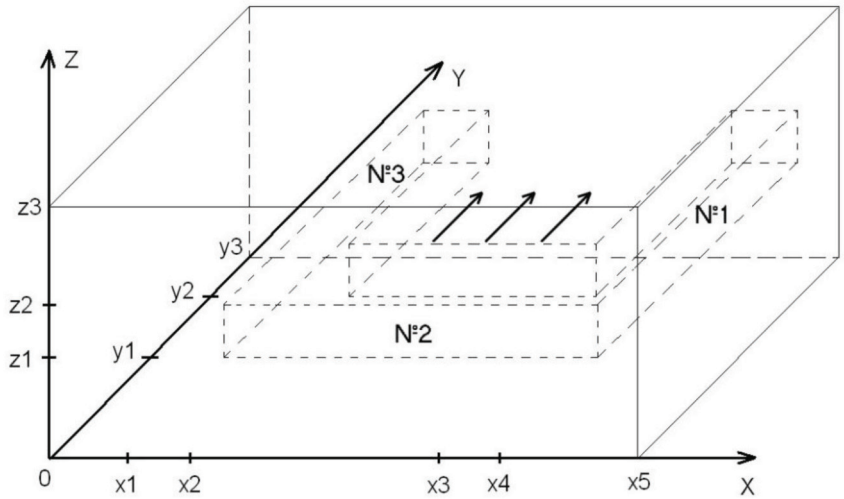

Рис. 1. Схема расчётной области Ω

Аналогичным образом задаются уравнения сохранения энергии для выработок № 2 и № 3.

В начальный момент времени задается распределение температуры в массиве горных пород и температуры шахтного воздуха внутри выработок:

$$\begin{gathered} T(x,y,z,0) = T^0(x,y,z), \\ 0 \le x \le x_5,\ 0 \le y \le y_3,\ 0 \le z \le z_3, \\ T_1 = T^0(y),\ y_1 \le y \le y_3, \\ T_2 = T^0(x),\ x_2 \le x \le x_4, \\ T_3 = T^0(y),\ y_1 \le y \le y_3. \end{gathered} \quad (7)$$

Численная реализация трехмерной математической модели (1–7) осуществлялась конечно-разностным методом суммарной аппроксимации, который сводит многомерную задачу к последовательному решению одномерных задач. Одномерные задачи аппроксимировались неявными разностными схемами сквозного счёта [9].

Алгоритм расчета теплового режима в очистном пространстве включает в себя следующие основные шаги: в начальный момент времени длина выработки № 2 (очистной камеры) L_1 равна длине рассечки, из которой начинается ведение очистных работ в камере. Продвижение очистного забоя описывается следующим соотношением

$$L_к = L_1 + V_{заб} \cdot t,\ 0 < t < t_{макс}, \quad (8)$$

где L_k – длина очистной выработки (камеры), м; $V_{заб}$ – скорость подвигания забоя очистной выработки № 2, м/сут.

Шаг пространственной сетки в направлении движения забоя задаётся таким образом, чтобы подвижная граница попадала в узел расчётной сетки.

Поскольку самоходное горное оборудование с дизельным приводом не является стационарным источником абсолютных тепловыделений, а постоянно перемещается в пространстве подземных горных выработок, то необходимо учитывать данное обстоятельство, но в то же время при расчётах теплового режима очистного пространства сложно задать траекторию передвижения данных источников тепловыделений. Поэтому с определенной степенью упрощения в данном алгоритме каждый период времени между подвиганиями груди очистного забоя разбивается на два равных интервала, в течение первого интервала абсолютный источник тепловыделений помещается в начале выработки № 2, а во второй – в средней части этой же выработки. Продолжительность работы источника абсолютных тепловыделений определяется исходя из циклограммы ведения очистных работ (количество рабочих смен в сутки и времени работы СГО в течение одной смены).

Перед следующим циклом подвигания груди очистного забоя температурные поля в массиве горных пород и выработках запоминаются и на последующем вычислительном шаге используются как начальные данные. Описанная выше процедура повторяется вплоть до отработки камеры.

Численные эксперименты

Численные эксперименты по расчету теплового режима в очистной камере и вмещающем ее массиве горных пород проведены на примере условий россыпного месторождения алмазов «Солур». Расчеты проводились при различных технологических параметрах ведения очистных работ, температуры и объема вентиляционного воздуха, поступающего в камеру, и др.

Как известно, существуют три системы разработки мерзлых россыпей подземным способом: сплошные, камерные и столбовые. Для мощного самоходного оборудования наиболее благоприятные условия обеспечивают камерные системы. Стоит отметить, что требования по безопасному применению систем разработки с использованием самоходного горного оборудования, которые содержатся в инструкции по разработке многолетнемерзлых россыпей подземным способом [6], определены только для камерной системы. В связи с этим для проведения расчетов принимаем камерную систему разработки.

В расчетах рассматривалось СГО с дизельным приводом, а именно погрузочно-доставочные машины (ПДМ) типа ST2G и ST7 (мощность двигателя соответственно 63 и 144 кВт). Данные машины являются абсолютными источниками тепловыделений в очистном пространстве (для ПДМ ST2G тепловыделения составят 60,3 кВт, а для ST7 – 50,2 кВт).

Для разжижения выхлопных газов, образующихся при работе ПДМ ST7 и ST2G, потребуется подать в камеру количество воздуха Q соответственно 20,4 и 8,9 м^3/с. При этом, как показали расчеты, приращение температуры от ПДМ в очистном забое, для ST7 составит 2,4 °С, а для ST2G – 6,5 °С.

В число дополнительных технологических параметров, которые необходимо задать для проведения расчётов, входят пролёт очистной камеры, который равен 18 м

(без учета рассечки шириной 6 м), что соответствует II классу устойчивости при камерной системе разработки с длинным очистным забоем (равен 50 м), глубина заложения камеры 40 м. Скорость подвигания груди очистного забоя в соответствии с инструкцией [6] должна обеспечить отработку запасов камеры за время не превышающее 20 суток (с учетом зачистки почвы при актировке). Исходя из указанных требований, для заданного пролета очистной камеры, определены следующие скорости подвигания забоя: 1, 1,5 и 2 м/сут. Режим организации очистных работ трёхсменный. Продолжительность работы ПДМ (время затрачиваемое на один цикл уборки породы) в течении одной смены составляет 3 часа.

По выработке № 1 в очистную камеру поступает свежий воздух со среднесуточными температурами: +5 и +10 °С.

На рис. 2 представлено температурное поле вокруг очистной камеры (в средней части по длине забоя) после её отработки для варианта, когда работает ПДМ ST7, скорость подвигания забоя 2 м/сут, расход воздуха $Q = 20{,}4$ м^3/с, температура вентиляционной струи воздуха $T_в = +5$ °С. На оси абсцисс лежит координата длины расчетной области (в метрах), на оси аппликат – высота расчетной области (в метрах). Цифры у кривых обозначают температуры в °С.

Следует отметить, что камерная система разработки с применением самоходного оборудования применяется при классах устойчивости горных пород I (высокоустойчивые, температура пород ниже –6 °С), II (устойчивые, с температурой пород не выше –3 °С), а также III (средней устойчивости) [6]. Породы III класса устойчивости могут иметь значения температуры в диапазоне –3…–1 °С, но при этом состав пород должен быть аналогичен I классу, суммарная льдистость в пределах 10–30 %, и мощность пород непосредственной кровли не менее 2 м.

Как видно из рис. 2, в кровле камеры образуется зона с температурой пород выше –1 °С, что для условий россыпного месторождения «Солур» накладывает ограничение для применения высокопроизводительного СГО типа ПДМ ST7.

В варианте расчетов, при котором среднесуточная температура воздуха, поступающего в очистную камеру, поднимается до +10 °С, приводит к появлению в кровле камеры зон, имеющих положительные значения температуры. Для исходных параметров ведения очистных работ глубина оттаивания пород может достигать 0,12 м.

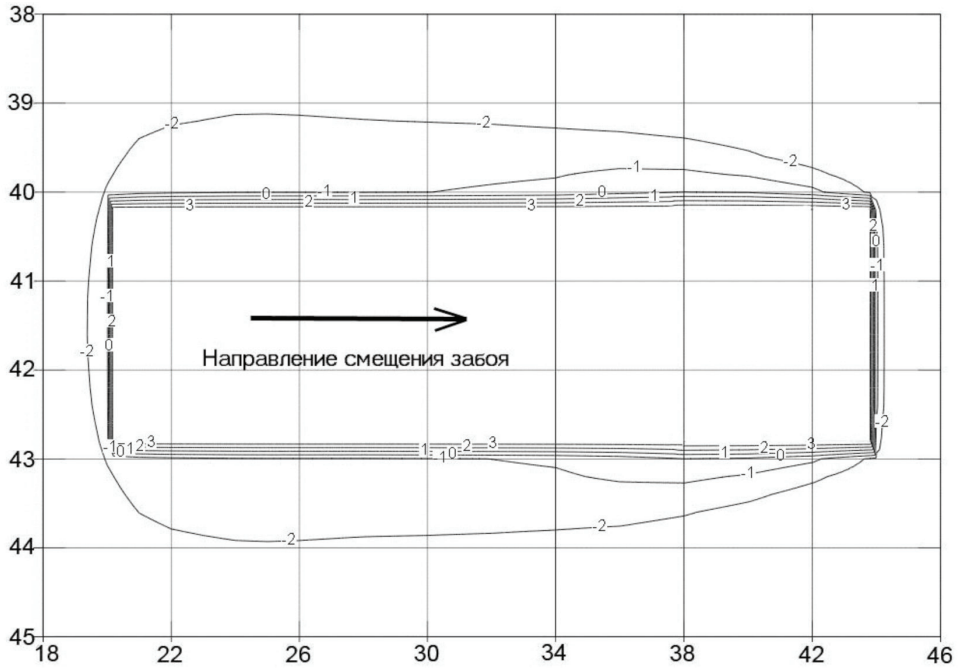

Рис. 2. Температурное поле вокруг очистной камеры, после её отработки, в плоскости YZ расчётной области (скорость подвигания забоя 2 м/сут, $T_в = +5$ °С, $Q = 20{,}4$ м^3/с)

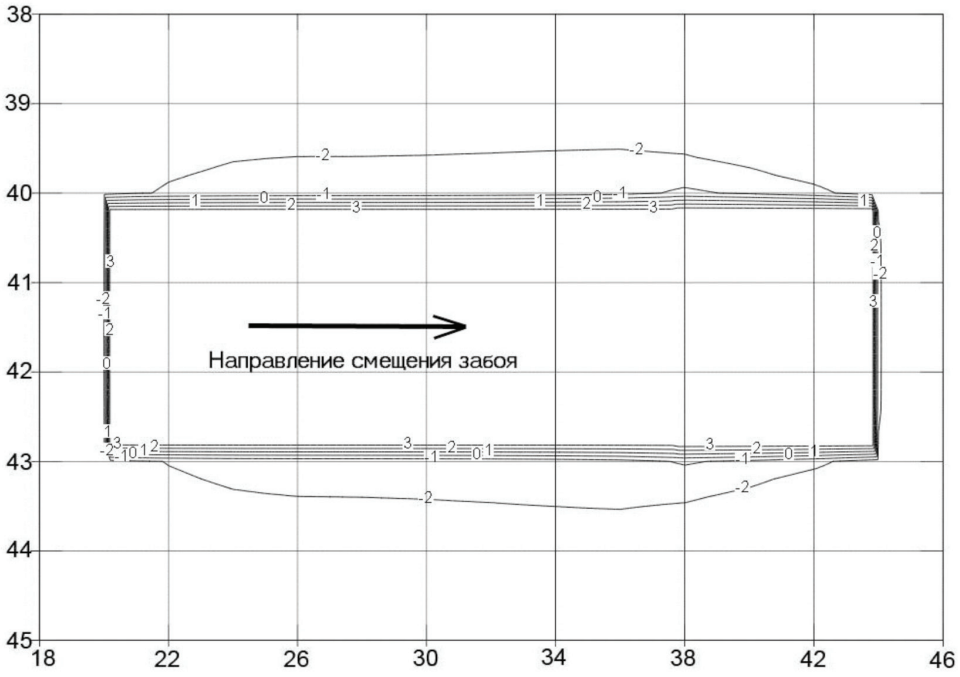

Рис. 3. Температурное поле вокруг очистной камеры, после её отработки, в плоскости YZ расчётной области (скорость подвигания забоя 2 м/сут, $T_в$ = +5 °C, Q = 8,9 м³/с)

Снижение объёмов воздуха подаваемого в очистной забой до 8,9 м³/с (для варианта, когда в забое работает ПДМ ST2G), при скорости подвигания забоя 1 м/сут и температуре вентиляционной струи воздуха $T_в$ = +5 °C приводит к сокращению размеров зон в кровле выработки, в которых породы имеют температуру выше –1 °C. Исключить её образование, как показывают расчеты, можно увеличив скорость подвигания забоя до 2 м/с (рис. 3).

Повышение среднесуточной температуры воздуха, подаваемого в очистной забой, до +10 °C приводит к образованию в кровле камеры зон с температурой выше –1 °C. Величина размеров зон с талыми породами незначительная и не превышает 0,02 м.

Выводы

Представленная в статье трехмерная математическая модель позволяет спрогнозировать температурный режим в очистной камере и окружающем ее массиве горных пород. Моделирование проводилось для условий россыпного месторождения алмазов «Солур». Результаты численных расчетов, которые проводились при различных исходных значениях технологических параметров, температуры вентиляционной струи и самоходного горно-шахтного оборудования (погрузочно-доставочные машины), показали возможность круглогодичной эксплуатации шахты при определенных сочетаниях указанных параметров.

Полученные при моделировании результаты могут быть использованы при составлении паспортов крепления очистных горных выработок и выборе конструктивных параметров системы разработки, тем самым обеспечивая создание безопасных условий при ведении горных работ на россыпных шахтах криолитозоны.

Список литературы / References

1. Марков В.С., Лабутин В.Н., Елшин В.К. Безвзрывная разработка многолетнемерзлых россыпных месторождений подземным способом. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. 176 с.

Markov V.S., Labutin V.N., Elshin V.K. Non-explosive development of permafrost deposits in the underground way. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2014. 176 p. (in Russian).

2. Киселев В.В., Хохолов Ю.А., Каймонов М.В. Приоритетный направления подземной золотодобычи и крепления очистного пространства россыпных шахт криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 5. С. 49–58. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-49-58.

Kiselev V.V., Khokhlov Yu.A., Kaimonov M.V. Preferred trends in underground gold placer mining and mine support in permafrost zone // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal). 2018. № 5. P. 49–58 (in Russian).

3. Шерстов В.А., Скуба А.Н., Лубий К.И., Костромитинов К.Н. Подземная разработка россыпных месторождений Якутии. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1981. 188 с.

Sherstov V.A., Skuba A.N., Lubiy K.I., Kostromitinov K.N. Underground mining of placer deposits of Yakutia. Yakutsk: Izd-vo YAF SO AN SSSR, 1981. 188 p. (in Russian).

4. Athey J.E., Werdon M.B., Twelker E., Henning M.W. Alaska's Mineral Industry 2015. AK: Alaska Division of Geological & Geophysical Survey, Fairbanks. 2016. 45 p. DOI: 10.14509/29687.

5. Modern Day Placer Mining in Yukon. URL: http://www.emr.gov.yk.ca/mining/pdf/modern_placer_mining.pdf (date of access: 15.08.2018).

6. Инструкция по разработке многолетнемерзлых россыпей подземным способом (камерные и столбовые системы разработки), РД 06-326-99. Утверждено постановлением Госгортехнадзора России от 18.11.99 № 84 [Электронный ресурс]. URL: http://7law.info/russia/regulation1c/u639/index.htm (дата обращения: 10.08.2018).

Instruction for the development of permafrost placers underground (chamber and pillar development systems), RD 06-326-99. Approved by Resolution of the Gosgortekhnadzor of Russia of 18.11.99 № 84 [Электронный ресурс]. URL: http://7law.info/russia/regulation1c/u639/index.htm (date of access: 10.08.2018) (in Russian).

7. Карелин В.Н., Кравченко А.В., Левин Л.Ю., Казаков Б.П., Зайцев А.В. Особенности формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников // Горный журнал. 2013. № 6. С. 65–68.

Karelin V.N., Kravchenko A.V., Levin L.Yu., Kazakov B.P., Zaitsev A.V. Features of formation of microclimatic conditions in mine workings of deep mines // Gornyy zhurnal. 2013. № 6. P. 65–68 (in Russian).

8. Курилко А.С., Хохолов Ю.А., Соловьев Д.Е. Особенности формирования теплового режима россыпных шахт криолитозоны при ведении добычных работ с применением самоходной техники // Горный журнал. 2015. № 4. С. 29–32. DOI: 10.17580/gzh.2015.04.06.

Kurilko A.S., Khokhlov Yu.A., Soloviev D.E. The features of cryolitezone placer mines, equipped by self propelling machinery, thermal conditions forming // Gornyy zhurnal. 2015. № 4. P. 29–32 (in Russian).

9. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислит. мат. и мат. физики. 1965. Т. 5. № 5. С. 816–827.

Samarskii A.A., Moiseenko B.D. An economical scheme for the counting account for the multidimensional Stefan problem // Zhurnal vychislit. mat. i mat. fiziki. 1965. T. 5. № 5. P. 816–827 (in Russian).