

СТАТЬИ

УДК 624.139.62: 536.244  
DOI 10.17513/use.38156

**ПРОГНОЗ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК  
ГЛУБОКОЙ ЗОЛОТОРОССЫПНОЙ ШАХТЫ КРИОЛИТОЗОНЫ,  
ЗАКРЕПЛЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ  
ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ НАБРЫЗГБЕТОННОЙ КРЕПЬЮ**

**Курилко А.С., Соловьёв Д.Е., Киселев В.В., Алексеев К.Н.**

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

Одним из эффективных способов защиты от протаивания подземных горных выработок шахт и рудников Севера, эксплуатирующихся в знакопеременном или положительном тепловых режимах, является применение в том числе теплозащитных набрызгбетонных покрытий с легким наполнителем. В статье приведены результаты исследований на основе разработанной методики и программного комплекса по прогнозу динамики и особенностям формирования теплового режима в горных выработках золотороссыпной шахты криолитозоны закрепленных металлической и комбинированной теплозащитной набрызгбетонной крепью. Выполнены прогнозные расчеты параметров теплового режима выработок, представленных в графическом виде. Сделаны выводы, что теплозащитная крепь толщиной до 10 см не обеспечивает защиту горных выработок от растепления, и для предотвращения этого необходимо применение более совершенных крепей и регулирование теплового режима в шахте в летний период. В случае консервации шахты на летний период применение теплозащитного набрызгбетона позволит сместить срок консервации шахты на начало июня, тем самым продлив добычной сезон. Подчеркивается, что тепловой режим является основным фактором, определяющим условия работы горнодобывающего предприятия – круглогодичные или с консервацией на летний период, которые определяются технико-экономическим расчетом.

**Ключевые слова:** криолитозона, россыпная шахта, тепловой режим, теплозащитная крепь, набрызгбетон, математическое моделирование

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (тема № 0297-2021-0021, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800083-0) с использованием (прибора, приборной базы, инфраструктуры и др.) ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН в рамках реализации мероприятий по гранту № 13.ЦКП.21.0016.*

**FORECAST OF THERMAL REGIME OF MINING WORKINGS  
IN A DEEP GOLD PLACER MINE IN THE CRYOLITHOZONE  
SUPPORTED WITH METAL AND COMBINED THERMAL  
PROTECTIVE SPRAYED CONCRETE SUPPORT**

**Kurilko A.S., Solovjev D.E., Kiselev V.V., Alekseev K.N.**

*Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Yakutsk, e-mail: solovjevde@igds.ysn.ru*

One of the effective ways to protect underground mines in mines of the North, operating in alternating or positive thermal conditions, from thawing is the use of heat-protective sprayed concrete coatings with light filler. The article presents the results of research based on the developed methodology and software package for predicting the dynamics and features of the formation of the thermal regime in the mine workings of a gold placer mine in the permafrost zone secured with metal and combined heat-protective shotcrete support. Forecast calculations of the parameters of the thermal regime of workings presented in graphical form were carried out. It was concluded that heat-protective support up to ten centimeters thick does not protect mine workings from thawing and to prevent this it is necessary to use more advanced supports and regulate the thermal regime in the mine in the summer. If the mine is mothballed for the summer, the use of heat-protective shotcrete will allow the mine mothballing period to be shifted to the beginning of June, thereby extending the mining season. It is emphasized that the thermal regime is the main factor determining the operating conditions of a mining enterprise – year-round or with conservation for the summer period, which are determined by technical and economic calculations.

**Keywords:** permafrost zone, alluvial mine, thermal regime, heat-protective support, shotcrete, mathematical modeling

*The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 0297-2021-0021 of the unified state information system for recording research, development and technological work for civil purposes No. 122011800083-0) using the equipment of the Center for Collective Use of the Federal research center «Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», grant No. 13. Center for collective use 21.0016.*

Рентабельная разработка глубокопогребенных мерзлых золотороссыпных месторождений Северо-Востока России требует строительства крупных высокомеханизированных шахт, эксплуатирующихся в круглогодичном режиме. Специалистами в области горной теплофизики подчеркивается неоспоримость утверждения о необходимости регулирования теплового режима (ТР) таких шахт [1, 2]. Известно, что ТР является одним из основных факторов, определяющих физико-механические свойства мерзлых дисперсных горных пород, устойчивость подземных сооружений и горных выработок в условиях криолитозоны, и в значительной степени предопределяет технологию ведения подземных горных работ, их эффективность и безопасность в значительной степени зависит от его правильного физико-технического обоснования.

Оценка криогенного состояния, физико-механических свойств горных пород и т.д. при различных аспектах ведения подземных горных работ в криолитозоне в настоящее время предопределяет необходимость математического моделирования тепловых процессов, происходящих в выработках и вмещающем их массиве мерзлых горных пород. Стремительное развитие вычислительной техники, позволяющей решать широкий класс тепловых задач с фазовыми переходами влаги в горных породах, характерных для криолитозоны, несомненно, способствует этому. Кроме того, во многих случаях математическое моделирование является наименее затратным и достаточно точным методом оценки как динамики формирования температурного поля мерзлого массива, вмещающего горные выработки, так и прогноза ТР [3].

Подземная разработка россыпных месторождений в криолитозоне характеризуется тесной взаимосвязью технологических процессов (система разработки, управление кровлей и др.) при ведении горных работ от температурного фактора [4]. В мерзлом состоянии дисперсные четвертичные отложения, слагающие россыпь, представляют собой монолитный массив за счет наличия в них льда-цемента. Прочность монолита зависит от температуры и повышается с ее понижением (возрастает более чем в три раза при понижении температуры от -1 до -18°C) [5]. При таянии содержащегося в песчано-глинистом заполнителе льда происходит обратный процесс – потеря цементирующих связей между минеральными частицами дисперсной породы и превращение ее в сыпучую или пластичную массу.

Одним из эффективных способов защиты подземных горных выработок шахт и рудников Севера, эксплуатирующихся в знакопеременном или положительном ТР, от протаивания в летний период за счет поступления атмосферного тепла, вносимого вентиляционным потоком, является применение, в частности, теплозащитных набрызгбетонных покрытий с легким наполнителем [6, 7]. Их применение обеспечивает устойчивость горных выработок, пройденных в мерзлых дисперсных породах, не допускающих протаивания или допускающих его на определенную глубину, тем самым снижая нагрузки на возведенную крепь (анкерную, рамную и др.). Помимо этого набрызгбетонная крепь защищает пристеночные горные породы выработок от морозного выветривания, тем самым повышая их устойчивость и срок службы.

Поддержание горных выработок на шахтах и рудниках Севера зачастую осуществляется с использованием анкеров или металлических рамных крепей из спецпрофиля СВП с затяжкой кровли и бортов деревом [6]. Анкерная крепь в комбинации с прочным набрызгбетонным покрытием обладает высокой несущей способностью (основную механическую нагрузку воспринимают анкера), податливостью и ремонтпригодностью. В комбинации с рамной крепью набрызгбетон помимо упрочнения приконтурных пород также играет роль затяжки и предохраняет металл от коррозии.

В работе представлены результаты исследований, посвященных выявлению особенностей влияния набрызгбетонной теплозащитной крепи на формирование теплового режима в горных выработках и вмещающем их массиве мерзлых пород глубокой высокомеханизированной золотороссыпной шахты Севера «Ручей Раковский».

#### **Материалы и методы исследования**

Наибольшее влияние на формирование температурного режима шахт и рудников Севера оказывают ряд таких факторов, как природные климатические условия района, вентиляционный режим и наличие многолетнемерзлых горных пород.

Математическое моделирование тепловых и вентиляционных процессов, протекающих в подземных горных выработках, и создание на их основе компьютерных программ позволяет решать сложные задачи, связанные с прогнозом ТР шахт и рудников Севера с учетом указанных выше факторов, а также динамики развития горных работ,

технологических процессов и др. В лаборатории горной теплофизики ИГДС СО РАН разработан программный комплекс, позволяющий рассчитать воздухораспределение и ТР сети горных выработок криолитозоны с учетом интенсивности теплообмена воздушной струи с окружающим массивом пород и фазовых переходов влаги в них [3].

Поскольку шахтную вентиляционную сеть можно рассматривать как взаимосвязанную систему, то изменение отдельных параметров в одном из элементов вызовет их изменение в ее остальных частях. Воздухораспределение в вентиляционной сети шахты зависит и одновременно определяет динамику теплового режима в горных выработках. Поэтому необходимо задачу воздухораспределения в выработках россыпной шахты решать совместно с задачей теплообмена вентиляционного воздуха с вмещающим мерзлым горным массивом [3].

Алгоритм совместного решения такой задачи заключается в следующем. Сначала задается начальное распределение температур воздуха и массива горных пород вокруг выработок во всех ветвях вентиляционной системы шахты. При заданных температурах воздуха решается задача воздухораспределения, т.е. определяются расходы воздуха в каждой выработке сети. Далее, исходя из топологической информации, определяется порядок расчета температуры воздуха по ветвям. Расчет начинается с воздухоподающих выработок сети. Температура воздуха на входе в выработку является уже известной величиной (т.е. входящие ветви в узел, с которого начинается выработка, уже прошли через процедуру расчета температуры воздуха). Согласно установленному порядку проводится процедура расчета температуры воздуха во всех выработках сети [3].

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

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Прогноз и выявления особенностей формирования ТР выработок строящейся золотороссыпной шахты «Ручей Раковский» осуществлялись на основе разработанного программного комплекса с учетом параметров вентиляционной струи, крепления горных горных выработок, теплофизических

свойств пород и др. Эта шахта, относящаяся к глубоким (пласт золотоносных песков залегает на глубине 200 м), разрабатывает глубокопогребенное золотороссыпное месторождение ручья Раковский, которое находится в Сусуманском районе Магаданской области. Необходимо отметить, что данное месторождение находится в зоне распространения «вялой» мерзлоты с высокими температурами пород  $-1,5^{\circ}\text{C}$  (в пределах продуктивного пласта) и в связи с этим низкими прочностными характеристиками песков и торфов, во многом затрудняющими его разработку.

Схема горных выработок шахты на первый период строительства приведена на рис. 1. Свежий воздух подается с поверхности в шахту через наклонный вентиляционный съезд (ВНС), а исходящая струя выдается через наклонный транспортный съезд (НТС).

В период с июня 2020 г. по июль 2021 г. сотрудниками института в строящейся россыпной шахте проводились натурные наблюдения за динамикой формируемого температурного режима. Для этого были оборудованы стационарные термостанции, в которые были установлены термогирлянды с терморезисторами типа ММТ-4.

В ходе проведенных наблюдений было установлено:

- естественная температура покрывающих дисперсных горных пород над продуктивным пластом не превышает  $-2^{\circ}\text{C}$ , что подтверждает ранее проведенные сторонними организациями геотермические наблюдения;

- температура продуктивного пласта золотоносных песков месторождения на глубине 200 м находится в интервале от  $-1,2$  до  $-1,5^{\circ}\text{C}$ .

На основе имеющихся горнотехнических и горно-геологических параметров, а также данных о физико-механических свойствах, полученных в процессе лабораторных исследований образцов горных пород (отобранных с золотороссыпного месторождения «Ручей Раковский»), задавались исходные значения для проведения численных расчетов. Исходные значения температур горного массива приняты по данным натурных наблюдений. В соответствии с требованиями ведомственных строительных норм (ВНС 126-90) толщина набрызг-бетонного покрытия применяемого в качестве расчетной несущей конструкции самостоятельно или в сочетании с анкерами или арками, должна быть не менее 5 см.

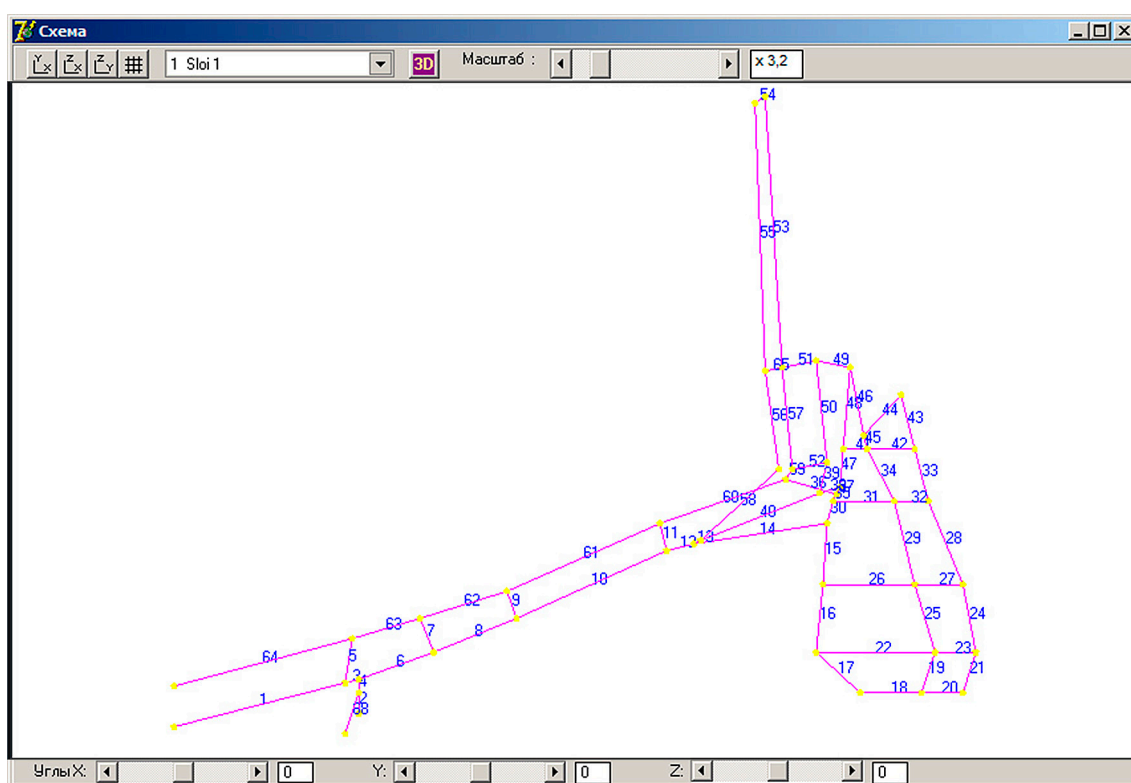


Рис. 1. Схема горных выработок россыпной шахты руч. Раковский  
(цифрами обозначены номера ветвей)

При численных расчетах теплозащитная набрызгбетонная крепь учитывается как термическое сопротивление при теплообмене шахтного воздуха с породным массивом, вмещающим горные выработки. В расчетах была принята толщина крепи равная 0,05 м, с коэффициентом теплопроводности 0,25 Вт/(м·К) при плотности вермикулитобетона 1086 кг/м<sup>3</sup> [7].

При проведении прогнозных расчетов параметров ТР россыпной шахты рассмотрен вариант ее эксплуатации в круглогодичном режиме (в зимний период воздух, подаваемый в шахту, подогревается до температуры не ниже -20 °С) и с наличием двух видов крепи горных выработок:

І. металлических рамных крепей из спецпрофиля СВП и анкерной крепи;

ІІ. металлических рамных крепей из спецпрофиля СВП и анкеров в комбинации с теплозащитной набрызгбетонной крепью.

Кроме улучшения санитарно-гигиенических условий горнорабочих необходимость подогрева вентиляционной струи в зимний период связана с тем, что в качестве индивидуальных средств защиты предполагается использование шахтных самоспасателей ШСС-1М, которые согласно

инструкции эксплуатируются при температуре не ниже -20°С.

В соответствии с проектом, требуемый объем воздуха для вентиляции шахты довольно значителен и составляет 130 м<sup>3</sup>/с, из-за необходимости разжижения выхлопных газов, выделяемых высокопроизводительным горным оборудованием с дизельным приводом.

Прогнозные расчеты параметров ТР горных выработок и вмещающего их горного массива россыпной шахты проводились на двухгодичный период эксплуатации, с марта 2022 г. по март 2024 г.

Результаты расчетов для первого варианта крепления горных выработок (без наличия теплозащитного набрызгбетона) показаны на рис. 2 и 3 в виде графиков динамики изменения температуры массива горных пород (на глубине 0,25; 0,5 и 1 м от стенки выработки) и шахтного воздуха в летний и зимний периоды эксплуатации шахты.

Как видно из рис. 2, по мере движения по горным выработкам теплый воздух, поступающий в шахту в летний период с поверхности для вентиляции, постепенно охлаждается, при этом сохраняя положительные значения на всем пути вплоть



до устья воздуховыдающей выработки. Наиболее интенсивные процессы теплообмена происходят в воздухоподающих выработках, по которым проходит наиболь-

ший объем воздуха для проветривания. Далее по мере движения воздушного потока интенсивность теплообменных процессов снижается.

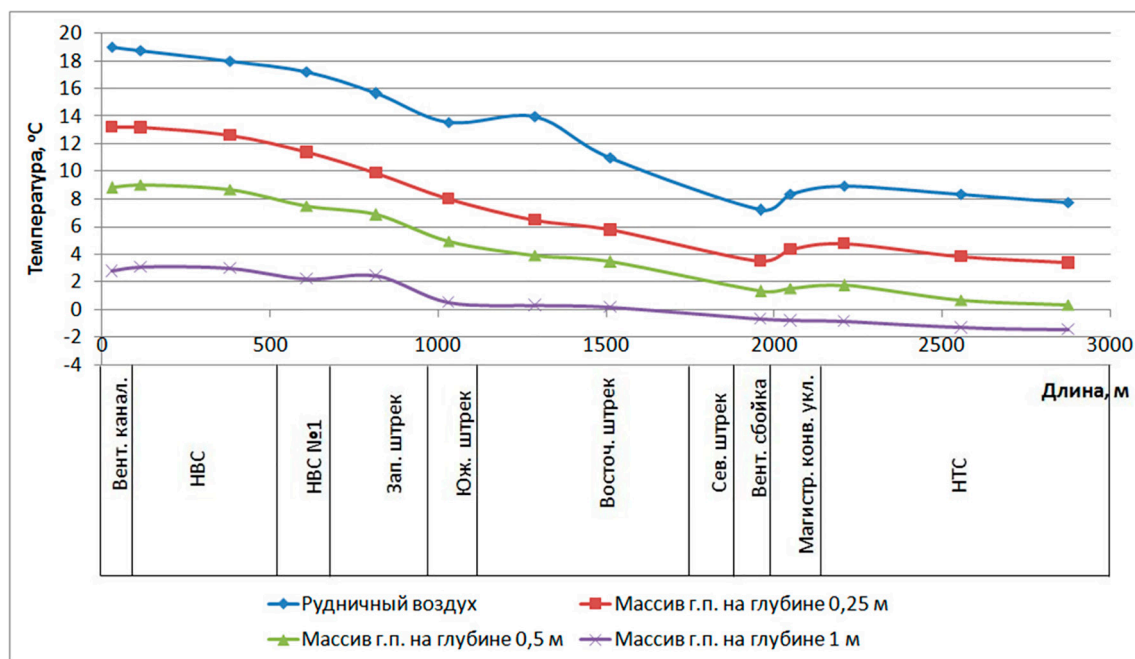


Рис. 2. Динамика температур массива горных пород и шахтного воздуха на дату 24 июля второго расчетного года эксплуатации РПШ по пути вентиляционной струи. Для I варианта расчетов (металлическая крепь и анкера)

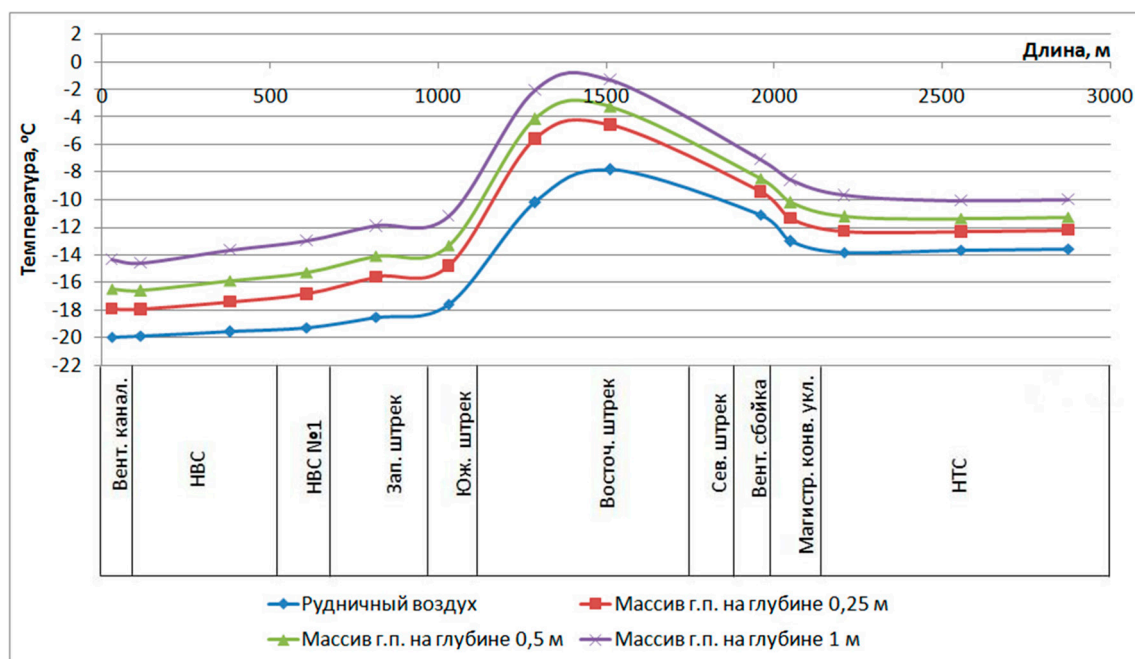


Рис. 3. Динамика температур массива горных пород и шахтного воздуха на дату 23 января второго расчетного года эксплуатации РПШ по пути вентиляционной струи. Для I варианта расчетов (металлическая крепь и анкера)

Подача в шахту теплого воздуха объемом около  $130 \text{ м}^3/\text{с}$  при относительно небольших ее размерах, приводит к интенсивному протаиванию мерзлых горных пород во всех выработках вентиляционной сети, в том числе и в наклонном транспортном съезде, через который отработанный воздух выдается из шахты. Максимальные размеры ореолов протаивания вмещающих пород, соответственно, также будут приходиться на воздухоподающие выработки. Так, в вентиляционном канале, вентиляционном наклонном съезде, западном штреке их размеры в летний период могут достигать 1,5 м вглубь горного массива. В очистных выработках, где естественные температуры продуктивного пласта песков относительно высокие (по данным натурных замеров составляют в среднем  $-1,5^\circ\text{C}$ ), также происходит подогрев шахтного воздуха от тепла, выделяемого работающей дизельной техникой. Это приводит к тому, что в данной области шахты (восточный штрек) также происходит существенное растепление вмещающих пород (размеры ореолов протаивания превышают 1 м). В наклонном транспортном съезде фиксируется самая низкая температура исходящей вентиляционной струи, которая понижается в два раза по сравнению с температурой в воздухоподающих выработках и это сказывается на размерах ореолов протаивания вмещающего массива горных пород, который не превышает 1 м.

Как видно из рис. 3, в зимний период за счет подогрева атмосферного воздуха, подаваемого в шахту, температура в горных выработках в соответствии с требованиями не опускается ниже  $-20^\circ\text{C}$ . В зоне ведения очистных работ (восточный штрек) за счет теплообмена с горными породами, имеющими относительно высокие отрицательные значения, а также поступления тепловыделений от работающей дизельной техники приводят к локальному прогреву шахтного воздуха до  $-8^\circ\text{C}$ , что создает относительно благоприятные условия труда для горнорабочих. Дальнейшее понижение температуры воздуха (как видно из приведенных графиков) обусловлено его смешиванием с более холодными вентиляционными струями, поступающими из других участков шахты.

В зимний период холодный атмосферный воздух, поступающий в шахту, приводит к обратному процессу повсеместного промораживания слоя оттаявших в теплый период года мерзлых горных пород. По ре-

зультатам численных расчетов, которые отражены на рис. 3, температура горных пород, вмещающих капитальные и подготовительные выработки, на конец января второго расчетного года будет иметь значения ниже  $-6^\circ\text{C}$ , тем самым снижая риск обрушения кровли и бортов выработок и, соответственно, повышая безопасность ведения горных работ.

Основываясь на результатах проведенных исследований, можно сделать вывод, что применение теплозащитной набрызгбетонной крепи, при столь относительно большом расходе воздуха ( $130 \text{ м}^3/\text{с}$ ), подаваемого в шахту, хотя и замедляет, но не обеспечивает защиту массива горных пород от протаивания в летний период (рис. 4). Как показали численные расчеты, толщина оттайки составляет немногим более одного метра, что создает дополнительную нагрузку (помимо горного давления) на основную несущую крепь и может привести к ее разрушению, обрушению кровли и стенок выработок.

Результаты расчетов для случая, когда толщина теплозащитного набрызгбетона составляет 0,1 м, приведены на рис. 5, видно, что двукратное увеличение толщины также не защищает породы от растепления. Размеры ореолов протаивания по длине вентиляционного пути будут находиться в пределах, не превышающих 1 м.

Таким образом, одним из вариантов обеспечения безопасной, круглогодичной эксплуатации шахты является увеличение толщины крепи из теплозащитного набрызгбетона, добиваясь допустимой глубины протаивания пород, вмещающих горные выработки в летний период. Кроме этого, специалистами [7], в частности, предлагается использовать на рудниках и шахтах криолитозоны двухслойные набрызгбетонные крепи, состоящие из тяжелого и легкого бетонов, обладающие высокими теплоизоляционными и прочностными показателями. Также в этих целях может быть рекомендовано применение высокомодульной базальтовой и низкомодульной полипропиленовой фибры в качестве микроарматуры торкрет-бетонных крепей и теплозащитных покрытий [8–10]. Полученный на этой основе композиционный строительный материал обладает повышенной стойкостью к статическим и динамическим нагрузкам, что, в свою очередь, способствует долговременной устойчивости бетонных конструкций и повышению безопасности труда горнорабочих.

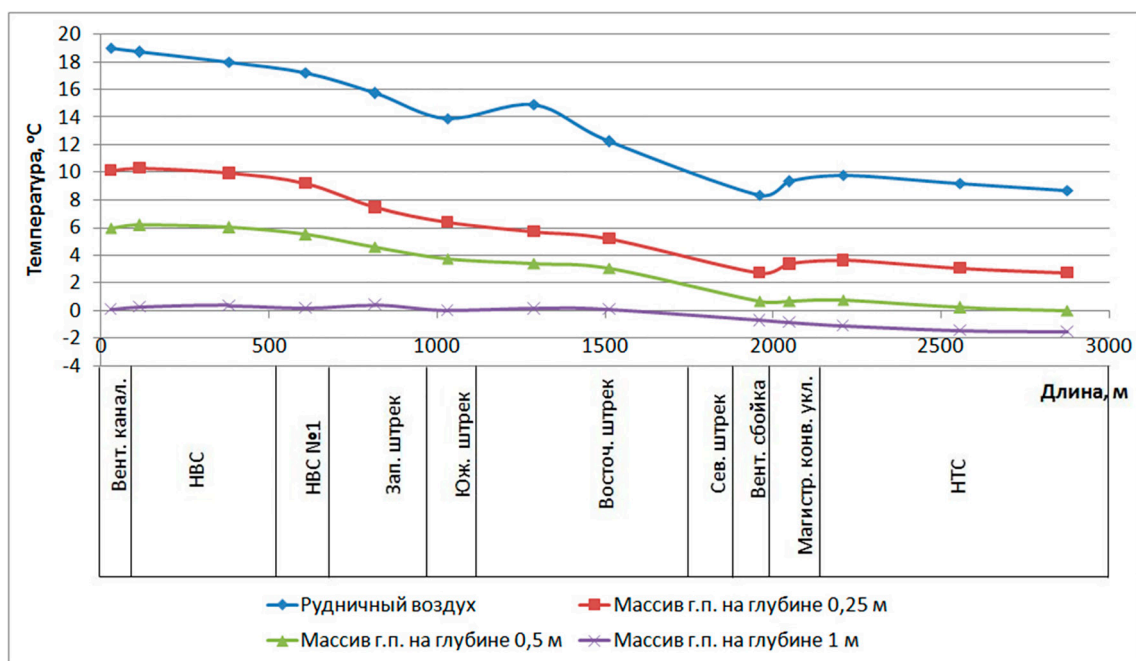


Рис. 4. Динамика температур массива горных пород и шахтного воздуха на дату 24 июля второго расчетного года эксплуатации РПШ по пути вентиляционной струи. Для II варианта расчетов (металлическая крепь, анкера и теплозащитный набрызгбетон толщиной 0,05 м)

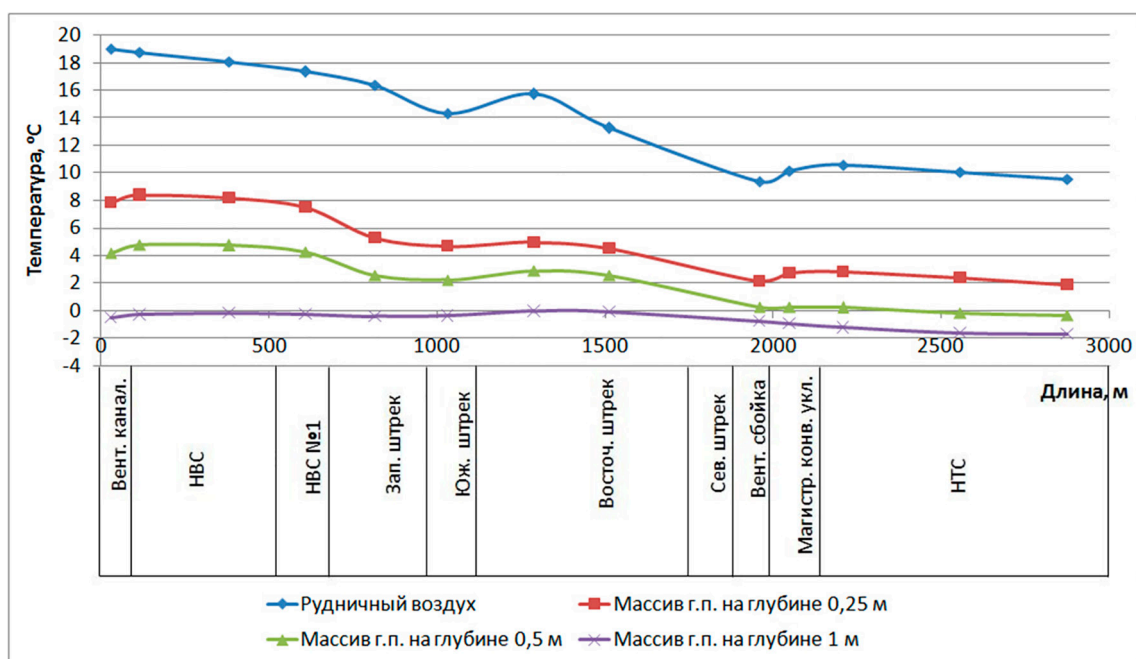


Рис. 5. Динамика температур массива горных пород и шахтного воздуха на дату 24 июля второго расчетного года эксплуатации РПШ по пути вентиляционной струи. Для II варианта расчетов (металлическая крепь, анкера и теплозащитный набрызгбетон толщиной 0,1 м)

Также возможно считать обоснованной необходимость применения различных способов регулирования ТР шахты (как в зимнее, так и в особенности в летнее время) для

снижения температуры шахтного воздуха, циркулирующего по горным выработкам, и, как следствие этого, уменьшения растепления пород. Все это потребует дополнитель-

ных технико-экономических расчетов для обоснования целесообразности эксплуатации шахты в летний период.

В случае невозможности обеспечения безопасной эксплуатации шахты в летний период рекомендуется ее временная консервация, которая по результатам численных расчетов должна осуществляться на период с 15 мая по 15 сентября. Применение теплозащитного набрызгбетона позволит сменить срок консервации шахты на начало июня, тем самым продлив добычный сезон.

### Заключение

Таким образом, как показали численные расчеты, применение теплозащитного набрызгбетона (толщиной до 0,1 м) в климатических и горно-технических условиях глубокой, высокомеханизированной золотороссыпной шахты «Ручей Раковский» не обеспечивает защиту от протаивания породного массива, вмещающего горные выработки. Эксплуатация шахты с естественным (нерегулируемым) ТР в летний период может создать угрозу обрушения горных выработок из-за интенсивного протаивания вмещающих мерзлых горных пород на глубину до 1 м.

Чтобы обеспечить безопасную круглогодичную эксплуатацию золотороссыпной шахты, необходимо либо увеличивать толщину возводимой крепи из теплозащитного набрызгбетона, добиваясь допустимой глубины протаивания пород, либо применять различные способы регулирования ТР шахты (не только в зимний, но и в летний периоды) для снижения температуры шахтного воздуха, циркулирующего по горным выработкам, до отрицательных значений.

Есть основание утверждать, что разработка проектов на строительство круглогодичных россыпных шахт в северных регионах РФ должна в обязательном порядке включать раздел по регулированию

ТР как в зимний, так и в летний периоды ее эксплуатации.

Тем самым тепловой режим наряду с вентиляционным при подземной отработке глубокопогребенных золотороссыпных месторождений (находящихся в зоне «вялой» мерзлоты) является основным фактором, определяющим режим работы горного предприятия и выполнения технологических операций, а также при выборе механизмов и оборудования.

### Список литературы

1. Степанов А.В., Попенко Ф.Е., Рожин Ф.Е. Основы инженерной защиты объектов строительства в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 2014. 448 с.
2. Васильев В.И. Моделирование распределения стационарных температурных полей в криолитозоне при проектировании геотехнических сооружений. М.: КУРС, 2017. 624 с.
3. Хохолов Ю.А., Соловьев Д.Е. Математическое моделирование тепловых процессов в горных выработках шахт и рудников Севера. Новосибирск: Гео, 2013. 185 с.
4. Марков В.С., Лабутинов В.Н., Елшин В.К. Безвзрывная разработка многолетнемерзлых россыпных месторождений подземным способом. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. 176 с.
5. 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.
6. Шапошник С.Н., Шапошник Ю.Н., Крупник Л.А., Нуршайыкова Г.Т. Обоснование эффективности применения набрызгбетонной крепи горных выработок в криолитозоне // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. 2020. № 1. С. 86–91.
7. Галкин А.Ф., Киселев В.В., Курилко А.С. Набрызгбетонная теплозащитная крепь. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. 164 с.
8. Alekseev K.N., Kurilko A.S. Strength characteristics of fiber-reinforced light shotcrete // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 192. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201020.
9. Харун М., Коротеев Д.Д., Дхар П., Ждеро С., Елроба Ш.М. Физико-механические свойства базальто-волоконного высокопрочного бетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14, № 5. С. 396–403. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-396-403.
10. Соболев Г.М., Зотов А.Н. Морозостойкость и водонепроницаемость модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй // Вестник научных конференций. 2018. № 5–2 (33). С. 89–91.