

ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕЛИОРАЦИЯ ГЕОМАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ ПОДУШКИ В ОТРАБОТАННЫХ КИМБЕРЛИТОВЫХ КАРЬЕРАХ КРИОЛИТОЗОНЫ, И ПРОГНОЗ ЕЁ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА

В. В. Киселев¹, Ю. А. Хохолов¹

¹ Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, Якутск, Россия

Аннотация: Изложены методологические основы решения ряда специфических задач, стоящих при сооружении подвижных породных защитных подушек, возводимых на дне отработанных кимберлитовых карьеров криолитозоны для последующей подземной отработки подкарьерных запасов нисходящим способом системами с обрушением. Подчеркивается особая значимость проведения натуральных экспериментов по изучению физико-технических свойств геоматериалов и смесей, используемых для их сооружения. Приводятся описания специально разработанных, запатентованных экспериментальных установок и ход ведения исследовательских работ. Разработана технологическая схема с перечнем необходимых аппаратов по технической мелиорации геоматериалов, предназначенных для возведения предохранительной подушки, обеспечивающая требуемый гранулометрический состав, сыпучие свойства и подвижность в период её круглогодичной эксплуатации. Перечислены результаты исследований на математических моделях процессов тепло- и массообмена, происходящих в предохранительной подушке. Приведены примеры расчета необходимой депрессии воздуха при различных значениях толщин предохранительной подушки. Полученные результаты при их реализации позволяют разработать рекомендации по возведению защитных подушек, обеспечению круглогодичной подвижности и требуемых фильтрационных характеристик и, как следствие этого, повысить безопасность ведения подземных горных работ на рудниках криолитозоны, осуществляющих доработку алмазорудных месторождений.

Ключевые слова: предохранительная подушка, геоматериалы, техническая мелиорация, технологическая схема, отработанный карьер, подземный рудник, криолитозона, математическая модель, фильтрация, фазовые превращения влаги, температура.

Для цитирования: Киселев В. В., Хохолов Ю. А. Техническая мелиорация геоматериалов, используемых для возведения предохранительной подушки в отработанных кимберлитовых карьерах криолитозоны, и прогноз её температурно-влажностного режима // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12–1. – С. 95–106. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_95.

Mechanical melioration of geomaterials for making safety cushions in mined-out open kimberlite pits and prediction of temperature–humidity conditions of the cushion in the permafrost zone

V. V. Kiselev¹, Yu. A. Khokholov¹

¹ Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Abstract: The methodology framework is presented for solving specific problems connected with construction of resilient safety cushions at the bottom of open pit mines to ensure further underground mining under the pits by underhand caving systems. It is highly important to perform full-scale studies into physicochemical properties of geomaterials and mixtures used for making such structures. The paper describes the dedicated and patented experimental setups and the experimentation procedure. The mechanical melioration technology and equipment intended for the safety cushion construction ensure the required grain size composition, looseness and resilience of the cushion during its year-round operation. The mathematical modeling data are discussed, and the features of the mass exchange and heat transfer processes which govern resilience and permeability of the cushion are revealed. The required depression of the cushion is calculated for different values of its thickness. The implementation of the experimental results can allow recommendations on construction of safety cushions with the wanted year-round resilience and permeability and, as a consequence, can enhance safety of underground diamond mining in the permafrost zone.

Key words: safety cushion, geomaterials, mechanical melioration, process flow chart, mined-out open pit, underground mine, permafrost zone, mathematical model, permeation, phase transformation of moisture, temperature.

For citation: Kiselev V. V. , Khokholov Yu. A. Mechanical melioration of geomaterials for making safety cushions in mined-out open kimberlite pits and prediction of temperature–humidity conditions of the cushion in the permafrost zone. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(12–1):95–106. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_95.

Введение

Достижение критических глубин карьерами АК «АЛРОСА», отрабатывающих верхние части кимберлитовых трубок на территории РС(Я), принуждает алмазодобывающие предприятия к значительному расширению подземного способа их доработки, в том числе системами большой мощности с обрушением, предполагающими сооружение предохранительной (защитной) породной подушки (ПП) в виде навала на дне отработанного карьера. В этих целях для её сооружения необходимо укладывать значительный объем пород, находящихся во вскрышных отвалах различного вещественного и грануло-

метрического состава, в связи с этим требующих предварительную техническую мелиорацию, чтобы получить однородную по всем параметрам породную смесь и обеспечивать затем многофункциональное назначение возведенной ПП на длительный период (до 30 лет), т. е. на весь срок существования рудника [1–4].

ПП должна обеспечивать надёжную защиту подземного рудника от динамических воздействий породных отделностей, падающих с уступов бортов отработанного карьера; изоляцию подземного пространства от проникновения в больших объёмах холодного атмосферного воздуха в зимнее время,

предотвращая тем самым дестабилизацию вентиляционного и температурного режимов; фильтрацию всех типов вод, поступающих в отработанный карьер. Кроме этого, ПП должна находиться в состоянии постоянной (круглогодичной) подвижности, равномерно опускаться при понижении очистных работ в руднике без образования зависаний и куполов.

К геоматериалам ПП и сыпучей породной смеси, приготавливаемой на их основе, на момент её сооружения предъявляется ряд требований, выполнение которых позволит обеспечить, в частности, её непрерывную круглогодичную подвижность и высокие фильтрационные свойства.

Для оценки и прогноза подвижности и фильтрующих свойств ПП в процессе эксплуатации, устойчивости кусков геоматериалов подушки к морозному выветриванию и механическому истиранию необходимо проведение предварительных опытно-экспериментальных работ в условиях, максимально приближенных к реальным. По результатам экспериментов могут быть скорректированы расчётные показатели, внесены изменения в состав и технологию возведения ПП, разработаны рекомендации и технологические регламенты.

Как известно, регулирование теплового режима ПП является определяющим фактором, влияющим на подвижность её, эффективность и безопасность горных работ [5]. При фильтрации влажного воздуха через слой мерзлых пород происходят конденсационные процессы с выпадением влаги на поверхности пород, что может привести к их смерзанию с образованием конгломератов и нарушению равномерности опускания ПП. Поэтому необходимы исследования на математических моделях с учетом тепломассобменных процессов, происходящих в ПП

для выявления особенностей температурно-влажностного режима.

Тепловой режим ПП формируется под влиянием множества факторов и имеет сложный характер, а также количественные и качественные особенности, и практически основательно не изучен ввиду целого ряда причин [5, 6]. Необходимость его регулирования является постулатом, во многом определяющим подвижность ПП, ритмичность работы рудника, эффективность и безопасность ведения горных работ.

Методика технической мелиорации геоматериалов и приготовления породной смеси для возведения породной подушки на дне отработанного кимберлитового карьера

Как правило, геоматериал отвалов кимберлитовых карьеров в естественном состоянии крайне разнороден по всем параметрам, в связи с чем не пригоден для возведения долговременного сооружения, какой является ПП ввиду наличия в большом количестве выветрелых отдельностей от глыб до штыба. Данные табл. 2.2 [3] показывают, что наибольшие прочностные характеристики имеют доломиты, доломитизированные и кавернозные известняки. По этой причине при выборе отвалов в период проведения инженерных изысканий на промплощадке ГОКа необходимо руководствоваться этими сведениями. При этом крайне важно, чтобы в выбранных отвалах содержание мергелей, глинистых и илистых компонентов было минимальным. Как известно, эти мелкозернистые фракции, часто содержащие гелеобразные включения, способствуют слеживаемости породных отдельностей, находящихся в навале ПП, снижающих её подвижность и фильтрационные свойства, что чревато возникновением аварийных ситуаций. Кроме этого, для получения качественной смеси необходимо обе-

спечить требуемый гранулометрический состав геоматериалов как минимум трёх категорий крупности (–150; –50; –16 мм).

Геоматериал ПП должен отвечать общеизвестным нижеперечисленным требованиям: размокаемость — неразмокаемые; морозостойкость — $F \geq 50$; плотность — $\approx 2,5 \text{ Т/м}^3$; пористость — $\leq 6\%$; степень засоленности — $\approx 0,15 - 0,2\%$; прочность на сжатие — $\geq 10 \text{ МПа}$.

Гранулометрический состав смеси геоматериалов, слагающих ПП, состоит из трех фракций (камней, щебня, дресвы): максимальный размер кусков — 150 мм; средний размер щебня — 50 мм; средний размер дресвы — 16 мм.

Требуемые физико-технические характеристики смеси (навала) геоматериалов ПП: пустотность — $\geq 20\%$; водопроницаемость — $\geq 0,5 \text{ м/сутки}$; степень засоленности — $\approx 0,15 \div 0,2\%$; содержание штыба (глинисто-илистых включений) — $\leq 5\%$.

Техническая мелиорация геоматериалов отвалов должна обеспечить: получение сыпучего, обесшламленного геоматериала трёх классов крупности (150, 50 и 16 мм) с низкой степенью лещадности (т. е. кубической формы); дезинтеграцию геоматериалов породных отвалов; тщательную отмывку глинисто-илистых включений; обезвоживание получаемых продуктов; перемешивание и усреднение компонентов для получения однородной смеси требуемого состава.

В пределах горного отвода рудника должны быть проведены инженерные изыскания по специально разработанной программе, в ходе которых уточнены в дополнение к существующим следующие параметры: особенности техногенно нарушенного ландшафта; расположение техногенных водоёмов, котлованов; изучение результатов

ранее проведённых изысканий НИР, геологических материалов; выявление наиболее предпочтительных породных отвалов, их расположение, гранулометрический и минералогический состав, строение, степень выветрелости, температурный режим, глубин сезонного промерзания (протаивания); решены вопросы: выбора технологической площадки для расстановки оборудования технической мелиорации, водоснабжения, размещения и устройства отстойников, временных отвалов (буртов) и т. д.

В процессе проведения изысканий также должны быть проведены лабораторные и натурные исследования физико-технических свойств геоматериалов отвалов по гостированным методикам [3].

На основе результатов инженерных изысканий определяется приближительный гранулометрический состав смеси ПП, который затем проверяется на соответствие требованиям по проведению опытно-экспериментальных работ, которые рекомендуется проводить на специальных запатентованных установках, разработанных ИГДС СО РАН [7, 8]. Установки рассчитаны на проведение исследований на натурном геоматериале в реальных климатических и технологических условиях эксплуатации ПП с обеспечением её подвижности, благодаря чему имитируется эффект понижения горных работ в руднике. Установки не имеют принципиальных различий, и использование какой-либо из них определяется местными условиями [9].

Для технической мелиорации геоматериалов породных отвалов рекомендуется применять оборудование и механизмы, используемые при обогащении алмазосодержащих россыпей, хорошо зарекомендовавшие себя на алмазодобывающих предприятиях. Оборудова-

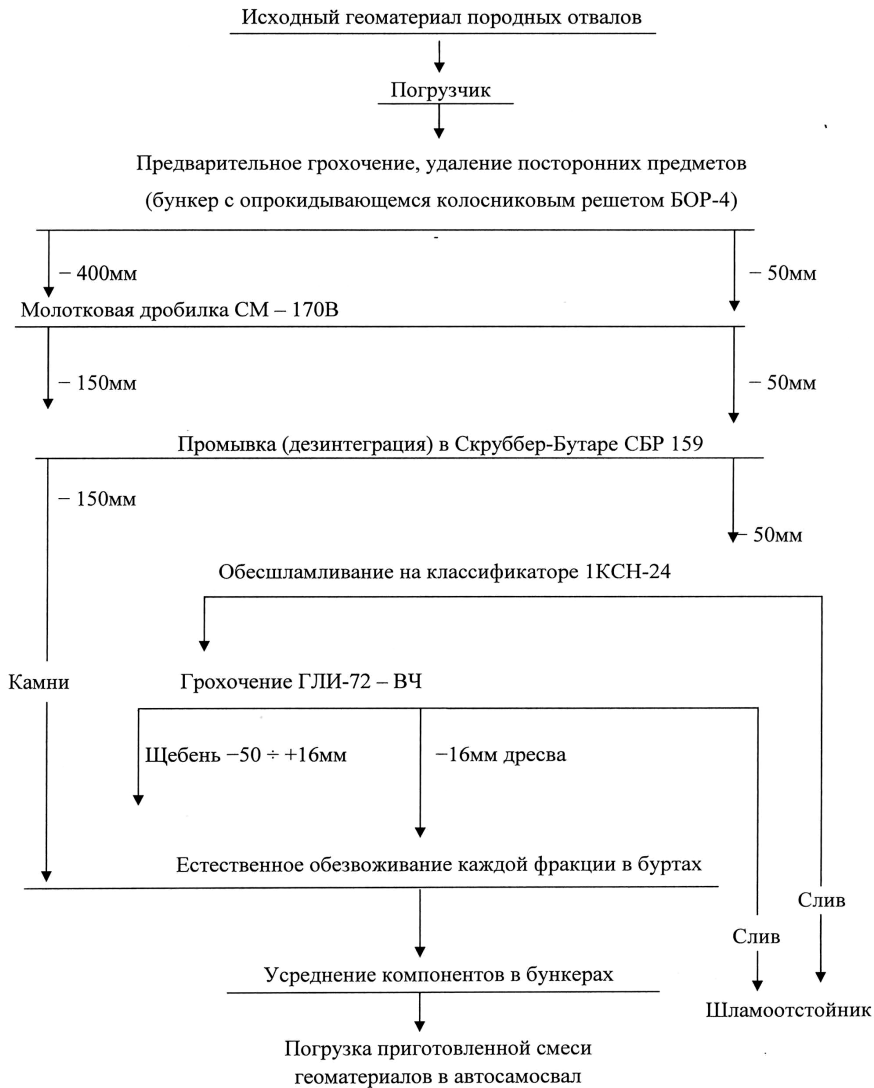


Рис. 1. Технологическая схема технической мелиорации и приготовления смеси геоматериалов породной подушки

Fig. 1. Technological scheme of technical reclamation and preparation of a mixture of rock pillow geomaterials

ние размещается на специально подготовленной технологической площадке (косогоре), каскадно на различных высотных отметках с максимальным обеспечением самотечного передвижения перерабатываемого материала и сокращения перегрузочных операций. В качестве вспомогательного, транс-

портного оборудования и механизмов используются: колёсные погрузчики, транспортёры, автосамосвалы, бутобои, электромагниты для улавливания металлических предметов.

Технологическая схема технической мелиорации геоматериалов представлена на рис. 1., схема цепи аппа-

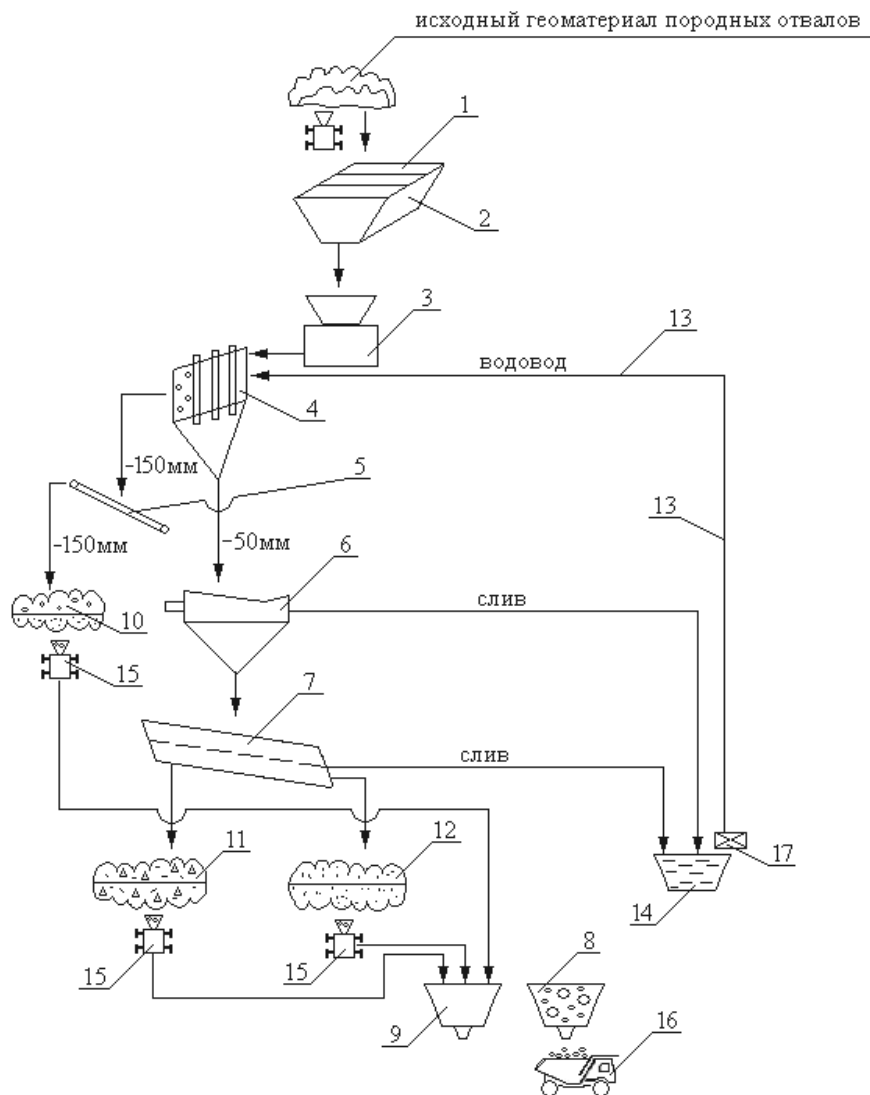


Рис. 2. Схема цепи аппаратов для технической мелиорации и приготовления смеси геоматериалов породной подушки: 1 – грохот колосниковый; 2 – бункер-питатель БПК-1000; 3 – молотковая дробилка СМ-170В; 4 – скруббер-бутира СБР-159; 5 – транспортёр; 6 – классификатор 1КСН-24; 7 – грохот ГЛИ-72ВЧ; 8 – усреднительный бункер в стадии разгрузки; 9 – усреднительный бункер в стадии наполнения; 10 – бурт крупного геоматериала; 11 – бурт щебня; 12 – бурт дресвы; 13 – водовод; 14 – шламоотстойник; 15 – колёсные погрузчики; 16 – автосамосвал; 17 – водяной насос

Fig. 2. Circuit diagram of devices for technical reclamation and preparation of a mixture of rock pillow geomaterials: 1 – grate screen; 2 – hopper feeder BOD-1000; 3 – hammer crusher SM-170V; 4 – scrubber-butara SBR-159; 5 – conveyor; 6 – classifier 1КСН-24; 7 – screen GLI-72VH; 8 – averaging hopper in the unloading stage; 9 – averaging hopper in the filling stage; 10 – a pile of large geomaterial; 11 – a pile of crushed stone; 12 – a pile of gravel; 13 – a water pipe; 14 – a sludge sump; 15 – wheel loaders; 16 – a dump truck; 17 – a water pump

ратов — на рис. 2. Предполагается последовательное производство ряда операций, которые выполняются в летнее время при положительной температуре наружного воздуха и появления воды в достаточном количестве.

Транспортировка геоматериалов отвалов на промплощадку осуществляется автосамосвалами с размещением во временный отвал, откуда они колёсными погрузчиками доставляются к бункеру и разгружаются на решётку-грохот. Решётка-грохот с ячейёй 400×400 мм по мере накопления негабаритов опрокидывается и сбрасывает их в отвал, где затем производится дробление бутаобоями и последующее использование.

Материал крупностью 400 мм подаётся в молотковую дробилку, где производится его дробление до фракции 150 мм. Затем переработанные материалы направляются в скруббер-бутару, где осуществляется их дезинтеграция и удаление фракции 150 мм во временный отвал (бурт) для обезвоживания естественным путём. После этого материал крупностью 50 мм поступает на обесшламливание в классификатор, а затем на грохочение, где разделяется на две фракции — 50 (щебень) и 16 мм (дресва), которые так же направляются на обезвоживание во временные отвалы.

Сливные продукты всех стадий переработки направляются в шламоотстойник. Осветлённая вода насосами подаётся в технологический процесс. Обезвоженные материалы (камни, щебень, дресва) погрузчиками в требуемом соотношении (выявленном при проведении опытно-экспериментальных работ) послойно загружаются колесными погрузчиками для усреднения и перемешивания в бункера, которых должно быть не менее двух; один находится в стадии заполнения, другой в стадии разгрузки. Должны быть

выдержаны углы наклона днищ бункеров (на 2° больше угла трения горной массы по материалу его дна). Кроме этого, размеры выпускных люков бункеров должны быть не менее трех-четырёхкратного размера наибольшего куска (≈ 600 мм).

При этом обязательным является выполнение требования: разгрузка бункера в автосамосвалы не должна осуществляться до полной их загрузки, а загрузка не должна начинаться до полного опорожнения. Эффективное усреднение и перемешивание материалов напрямую зависит от размеров бункеров, где процесс усреднения и перемешивания достигается в процессе их послойного заполнения и разгрузки.

Перемешенную смесь трёх классов геоматериалов автосамосвалами доставляют в отработанный карьер, где укладывают послойно на дно с применением землеройной техники с обеспечением требуемой мощности ПП при минимальном уплотнении.

Прогноз температурно-влажностного режима предохранительной

Для прогноза температурно-влажностного режима ПП разработаны математические модели тепло- и массопереноса, которые позволяют выявить особенности функционирования ПП [8, 9]. В моделях учитываются нисходящая фильтрация воды с учетом атмосферных осадков, восходящая фильтрация влажного воздуха и теплоперенос с учетом фазовых переходов влаги. За основу разрабатываемых математических моделей взяты апробированные модели тепло- и массопереноса в пористой среде, основанные на фундаментальных законах термодинамики и гидродинамики [10–17].

В качестве примера рассмотрена ПП толщиной 30 м, которая соответствует горизонту -365 м рудника Удачный АК «АЛРОСА». Расчёты проводились

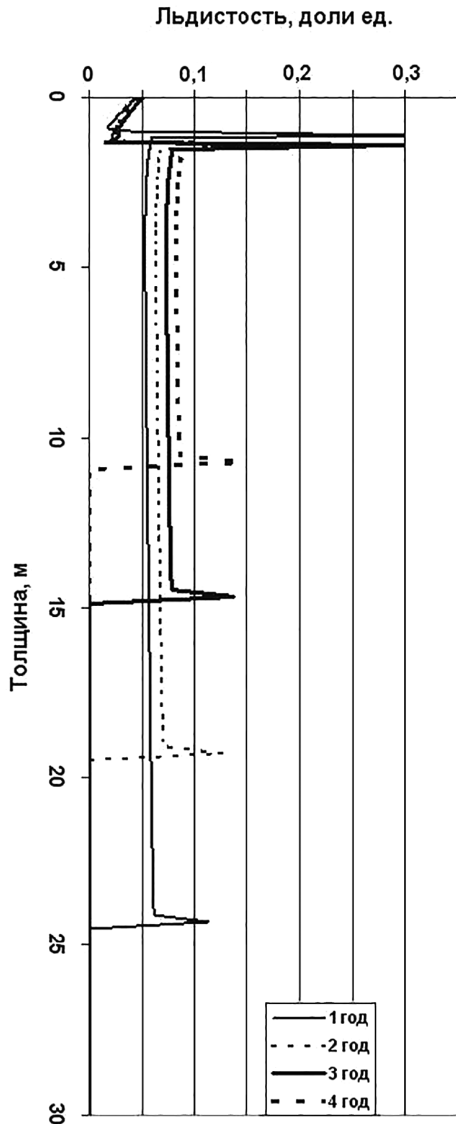


Рис. 3. Распределения льди́стости по глубине предохранительной подушки в разные периоды эксплуатации
 Fig. 3. Distribution of ice content by the depth of the safety cushion in different periods of operation

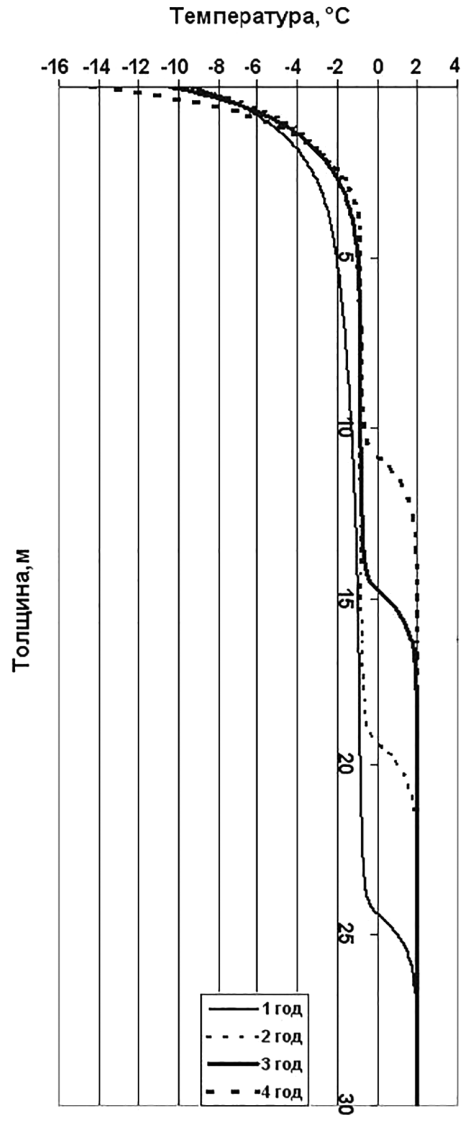


Рис. 4. Распределения температур по глубине предохранительной подушки в разные периоды эксплуатации
 Fig. 4. Temperature distributions over the depth of the safety cushion in different periods of operation

при следующих исходных данных: начальная температура ПП $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$; пористость (пустотность) 0,3; температура восходящего потока руднич-

ного воздуха $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$; депрессия 60 дПа. Источниками разности давлений между верхней и нижней границами ПП могут быть общерудничная депрессия, созда-

Таблица 1

Значения депрессий (разности давлений) воздуха между верхней и нижней отметками ПП, исключая накопление льда в пустотах породного навала

The values of depressions (pressure difference) of air between the upper and lower levels of the PP, excluding the accumulation of ice in the cavities of the rock bulk

Толщина ПП, м	30	35	45	65
Депрессия, дПа	80	120	140	240

ваемая вентиляторами, естественная тяга и т. д.

На рис. 3 и 4 приведены распределения льдистости и температуры в ПП по истечении одного, двух, трех и четырех лет эксплуатации.

Из графиков видно, что при поступлении вод атмосферных осадков в подушку в её верхней части происходит постепенное накопление льда в порых горных пород за счет аккумулярованного ими холода в зимний период. При депрессии 60 дПа происходит постепенное повышение льдистости, что приводит к закупорке каналов через один год эксплуатации на глубине 1,1 м. Через три года эксплуатации характерный выступ передвигается на глубину 1,4 м и по истечении четырех лет он сохраняется на этой же глубине. При этом в нижней части ПП происходит постепенное повышение температуры пород за счет фильтрации теплого воздуха из рудника независимо от времени года. В этом случае также происходит накопление льда в ПП за счет конденсации влаги из восходящего потока влажного рудничного воздуха. Кривая льдосодержания также имеет характерный выступ, который с течением времени перемещается к верхней границе ПП.

Были также рассчитаны (табл. 1) требуемые депрессии воздуха для различных значений толщин ПП, при которых возможно предотвратить закупорку льдом пустот в верхней её части за счет поступления атмосферных осадков.

Данные табл. 1 свидетельствуют, что с увеличением толщины ПП требуется повышение депрессий, что должно быть учтено при выборе рудничного вентилятора, т. к. её толщина непрерывно возрастает в результате падающих с бортов карьера пород.

Необходимо отметить, что со временем геоматериал ПП при её передвижении будет механически истираться с появлением мелких фракций, а также не исключается его слеживание, особенно при увлажнении. Все это может привести к снижению фильтрационных характеристик ПП. Для выяснения этого обстоятельства были дополнительно проведены аналогичные расчеты для проницаемого и слабопроницаемого навала горных пород при толщине ПП 30 м. Полученные результаты свидетельствуют, что депрессии, позволяющие предотвратить накопление льда в пустотах пород, для проницаемого навала пород составляют 320 дПа, а для слабопроницаемого — 360 дПа. Таким образом, требуется существенное повышение значения депрессии при снижении коэффициента фильтрации ПП по сравнению с хорошо проницаемыми породами. Это обстоятельство также должно быть учтено при выборе рудничного вентилятора.

Выводы

Тщательное выполнение опытно-экспериментальных работ и всех операций в соответствии с разработанной технологической схемой позволит приготовить смесь требуемого состава и воз-

вести ПП, отвечающую предъявляемым требованиям и, как следствие этого, обеспечить в дальнейшем безопасное и ритмичное ведение горных работ в руднике при подземной доработке подкарьерных запасов на многие годы.

В весенне-летний период при поступлении вод атмосферных осадков и растаявшего снега в ПП в её верхней части происходит постепенное накопление льда в порах и пустотах навала мерзлых горных пород за счет аккумулярованного ими холода за зимний период. В нижней части подушки постепенно повышается температура пород за счет восходящей фильтрации теплого воз-

духа из рудника независимо от времени года. При этом также происходит накопление льда в ПП за счет конденсации влаги из влажного рудничного воздуха.

Разработанные математические модели тепло- и массообмена и программы расчета температурно-влажностного состояния ПП при фильтрации в противоположных направлениях влаги и воздуха могут служить основой для прогноза интенсивности смерзания слагающих пород, а также разработки мероприятий по управлению процессом её равномерного опускания в период подземной отработки алмазосодержащей трубки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов И. В., Смирнов А.А., Антипин Ю. Г., Кульминский А. С. Отработка подкарьерных запасов трубки «Удачная» в сложных климатических, горно- и гидрогеологических условиях // Горный журнал. — 2011. — №1. — С.63–66.
2. Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Никитин И. В., Тишков М. В. Обоснование толщины предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов трубки «Удачная» системами с обрушением // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018.- № 2. — С. 52–62.
3. Шубин Г. В., Заровняев Б. Н., Курилко А. С., Дмитриев А. А. Технологические свойства руд и вмещающих пород Удачинского месторождения — Новосибирск: Наука. 2017. — 160 с.
4. Коваленко А. А., Тишков М. В. Оценка подземного способа отработки месторождения трубки «Удачная» с применением системы с самообрушением // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 4. — С. 117–128.
5. Заровняев Б. Н., Шубин Г. В., Курилко А. С., Хохолов Ю. А. Прогноз температурно-влажностного состояния предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов руды в условиях криолитозоны // Горный журнал. — 2016. — №9. — С. 33–36.
6. Неустроев А. П., Хохолов Ю. А. Учет инфильтрации атмосферных осадков и фильтрации влажного рудничного воздуха при накоплении льда в слое породной предохранительной подушки в условиях криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. - № 12. — С. 39–47.
7. Патент РФ №2571435 Васильев И. В., Киселев В. В., Заровняев Б. Н., Николаев И. А., Шубин Г. В., Курилко А. С., Дмитриев А. А. Устройство для исследования сыпучих свойств геоматериалов. 2015. Бюл. № 35.
8. Патент РФ на полезную модель № 147743 Шубин Г. В., Заровняев Б. Н., Дмитриев А. А., Васильев И. В., Николаев И. А., Курилко А. С., Киселев В. В. Физическая модель для исследования сыпучих свойств рудопородных материалов. 2014. Бюл. № 32.
9. Киселев В. В., Курилко А. С., Хохолов Ю. А. Методы и экспериментальные установки для натуральных исследований физико-технических свойств смесей техногенных

геоматериалов защитных подушек // Евразийское Научное Объединение. – 2018. № 10 (44). – С. 75–78.

10. Kurylyk B. L., Walvoord M. A. Hydrologic impacts of thawing permafrost – a review // Vadose zone journal, 2016, no 15 (6), pp. 1–10. DOI.org/10.2136/vzj2016.01.0010/

11. Kurylyk B. L., Irvine D. J. Analytical solution and computer program (FAST) to estimate fluid fluxes from subsurface temperature profiles // 2016, vol. 52, issue 2, pp. 725–733. DOI.org/10.1002/2015WR017990.

12. Wu M., Jansson P.-E., Tan X., Wu J., Huang J. Constraining parameter uncertainty in simulations of water and heat dynamics in seasonally frozen soil using limited observed data // Water, 2016, 8(2), 64. doi:10.3390/w8020064.

13. Sjöberg Y., Coon E., Sannel A. B.K., Pannetier R., Harp D., Frampton A., Painter S. L., Lyon S. W. Thermal effects of groundwater flow through subarctic fens: A case study based on field observations and numerical modeling // Water Resour. Res., 2016, vol. 52, no. 3, pp. 1591–1603. doi:10.1002/2015WR017571.

14. Мотовилов Ю. Г. Численное моделирование процесса инфильтрации воды в мерзлые почвы // Метеорология и гидрология. 1977. №9. С. 67–75.

15. Кулик В. Я. Инфильтрация воды в почву. М.: Колос. 1978. 93 с.

16. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1947. – 244 с.

17. Хямяляйнен В. А., Понасенко Л. П., Бурков Ю. В., Франкевич Г. С., Жеребцов В. А. Тампонаж обрушенных пород.- Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т, 2000. – 107 с. **MIAB**

REFERENCES

1. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Antipin Yu.G., Kulminskiy A. S. Development of sub-pit reserves of the Udachnaya pipe in difficult climatic, mountain and hydrogeological conditions, *Gornyi Zhurnal*. 2011, no. 1, pp.63–66. [In Russ].

2. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Antipin Yu. G., Nikitin I. V., Tishkov M. V. Justification of the thickness of the protective cushion when working out the quarry reserves of the Udachnaya pipe with collapse systems, *Fiziko-tekhnicheskiyeproblemyrazrabotkipoleznykhi skopayemykh*, 2018, no. 2, pp. 52–62. [In Russ].

3. Shubin G. V., Zarovnyaev B. N., Kurilko A. S., Dmitriev A. A. *Tehnologicheskiesvoystva rud i vmeshhajushhih porod Udachninskogo mestorozhdenija* [Technological properties of ores and host rocks of the Udachninskoye deposit], Novosibirsk, Nauka Publ., 2017, 160 p. [In Russ].

4. Kovalenko AA, Tishkov MV Evaluation of the underground mining method of the Udachnaya pipe deposit using a self-caving system, *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2017, no. 4, pp. 117–128. [In Russ].

5. Zarovnyaev B. N., Shubin G. V., Kurilko A. S., Khokholov Yu.A. Forecast of the temperature and humidity state of the protective cushion during the development of sub-pit ore reserves in permafrost conditions, *Gornyi Zhurnal*, 2016, no. 9. pp. 33–36. [In Russ].

6. Neustroev A.P, Khokholov Yu. A. Accounting for the infiltration of atmospheric precipitation and filtration of humid mine air during ice accumulation in the layer of a rock protective cushion in permafrost conditions, *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 12, pp. 39–47. [In Russ].

7. Vasiliev I. V., Kiselev V. V., Zarovnyaev B. N., Nikolaev I. A., Shubin G. V., Kurilko A. S., Dmitriev A. A. Patent RU 2571435 C2, 27.09.2015. [In Russ].

8. Shubin G. V, Zarovnyaev B. N., Dmitriev A. A., Vasiliev I. V, Nikolaev, I. A., Kurilko A. S., Kiselev V. V. Patent RU 147743 U1, 20.11.2014. [In Russ].

9. Kiselev V. V., Kurilko A. S., Khokholov Yu.A. Methods and experimental installations for field studies of the physical and technical properties of mixtures of technogenic

geomaterials of protective cushions, *Eurasian Scientific Association*, 2018, no. 10 (44), pp. 75–78. [In Russ].

10. Kurylyk B. L., Walvoord M. A. Hydrologic impacts of thawing permafrost a review, *Vadose zone journal*, 2016, no. 15 (6), pp. 1–10. DOI.org/10.2136/vzj2016.01.0010/

11. Kurylyk B. L., Irvine D. J. Analytical solution and computer program (FAST) to estimate fluid fluxes from subsurface temperature profile, 2016, vol. 52, issue 2, pp. 725–733. DOI.org/10.1002/2015WR017990.

12. Wu M., Jansson P.-E., Tan X., Wu J., Huang J. Constraining parameter uncertainty in simulations of water and heat dynamics in seasonally frozen soil using limited observed data, *Water*, 2016, 8 (2), 64. doi: 10.3390. w8020064.

13. Sjöberg Y., Coon E., Sannel A. B.K., Pannetier R., Harp D., Frampton A., Painter S. L., Lyon S. W. Thermal effects of groundwater flow through subarctic fens: A case study based on field observations and numerical modeling, *Water Resour. Res.*, 2016, vol. 52, no.3, pp. 1591–1603. doi: 10.1002. 2015WR017571.

14. Motovilov Yu. G. Numerical modeling of the process of water infiltration into frozen soils. *Meteorology and Hydrology*, 1977, no. 9, pp 67–75. [In Russ].

15. Kulik V. Ja. *Infil'tracija vody v pochvu* [Infiltration of water into the soil], Moscow, Kolos Publ., 1978, 93 p. [In Russ].

16. Lejbenzon L. S. *Dvizhenie prirodnyh zhidkostej i gazov v poristoj srede* [Movement of natural liquids and gases in a porous medium], Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo tehniko-teoreticheskoy literatury Publ., 1947, 244 p. [In Russ].

17. Hjamjalajnen V. A., Ponasenko L. P., Burkov Ju. V., Frankevich G. S., Zherebcov V. A. *Tamponazh obrushennyh porod* [Tamponage of collapsed rocks], Kemerovo, Kuzbas. gos. tehn. un-t Publ., 2000, 107 p. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Киселев Валерий Васильевич*¹ — канд. техн. наук, ст. науч. сотр.;

*Хохолов Юрий Аркадьевич*¹ — докт. техн. наук, вед. науч. сотр., <https://orcid.org/0000-0002-9510-3808>, khokholov@igds.ysn.ru;

¹ Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук — обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 43.

Для контактов: *Хохолов Ю. А.*, khokholov@igds.ysn.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Kiselev V. V.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher;

*Khokholov Yu. A.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, khokholov@igds.ysn.ru;

¹ Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, 677980, Russia.

For contacts: *Khokholov Yu. A.*, khokholov@igds.ysn.ru.

Получена редакцией 18.07.2021; получена после рецензии 13.10.2021; принята к печати 10.11.2021.

Received by the editors 18.07.2021; received after the review 13.10.2021; accepted for printing 10.11.2021.

