

УДК 624.139.62:536.244

## ФОРМИРОВАНИЕ ЛЬДОПОРОДНОГО МАССИВА НА ДНЕ ОТРАБОТАННОГО КИМБЕРЛИТОВОГО КАРЬЕРА «ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНЫЙ» АК «АЛРОСА» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖИДКОСТНЫХ ЗАМОРАЖИВАЮЩИХ КОЛОНОК ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

**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*

В качестве одного из способов обеспечения безопасных условий на действующем руднике «Интернациональный», обрабатывающем подкарьерные запасы, и предотвращения чрезвычайной ситуации из-за накопления на дне отработанного карьера обводненной породной осыпи, предлагается ее искусственное промораживание с использованием жидкостных замораживающих колонок с принудительной циркуляцией хладоносителя. На основе математического моделирования, с учетом влияния температурных условий на поверхности, расположения и взаимовлияния замораживающих колонок, а также способа охлаждения хладоносителя, проведены многовариантные теплофизические расчеты основных параметров. Полученные результаты позволили, в частности, определить продолжительность промерзания пород между замораживающими колонками для различных схем их расположения и выбрать наиболее оптимальные варианты. В целях максимального сокращения времени промораживания рекомендована гексагональная схема размещения замораживающих колонок и двухэтапная схема подготовки хладоносителя. Проведенными исследованиями выявлена зависимость продолжительности промораживания обводненной осыпи от физических свойств слагающих ее геоматериалов (в частности, влажности и плотности). Подчеркивается, что сформированный на дне отработанного карьера льдопородный массив обладает высокой несущей способностью. В условиях криолитозоны при искусственно поддерживаемом отрицательном температурном режиме в период эксплуатации льдопородный массив будет выполнять функции искусственного предохранительного целика, защищая действующий рудник от возможного внезапного прорыва вод.

**Ключевые слова:** отработанный кимберлитовый карьер, обводненная породная осыпь, криолитозона, жидкостные замораживающие колонки, хладоноситель, атмосферный и искусственный холод, математическое моделирование

## FORMATION OF AN ICE-ROCK MASSIF AT THE BOTTOM OF THE «INTERNATIONAL» MINED-OUT KIMBERLITE QUARRY OF ALROSA USING LIQUID FREEZING COLUMNS OF FORCED ACTION

**Kurilko A.S., Solovjev 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*

As one of the ways to ensure safe conditions at the existing mine "International", which mines sub-open-pit reserves and to prevent an emergency, due to the accumulation of watered rock talus at the bottom of the spent quarry, it is proposed to artificially freeze it using liquid freezing columns with forced circulation of the coolant. Based on mathematical modeling, taking into account the influence of temperature conditions on the surface, the location and mutual influence of freezing columns, as well as the method of cooling the coolant, multivariate thermophysical calculations of the main parameters were carried out. The results obtained made it possible, in particular, to determine the duration of freezing of rocks between freezing columns for various schemes of their location and to choose the most optimal options. In order to minimize the freezing time, a hexagonal layout of freezing columns and a two-stage refrigerant preparation scheme are recommended. The conducted studies revealed the dependence of the duration of freezing of watered talus on the physical properties of the geomaterials composing it (in particular, moisture and density). It is emphasized that the ice-rock massif formed at the bottom of the worked-out pit has a high bearing capacity. In permafrost conditions with an artificially maintained negative temperature regime during operation, the ice-rock massif will perform the functions of an artificial safety pillar, protecting the operating mine from a possible sudden breakthrough of water.

**Keywords:** mined-out kimberlite quarry, flooded rock talus, permafrost zone, liquid freezing columns, coolant, atmospheric and artificial cold, mathematical modeling

К числу основных тенденций, осложняющих освоение минерально-сырьевой базы в России и за рубежом, относится усложнение экономико-географических и горно-технических условий разработки месторождений как открытым, так и подземным способами, в том числе в северных регионах.

В связи с этим перед различными направлениями горной науки, в первую очередь геомеханики и теплофизики, встали ряд сложных задач, в плане выявления особенностей ведения горных работ в экстремальных климатических, геокриологических и геотехнологических условиях и разработке ме-

роприятий по нейтрализации и управлению негативными процессами, приводящими к возникновению чрезвычайных ситуаций, деформированию и разрушению прибортовых горных массивов карьеров и подземных горных выработок шахт и рудников.

Всё вышесказанное в полной мере относится к кимберлитовым рудникам АК «АЛРОСА», дорабатывающим подкарьерные запасы, где горно-технические условия крайне неблагоприятны. В частности, на руднике «Интернациональный» в настоящее время обрушившаяся с бортов на дно карьера порода представляет собой водонасыщенный массив значительной мощности (около 45 м) с наличием на поверхности техногенного озера. Это создаёт дополнительную нагрузку на предохранительный целик, что чревато негативными последствиями, связанными с его разрушением и возможным внезапным прорывом пульпы и скопившихся вод в рудник.

Одним из наиболее приемлемых выходов из сложившейся неординарной, крайне непростой ситуации, при невозможности технической ликвидации накопленных обводненных осыпей может быть их криогенная консервация путем принудительной проморозки. Таким способом будет образовано льдопородное сооружение (целик), обладающее высокой несущей способностью. В связи с этим целью работы является исследование особенностей формирования льдопородного массива из обводнённых осыпей, образованных на дне отработанного карьера «Интернациональный» с использованием жидкостных замораживающих устройств принудительного действия.

#### Материалы и методы исследования

Искусственное замораживание грунтов. Способ искусственного замораживания грунтов нашел применение практически во всех областях строительства: шахтном, промышленном, гидротехническом, при строительстве метрополитенов и т.д. [1–3]. Его, в частности, применяют для создания монолитного льдопородного основания в фундаментах инженерных сооружений, образования противофильтрационных льдопородных завес в насыпных плотинах хвостохранилищ обогатительных фабрик, сооружения плавучих ледяных платформ на шельфах северных морей, грунтовых аккумуляторов холода в криолитозоне и в других целях [4–6].

Для ускоренного замораживания пород чаще всего применяют жидкостные охлаждающие устройства, работающие на искусственно вырабатываемом холоде с принудительной циркуляцией хладоносителя, имеющие значительные преимущества, по сравнению с воздушными, которые зачастую через короткое время забиваются льдом и инеем, а восстановление их работоспособности требует значительных затрат энергии и рабочего времени, что также немаловажно [7]. Кроме этого, такие колонки могут работать круглый год вне зависимости от температуры окружающей среды.

При промораживании породной осыпи на дне карьера предлагается двухэтапный способ, который включает в себя активное замораживание (в начальный период), а затем поддержание массива в мерзлом состоянии [8].

Необходимо отметить, что активное промораживание осыпи должно вестись в круглогодичном режиме до ее полной проморозки на всю мощность. Пассивное промораживание производится после завершения активного, ежегодно только в зимний период с использованием атмосферного холода.

Для прогнозирования скорости промерзания обводненной породной осыпи в отработанном карьере при ее искусственном замораживании была разработана трехмерная математическая модель, учитывающая ряд параметров, в том числе динамику температурных условий на поверхности, расположение и взаимовлияние замораживающих колонок, а также способ охлаждения хладоносителя.

Были проведены численные расчеты теплового взаимодействия вертикальных замораживающих колонок и обводненной породной осыпи с целью выбора оптимальных параметров их расположения для следующих вариантов схем и шага их установки:

I. Квадратная схема. Расстояние между колонками и рядами колонок – 3 м (рис. 1, а).

II. Шахматная схема. Расстояние между колонками и рядами колонок – 3 м (рис. 1, б).

III. Гексагональная схема, при которой сохраняется шахматный порядок в расположении колонок между рядами, при этом расстояние между колонками (как и между теми, которые располагаются в одном ряду, так и между соседними рядами) должно быть одинаковым в виде равностороннего треугольника (рис. 1, в). Длина ребра равностороннего треугольника: а) 3 м; б) 5 м; в) 6 м; г) 7 м.

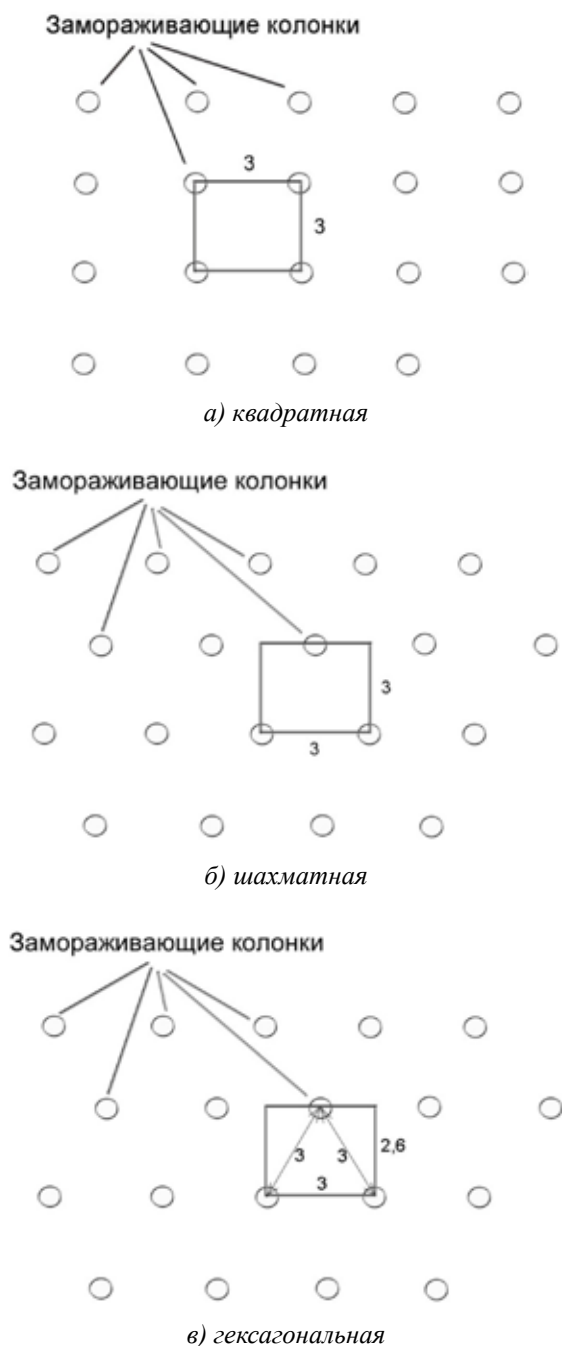


Рис. 1. Схемы размещения замораживающих колонок на породной осыпи

Необходимо отметить, что при построении трехмерной математической модели рассматривалась не вся площадь породной осыпи, а отдельно выделенный участок, на котором расположены три или четыре замораживающие колонки в зависимости от принятой схемы их размещения. Через боковые поверхности выделенных участков тепловые потоки отсутствуют. Данный подход позволяет определить скорость промерзания пород в области между ко-

лонками и существенно снизить затраты машинного времени на проведение численных расчетов.

Расчеты проводились при следующих исходных теплофизических параметрах породной осыпи (которые были получены на основе лабораторных испытаний образцов породной осыпи, отобранных со дна карьера и фондовых источников): естественная температура породной осыпи –  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; температура фазового перехода воды –  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; коэффициент теплопроводности пород в талом и мерзлом состояниях соответственно  $1,73$  и  $1,85\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ; удельная теплоемкость скелета породы –  $887\text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ; плотность породы –  $2000\text{ кг/м}^3$ ; влажность породы –  $0,15$  д.е.; коэффициент теплопередачи от внешней поверхности замораживающих труб к окружающей породе –  $262\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ; температура хладоносителя в замораживающих колонках –  $-15$  ( $-20$ )  $^{\circ}\text{C}$ .

Начало расчетов осуществляется с 15 октября, когда устанавливаются отрицательные среднесуточные температуры воздуха в районе расположения карьера «Интернациональный».

#### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты расчетов приведены в графическом виде на рис. 2–4, где показано температурное поле по горизонтальному и вертикальному сечению породной осыпи между замораживающими колонками для первого варианта их размещения и температуре хладоносителя  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На рис. 2 показана температура пород по горизонтальному сечению расчетного участка на глубине  $20$  от поверхности спустя 4 месяца (121 день) после начала работы системы замораживания. Видно, что происходит прогрессирующее промерзание пород между колонками, при этом в средней части остается зона талых пород с температурой выше  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чтобы произошло полное промерзание пород (рис. 3 и 4) при данной схеме расположения колонок, необходима работа системы замораживания в течение более 6 месяцев (191 день).

Проведенными исследованиями было выявлено, что изменение схемы расположения замораживающих колонок с квадратной на шахматную (второй вариант размещения колонок) позволяет добиться снижения времени, затрачиваемого на промораживание породной осыпи. Полное промерзание пород при данной схеме расположения колонок происходит в течение 177 дней (рис. 5).

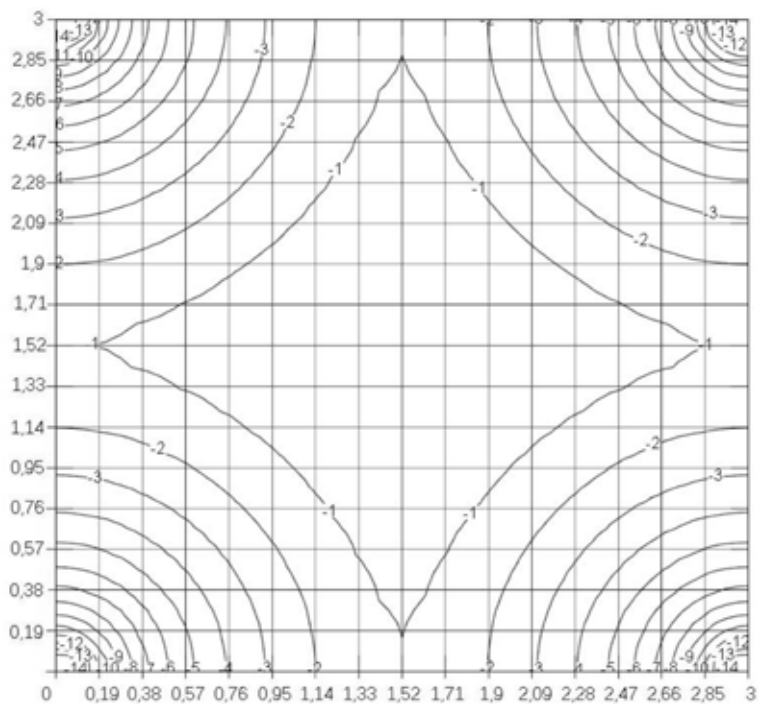


Рис. 2. Температурное поле в породной оси  
при I варианте размещения замораживающих колонок,  
по истечении 121 дня (горизонтальное сечение на глубине 20 м от поверхности)

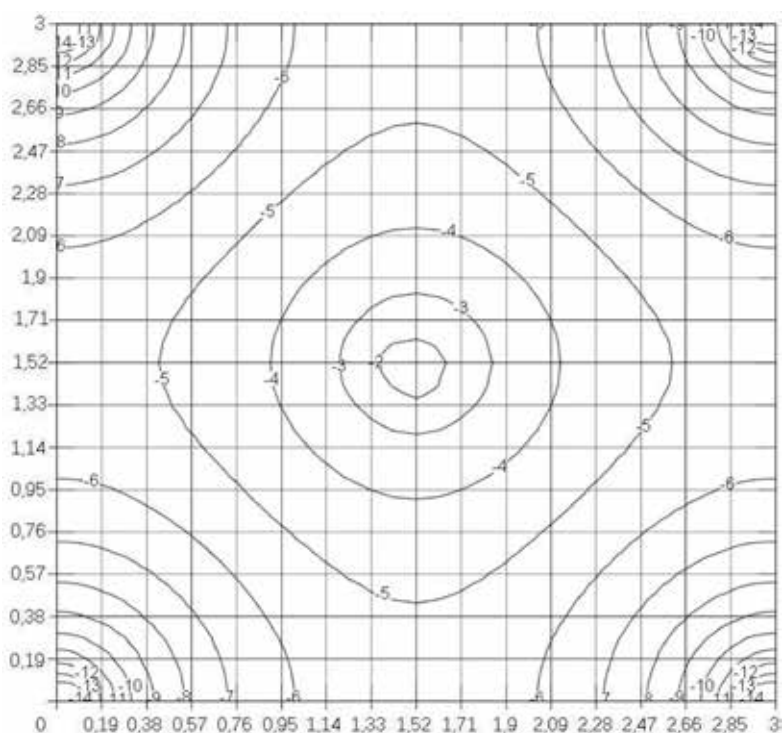
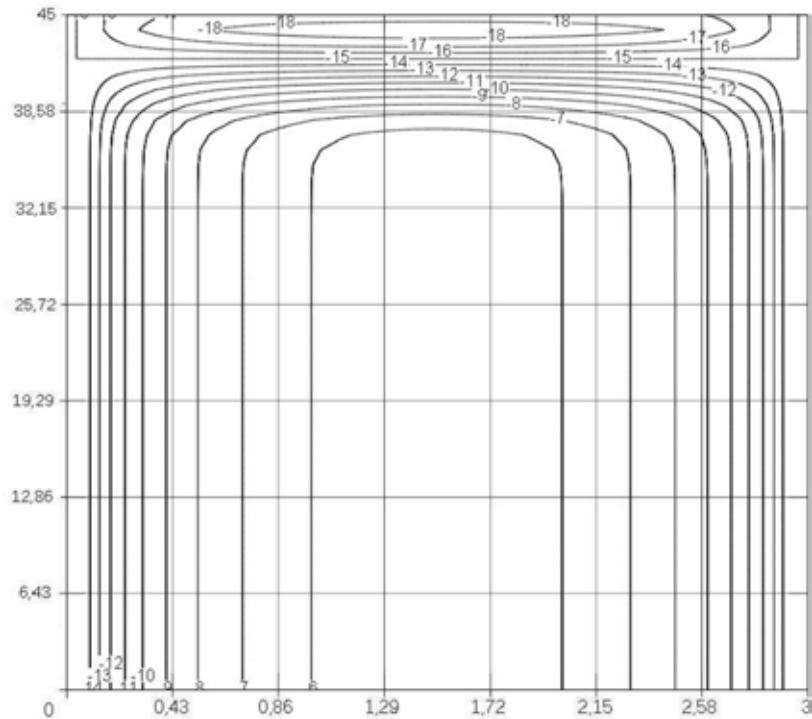
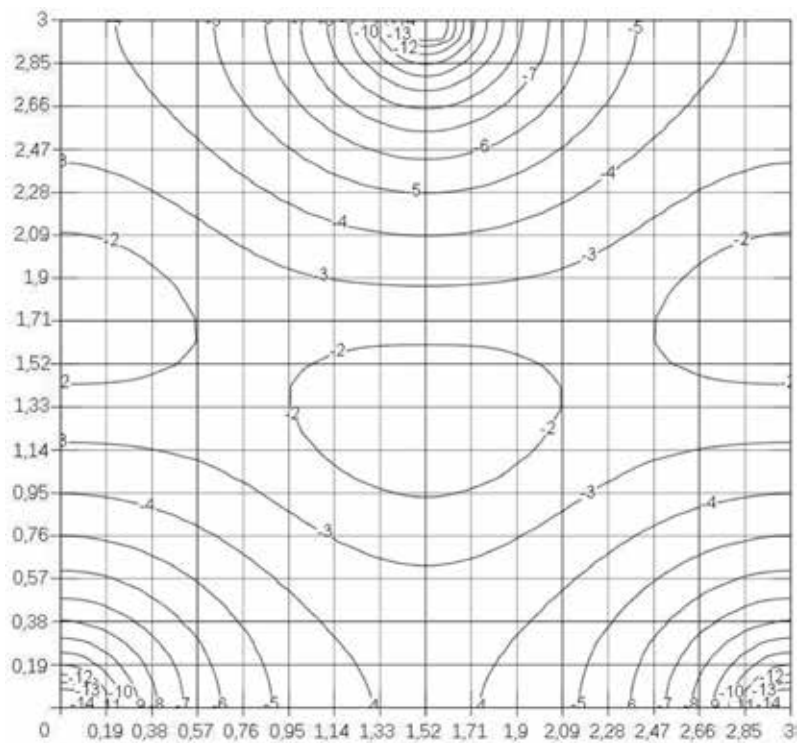


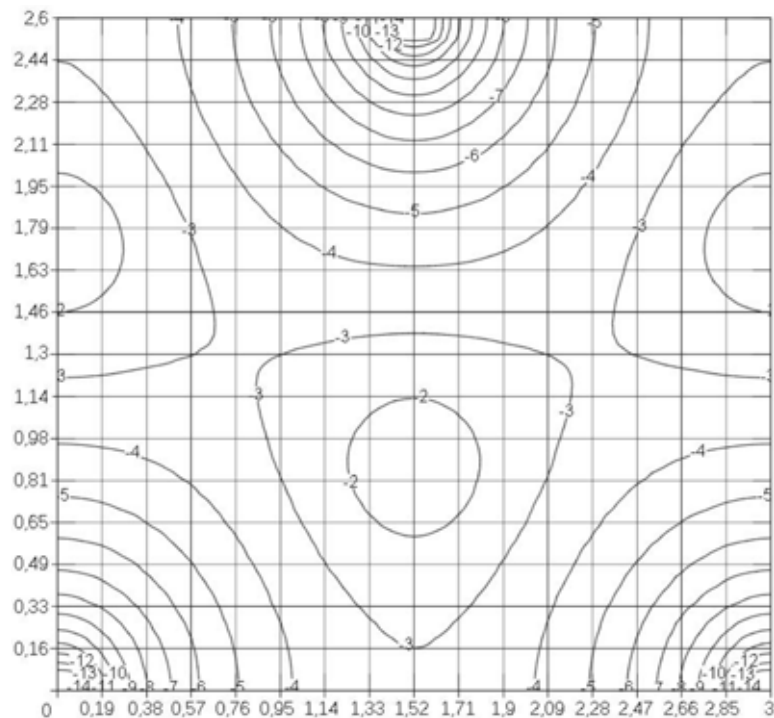
Рис. 3. Температурное поле в породной оси  
при I варианте размещения замораживающих колонок,  
по истечении 191 дня (горизонтальное сечение на глубине 20 м от поверхности)



*Рис. 4. Температурное поле в породной оси  
 при I варианте размещения замораживающих колонок, по истечении 191 дня  
 (вертикальное сечение, между колонками)*



*Рис. 5. Температурное поле в породной оси  
 при II варианте размещения замораживающих колонок, по истечении 177 дней  
 (горизонтальное сечение на глубине 20 м от поверхности)*



*Рис. 6. Температурное поле в породной насыпи при III варианте размещения замораживающих колонок, располагающихся на расстоянии 3 м друг от друга, по истечении 150 дней (горизонтальное сечение на глубине 20 м от поверхности)*

Гексагональная схема расположения замораживающих колонок, как следует из приведенных данных на рис. 6, существенно сокращает время полного промораживания породной осыпи, которое составит 150 дней. Для случая, когда расстояние между колонками составляет 3 м, время промораживания породной осыпи сокращается по сравнению с I вариантом на 41 день и, соответственно, на 27 дней по сравнению с II вариантом.

Понижение температуры хладоносителя до  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при данной схеме расположения замораживающих колонок, позволяет дополнительно сократить время промораживания породной осыпи на 35 дней. В этом случае промерзание пород между колонками произойдет за 115 дней, т.е. практически за 4 месяца.

Вышеприведенные варианты расчетов рассматривались для случая, когда температура хладоносителя в течение всего периода промораживания породной осыпи поддерживается на заданном уровне (в данных расчетах приняты температуры  $-15$  и  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). В то же время возможно использовать жидкостную замораживающую систему, в которой применяется двухэтапное охлаждение

хладоносителя, с охлаждением на первом этапе до некоторой постоянной заданной температуры (например  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а на втором этапе при понижении температуры атмосферного воздуха ниже температуры хладоносителя на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то в этом случае хладоноситель подается в воздушный теплообменник (радиатор) с вентилятором и, охлаждаясь, принимает температуру атмосферного воздуха. При таком варианте, используя атмосферный холод, можно добиться сокращения энергетических затрат и времени на проморозку породной осыпи, что подтверждается результатами расчетов на математических моделях, приведенных в таблице.

Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что применение вышеописанного способа подготовки хладоносителя, при гексагональной схеме расположения замораживающих колонок, позволяет добиться значительного сокращения продолжительности промораживания породной осыпи. Например, для случая, когда расстояние между колонками равно 5 м, время промораживания составит 298 дней, что на 226 дней меньше, чем при постоянной температуре хладоносителя, подаваемого в замораживающие колонки.

Время промерзания пород между замораживающими колонками  
для III варианта их размещения  
(породная осыпь: влажность – 0,15 д.е.; плотность – 2000 кг/м<sup>3</sup>)

Расстояние между колонками, м	Температура хладоносителя, °С	С учетом атмосферного холода, дни	Без учета атмосферного холода (температура хладоносителя постоянная), дни
3	-15	90	150
	-20	87	115
5	-15	298	524
	-20	276	402
6	-15	499	799
	-20	471	615
7	-15	700	1135
	-20	631	876

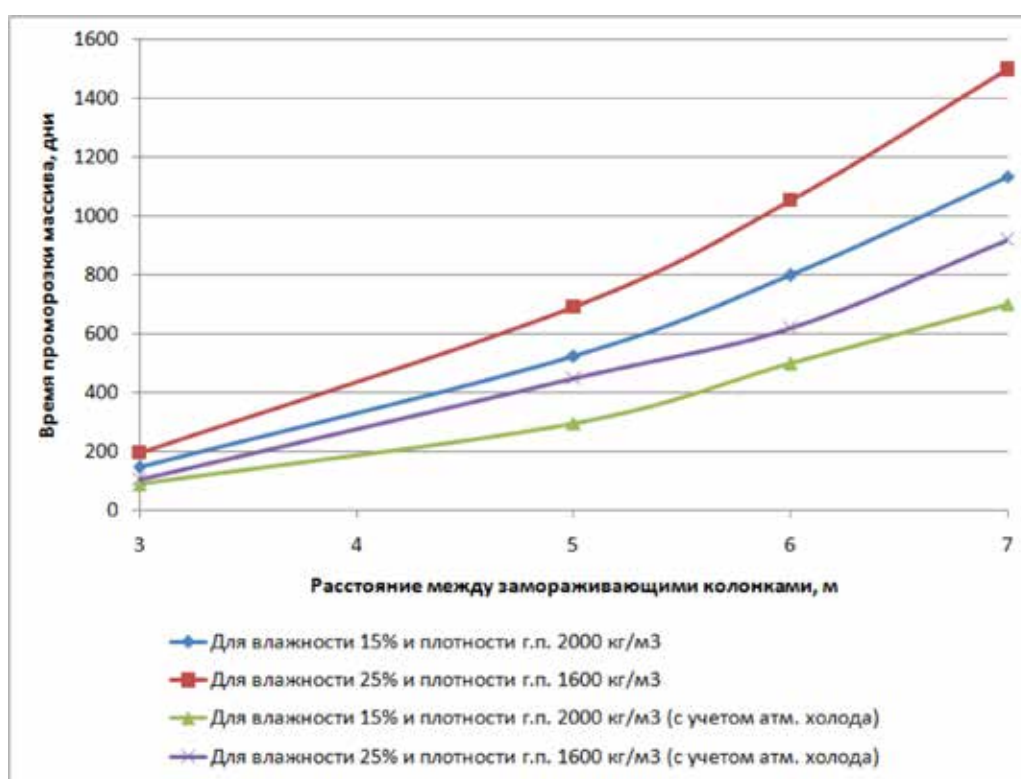


Рис. 7. Время промерзания пород между замораживающими колонками в зависимости от влажности и плотности для III варианта их размещения и температуре хладоносителя –15 °С

Применение двухэтапного охлаждения хладоносителя позволяет значительно сократить (до 40%) время промораживания породной осыпи. Таким образом, в целях экономии энергозатрат рационально использовать вариант двухэтапного охлаждения хладоносителя.

Дополнительно были проведены численные расчеты для случая, когда плотность и влажность пород составляют со-

ответственно 1600 кг/м<sup>3</sup> и 0,25 д.е. Данное соотношение параметров может быть характерно для центральной части породной осыпи. Остальные исходные параметры оставались без изменений. Результаты расчетов для гексагональной схемы расстановки замораживающих колонок приведены на рис. 7, соответственно для вариантов без и с учетом влияния атмосферного холода на температуру хладоносителя.

Как видно из рисунка, изменение влажности и плотности пород влияет на время, затрачиваемое на промораживание породной осыпи между колонками. Так, например, для проморозки породной осыпи, при расстоянии между колонками 7 м (с влажностью 25 % и плотностью 1600 кг/м<sup>3</sup>), потребуется непрерывная работа системы замораживания в течение четырех лет (при постоянной температуре хладоносителя -15°C), что почти на 1 год дольше, чем для менее влажных пород (с влажностью 15 % и плотностью 2000 кг/м<sup>3</sup>).

Таким образом, изменение физических свойств промораживаемого массива значительно влияет на время его проморозки. Для получения более точных расчетных данных потребуются дополнительные исследования, связанные с отбором проб в породной осыпи карьера «Интернациональный», и проведение лабораторных испытаний на определение их физических свойств.

### Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Для предотвращения возможной чрезвычайной ситуации в действующем руднике при внезапном прорыве скопившихся на дне отработанного кимберлитового карьера криолитозоны обводненных породных масс, наиболее рациональным путем является их проморозка с образованием монолитного льдопородного сооружения (целика), обладающего высокой несущей способностью.

Предлагается способ проморозки обводненной породной осыпи и стабилизации отрицательного температурного режима образованного льдопородного целика, с использованием замораживающих колонок, который несложен в реализации и предполагает использование наряду с машинным атмосферного холода для охлаждения хладоносителя.

Наиболее предпочтительно использование двухэтапного способа промораживания техногенного озера и геоматериалов, слага-

ющих породную осыпь. Первый этап реализуется в начальный период и обеспечивает их активное промораживание в круглогодичном режиме с принудительной циркуляцией хладоносителя в колонках. В дальнейшем (второй этап) производится пассивное ежегодное промораживание породной осыпи только в зимний период для компенсации летних холодопотерь льдопородного целика, с использованием атмосферного холода для охлаждения хладоносителя и естественной циркуляцией хладоагента в колонках.

Гексагональная схема расположения замораживающих колонок позволяет максимально сократить время промораживания породной осыпи.

*Лабораторные исследования проводились на оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант № 13.ЦКП.21.0016).*

### Список литературы

1. Вакуленко И.С. Анализ и перспективы развития способа искусственного замораживания горных пород в подземном строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 3. С. 338–346.
2. Кузнецов Г.И. Мерзлотные подпорные стены в гидротехническом строительстве // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 1 (709). С. 76–83.
3. Семин М.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С. Выбор параметров и обоснование режима работы замораживающих колонок для поддержания толщины льдопородного ограждения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 5. С. 194–205.
4. Хохолов Ю.А., Курилко А.С., Соловьев Д.Е. Расчет температурного поля засоленных горных пород в устьевой части вертикального ствола при работе замораживающей системы // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 3. С. 176–184.
5. Ahmed Marwan, Meng-Meng Zhou, M. Zaki Abdelrehim, Günther Meschke Optimization of artificial ground freezing in tunneling in the presence of seepage flow. Computers and Geotechnics. 2016. Vol. 75. P. 112–125.
6. Mahmoud A. Alzoubi, Minghan Xu, Ferri P. Hassani, Sébastien Poncet, Agus P. Sasmito Artificial ground freezing: A review of thermal and hydraulic aspects. Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 104.
7. Степанов А.В., Попенко Ф.Е., Рожин И.И. Основы инженерной защиты объектов строительства в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 2014. 448 с.
8. Васильев В.И. Моделирование распределения стационарных температурных полей в криолитозоне при проектировании геотехнических сооружений: учебное пособие под ред. В.И. Васильева, Н.И. Сидняева. М.: КУРС. 2017. 624 с.