УДК 624.139

ГЕОТЕРМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ОСНОВАНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ АЛМАЗОДОБЫВАЮЩИХ РУДНИКОВ ЯКУТИИ

[1]Курилко А.С., [2]Дроздов А.В., [1]Хохолов Ю.А., [1]Соловьев Д.Е., [2]Мельников А.И.

[1]Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск;
[2]Институт земной коры СО РАН, Иркутск, e-mail: mel@crust.irk.ru

В настоящей статье представлены материалы по особенностям геотермического контроля оснований поверхностных сооружений на подземных рудниках АК «АЛРОСА». Анализ исследований по развитию деформаций грунта при изменении температуры вокруг устьевой части шахтных стволов показал, что наибольшее влияние оказывают реологические процессы в зоне промерзания-протаивания. Разработана трехмерная математическая модель теплообмена грунтов под основанием башенных копров, которая позволяет учитывать реальный процесс промерзания-протаивания порового раствора мерзлого массива в спектре возможных температур при изменении теплофизических свойств и общей засоленности разреза пород по глубине. На алмазодобывающих рудниках в Якутии необходима постоянная эксплуатация систем принудительной заморозки грунтов вблизи стволов и всей охлаждающей системы свайных полей, а расчеты несущей способности криогенных оснований следует выполнять с учетом фактической обводненности и засоленности породного массива.

Ключевые слова: подземный рудник, геотермический контроль, температурный режим, мерзлые грунты

GEOTHERMAL CONTROL OF THE BASES OF SUPERFICIAL CONSTRUCTIONS DIAMOND-MINING MINES OF YAKUTIA

[1]Kurilko A.S., [2]Drozdov A.V., [1]Khokholov Y.A., [1]Solovev D.E., [2]Melnikov A.I.

[1]Institute mining of the North of N.V. Chersky of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Yakutsk;
[2]Institute earth crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Irkutsk, e-mail: mel@crust.irk.ru

In the present article materials on features of geothermal control of the bases of superficial constructions on underground mines AC «ALROSA» are presented. The analysis of researches on development of deformations of a ground at temperature change around mouth parts of mine trunks has shown that the greatest influence render rheological processes in a zone frost penetration-thaw through. The three-dimensional mathematical model of heat exchange materials under the basis tower which allows to consider real process frost penetration-thaw through poral a solution of a frozen file in a spectrum of possible temperatures at change thermophysical properties and the general salinity of a cut of breeds on depth is developed. On diamond-mining mines in Yakutia constant operation of systems compulsory frosts materials near to trunks and all cooling system of pile fields is necessary, and calculations of bearing ability of the cryogenic bases should be carried out taking into account actual watering and salinities of a pedigree file.

Keywords: underground mine, geothermal control, a temperature mode, frozen materials

В настоящее время алмазодобывающая промышленность России переходит по основным крупнейшим месторождениям Якутии на подземный способ их отработки [1]. На рудниках АК «АЛРОСА» кимберлитовые трубки вскрываются вертикальными и наклонными стволами, над которыми устанавливаются сложные инженерные сооружения – копры. Их устойчивость над подземными выработками – вопрос общей промышленной безопасности горного предприятия, поскольку аварии при спуско-подъемах скипов или клетей из-за опасного наклона оси сооружения ведут к длительному прекращению добычи руды (кимберлита), простою обогатительных фабрик, длительному и дорогостоящему ремонту [3].

Основания фундаментов копров представлены, главным образом, высокольдистыми глинистыми отложениями, теряющими свою прочность при протаивании. Поэтому существует угроза устойчивости копров на рудниках, которые являются тяжело нагруженными конструкциями со сложным тепловым режимом грунтового основания. При восстановлении мерзлого состояния фундаментов копров возникает опасность разрушения крепи стволов силами морозного пучения. Тогда возникает актуальная проблема управления процессом замораживания пород оснований фундаментов, чтобы, с одной стороны, добиться необходимой несущей способности свайного поля, а, с другой стороны, не разрушить при этом крепь шахтного ствола [2]. Нередко в устьевой части ствола, относящейся к интервалу годовых колебаний температур, происходит разрушение крепи, состоящей из бетона и чугунных тюбингов.

Необходимость контроля термомеханических процессов, протекающих при растеплении и замораживании грунтов в основаниях копров, требует создания термометрических комплексов для измерения параметров температурного поля и математических моделей для прогноза геотермического режима грунтового основания при эксплуатации сооружения. Поскольку опыт создания таких комплексов в горном деле отсутствует, актуальными являются теория и практика конструирования и обслуживания системы геотермических наблюдений в криолитозоне.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты проведенных инженерно-геологических изысканий на всех промплощадках рудников АК «АЛРОСА» показали, что грунтовые основания башенных копров шахтных стволов обладают различной степенью техногенной засоленности: от слабо- до сильнозасоленных. По результатам химических анализов подземные воды, вскрытые практически во всех скважинах, с высоким содержанием солей имеют хлоридный кальциевый или натриевый состав. Это указывает на их техногенный характер, при этом по степени минерализации растворы изменяются от слабосолоноватых до рассолов. Химический анализ водных вытяжек грунтов, к примеру, по руднику «Удачный» подтвердил хлоридный кальциевый тип засоления. Поэтому можно утверждать, что загрязнение верхнего криогенного интервала разреза произошло вследствие разлива шахтных минерализованных вод и инфильтрации их в грунты основания сооружений на промплощадке.

Для сохранения мерзлого состояния грунтов и, как следствие этого, их несущей способности на период эксплуатации копров на рудниках в каждом стволе предусмотрены замораживающие установки. В этом случае возникает неординарная задача, связанная с управлением процесса замораживания пород в их основаниях, чтобы, с одной стороны, добиться необходимой несущей способности свайных полей, а с другой, не допустить разрушения бетонной и тюбинговой крепи стволов в результате негативных воздействий напряжений, возникающих при промерзании грунтов. Для достижения поставленной цели на промплощадках рудников АК «АЛРОСА» необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ результатов натурных наблюдений и оценить изменение геотермического режима верхней части криогенно-растепленного породного массива.
2. Оценить возможность наличия высококонцентрированных растворов в охлажденной породной толще и нижележащих отложениях.
3. Проанализировать имеющиеся результаты геотермического контроля.
4. Оценить пригодность проектных замораживающих систем.
5. Разработать математическую модель температурного режима породного массива, вмещающего устьевую часть стволов и площадок под фундаменты копров с учетом многих факторов, в частности: температуры замораживающей жидкости, длины скважин, их количества и места расположения, температур атмосферного воздуха и т.д. Разработать программное обеспечение для оценки несущей способности свайного основания копров и устойчивости крепи устьевой части стволов.
6. Провести численные эксперименты для выбора оптимального режима функционирования замораживающих систем.

Лабораторией горной теплофизики ИГДС СО РАН в течение ряда лет проводятся исследования по изучению тепловых и геомеханических процессов в многолетнемерзлых породах и подземных сооружениях, в том числе на специально разработанных математических моделях. При этом накоплен определенный опыт в области регулирования теплового режима рудников в криолитозоне. На основании анализа данных инженерно-геологических исследований на промплощадках установлено, что распределение льда в верхних слоях оснований неравномерно по площади, что предполагает при оттаивании неравномерное деформирование поверхности и и различную степень осадок грунта. Поэтому вертикальные деформации грунта носят неравномерный характер вблизи башенных копров, что отрицательно влияет на устойчивость его конструкции. С другой стороны, и горизонтальные деформации массива носят явно выраженный временный характер, обусловленный реологическими свойствами льдистого и засоленного грунта, что требует его геомеханической оценки при процессах оттаивания-промерзания на воздействие крепи устьевой части шахтных стволов. В данных моделях деформирования предполагается, что при определенных соот-

ношениях влажности и льдистости горные породы обладают реологическими свойствами, т.е. ползучестью.

Особенности разработки алмазных месторождений Якутии приводят к необходимости учета взаимодействия засоленных подземных вод и криогенных грунтов. При этом возникает необходимость оценки температурного и концентрационного, по воде и солям, состояния мерзлых засоленных отложений, как в естественных условиях, так и при техногенном воздействии. Имеются различные методики прогноза температурного режима засоленных мерзлых пород, удовлетворительно отражающие природу происходящих в них процессов. Основная проблема при их использовании – это корректный выбор входных параметров, прежде всего температуры начала замерзания и прогноз фазового состава влаги в засоленных грунтах. Для массивов засоленных пород, приемлемые методики прогноза концентрационного режима отсутствуют. Нами сделан основной акцент на разработку математической модели и алгоритма ее реализации для расчета температурного режима засоленного разреза, находящегося в зоне действия годовых теплооборотов. В качестве выражения апроксимирующего содержание незамерзшей воды в засоленных грунтах использованы результаты выполненных работ [4, 5, 7].

Как известно, основной проблемой при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений в криолитозоне является поддержание требуемого (отрицательного) температурного режима грунтов, обеспечивая тем самым несущую способность свайных фундаментов и, как следствие этого, устойчивость и долговечность любых строительных конструкций. Острота этого момента ощущается практически на всех промышленных площадках рудников АК «АЛРОСА», где строительство горнотехнических объектов невозможно без применения специальных мероприятий, обеспечивающих их устойчивость. Особенно это характерно для сооружений поверхностных комплексов рудников и в большей степени шахтных стволов, оснащенных подъемными установками, свайные фундаменты и устьевые части которых подвергаются техногенному растеплению в процессе ведения проходческих и строительных работ, а также в период эксплуатации. Причинами растепления и оттаивания многолетнемерзлых грунтов являются подача вентиляционного воздуха в рудник с круглогодичной положительной температурой; тепловое влияние обогреваемых зданий; высокая засолённость грунтов; воздействие атмосферного тепла в летний период.

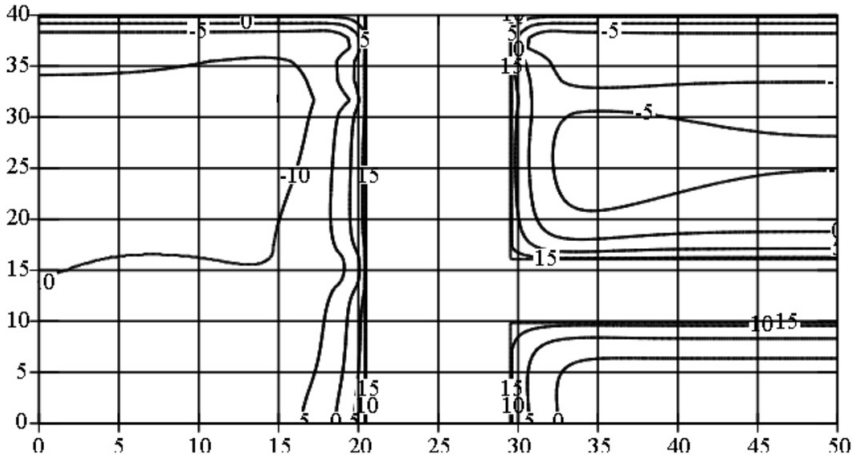
Температурное поле в породном массиве, вмещающем ствол, определяется взаимодействием тепловых потоков, идущих от него и влиянием дневной поверхности. В подземные горные выработки через вентканал и ствол круглогодично подается воздух, который поддерживает положительный температурный режим с помощью калориферных установок. Все это вызывает растепление окружающих криогенных пород, негативно сказывающееся на их устойчивости. Для предотвращения негативных воздействий теплового потока, идущего от ствола предусматривается расположение вокруг ствола замораживающих установок, которые к тому же обеспечивают повышение несущей способности массива горных пород.

Поверхностные комплексы рудников включают громоздкие копры, свайные поля которых расположены вокруг вертикальных стволов и испытывают огромную нагрузку от их давления. В связи с этим их устойчивость гарантирована только при стабильной требуемой отрицательной температуре грунтов, обеспечивающей круглогодичное нахождение их в мерзлом состоянии, несмотря на негативное воздействие растепляющих факторов. Поддержание горных пород в основании фундаментов копров и устьевой части стволов в мерзлом состоянии осуществляется с помощью системы принудительного замораживания, состоящей из станции, галереи рассолопроводов, колонок. Общее количество замораживающих колонок в галерее заморозки зависит от диаметра ствола и изменяется от 12 до 56, при длине от 15 до 40 м. Эксплуатация замораживающей станции предусмотрена в течение всего срока существования рудника, включение и выключение ее производится на основании температуры по показаниям датчиков, установленных в термометрических скважинах. В целом система автоматизированного термоконтроля, состоящая из вертикальных и горизонтальных скважин, необходима для обеспечения стабильной, требуемой температуры грунтов в местах расположения свайного фундамента и устьевой части крепи вертикального ствола.

Расположение вертикальных термометрических скважин должно быть осуществлено с расчетом возможности обеспечения контроля каждого куста свайного поля, т.е. по две скважины на куст. Глубина термометрических скважин должна соответствовать длине свай. Температурные датчики располагаются в следующем порядке: первый датчик следует установить на нулевой отметке грунта, остальные через один метр по всей длине скважины. Для предотвращения деформирования и разрушения крепи стволов сдвиговыми напряжениями, возникающими в процессе замерзания пород в закрепном пространстве, необходимо наличие в нем демпфирующей талой кольцеобразной зоны. Следовательно, требуется оборудовать дополнительные термометрические скважины для мониторинга температурного режима породного массива между крепью ствола и замораживающими колонками и демпфирующей зоны, и также обеспечения оптимального режима работы замораживающей системы. Расположение горизонтальных скважин необходимо выполнять на основе результатов численных модельных экспериментов с учетом криогидрогеохимических условий прилегающего породного массива и особенностей системы заморозки ствола.

Для примера покажем характер изменения геометрических параметров ореола протаивания вокруг ствола ВВС рудника «Удачный» в момент отключения замораживающей станции. Расчеты проводились при следующих исходных параметрах: температура воздуха в стволе + 15 °С, температура хладоносителя в замораживающих колонках – 20 °С. Режим эксплуатации замораживающей станции: 5 месяцев работает, 1 месяц – отключена. Результаты расчетов для наглядности представлены с интервалом 30 суток и приведены на рисунке. Как видно из рисунка, ореол протавания (нулевая изотерма) смещается в глубь породного массива практически параллельно поверхности закрепленного ствола за исключением нижней части, где происходит его расширение, связанное с тем, что данная область находится под замораживающими колонками и их влияние на теплопритоки от ствола ослабевает.

Исходя из результатов численного моделирования для организации автоматизированного контроля температуры грунтов (горизонтальными скважинами) устьевой части ствола ВВС предлагаются следующие мероприятия. Для измерения температуры устьевой части ствола необходимо оборудовать три яруса горизонтальных термометрических скважин на отметках 8, 18 и 35 м от земной поверхности (выше и ниже уровня вентканала). В качестве обсадки скважин рекомендуется использовать металлические трубы, обладающие высокими прочностными свойствами, что важно при их установке в скважины, а также в последующей эксплуатации. Длина термометрических скважин должна быть 2,5 м. В каждую термометрическую скважину необходимо установить термогирлянды с 8 температурными датчиками. Датчики необходимо располагать в следующем порядке: первый размещается на контакте «крепь-воздух»; второй – на контакте «крепь-порода» на глубине 0,5 м; третий – на глубине 0,75 м; четвертый – 1,0 м; пятый – 1,25 м; шестой – 1,5 м; седьмой – 2,0 м; восьмой – 2,5 м.



Температурное поле вокруг ВВС через 30 суток после отключения замораживающей системы

Автоматизированная система термоконтроля на рудниках позволяет снимать данные температурных датчиков и производить пересчет показаний с различной частотой по времени. Как известно, процессы теплообмена в породном массиве довольно инерционны и скорости изменения температуры относительно невелики, поэтому для определения оптимального периода проведения температурных замеров были проведены численные расчеты, позволяющие спрогнозировать скорость движения нулевой изотермы в моменты времени, когда замораживающая система работает или отключена.

Анализ исходных данных показал, что температура грунтов возле стволов имеет более высокие значения, чем температура пород в скважинах, расположенных на расстоянии от стволов, т.е. произошло повышение температуры грунтов вокруг сооружений. По результатам прогнозных расчетов, температура грунта вокруг ряда стволов в районе расположения свай фундаментов копров в основном соответствует – 2…– 3 °С, при которой поровая влага в засоленном грунте не замерзает при концентрации солей 6 и более %. Это говорит о необходимости применения дополнительных замораживающих скважин и станций для обеспечения мерзлого состояния породного массива. При этом, согласно СНиПу 2.02.04-88 [6], расчетные значения сопротивления грунтов нормальному давлению и сдвигу по поверхности смерзания надлежит принимать, как правило, по опытным данным.

Для наглядности приведем результаты модельных расчетов по стволу ВВС рудника «Удачный», которые проводились при следующих исходных параметрах: температура подаваемого воздуха в ствол + 10 °С, температура хладоносителя в замораживающих колонках – 20 °С. Режим эксплуатации замораживающей станции: 2 месяца находится в работе, 2 месяца – отключена. Установлено, что изменение размеров ореола протаивания за 1 месяц носит плавный характер без резких понижений и подъемов температуры грунтов. При работе замораживающей станции за месячный период размер ореола протаивания уменьшился с 1,34 м до 0,88 м, т.е. в среднем за неделю его уменьшение составило 0,11 м. Чуть менее интенсивно идет движение нулевой изотермы при отключении замораживающей станции, а также происходит некоторая стабилизация нулевой изотермы в последующие несколько дней и затем начинается ее плавный рост.

В соответствии с модельными расчетами, для эффективного промораживания грунтов температура замерзающей жидкости должна соответствовать – 20 °С. Максимальная температура грунтов, при которой можно начинать нагрузку на основания сооружения, составляет не выше – 7 °С. В период эксплуатации копров, с учетом неоднородности грунтов и их засоленности, температуру в контролируемых точках следует поддерживать на уровне – 12… – 13 °С.

Таким образом, исходя из результатов численного моделирования изменения скорости движения нулевой изотермы, можно сделать вывод, что для оперативного мониторинга температурного поля в устьевой части стволов достаточно проводить замеры с периодичностью один раз в неделю. Оценку температурного состояния грунтов в основаниях фундаментов копров также достаточно проводить один раз в неделю для отражения полной картины температурного поля на всем контролируемом участке. Для обеспечения устойчивости башенных копров шахтных стволов необходимо заморозить обводненный и засоленный грунт, особенно в районе свайного фундамента башенного копра, с помощью системы заморозки, состоящей из морозильных колонок, галереи и замораживающей станции.

Заключение

Анализ результатов исследований на всех промплощадках подземных рудников АК «АЛРОСА» по развитию горизонтальных деформаций грунта при изменении температуры вокруг устьевой части стволов показал, что наибольшее влияние оказывают реологические процессы деформирования в зоне промерзания-протаивания. Активный рост смещений горных пород наблюдается в момент деградации мерзлых грунтов, при стабилизации зоны протаивания происходит замедление роста смещений в породном контуре выработки. Геотермическими наблюдениями с оценкой несущей способности крепи устьевых частей стволов установлено, что устойчивость массива в условиях образования трещиноватости и проявление реологических процессов в зоне протаивания мерзлых грунтов должны обеспечиваться со значительным запасом.

Разработанная трехмерная математическая модель теплообмена грунтов под основанием башенных копров с учетом тем-

пературы существующей жидкости, длины замораживающих скважин, их количества и места расположения, температуры атмосферного воздуха, степени засоленности вмещающих пород и т.д., позволяет учитывать реальный процесс промерзания-протаивания порового раствора мерзлого массива в спектре возможных температур при изменении теплофизических свойств и общей засоленности разреза по глубине.

При эксплуатации рудников на их промплощадках следует предусмотреть комплекс мероприятий по предотвращению прогрессирующего обводнения и засоления грунтов оснований башенных копров. Установки свай фундамента рекомендуется производить в зимний период, когда рассолы в зоне годовых колебаний температур (до 30 м) находятся в твердом состоянии. Следует отметить, что замораживание грунтов предотвращает миграцию солей, поскольку интенсивность массообменных процессов значительно снижается при понижении их температуры. Кроме того, при замораживании загрязненных пород соли вытесняются в зону с более высокой температурой. Таким образом, на алмазодобывающих рудниках Якутии необходима постоянная эксплуатация систем принудительной заморозки грунтов вблизи стволов и всей охлаждающей системы свайных полей, а расчеты несущей способности криогенных оснований следует выполнять с учетом фактической обводненности и засоленности породного массива.

Список литературы

1. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. – 507 с.

2. Козеев А.А., Изаксон В.Ю., Звонарев Н.К. Термо- и геомеханика алмазных месторождений. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН. – 1995. – 245 с.

3. Крамсков Н.П. Устойчивость копров вертикальных стволов – основа промышленной безопасности алмазодобывающих рудников // Наука и образование. – 2004. – № 1. – С. 27–34.

4. Попов В.И., Курилко А.С. Решение задач тепломассопереноса при промерзании-оттаивании горных пород с учетом уравнения фазового состояния поровой влаги. ГИАБ. – 2006. Тематическое приложение «Физика горных пород». С. 236–244.

5. Слепцов В.И., Мордовской С.Д., Изаксон В.Ю. Математическое моделирование теплообменных процессов в многолетнемерзлых горных породах. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, – 1996. – 104 с.

6. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах.

7. Khokholov U.A., Solovev D.E., Kurilko A.S., Drozdov A.V. The forecast of a temperature regime of soils containing the pile foundation of a pithead on diamond-mining mines of cryolithic zone // Journal of Engineering of Heilongjiang University. – 2014. – Vol. 5, № 3. – P. 117–122.