

УДК 624.139

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТЬЮ БАШЕННЫХ КОПРОВ НА АЛМАЗОДОБЫВАЮЩИХ РУДНИКАХ В ЯКУТИИ

¹Курилко А.С., ²Дроздов А.В., ¹Соловьев Д.Е., ²Мельников А.И., ¹Хохлов Ю.А.

¹ФГБУН «Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского» СО РАН,
Якутск, e-mail: mel@crust.irk.ru;

²ФГБУН «Институт земной коры» Сибирского отделения Российской академии наук,
Иркутск, e-mail: drosdovav@list.ru

В настоящей статье представлены материалы по оптимизации систем управления устойчивостью башенных копров на подземных алмазодобывающих рудниках АК «АЛРОСА». Исследованиями по развитию деформаций пород при изменении температур установлено, что наибольшее влияние оказывают реологические процессы в зоне промерзания-протаивания. В соответствии с рекомендациями для эффективного промораживания грунтов необходимо принять температуру охлаждающей жидкости равную -20°C . Максимальная температура грунтов, при которой можно начинать нагрузку на основание башенных копров, должна быть не выше -7°C . В период эксплуатации сооружения, с учетом неоднородности грунтов и их засоленности, температуру в контролируемых точках следует поддерживать на уровне -12 – -13°C . Разработанная трехмерная математическая модель теплообмена грунтов под основанием башенных копров показала, что замораживающую систему в зависимости от температуры охлаждения и воздуха в стволе рекомендуется эксплуатировать в циклическом режиме. Полученные значения температур пород в районе расположения свай фундамента башенных копров должны сверяться с результатами моделирования и при необходимости корректировать работу охлаждающих устройств для обеспечения требуемых температурных условий.

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

OPTIMISATION OF CONTROL SYSTEMS BY STABILITY TOWER ON DIAMOND-MINING MINES IN YAKUTIA

¹Kurilko A.S., ²DrozdoV A.V., ¹Solovev D.E., ²Melnikov A.I., ¹Khokhlov Yu.A.

¹Institute mining of the North of N.V. Chersky of the Siberian

Branch of the Russian Academy of Science, Yakutsk, e-mail: mel@crust.irk.ru;

²Institute of the Earth's Crust Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
Irkutsk, e-mail: drosdovav@list.ru

In the present article, materials on optimization of control systems by stability tower on underground diamond-mining mines AC «ALROSA» are presented. By researches on development of deformations of breeds at change of temperatures, it is established that the greatest influence render rheological processes in a zone frost penetration-thaw through. According to recommendations for effective expose to frost soils it is necessary to accept temperature of a cooling liquid equal -20°C . The maximum temperature soils at which it is possible to begin loading on the basis tower makes not above -7°C . In construction operation, taking into account heterogeneity soils and their salinities, the temperature in controllable points should be supported at level -12 – -13°C . The developed three-dimensional mathematical model of heat exchange soils under the basis tower has shown that freezing system depending on cooling and air temperature in a trunk it is recommended to be maintained in a cyclic mode. The received values of temperatures of breeds around an arrangement of piles of the base tower should will be verified with results of modelling, and if necessary to correct work of cooling devices for maintenance of demanded temperature conditions.

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

Эксплуатация различных инженерных сооружений в районах криолитозоны осуществляется в основном с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии. Для сохранения мерзлоты и, как следствие, несущей способности пород в период эксплуатации башенных копров алмазодобывающих рудников Якутии на каждом стволе предусмотрена замораживающая установка. В этом случае возникает неординарная задача, связанная с управлением процесса охлаждения грунтовых оснований, т.е. добиться необходимой несущей способности

свайных полей, а также не допустить разрушения бетонной и тубинговой крепи стволов из-за негативных воздействий напряжений, возникающих при промерзании [1].

Тепловой режим оснований копров шахтных стволов отличается от такового в других зданиях тем, что кроме вертикальных тепловых потоков в них существенную роль играет горизонтальный теплообмен от ствола, в который в зимнее время подается подогретый воздух. Понятие «система управления устойчивостью копра» над стволом подземного рудника включает

в себя две подсистемы: замораживающую установку, состоящую из замораживающих устройств и станции, и термометрический комплекс, состоящий из термометрических скважин и пункта оператора. Основной целью данных исследований являлась разработка регламентов по режиму работы замораживающих станций на период эксплуатации шахтных стволов на рудниках АК «АЛРОСА». Основным методом исследования принят метод математического моделирования термомеханического состояния оснований фундаментов копров, т.е. температурных полей и связанных с ними несущих способностей свай [3].

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ результатов исследований по развитию горизонтальных сдвижений грунта при его охлаждении вокруг устьевой части ствола показал, что наибольшее влияние оказывают реологические процессы деформирования в зоне промерзания-протаивания [6]. Активный рост смещений горных пород наблюдается в момент деградации мерзлоты. Для предотвращения деформирования и разрушения крепи ствола сдвиговыми напряжениями, возникающими в процессе замерзания грунтов в закрепном пространстве, необходимо наличие в нем демпфирующей талой кольцеобразной зоны.

При строительстве шахтных стволов на рудниках наблюдаются активные процессы обводнения и засоления грунтов на участках расположения башенных копров при подъеме горной массы, вынимаемой из подмерзлотных водоносных горизонтов. Для обеспечения устойчивости сооружений необходимо заморозить обводненный интервал, особенно в районе свайных фундаментов, с помощью систем охлаждения. При этом возникает необходимость оценки температурного и концентрационного состояния засоленных отложений, как в естественных условиях, так и при техногенном воздействии. Основной акцент при таких исследованиях сделан на разработку математических моделей и алгоритма их реализации для расчета температурного режима засоленных образований, находящихся в зоне действия годовых теплооборотов.

Башенные копры, возводимые над стволами, являются главными горнотехническими сооружениями шахтных комплексов, определяющими эффективность работы строящихся и эксплуатируемых предприятий. Расчет крепи шахтных стволов глубиной до 50 м или их устьев регламентируется действующим СНиП [4], предусматриваю-

щим определение нормативных и расчетных нагрузок на крепь с учетом пригрузки от сооружений, расположенных вблизи ствола, а также с учетом материала и установления размеров крепи. Для мерзлого состояния грунтов, полученного в результате замораживания верхней части растепленного массива, необходимо оценить их термомеханическое влияние на крепь устьевой части ствола. При оставлении небольшой зоны оттаивания между замороженным массивом и крепью ствола грунты в зоне оттаивания будут деформироваться в жесткопластическом режиме.

Жесткопластическая модель деформирования пород предусматривает образование двух зон в массиве вокруг подземной выработки: примыкающий к породному обнажению участок неупругих деформаций и остальная область, деформирующаяся по закону Гука. Однако жесткопластическая модель предполагает такое взаимодействие пород с крепью выработки, когда неупругие деформации обнажения во много раз превосходят по величине упругие смещения. При этом блок, находящийся за зоной неупругих деформаций, рассматривается как твердое тело, упругие подвижки которого не оказывают механического влияния на пластическое сдвижение участков неупругих деформаций.

В зависимости от размеров области неупругих деформаций возможно образование устойчивых сводов равновесия разрушенных горных пород. Параметры сводов определяются в основном размерами поперечного сечения шахтного ствола. Применение жесткопластической модели к расчету нагрузки на крепь ствола можно считать обоснованным в аспекте развития геомеханических процессов в массиве пород вокруг выработки. Нагрузка на крепь ствола будет определяться размерами сводов устойчивого равновесия. При этом мощность толщи пород практически не влияет на параметры нагрузки на крепь выработки.

Криогенный массив представляет собой многофазную систему, состоящую из незамерзшей воды, газообразных веществ в порах, льда, минерального скелета горных пород. Известно, что многолетнемерзлые грунты обладают высокой прочностью за счет цементирующего действия замерзшей воды в порах и трещинах массива. В процессе эксплуатации горных выработок мерзлое состояние толщи обеспечивает длительное время устойчивость породного обнажения выработки, что позволяет их проходить без крепления при условии сохранения отрицательного температурного режима вскрываемой толщи.

Во всех расчетных схемах основным условием деформирования является уравнение совместности перемещений выше указанных систем, из которого находятся выражения для расчета нагрузок на крепь шахтного ствола. Анализ расчетов показал, что при повышении температуры пород от -24°C до нулевой отметки смещение породного массива увеличивается на 1,0...1,5 мм. На основе этих результатов делается вывод, что нагрузка на абсолютно жесткую крепь составит 3,5...4,0 МПа, а с учетом податливости крепи – до 0,7 МПа [5].

Анализ результатов расчетов показывает существенное влияние глубины протаивания вокруг ствола на величину нагрузки на крепь выработки. С другой стороны, протяженность выработки так же значительно влияет на параметры нагрузки на крепь ствола при больших размерах зон протаивания. Как известно, механическое поведение мерзлых грунтов в значительной мере определяется развитием термодинамических, тепломассообменных, химических, физико-химических процессов жидкой, газообразной и твердой фазы в породном массиве. В процессе нагружения минеральный скелет проявляет разные виды деформирования (упругое, пластическое, вязкое). Учитывая значительную область деформирования горных пород вокруг выработки, в зависимости от параметров распределения напряженного и прочностного состояния породного массива, можно предположить одновременность протекания разных видов деформаций в разных точках приконтурного слоя.

На алмазодобывающих рудниках, как правило, сооружают свайное основание с проветриваемым подпольем при глубоком охлаждении грунтов, используемых в качестве фундаментов башенных копров [5], которое обеспечивается замораживающей системой, состоящей из охлаждающих устройств различного типа и термометрической станции для контроля температурного состояния прилегающего массива. При этом рекомендуется оставлять талую зону вокруг ствола мощностью 0,5–1,0 м, что должно предотвратить разрушающие нагрузки на крепь ствола при полном промораживании пород.

Максимальные расчетные нагрузки на крепь устьевой части шахтного ствола значительно ниже ее несущей способности, что обеспечивает нормальную эксплуатацию ствола при замороженном основании копра. При минимальной прочности монолитного бетона на сжатие 10–15 МПа вероятность возникновения разрушения крепи по причине температурных напряжений

исключена из-за небольшого температурного градиента. Температурные напряжения, кроме сжимающих нагрузок, оказывают также растягивающий эффект в бетонной крепи. Предел прочности на растяжение бетона составляет до 2 МПа. Тогда возможно появление зон разрушения бетона в местах максимальных температурных напряжений. Это отмечается в основном на внутренней поверхности бетонной крепи, которая может проявляться в виде шелушений, отколов и трещинообразования на ее поверхности. Таким образом, результаты оценок нагрузок на крепь устьевой части шахтного стола показывают, что при правильной организации функционирования замораживающей станции термомеханическое состояние грунтов не оказывает существенного влияния на формирование нагрузок на крепь устьевой части сооружения. Несущая способность крепи устьевой части шахтного ствола обеспечивает в данных геотермических состояниях его нормальную эксплуатацию.

Для прогноза тепловых условий выделим расчетную область, которая учитывает наличие вентиляционного канала, который примыкает к стволу и через него подается теплый рудничный воздух. Постановку модельной задачи осуществим с учетом процессов промерзания-протаивания влаги в горных породах, теплообмена охлаждающих устройств с окружающим породным массивом, а также воздуха с внутренней поверхностью ствола и вентканала, влияния дневной поверхности. При численном эксперименте обычно задают различные значения параметров, изменяется ширина диапазона температур фазового перехода. Мощность и средняя температура теплоделителя остаются постоянными, а меняется вид функции плотности распределения тепла. При этом идентифицированные расчетные формулы учитывают реальный процесс промерзания-протаивания порового раствора. Преимуществом данного подхода является то, что отсутствует необходимость выбора параметра сглаживания. Данный подход позволяет строить разностные схемы со сглаженными коэффициентами, т.е. совершается переход к обычной задаче теплопроводности. Численная реализация нелинейной задачи осуществляется с помощью итерационных методов сквозного счета, что намного упрощает процесс решения задач теплообмена в мерзлых грунтах при использовании аддитивных локально-одномерных разностных схем.

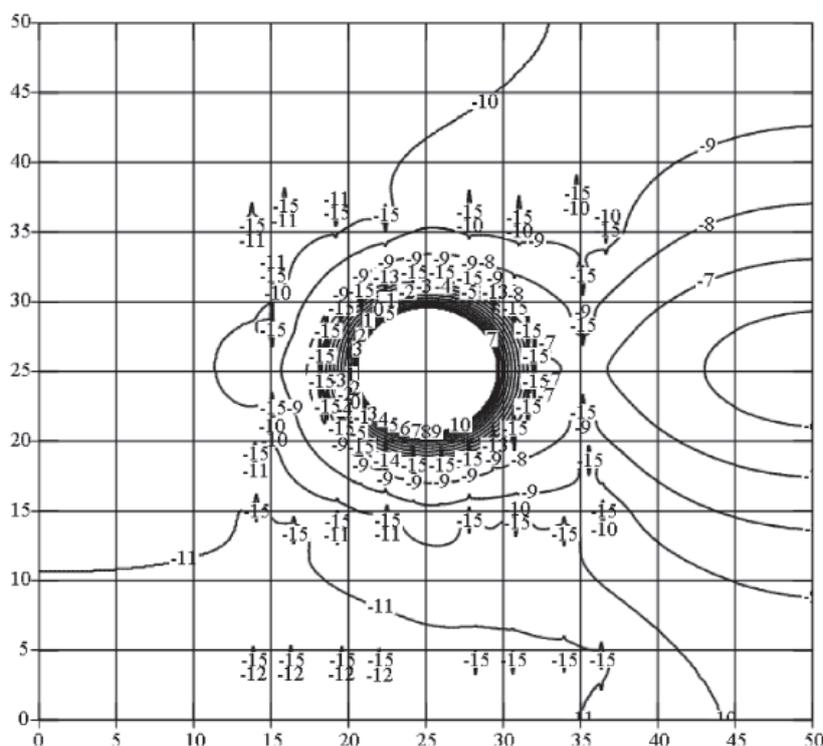
Для решения трехмерной задачи теплообмена использован метод суммарной аппроксимации [2, 7], который сводит

исходную задачу к последовательности одномерных задач. При этом разностные схемы удовлетворяют условиям аппроксимации и устойчивости только в конечном счете. На каждом временном слое решается последовательность одномерных задач. Все системы разностных уравнений выводятся с учетом геометрии рассматриваемой области. Система разностных уравнений решается методом простой итерации с применением метода прогонки. Полученный результат является искомым решением на новом временном слое.

С началом работы замораживающих систем необходимо организовать процесс таким образом, чтобы не допустить промораживания пород демпфирующей зоны и в то же время поддерживать мерзлое состояние свайного фундамента, обеспечивая при этом его несущую способность. Для решения этой задачи проведены масштабные вычислительные эксперименты на специально разработанной математической модели. Модель позволяет рассчитать температурный режим пород, окружающих ствол, с учетом режима работы замораживающей системы и размеров ореолов протаивания вокруг него, а также определить несущую способность каждой сваи в зависимости от температурных условий грунтов и степени их засоленности. При выполнении расчетов были рассмотре-

ны различные режимы работы замораживающей системы. При моделировании рассмотрены две температуры охлаждения -15 и -20°C , а также три температуры в стволе: $+5$, $+10$ и $+15^{\circ}\text{C}$. В результате вычислительных экспериментов выбраны наиболее рациональные режимы работы замораживающей системы, при которых обеспечивается наличие демпфирующего талого кольца размером не менее $0,5$ м.

При температуре в стволе $+10^{\circ}\text{C}$ и температуре замораживания -15°C был выбран оптимальный вариант, когда замораживающая система работает в течение 5 месяцев, с последующим месячным отключением, после которого вновь включается в работу на тот же срок. На рисунке приведены температурные изолинии, полученные по результатам проведенных расчетов температурных полей вокруг нее, по горизонтальной плоскости на глубинах 14 м. Как видно из рисунка, на глубине 14 м вокруг ствола при таком режиме работы замораживающей станции через 4 года может быть образована кольцеобразная мерзлая зона с температурой пород -10°C , а на глубине 27 м – такая же зона с температурой $-6...-8^{\circ}\text{C}$. Из графика видно, что существенное тепловое влияние на окружающий породный массив стволов оказывает вентканал, температура пород вокруг которого не превышает $-1...-3^{\circ}\text{C}$.



Температурное поле вокруг ствола ВВС рудника «Удачный» на конец четвертого года эксплуатации замораживающей системы (глубина 14 м)

Согласно выполненным расчетам, температуру замораживающей жидкости следует поддерживать не выше -15°C . Контроль температуры грунтов вокруг шахтного ствола необходимо осуществлять с использованием горизонтальных и вертикальных термометрических скважин, специально оснащенных гирляндами датчиков. Замораживающая система, зависящая от температуры охлаждения и воздуха в стволе, должна эксплуатироваться в циклическом режиме. Рациональные режимы работы замораживающей системы, по результатам модельных расчетов, приведены в таблице.

Режимы эксплуатации системы охлаждения в зависимости от температур замораживания и воздуха в стволе

Температура воздуха в стволе, $^{\circ}\text{C}$	Температура замораживания, $^{\circ}\text{C}$	
	-15	-20
5	0,5 + 2,5	0,5 + 3,5
10	5 + 1	2 + 2
15	5 + 1	5 + 1

Примечание. (5 + 1) означает, что замораживающая система работает 5 месяцев, а на 1 месяц отключена.

При эксплуатации стволов необходим постоянный контроль динамики размеров ореолов деформирующей зоны для оптимизации работы замораживающей системы. Установлено, что изменения несущих способностей свай носят сезонный характер: зимой происходит их повышение, а летом, наоборот, – снижение. Рассчитанные значения несущих способностей свай, на которые опирается фундамент копра, изменяются в пределах от 400 до 900 тонн, что превышает проектные значения. Для оценки температурных полей в верхней части пристволового пространства необходим мониторинг состояния грунтов в районе вентканала, а при необходимости рекомендуется установка дополнительных замораживающих устройств. Кроме этого, основным требованием является обеспечение постоянного мониторинга температур приповерхностного массива в течение всего периода эксплуатации ствола. Полученные значения температуры грунтов в районе расположения свай фундамента необходимы для выбора оптимального режима функционирования замораживающей системы.

Выводы

Анализ результатов проведенных исследований по развитию горизонтальных деформаций грунта при изменении температур вокруг устьевого части ствола показал, что наи-

большее влияние оказывают реологические процессы деформирования в зоне промерзания-протаивания. В соответствии с рекомендациями для эффективного промораживания грунтов необходимо принять температуру охлаждающей жидкости равную -20°C . Максимальная температура грунтов, при которой можно начинать нагрузку на основание башенных копров, составляет не выше -7°C . В период эксплуатации сооружения, с учетом неоднородности грунтов и их засоленности, температуру в контролируемых точках следует поддерживать на уровне $-12...-13^{\circ}\text{C}$. Изменения несущих способностей свай вблизи копров носят сезонный характер, зимой происходит их повышение, а летом, наоборот – снижение. Поэтому необходим постоянный контроль за температурным режимом грунтов в околостволовом пространстве.

Следует отметить, что массив искусственно замороженных пород служит барьером и предотвращает миграцию солей, а также способствует снижению интенсивности теплообменных процессов. Поскольку на промплощадке в верхней части разреза имеются участки с повышенным содержанием солей, необходим мониторинг за состоянием и температурным режимом грунтов под основанием башенных копров. Разработанная трехмерная математическая модель теплообмена под основанием башенных копров показала, что замораживающую систему в зависимости от температуры охлаждения и воздуха в стволе рекомендуется эксплуатировать в циклическом режиме. Полученные значения температур пород в районе расположения свай фундамента башенных копров должны сверяться с результатами моделирования, и при необходимости корректировать работу охлаждающих устройств для обеспечения требуемых температурных условий.

Список литературы

1. Иудин М.М., Петров Е.Е. Взаимодействие многолетнемерзлого породного массива с крепью вертикального ствола. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2000. – 148 с.
2. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М., Наука, 1983. – 616 с.
3. 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.
4. СНиП II-94-80 Подземные горные выработки. – М.: Госстрой СССР, 1982.
5. СНиП 2.02.04-88. Основание и фундаменты на вечноммерзлых грунтах. – М.: Госстрой СССР, 1990.
6. Попов В.И., Курилко А.С. Решение задач теплопереноса при промерзании – оттаивании горных пород с учетом уравнения фазового состояния поровой влаги. ГИАБ. – 2006. Тематическое приложение «Физика горных пород». – С. 236–244.
7. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, 1967. – 196 с.