

УДК 622.25:004.925.84

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ КРЕПИ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Иголка Д.А.¹, Иголка Е.Ю.¹, Лукша Е.М.², Кологривко А.А.¹¹ Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь² ОАО «Белгорхимпром», г. Минск, Беларусь

Приведены закономерности изменения прочностных характеристик массива горных пород в отрицательном температурном поле ледопородного ограждения. Оценено влияние изменяющихся в температурном поле прочностных характеристик пород на нагружение бетонной крепи.

Введение

Из всех применяемых в настоящее время специальных способов проходки шахтных стволов по степени научной обоснованности, уровню развития технических средств и технологии производства работ, длительности и систематичности использования надежным и универсальным является способ искусственного замораживания горных пород, что подтверждается практикой [1].

В частности, для проходки стволов калийных рудников в сложных гидрогеологических условиях способ замораживания является практически единственно применимым. Так, например, стволы Старобинского и Саскачеванского месторождений калийных солей, Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей пройдены с использованием способа замораживания. Исключением в условиях Верхнекамского месторождения является ствол № 1 СКРУ-1, построенный в 1930 г. с применением цементации горных пород, а также два ствола фирмы PotashCorp на месторождении New Brunswick, сооруженные в 2012 году.

Несмотря на большую накопленную базу исследований и практических знаний, аварийные ситуации, связанные с деформированием стенок стволов, и как следствие, приводящие к разрушению крепи и разрыву замораживающих колонок, имеют место в практике ведения горно-строительных работ. Решение возникающих вопросов находят в завышении мощности замораживания пород и промораживании всего контура шахтного ствола, что не является безопасным и эффективным с точки зрения нагружения крепи, оттаивания горных пород и высокой стоимости процесса заморозки.

Развитие научных знаний в области расчета крепи стволов, проводимых способом замораживания, исследований особенностей взаимодействия системы «монолитная бетонная крепь – замороженный породный массив» с учетом изменения свойств ледопородного ограждения (ЛПО) в переменном и постоянном температурном поле, формирующемся вокруг замораживающих колонок, является актуальной задачей в области строительства шахтных стволов на калийных рудниках.

Результаты исследований

Замораживание горных пород изменяет их физико-механические и прочностные свойства, определяет ряд особенностей в технологии проходки и креплении стволов. В формулы расчета крепи стволов, как одного из основных определяющих факторов безопасности конструкции, входят прочностные и деформационные характеристики

замороженных пород: предел прочности на сжатие, модуль деформации, коэффициент Пуассона, сцепление, угол внутреннего трения.

К исследованию принимались замороженные алевролитовые породы на глубине 400 м при температуре замораживания $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, характерные для стволов калийных рудников. Используются свойства образцов в естественном и замороженном состояниях. Проведены исследования нагрузок на крепь ствола от горных пород, свойства которых приняты при постоянной средней температуре ЛПО, и от пород с дифференцированными свойствами в переменном температурном поле ЛПО. Установлена приемлемость вычислений нагрузок по средней температуре ЛПО. Нагружения бетонной крепи, связанные с морозным пучением и реологией, не учитывались, их исследование является отдельной актуальной темой для анализа и изучения.

Исследование напряженного состояния крепи проведено с применением методов механики сплошной среды с использованием программного продукта РК-2, реализующего аналитическое решение методом коэффициентов передачи нагрузок [2] и рекомендуемого нормативными документами по проектированию подземных горных выработок.

Ниже представлены результаты расчета, в котором нагрузка на крепь воспринимается от замороженных пород по свойствам, соответствующим средней температуре ЛПО. Схема размещения замораживающих скважин и толщины ЛПО приведена на рисунке 1. Средняя температура ЛПО в замковой части определена по рекомендациям [3, 4]:

$$t_{\text{ср.з}} = \frac{t_{\text{ст}} \ln(d_2 / l)}{2 \ln(d_2 / d_1)} + \frac{t_3}{2} \left(\frac{\ln(l / d_1)}{\ln(d_2 / d_1)} + 1 \right) = -4,36\text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (1)$$

где $t_{\text{ст}} = -17$ – внешняя температура стенки замораживающей колонки, $^{\circ}\text{C}$;

$l = 1,3$ – расстояние между замораживающими колонками, м;

$d_1 = 0,148$ – диаметр замораживающей колонки, м;

$d_2 = 5,2$ – внешний диаметр криогидратного цилиндра вокруг замораживающей колонки, м;

$t_3 = -1,3$ – температура замерзания пород, $^{\circ}\text{C}$.

Средняя температура главной плоскости ЛПО:

$$t_{\text{ср.г}} = \frac{t_{\text{ст}}}{\ln(r_2 / r_1)} + \left(1 + \frac{1}{\ln(r_2 / r_1)} \right) \cdot t_3 = -6,42\text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (2)$$

где $r_1 = 0,074$ – радиус замораживающей колонки, м;

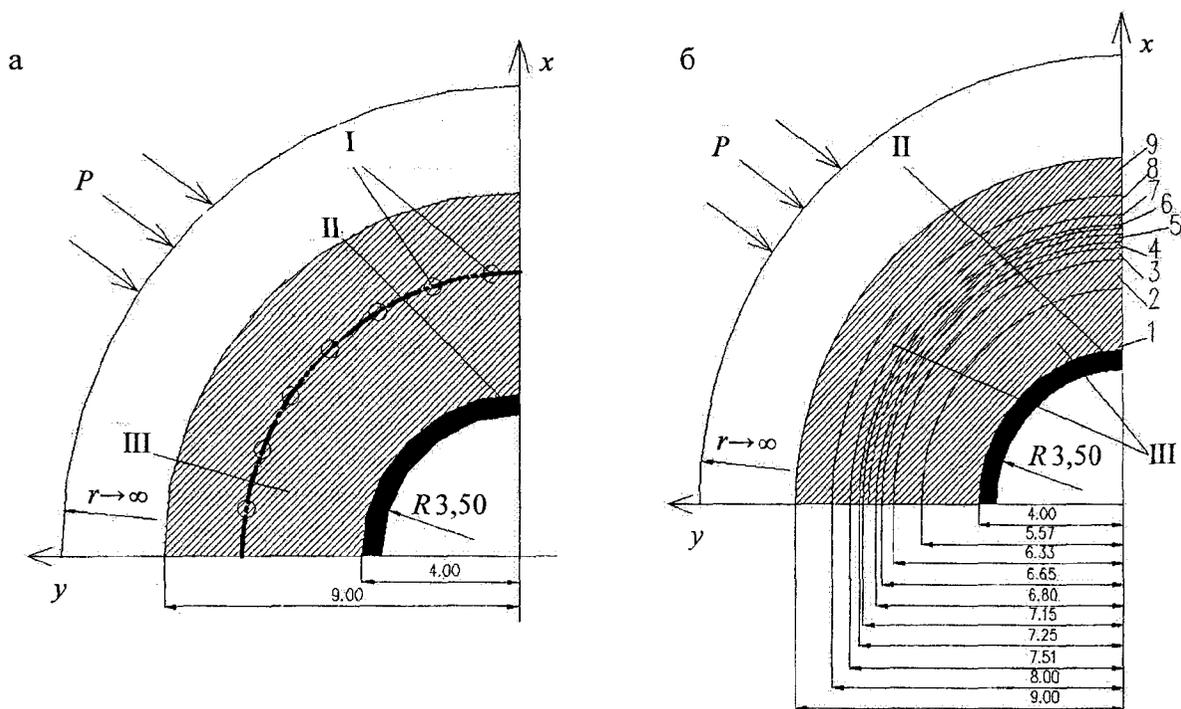
$r_2 = 2,063$ – радиус криогидратного цилиндра вокруг замораживающей колонки, м.

Средняя температура ЛПО:

$$t_{\text{лпо}} = \frac{t_{\text{ср.з}} + t_{\text{ср.г}}}{2} = -5,4\text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (3)$$

Средняя температура ЛПО использована для дальнейшего определения расчетных величин прочностных характеристик пород. К расчетам нагрузок на крепь приняты свойства породы при температуре $-5,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (модуль деформации ЛПО – 495 МПа, коэффициент Пуассона – 0,12). Бетон принят толщиной 0,5 м, модуль деформации с учетом

молодого возраста – 13500 МПа. Модуль деформации пород – 195 МПа, коэффициент Пуассона – 0,22. Расчетная схема представлена на рисунке 1а.



а – по средней температуре ЛПО; б – в переменном температурном поле ЛПО;
1-9 – расчетные интервалы через каждые 6,8 °С; I – замораживающие колонки;
II – бетонная крепь; III – ЛПО; P – радиальная нагрузка на ЛПО

Рисунок 1 – Схема расчета нагрузок на крепь

Коэффициент, учитывающий влияние расстояния до забоя ствола, принят согласно формуле разработанной профессором Н.С. Булычевым [2]. Расчетная величина начальных напряжений составляет 0,83 МПа.

В результате расчета по средней температуре ЛПО нормальные тангенциальные напряжения на внутреннем контуре сечения крепи составляют 7,67 МПа, а напряжения на наружном контуре 6,77 МПа, что не превышает расчетного сопротивления сжатия бетона [5]. При этом радиальное напряжение на контакте крепи и породы составит 0,9 МПа.

Для определения нагрузок на крепь от замороженных пород с учетом переменной температуры в ЛПО по логарифмической зависимости [2] построен график распределения температур в ЛПО толщиной 5 м (рисунок 2), с учетом распределения толщины d ЛПО: $0,6d$ к центру ствола и $0,4d$ к его внешней части.

Температура в любой точке ЛПО радиусом R_t определена по формуле:

$$t(R_t) = t_k \cdot \left(\frac{\ln(R_{\text{вн}} / R_t)}{\ln(R_{\text{вн}} / R_0)} \right), \quad (4)$$

где t_k – температура поверхности замораживающей колонки, °С;

$R_{\text{вн}}$ – радиус промерзания ледопородных цилиндров, °С;

R_t – расстояние рассматриваемой точки от оси замораживающей колонки, м;
 R_0 – внешний радиус замораживающей колонки, м.

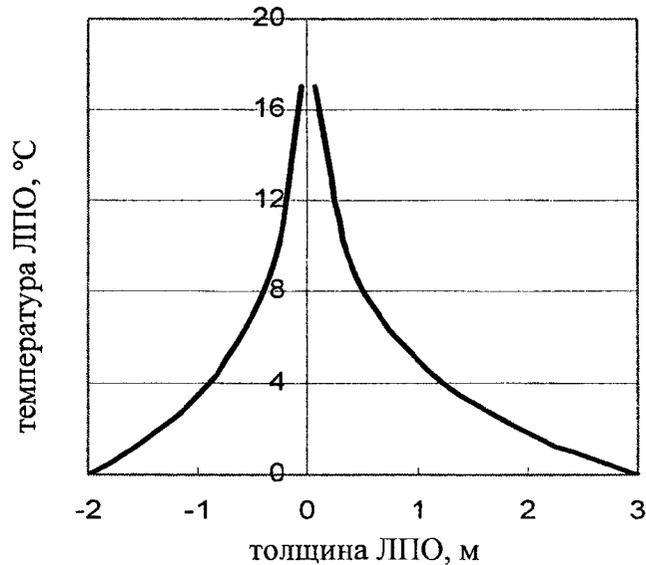
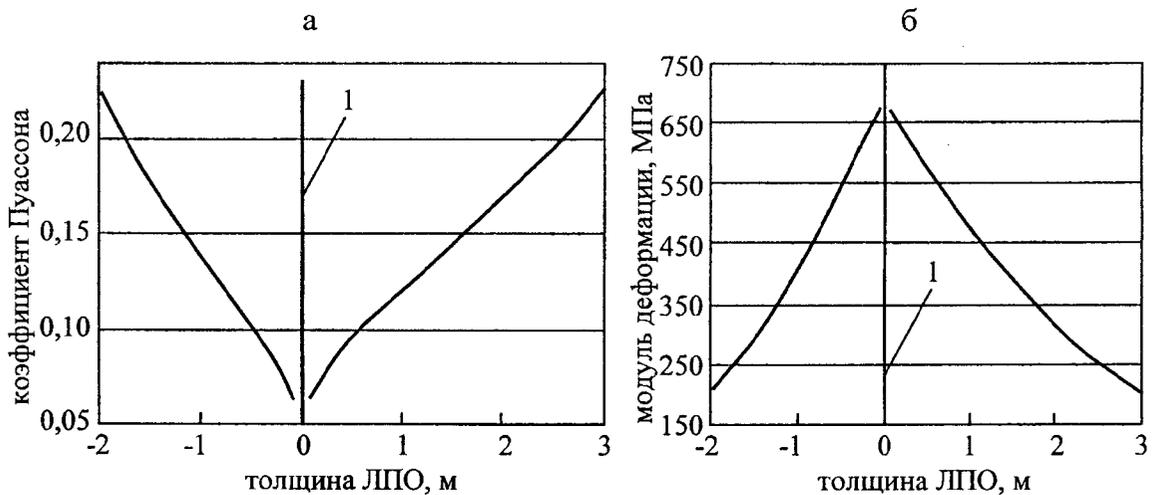


Рисунок 2 – График распределения температур в ЛПО

При выполнении расчета допущено, что температура ледообразования $t_0 = 0$ °С и соответствует температуре на стенке ствола при его проходке. Далее согласно физико-механическим свойствам пород при отрицательных температурах построены графики изменения модуля деформации и коэффициента Пуассона, соответствующие температурному полю ЛПО, (рисунок 3) и определены закономерности изменения коэффициента Пуассона и модуля деформации замороженных пород в отрицательном температурном поле.



1 – замораживающая колонка

Рисунок 3 – Графики зависимости коэффициента Пуассона (а) и модуля деформации (б) от отрицательного температурного поля ЛПО

Для исследования нагрузки на бетонную крепь от переменного температурного поля ЛПО использовано решение программы РК-2. При разделении температурного

поля ЛПО через каждые 6,8 °С имеем 9 расчетных интервалов. Слои ЛПО приняты в качестве аналога многослойной крепи. Расчетная схема представлена на рисунке 16. Внутри каждого выделенного интервала путем линейной интерполяции определялась средняя температура каждого слоя. По полученным графическим закономерностям в соответствии с температурой расчетных интервалов ЛПО определены значения коэффициента Пуассона и модуля деформации для каждого расчетного слоя.

В результате расчета нормальные тангенциальные напряжения на внутреннем контуре сечения крепи составили 6,95 МПа, напряжения на наружном контуре – 6,16 МПа.

Расчет с учетом дифференцированных свойств пород показал, что напряжения в конструкции примерно на 10 % меньше, чем при расчете крепи по средней температуре ЛПО.

Методы механики сплошной среды применительно к механике подземных сооружений в настоящее время достаточно развиты [6]. Это позволяет выполнять аналитические расчеты по обоснованию параметров различных типов крепи шахтных стволов при воздействии на них как статических нагрузок – горное давление, морозное пучение, так и динамических – сейсмическое воздействие, тампонажные работы.

На современном этапе изучения методов расчета крепи в замороженных породах при строительстве стволов на калийных рудниках отсутствует методика расчета, которая бы учитывала нагрузки на крепь ствола сил морозного пучения, реологических параметров замороженных пород, переменных свойств массива пород, а также поведение материалов крепи в условиях отрицательных температур. В связи со сложностью термодинамических и геомеханических процессов, происходящих в массиве при реализации метода замораживания пород, представляется возможным привлечение численных методов с построением цифровых моделей, позволяющих решать комплексные задачи. Такие методы моделирования получили название ТНМС (метод Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical) [7], учитывающие механические, термические, гидравлические и химические свойства массивов, а такие программные продукты как ANSYS, FLAC позволяют выполнять постановку задач такого рода [8]. Использование таких методов моделирования в сочетании с постоянным мониторингом напряженно-деформированного состояния системы «монолитная бетонная крепь – замороженный породный массив» обеспечит безопасность проходки, позволит эффективно оптимизировать дорогостоящие процессы замораживания пород и крепления стволов.

Заключение

Исследование нагрузок на крепь стволов от горных пород, характерных для калийных рудников, свойства которых приняты при средней (постоянной) температуре ЛПО, и от пород с дифференцированными свойствами в переменном температурном поле ЛПО показывают, что напряжения в конструкции крепи примерно на 10 % меньше, чем при расчете крепи по средней температуре ЛПО. Использование при расчете крепи шахтных стволов, проводимых способом замораживания, средней температуры ЛПО согласуется с результатами расчетов, учитывающих изменения деформационных свойств пород ЛПО от изменения температуры.

Список использованных источников

1. **Schmall, P.** Ground freezing a proven technology in mine shaft sinking / P. Schmall, D. Maishman // T&UC. – London, June 2007. – 2007. – P. 25-30.

2. Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1994. – 278 с.
3. Литвин, А.З. Проходка стволов специальными способами / А.З. Литвин, Н.М. Поляков. – М.: Недра, 1974. – 328 с.
4. Трупак, Н.Г. Замораживание грунтов при строительстве подземных сооружений / Н.Г. Трупак. – М.: Недра, 1979. – 278 с.
5. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск, 2003. – 39 с.
6. Булычев, Н.С. О расчете крепи ствола при проходке способом замораживания пород / Н.С. Булычев // Геомеханика. Механика подземных сооружений. Выпуск 3. – Тула: ТулГУ, 2001. – С. 42-46.
7. Yu-Shu, Wu. Development of Advanced Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical (THMC) Modeling Capabilities for Enhanced Geothermal Systems / Wu. Yu-Shu // Geothermal Technologies Programm. – Colorado School of Mine, 2010.
8. Иголка, Е.Ю. Применение численного моделирования для оценки влияния криогенного пучения на крепь при проходке шахтных стволов способом замораживания / Е.Ю. Иголка, В.С. Усенко, Г.А. Щербаков // V-th International Geomechanics Conference. – Варна (Болгария), 2012.

Igolka D.A., Igolka E.Yu., Luksha E.M., Kologrivko A.A.

Influence of an ice wall temperature at calculation of the shafts lining system

Regularities of changing of rock mass strength characteristics are given within a negative temperature field of an ice-wall massif. It is estimated the influence of rock strength characteristics changing within the temperature field on loading of a concrete lining system.

Поступила в редакцию 05.06.2014 г.