

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ НА ПРИМЕРЕ СКИПОВОГО СТВОЛА КАЛИЙНОГО РУДНИКА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

М.А. Семин, А.А. Дунькина
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В представленной работе на основании данных температурного мониторинга состояния ледопородного ограждения (ЛПО) скипового ствола строящегося калийного рудника параметризована теплофизическая модель замораживаемого массива пород. Она использована для оценки энергоэффективности работы системы замораживания. Показано, что в условиях достаточно большого интервала замораживания пород для верхних слоев наблюдаются существенные превышения фактической толщины ЛПО над требуемой толщиной, а также имеется высокая доля неэффективно используемой тепловой энергии, затраченной на замораживание пород.

Ключевые слова: искусственное замораживание, ледопородное ограждение, энергоэффективность, моделирование, поле температур, теплота.

Введение

Строительство шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях осуществляется с использованием специальных способов. Наиболее распространенным специальным способом строительства шахтных стволов калийных рудников является искусственное замораживание [1]. В рамках данного способа вокруг проектируемой горной выработки формируется ледопородное ограждение (ЛПО), предотвращающее поступление подземных вод в данную выработку и повышающее устойчивость стенок горной выработки до возведения бетонной крепи.

Далее при работе системы замораживания осуществляется непрерывный температурный контроль за параметрами замороженных пород, целью которого является определение момента достижения требуемых толщин ЛПО во всем интервале замораживания [3]. Процедура искусственного замораживания пород является ресурсозатратной в плане электроэнергии. По оценкам [4], расходы электроэнергии на замораживание пород для одного погонного метра ствола может составлять $3,6 \cdot 10^9$ кДж. По данной причине важно подбирать энергоэффективные параметры работы систем замораживания, соблюдая при этом требования безопасности.

Вопросам энергоэффективного замораживания пород при строительстве стволов посвящен ряд исследований в литературе. В классической работе Н.Г. Трупака [5] предложены основные подходы к управлению холодопроизводительностью замораживающей станции на стадии пассивного замораживания. В работах [3, 6] предложена система непрерывного термометрического контроля, обеспечивающая оперативную и точную оценку состояния замороженных пород для своевременного принятия решений о смене режима работы замораживающей станции. В зарубежных работах [7, 8] рассмотрены принципы прерывистого управления и замораживания по требованию. Принцип замораживания по требованию был существенно развит в работе научной школы Горного института [9, 10]. Также в работе [9] был предложен поинтервальный принцип разрешения проходческих работ под защитой ЛПО. Применительно к калийному руднику в Республике Беларусь он позволил начать проходку двух стволов раньше, чем были достигнуты требуемые параметры ЛПО в наиболее глубоких слоях пород из интервала замораживания. Данный принцип сопровождался непрерывным контролем достижения требуемых толщин ЛПО к моменту начала работ по выемке породы на наименее промороженных глубоких слоях пород. Это позволило существенно уменьшить затраты электроэнергии на работу замораживающей станции на формирование и поддержание ЛПО (на величину более 3 млн. кВт*ч). Однако вместе с тем, по оценкам из

[10], многие слои пород из интервала замораживания для калийного рудника Республики Беларусь по-прежнему были существенно переморожены. Это указывает на потенциальную возможность дальнейшей оптимизации параметров системы замораживания.

Поиск дальнейших путей повышения энергоэффективности систем замораживания при строительстве шахтных стволов требует проведения детального анализа процессов замораживания на примере реальных рудников. По данной причине в настоящей работе на примере строящегося скипового ствола калийного рудника проведен анализ эффективности использования холодильной мощности системы замораживания при формировании ЛПО для различных слоев пород в интервале замораживания.

Объект исследования и исходные данные для анализа

В рамках исследования выполнен температурный мониторинг состояния ЛПО скипового ствола калийного рудника Республики Беларусь. Восстановление температурного поля во всем породном массиве по данным измерений в контрольно-термических скважинах осуществлялось с помощью численного моделирования в программном комплексе «FrozenWall». Параметризованная модель тепломассопереноса также использовалась для оценки энергоэффективности работы системы замораживания. Интервал замораживания имел глубину 185 м и был разделен на 17 слоев с различными теплофизическими свойствами (см. таблицу 1).

Таблица 1

Параметры слоев, залегающих в пределах скипового ствола

№ слоя	Описание породы	Отм. кровли, м	Отм. подошвы, м	Суммарное давление на внешнюю стенку ЛПО, МПа	Проектная толщина ЛПО, м
1	Песок	2,1	18	0,16	0,15
2	Суглинок	18	24,5	0,27	0,31
3	Песок, суглинок, супесь	24,5	33,5	0,30	0,32
4	Супесь	33,5	41,1	0,46	0,49
5	Супесь, суглинок	41,1	50	0,54	0,63
6	Суглинок	50	60,5	0,85	0,86
7	Песок глинистый, супесь	60,5	72,3	1,22	0,86
8	Суглинок	72,3	82,9	1,21	1,39
9	Супесь, суглинок	82,9	97,3	1,29	1,49
10	Мел писчий, супесь	97,3	109,3	1,43	1,77
11	Песок, супесь	109,3	124,4	1,87	1,89
12	Песок, суглинок	124,4	133,7	1,68	2,75
13	Песок	133,7	141,5	1,72	2,82
14	Глина, известняк	141,5	154,8	1,55	1,75
15	Глина, глина аргил.	154,8	162,1	1,69	1,59
16	Глина аргил.	162,1	182,1	1,91	1,82
17	Глина аргил.	182,1	187,1	1,94	2,12

Фактическая толщина ЛПО определялась исходя из рассчитанного поля температур по изотерме, равной -4°C , так как при данной изотерме температура прочного ЛПО достигает -10°C . Далее эта толщина сравнивалась с требуемой толщиной ЛПО, которая рассчитывалась по двум критериям: предельному напряженному (1) и предельному деформированному (2) состояниям [2]:

$$E = \frac{\sqrt{3} \cdot P \cdot h_3}{2 \cdot \sigma_{\text{дл}}}, \quad (1)$$

$$E = 0,5R \left[\left(1 + g(P) \frac{(1-m) \cdot P \cdot h_3^{1+m}}{A(t; \theta) \cdot \Delta^m \cdot R} \right)^{\frac{1}{1-m}} - 1 \right] \quad (2)$$

где P – полное горизонтальное давление, действующее на ледопородный цилиндр Па; h_3 – высота участка ЛПО, не подкреплённого крепью (высота заходки), м.; $\sigma_{дл}$ – предельно-длительное значение предела прочности на одноосное сжатие, определенное для расчетного времени t , Па; R – радиус ствола в проходке, м; m – коэффициент упрочнения замороженных пород (коэффициент нелинейности по напряжениям); A – предельно-длительное значение деформации, Па; Δ – допускаемое по техническим соображениям радиальное смещение внутренней стенки ЛПО, м; $g(P)$ – безразмерная функция от давления бокового распора [2].

Результаты моделирования

Давление, оказываемое на стенку ЛПО растет с глубиной залегания слоев, а потому, как правило, нижние слои требуют больших толщин ЛПО и, соответственно, промораживаются медленнее [11]. Из-за этого верхние слои склонны к перемораживанию в процессе формирования ЛПО требуемой толщины для всего интервала замораживания. В результате произведенных расчетов выявлена закономерность между глубиной залегания слоёв породы и отношением фактической толщины к требуемой (см. рис. 1). Нахождение такого отношения показывает во сколько раз происходит превышение или недостаток толщины ЛПО в слоях.

Исходя из графика зависимости, необходимо отметить следующее. В интервале от 1-го до 7-го слоя наблюдается чрезвычайно высокое превышение фактической толщины от требуемой. В частности, для 1-го слоя это отношение составляет 23,5. В интервале в целом от 8-го до 17-го слоя наблюдается невысокое превышение от требуемой величины (от 1,1 до 2,95), за исключением слоя № 16 – в нем по истечении 4-х месяцев с момента начала замораживания замороженные температуры не достигают -10°C и, следовательно, толщина ЛПО по средней температуре -10°C равна нулю. Несмотря на это в рамках предложенного подхода поинтервального разрешения проходческих работ по истечении 4 месяцев активного замораживания принято решение о начале проходки скипового ствола. Последний подход позволил существенно сэкономить энергозатраты на работу системы замораживания, так как для достижения требуемой толщины в слое 16 необходимо было продолжать стадию активного замораживания еще 3-4 месяца. Однако, как видно из рис. 1, достигнутый сценарий замораживания по-прежнему не является оптимальным в плане энергопотребления, имеется большой потенциал для его дальнейшей оптимизации по критериям затрачиваемой холодопроизводительности и безопасности ведения горных работ.

Также проведена оценка эффективности холодильной мощности системы в терминах доли неэффективно использованной холодопроизводительности системы замораживания. Оценивалось отношение неэффективно использованной тепловой энергии, затраченной на перемораживание ЛПО сверх требуемой толщины, к полезной теплоте, затрачиваемой на образование требуемой толщины ЛПО со средней температурой -10°C . Полезная и неэффективно использованная тепловые энергии рассчитываются по формулам (3) и (4):

$$Q_{п} = \rho \omega L V_{т} + \rho C_{т} \Delta T_1 V_{т} + \rho C_3 \Delta T_2 V_{т}, \quad (3)$$

$$Q_{н} = \rho \omega L V_{пер} + \rho C_{т} \Delta T_1 V_{т} + \rho C_3 \Delta T_2 V_{т} \quad (4)$$

где ρ – плотность породы n -го слоя, $\text{кг}/\text{м}^3$; ω – количество замерзающей воды, $\text{кг}/\text{кг}$; L – удельная теплота кристаллизации вещества, $\text{Дж}/\text{кг}$; $V_{т,пер}$ – объем породы, необходимый для достижения требуемой толщины ЛПО; объем перемороженной породы м^3 ; $C_{т,3}$ – соответственно в зоне охлаждения и в зоне льда, $\text{Дж}/\text{кг}^\circ\text{C}$; $\Delta T_{1,2}$ – разность температур соответственно, породы и полной кристаллизации; полной кристаллизации и прочного ЛПО, $^\circ\text{C}$.

Рассчитанные значения критерия неэффективно использованной теплоты представлены на рис. 2.

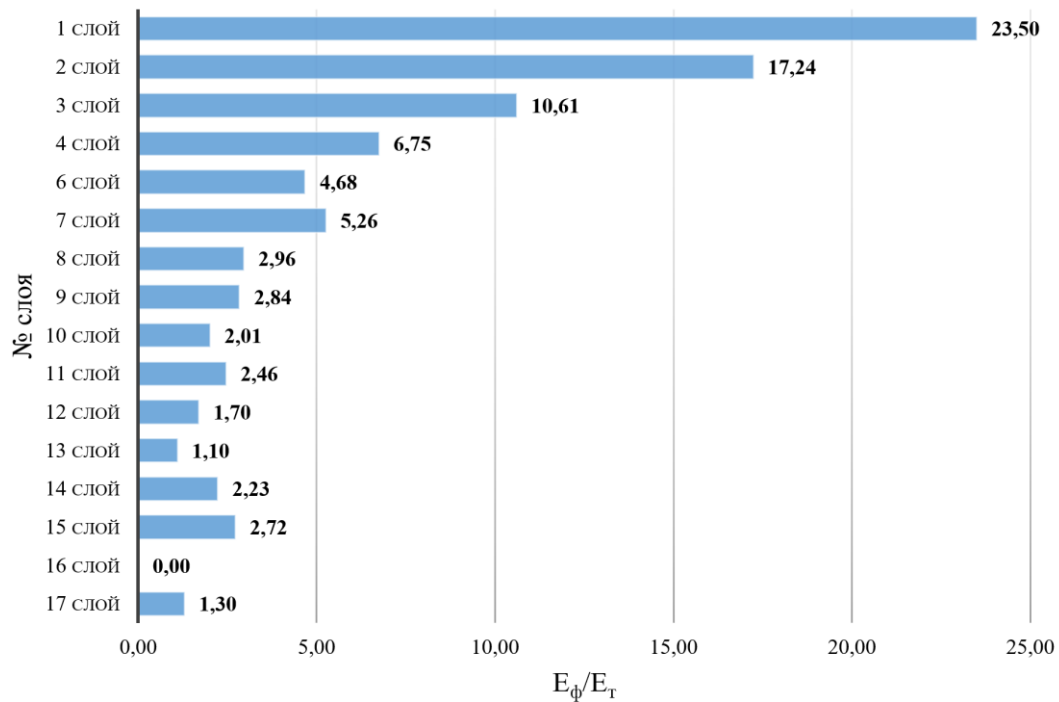


Рис. 1. Зависимость E_{ϕ}/E_T от глубины залегания слоя по истечении 4-х месяцев с момента начала замораживания

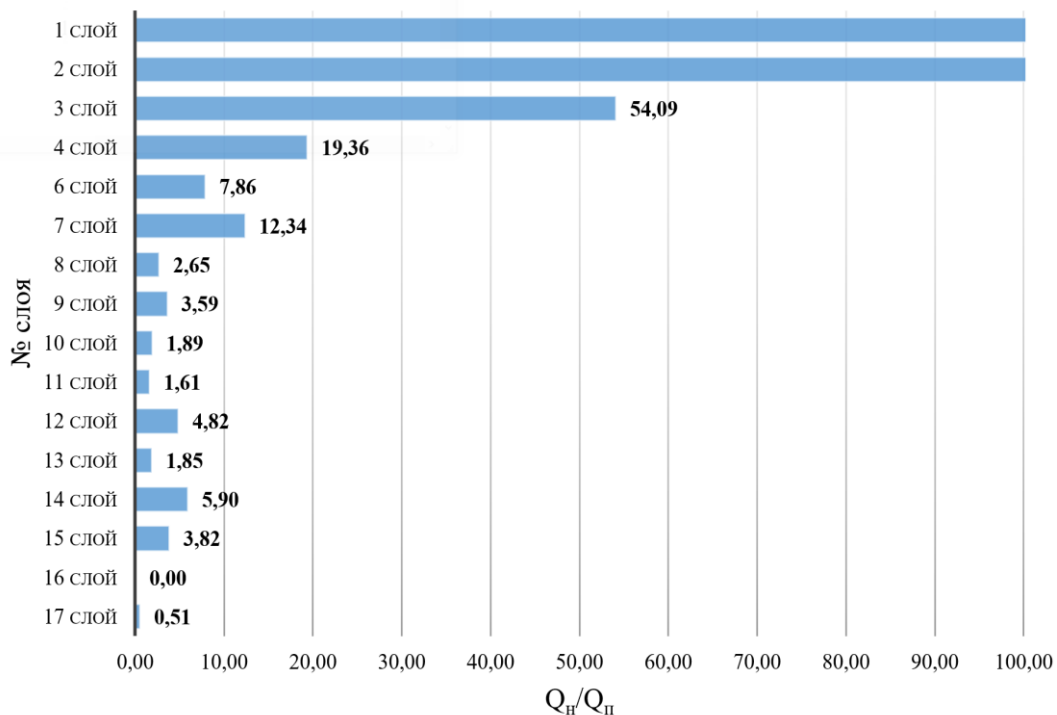


Рис. 2. Зависимость Q_n/Q_n от глубины залегания слоя по истечении 4-х месяцев с момента начала замораживания

Из рис. 2 видно, что в верхних слоях имеются значительные превышения требуемой холодопроизводительности на формирование ЛПО проектной толщины. Для первых двух

слоев превышение в более чем 100 раз. Это связано с тем, что проектная толщина ЛПО для данных слоев очень мала (см. табл. 1). В частности, при такой толщине ЛПО не обеспечивается условие замыкания ледопородного ограждения вокруг проектного сечения ствола.

В [9] упоминается, что искусственное замораживание должно рассматриваться в комплексе с другими технологическими процессами при проходке стволов. Вместе с этим эффективность проходческих работ напрямую зависит от устойчивости незакрепленных стенок шахтного ствола. В случае, если в интервале замораживания не достигается необходимая толщина до проектного сечения ствола, может происходить сильное деформирование породы, её вывалы в очистное пространство. Это повлечет за собой необходимость проведения дополнительных работ по укреплению стенок шахтного ствола и заполнению образовавшихся после вывалов пустот (например, с помощью бетона). В этом смысле перемораживание относительно рыхлых верхних слоев пород является благоприятным фактором.

В современных условиях еще одним значимым фактором при строительстве шахтных стволов является глубина интервала замораживания. С ростом глубины интервала замораживания максимальная нагрузка на внешнюю стенку ЛПО в самых глубоких слоях пород также растет. Это приводит к сильной дифференциации слоев замораживаемых пород по толщинам ЛПО, а также к перемораживанию верхних слоев. Поэтому необходимо сказать, что одним из перспективных путей повышения энергоэффективности является поинтервальный принцип разрешения проходческих работ под защитой ледопородного ограждения. Данный принцип также необходимо совершенствовать с точки зрения оптимизации проектных параметров замораживания в рамках данного подхода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (проект № 122030100425-6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ольховиков Ю.П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. – М.: Недра, 1984. – 238 с.
2. Kostina A., Zhelnin M., Plekhov O., Pantelev I., Levin L., Semin M. Applicability of Vyalov's equations to ice wall strength estimation // *Frattura ed integrità strutturale*. – 2020. – V. 14, № 53. – P. 394-405. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.53.30.
3. Levin L., Golovaty I., Zaitsev A., Pugin A., Semin M. Thermal monitoring of frozen wall thawing after artificial ground freezing: Case study of Petrikov Potash Mine // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2021. – V. 107. – № статьи 103685. – DOI 10.1016/j.tust.2020.103685.
4. Паланкоев И.М. Разработка конструкции замораживающей колонки зонального замораживания и методика определения эффективности ее работы // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2012. – №. 7. – С. 217-222.
5. Трупак Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. – М.: Углетехиздат, 1954. – 896 с.: ил.
6. Levin L.Y., Semin M.A., Parshakov O.S. Improving methods of frozen wall state prediction for mine shafts under construction using distributed temperature measurements in test wells // *Journal of Mining Institute*. – 2019. – T. 237. – С. 268-274. – DOI: 10.31897/PMI.2019.3.268.
7. Zhou Y., Zhou G. Intermittent freezing mode to reduce frost heave in freezing soils—experiments and mechanism analysis // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2012. – T. 49, №. 6. – С. 686-693.
8. Alzoubi M.A., Zueter A., Nie-rouquette A., Sasmito A.P. Freezing on demand: A new concept for mine safety and energy savings in wet underground mines // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2019. – V. 29, №. 4. – С. 621-627.
9. Головатый И.И., Левин Л.Ю., Семин М.А., Пугин А.В. Реализация принципов замораживания «по требованию» при строительстве стволов Дарасинского рудника // *Горный журнал*. – 2023. – № 8. – С. 34-39. – DOI: 10.17580/gzh.2023.08.05.
10. Levin L., Semin M., Golovaty I. Analysis of the structural integrity of a frozen wall during a mine shaft excavation using temperature monitoring data // *Frattura ed integrità strutturale*. – 2023. – V. 17, № 63. – P. 1-12. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.63.01.
11. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Контроль и прогноз формирования ледопородного ограждения с использованием оптоволоконных технологий // *Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН*. – Пермь, 2016. – С. 236-238.