

10. Андрейко С.С., Иванов О.В., Нестеров Е.А. Исследование способов предотвращения внезапных отжимов призабойной части соляных пород // Горный журнал. – 2018. – № 6. – С. 30-34. – DOI: 10.17580/gzh.2018.06.06.
11. Литвиновская Н.А., Ключарев А.П. Совершенствование технологии отработки запасов выбросоопасного пласта КрII в условиях рудника «Еврохим-УКК» // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2021. – № 4. – С. 416-424. – DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-416-424.
12. Андрейко С.С., Иванов О.В., Лялина Т.А., Нестеров Е.А. Газоносность по свободным газам пород сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон Верхнекамского месторождения // Горная промышленность. – 2021. – № 4. – С. 125-133. – DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-125-133.

УДК 622.253

DOI:10.7242/echo.2022.2.22

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ АССИМЕТРИЧНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ЗАМОРАЖИВАЕМОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

А.В. Пугин, А.А. Оглоблина, А.В. Богомяжков

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Асимметричное распределение температур в массиве горных пород, подвергнутому искусственному замораживанию, является обыденной реальностью. В статье показаны примеры подобных распределений, имевших место в практике при строительстве вертикальных шахтных стволов. Причинами могут служить как естественные, так и технологические факторы. Явление асимметрии затрудняет контроль состояния ледопородного ограждения. Однако применение теплофизического моделирования с последующим морфологическим анализом восстановленного поля температур в рамках предложенного подхода позволяет оперативно и адекватно оценивать параметры ледопородного ограждения на соответствие требуемым критериям, а значит своевременно принимать рациональные и экономически целесообразные технические решения при ведении горных работ.

Ключевые слова: ледопородное ограждение, асимметрия, теплофизическое моделирование, распределение температур, морфологический анализ.

Ледопородное ограждение (ЛПО), возводимое с целью защиты строящейся выработки от разрушения и затопления, должно соответствовать конкретным механическим, термодинамическим и гидравлическим критериям обеспечения безопасности [1, 2].

К механическим критериям относятся требуемая прочность замороженной породы и ее устойчивость к деформациям в течение заданного времени под воздействием внешней нагрузки (суммарно горного и гидростатического, реже, при движении подземных вод – и динамического давления); к гидравлическим – снижение поровой и трещинной проницаемости породы до значения, обеспечивающего нулевую скорость фильтрации подземных вод; к термодинамическим – обеспечение необходимого объема замороженной породы и ее температуры.

При контроле состояния ЛПО термодинамические критерии первичны. Они напрямую связаны с механическими и гидравлическими критериями. Их соблюдение является приоритетным и достаточным условием для одновременного решения механической и гидравлической задач. Кроме того, именно термодинамические параметры легче всего определяются в полевых условиях и служат основой для остальных критериальных оценок.

В формализованном виде анализ термодинамического состояния ледопородного ограждения обычно сводится к сопоставлению его фактической минимальной толщины и средней температуры с требуемыми значениями, определенными на стадии проекти-

рования для каждого слоя пород, где толщина – аналог критерия требуемого объема замороженной породы на заданном радиальном направлении от центра ствола. Суждение о достаточности прочностных, деформационных и противofильтрационных характеристик выносится на основе их взаимосвязи с термодинамическими параметрами.

Поэтому термометрия является основным методом контроля ЛПО, а теплофизическое моделирование – наиболее адекватным способом оценки его состояния [3, 4]. При симметричной форме в горизонтальной проекции в каждом слое толщина ЛПО и средняя температура по всем радиальным направлениям будут одинаковы. Процесс легко автоматизируется с вычислением данных параметров по любому, наиболее удобному направлению. Сложнее производить оценку, когда очертания ЛПО в горизонтальной проекции имеют асимметричный характер.

Конфигурация ЛПО в проекции на горизонтальную плоскость может быть определена по изотермам поля температур (рис. 1), построенного на основе теплофизического расчета. Достоверность расчета определяется степенью детализации и идеализации (упрощениями и допущениями) теплофизической модели и близостью вычисленных температур к измеренным в контрольно-термических скважинах и шпурах.

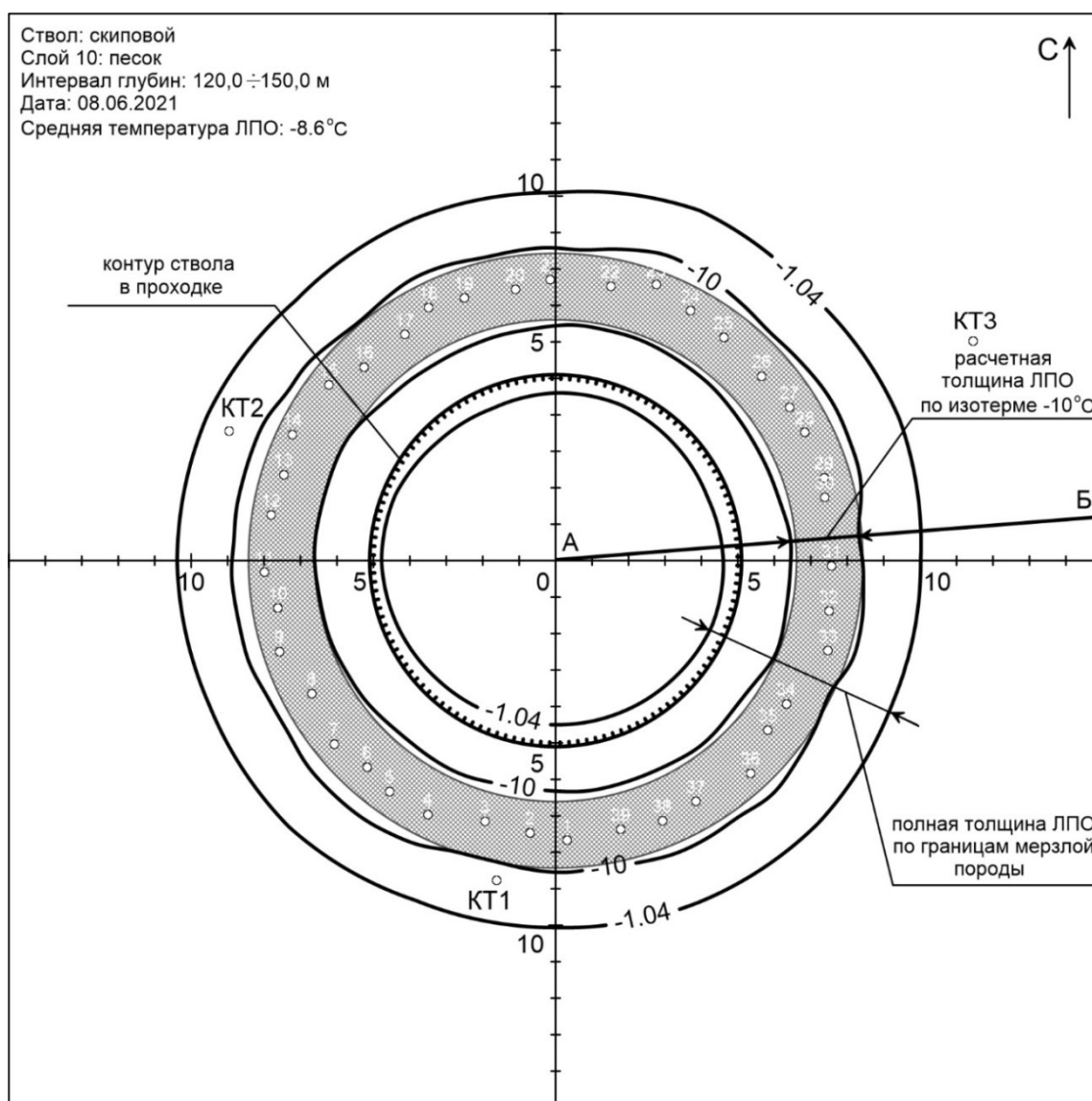


Рис. 1. Определяемые термодинамические параметры ЛПО.
Штриховкой показано проектное положение и минимально требуемая толщина ЛПО

По полю температур в горизонтальном сечении минимальная толщина ЛПО определяется как наименьшее расстояние между изотермами одного значения внутри и снаружи контура замораживающих колонок, а если нужная изотерма попадает в контур проходки ствола – по минимальному расстоянию от него до внешней изотермы.

На рисунках 2, а-е в виде контурных карт изотерм проиллюстрированы модельные поля температур, рассчитанные с опорой на экспериментальные данные в процессе термометрического контроля ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов различных рудников.

Симметричное (рис. 2а) и квазисимметричное (рис. 2б) распределения температур наблюдаются, когда отклонения замораживающих скважин от вертикали незначительны. В случае значительного расстояния между замораживающими колонками или при наличии отклонений от нормального режима работы одной или нескольких из них (вплоть до полного отключения) наблюдается асимметрия изотерм на локальных участках (рис. 2, в-г). Полная асимметрия поля температур на рисунке 2д обусловлена движением подземных вод в западном направлении, а на рисунке 2е – расположением замораживающих колонок в проекции на горизонтальную плоскость, их конструктивными особенностями и разными режимами работы.

Математически формализовать каждый случай для автоматического распознавания сложно. Необходимо создать набор паттернов, описывающих все ситуации и эффективный алгоритм их сличения с модельным полем температур, не допускающий ошибки, цена которой – затопление строящейся выработки. Поэтому интерактивный морфологический анализ температурных полей остается одним из важнейших этапов термометрического мониторинга ЛПО.

Разработанное специалистами «ГИ УрО РАН» программное обеспечение «Frozen-Wall» [5] способно анализировать толщины ЛПО по радиальному профилю в направлении от центра ствола. Для определения минимальной толщины создается набор k -го числа радиальных профилей с заданным угловым шагом $\Delta\varphi$ (где φ – полярный угол в полярной системе координат $\sum r\varphi$) и определяет расстояние Δr_k между изотермами с заданным значением температуры по каждому из них. Расстояние $\Delta r_{min} = \min \Delta r_k$ принимается за минимальную толщину ЛПО, а соответствующее направление с индексом k и полярным углом φ_k считается наиболее «слабым» участком, требующим повышенного внимания.

Выявления одного направления бывает недостаточно. Локальных «ослабленных» участков может быть несколько, как например на рисунке 2г, и для формирования обоснованных выводов о состоянии ЛПО требуется детально проанализировать каждый из них.

Иногда в моделируемом пласте ввиду сложного геологического строения участка присутствует зона литологического замещения породы, контуры которой известны по данным бурения и геофизических исследований. Как пример, данная зона может быть сложена водоносным песчаником, а в целом слой – водоупорными глинами. В таком случае, чтобы оценить достаточность параметров ЛПО для обеспечения требуемых критериев безопасности, необходимо определить не только минимальное минимальную толщину ЛПО в этом секторе, но и радиальное расстояние до точек пересечения границ ЛПО по заданной изотерме (например, со значением -12°C) с границами зоны замещения, как показано на рисунке 2е.

Анализ температур замораживаемого массива вдоль выбранного радиального профиля придает большее понимание ситуации на локальных участках и позволяет сделать выводы не только о размерах ЛПО по границам мерзлой породы (по температуре начала замерзания воды в породе) или по границам прочной породы (с заданной проектом температурой), но и о дефиците или избытке защитных свойств ЛПО.

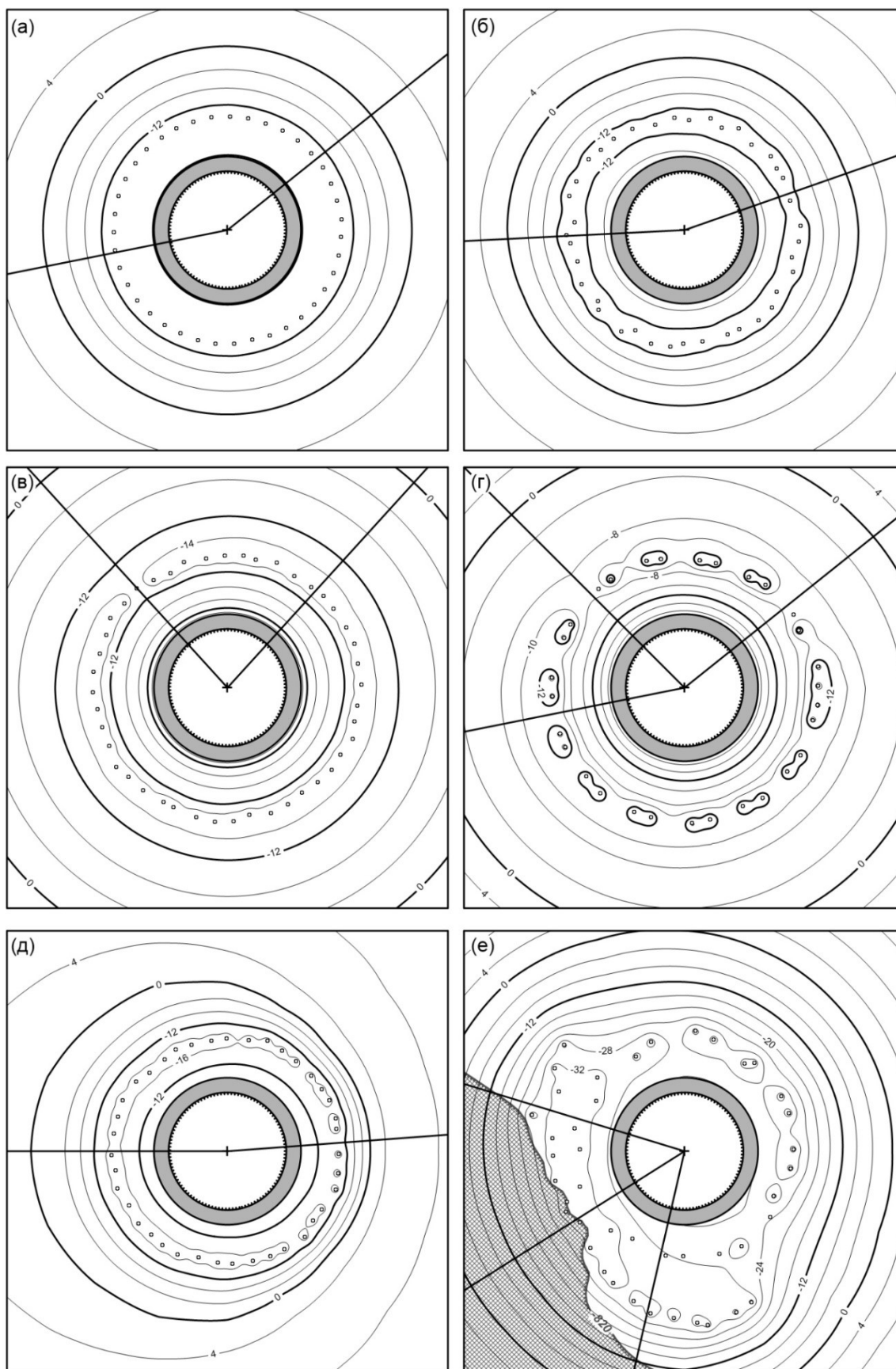


Рис. 2. Распределение температур в горизонтальном слое горных пород (карта изотерм): (а) – радиально симметричное и (б)-(е) – с разной степенью асимметрии вращения относительно центра ствола: (б) – квазисимметричное; (в)-(г) – локально асимметричное; (д)-(е) – полностью асимметричное. Штриховкой на карте с литерой (д) маркирована зона литологического замещения породы

Допустим, по совокупности критериев заранее определено, что при температуре породы -12°C достижение минимальной толщины ЛПО в 2 метра гарантирует соблюдение технологических требований к устойчивости стенок выработки, величине их деформации за время проходки до крепления и защите от затопления. На рисунке 3 показан пример графика температур по радиальному направлению через участок с минимальной толщиной ЛПО. Предположим, минимальная толщина ЛПО определяется по расстоянию между изотермами с температурой прочной породы -12°C . В данном случае ее величина составляет всего 1,1 м, чего недостаточно в сравнении с требуемым значением в 2,0 м.

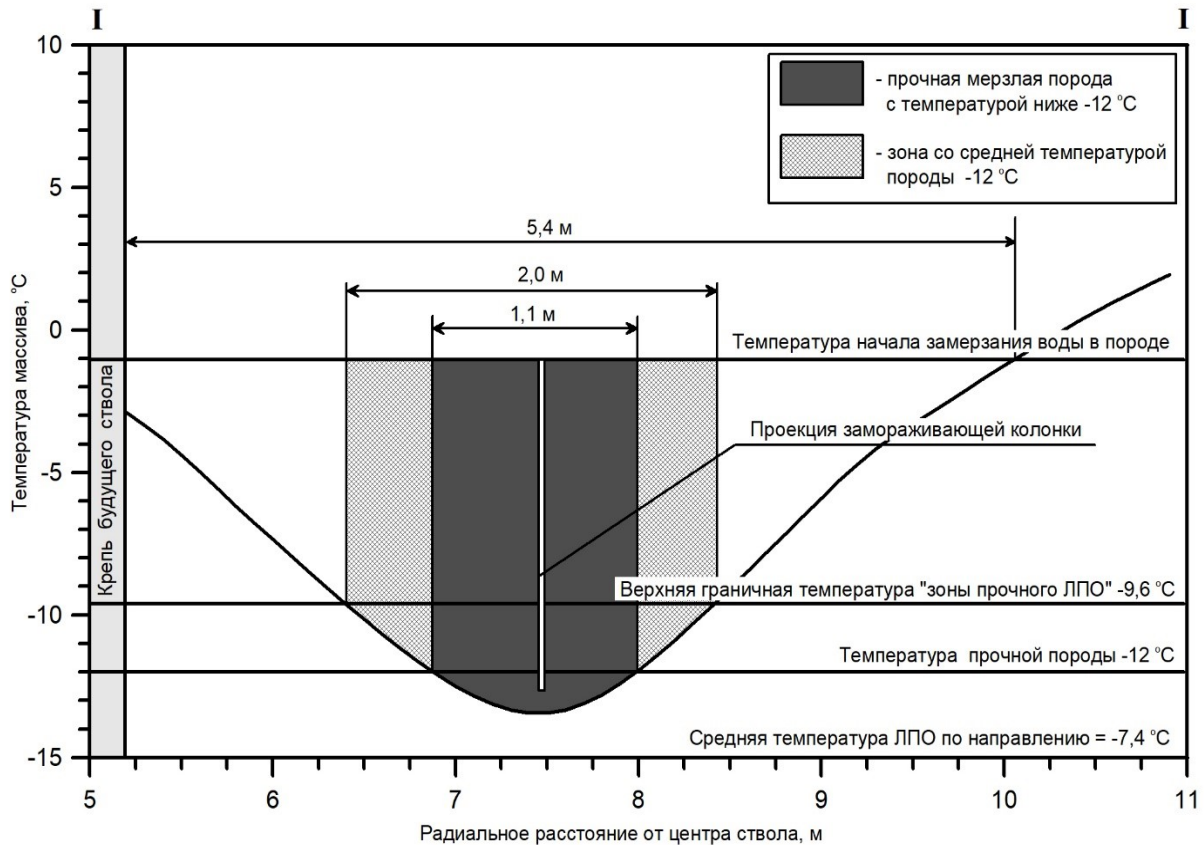


Рис. 3. Анализ температурного состояния ЛПО по радиальному профилю

В то же время порода с температурой ниже -12°C создает дополнительный запас прочности и устойчивости к деформации, а толщина ЛПО по границам мерзлой породы составляет 5,4 м и, казалось бы, намного превосходит требуемые 2,0 м. Возникает закономерный вопрос: обеспечивает ли ЛПО с такими размерами ту же степень безопасности, что и заданное проектом с толщиной в 2,0 м и средней температурой -12°C ? Ответ на этот вопрос не является тривиальным. Средняя температура ЛПО по профилю составляет всего $-7,4^{\circ}\text{C}$ вместо необходимых -12°C . Корректная оценка может быть получена только на основании численного геомеханического моделирования. Ввиду ее трудозатратности у интерпретатора, оценивающего состояние ЛПО, может возникнуть искушение сделать вывод о несоответствии параметров ЛПО требуемым значениям и дать рекомендацию на продолжение активного замораживания, что приведет к необоснованным затратам. Поскольку проходка ствола невозможна, если параметры ЛПО в данном интервале глубин не отвечают принятым критериям безопасности, сделанные выводы послужат (обоснованной?) причиной задержки проходки.

Решение можно упростить введением нескольких допущений. Предположим, что (а) массив однороден по строению (что всегда предполагается в отсутствие достоверных сведений о противоположном), (б) поведение под нагрузкой некоторого объема замороженной породы с неоднородным распределением температуры, имеющей среднюю температуру -12°C , идентично поведению аналогичного объема с однородным распределением температуры величиной -12°C . Данное допущение не является новым, поскольку с его применением выведен ряд формул для расчета требуемой толщины ЛПО, например, предложенные С.С. Вяловым [6, 7]. Обозначим указанный объем как «зону прочного ЛПО».

Третье допущение (в) основано на том, что если границы этой зоны не являются одновременно границами мерзлой породы, то внешняя нагрузка прилагается не к границе зоны прочного ЛПО, а опосредованно, через «буферную» толщу замороженной породы с более высокой температурой, и на границе зоны ее величина снижена.

Принимая во внимание эти допущения, остается только обозначить границы зоны прочного ЛПО, рассчитать ее горизонтальные размеры и соотнести их с требуемой толщиной. Введем следующее упрощение: пусть внутренняя r_1 и внешняя r_2 границы зоны определяются по равным значениям температуры внутри (в направлении ствола) $T(r_1)$ и снаружи $T(r_2)$ от проекции контура замораживающих колонок на профиль. Тогда

$$\begin{cases} \bar{T} = \int_{r_1}^{r_2} T dr, \\ \text{sup}T = T(r_1) = T(r_2), \end{cases}$$

где $\text{sup}T$ – суть верхняя температурная граница зоны прочного ЛПО, \bar{T} – необходимая средняя температура породы.

После дискретизации функции температуры

$$\begin{cases} \bar{T} = \frac{T(r_1) + T(r_2) + \sum_{i=1}^n T_i}{n + 2}, \\ T(r_1) \approx T(r_2), \\ \text{sup}T = \frac{T(r_1) + T(r_2)}{2}, \end{cases}$$

где n – количество дискретов в интервале $(r_1; r_2)$, следовательно

$$T(r_1) + T(r_2) = \bar{T}(n + 2) - \sum_{i=1}^n T_i$$

и

$$\text{sup}T = \frac{\bar{T}(n + 2) - \sum_{i=1}^n T_i}{2}.$$

Поиск величины $\text{sup}T$ легко как алгоритмизировать и автоматизировать, так и выполнить вручную. Предположим, что в результате оценки толщина зоны прочного ЛПО составляет 2,0 м, как показано на рисунке 3. В этом случае ЛПО удовлетворяет заданным термодинамическим критериям, а дальнейшее продолжение активного замораживания и задержка проходки данного интервала глубин лишь приведут к необоснованным затратам.

В совокупности описанная выше процедура морфологического анализа не является трудозатратной и может выполняться ежедневно в процессе термометрического контроля формирования и состояния ЛПО. Изложенный подход, в числе прочего содержащий решение в терминах «зоны прочного ЛПО», позволяет адекватно оценивать состояние ЛПО в условиях асимметричного распределения температур в замораживаемом породном массиве, а значит, своевременно принимать обоснованные и экономически целесообразные технические решения при ведении горных работ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер НИОКТР 122012000396-6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семин М.А. Исследование возможностей упрощения сопряженной термогидромеханической модели искусственного замораживания пород при строительстве стволов шахт // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2021. – № 4. – С. 453-463. – DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-453-463.
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 integrita strutturale. – 2020. – V. 14, № 53. – P. 394-405. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.53.30.
3. 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.
4. 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.
5. «Frozen Wall»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2018666337 / Богомяжков А.В., Зайцев А.В., Клюкин Ю.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Пугин А.В., Семин М.А.; заявитель и правообладатель ПФИЦ УрО РАН. – 2018663501; заявл. 28.11.2018; зарегистрировано 17.12.2018; опубл. 17.12.2018. – 1 с.
6. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений / автор-сост.: С.С. Вялов и др. – М.: Из-во АН СССР, 1962. — 254 с.: ил.
7. Семин М.А., Бровка Г.П., Пугин А.В., Бублик С.А., Желнин М.С. Исследование влияния неоднородности поля температур на прочность ледопородных ограждений стволов шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 9. – С. 79-93. – DOI: 10.25018/0236-1493-2021-9-0-79.