

5. Попов М.Д. Анализ методов и подходов к моделированию интенсивных источников тепловыделения в наклонных горных выработках // Горное эхо. – 2023. – № 3 (92). – С. 128-134. – DOI: 10.7242/echo.2023.3.18.
6. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Семин М.А., Гришин Е.Л., Трушкова Н.А. Конвективная стратификация воздушных потоков по сечению горных выработок, ее роль в формировании пожарных тепловых депрессий и влияние на устойчивость проветривания // Горн. журн. – 2014. – №12. – С. 105-109.
7. Левин Л.Ю., Кормщиков Д.С., Семин М.А. Решение задачи оперативного расчета распределения продуктов горения в сети горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 12. – С. 179-184.
8. Semin M.A., Levin L.Y. Stability of air flows in mine ventilation networks // Process Safety and Environmental Protection. – 2019. – V. 124, Part B. – P. 167-171. – DOI: 10.1016/j.psep.2019.02.006.
9. Василенко В.И. Принципы, критерии, алгоритмы управления проветриванием и устойчивостью вентиляционных струй при авариях в шахте // Изв. вузов. Горн. журн. – 2010. – №. 8. – С. 42-46.
10. Костеренко В.Н. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети горных выработок угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №. 6. – С. 373-377.

УДК 622.253

DOI:10.7242/echo.2024.2.16

## ПОДГОТОВКА ЗАМОРОЖЕННОГО ПОРОДНОГО МАССИВА К ЛИКВИДАЦИИ ЗАМОРАЖИВАЮЩИХ И КОНТРОЛЬНО-ТЕРМИЧЕСКИХ СКВАЖИН

А.В. Пугин, К.М. Агеева, А.В. Богомятков, О.Д. Залазаев, С.А. Бублик  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Ликвидация замораживающих и контрольно-термических скважин производится на заключительном этапе работ по искусственному замораживанию породного массива при строительстве шахтного ствола. Работы должны производиться в размороженном массиве для чего вокруг скважин формируется зона талой породы заданного радиуса. В данной статье авторами показано, что для выполнения ликвидационных работ недостаточно лишь достижения заданных размеров зоны оттаивания породы. Установлено, что после отключения нагрева и циркуляции теплоносителя в замораживающих колонках может возникать обратная реакция, интенсивность которой определяется температурой той части ледопородного ограждения, которая осталась незамороженной и находится в непосредственной близости к замораживающим скважинам. Во избежание обратного промерзания породы необходимо выполнять математическое моделирование процесса с использованием детальной и актуализированной теплофизической модели, и разрабатывать мероприятия по поддержанию минимальных размеров зоны оттаивания с поочередным отключением колонок, либо формированию ее запаса, который позволит сохранить требуемые размеры до полного окончания работ по ликвидации всех скважин.

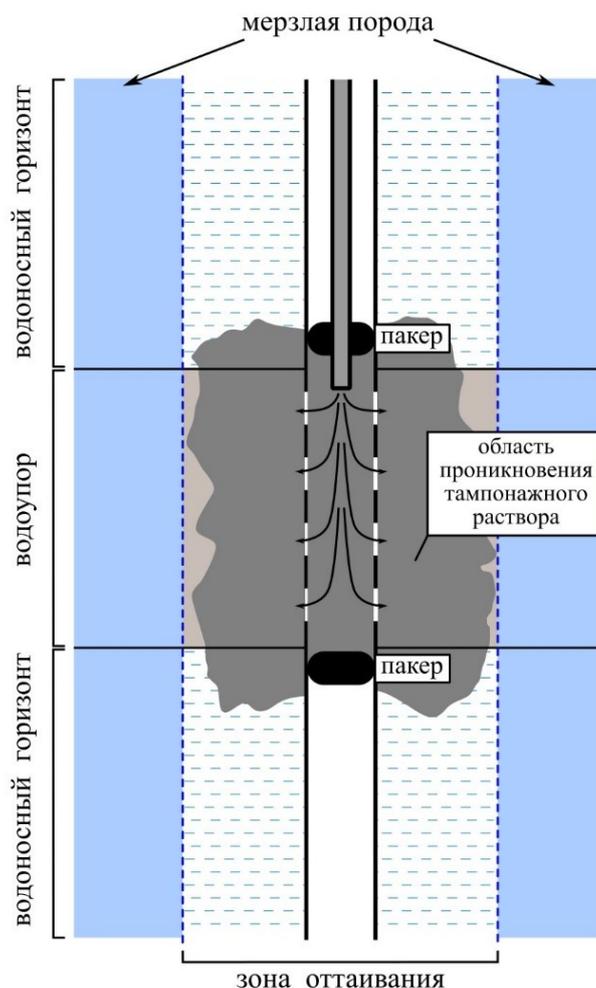
**Ключевые слова:** Искусственное замораживание, размораживание, ледопородное ограждение, ликвидация скважин, зона оттаивания.

Ликвидация замораживающих и контрольно-термических (КТ) скважин является обязательным видом работ, основной целью которых является разобщение водоносных горизонтов, разрыв их гидравлической связи и предотвращение вертикальных перетоков в предохранительном целике за крепью ствола. Данный технологический процесс редко рассматривается во взаимосвязи с искусственным замораживанием горных пород или, точнее, с размораживанием ледопородного ограждения (ЛПО), поскольку кажется наименее проблемным. Намного большее внимание уделяется непосредственно формированию и поддержанию ЛПО в процессе проходки ствола [1, 2], или его размораживанию при подготовке к гидроизоляции ствола и консолидации закрепленного массива [3].

В последнее время наблюдается тенденция к производству работ по ликвидации скважин без извлечения замораживающих и термометрических колонок. Разобщение водоносных горизонтов производится путем перфорации обсадной колонны в интервалах залегания водоупоров и инъекции через полученные технологические отверстия тампонажного раствора в массив под давлением. При этом ликвидация скважины может производиться как с полным заполнением ствола, так и поинтервально с отсечением тампонируемого участка пакерными устройствами.

В процессе формирования ЛПО замораживающие и термометрические колонки вмораживают в породный массив. И хотя затрубная цементация замораживающих и термометрических колонок при установке в скважины не производится, это гарантирует отсутствие вертикальных перетоков. При размораживании породы техногенная нарушенность массива в окрестности колонок вновь начинает определять гидравлическую проницаемость водоупора и связи между водоносными горизонтами.

Значимым условием для качественного цементного заполнения порово-трещинного пространства является формирование вокруг скважины зоны оттаивания пород требуемого радиуса. Важным является создание не только области талой породы, но имеющей определенную температуру, при которой происходит наилучшее проникновение тампонажного раствора в порово-трещинное пространство массива и его быстрое отвердевание. Схематически основные зоны в рассматриваемой области околоскважинного пространства показаны на рисунке 1.



**Рис. 1.** Схематическое представление околоскважинного пространства при выполнении ликвидационного тампонажа в интервальном исполнении

Оттаивание породы вокруг колонок производится при помощи нагрева и циркуляции в них теплоносителя (тот же хладоноситель на этапе замораживания). Нагрев осуществляется постепенно до положительной температуры порядка  $+20^{\circ}\text{C} \div +30^{\circ}\text{C}$  с последующим ее поддержанием в течение необходимого времени.

В зависимости от расположения замораживающих колонок и градиента температур между их стенками и окружающим массивом возможно несколько вариантов формирования зоны оттаивания. В случае незначительного удаления замораживающих колонок от передовой бетонной крепи (обычно 2,3-3,0 м) размораживание породы происходит быстрее, т. к. вспомогательный вклад вносят другие, протекающие параллельно технологические процессы. Интенсивное проветривание шахтного ствола нагретым воздухом и тампонаж закрепного пространства с целью консолидации и гидроизоляции массива обеспечивают дополнительные теплопритоки в околоствольное пространство.

Если при подготовке к ликвидации скважин температура мерзлой породы внутри ЛПО близка к температуре полного плавления льда в ее порах, можно считать что обеспечиваются наиболее благоприятные условия для формирования и поддержания зоны оттаивания, т. к. в этом случае градиент температур между стенкой колонки и замороженным массивом минимально возможный.

Рассмотрим рисунок 2а. Источником теплоты является постоянный подогрев и циркуляция теплоносителя в замораживающей колонке, обеспечивающие тепловой поток плотности  $\dot{q}_1$ . Тогда уравнение теплового баланса в системе «замораживающая колонка – талая зона – мерзлая зона» упрощенно (в случае мгновенно совершаемого фазового переходом, без учета внешних теплопритоков) можно записать следующим образом:

$$W = \frac{\partial H_1}{\partial t} + \frac{\partial H_2}{\partial t} + L \operatorname{sgn} w \frac{\partial w}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial H_1}{\partial t} = \nabla(\lambda_1 \nabla T_1), \quad \frac{\partial H_2}{\partial t} = \nabla(\lambda_2 \nabla T_2), \quad (2)$$

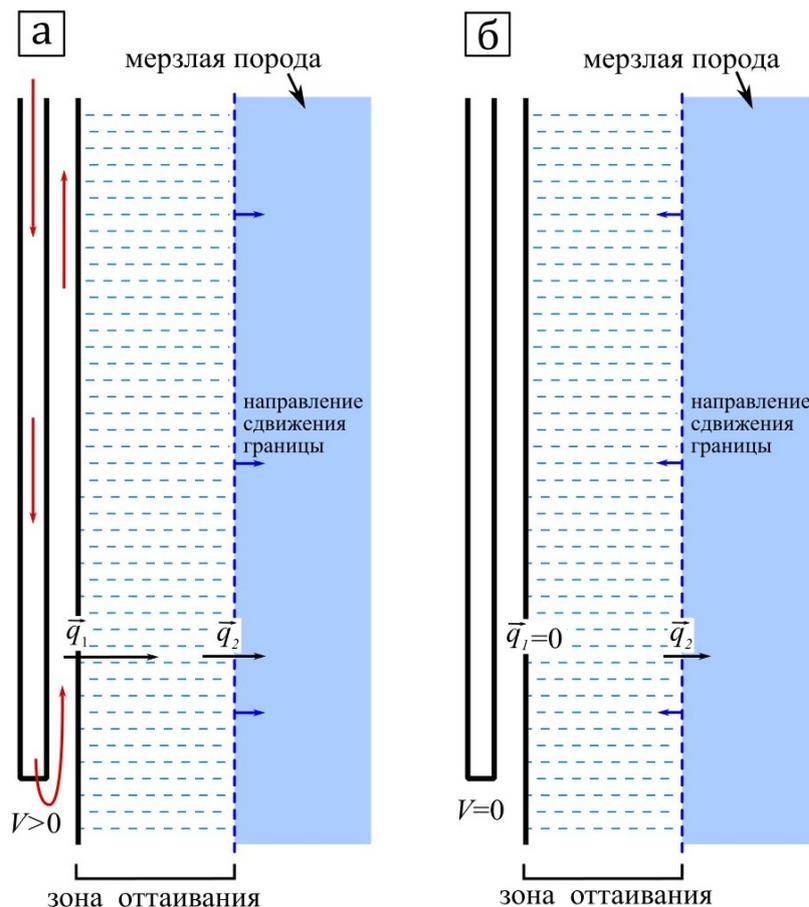
$$\operatorname{sgn} w = \begin{cases} 1, & \text{при плавлении льда,} \\ -1, & \text{при замерзании воды,} \end{cases} \quad (3)$$

где  $W$  – мощность источника теплоты, Вт;  $\frac{\partial H_1}{\partial t}$  и  $\frac{\partial H_2}{\partial t}$  – изменение теплосодержания породы в результате изменения ее температуры  $T_1$  и  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) в талой и мерзлой зонах соответственно, вне свершения фазового перехода, Дж/с;  $\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности талой и мерзлой породы, Вт/(м· $^{\circ}\text{C}$ );  $\frac{\partial w}{\partial t}$  – массовое приращение количества растаявшего льда (замороженной воды) в породе, кг/с;  $L$  – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг;  $t$  – переменная времени, с.

После отключения подогрева и циркуляции теплоносителя тепловой поток через стенку колонки быстро снизится до нуля, и уравнение (1) примет вид:

$$\frac{\partial H_1}{\partial t} = \frac{\partial H_2}{\partial t} + L \operatorname{sgn} w \frac{\partial w}{\partial t}. \quad (4)$$

Поскольку другие источники теплоты в системе отсутствуют, начнется перераспределение теплоты между талой и мерзлой зонами. В талой зоне порода вновь начнет охлаждаться, т. е. возникнет обратная реакция, тогда как в мерзлой – продолжит нагреваться с меньшей интенсивностью, поскольку разница температур породы в этих двух зонах уменьшится.



**Рис. 2.** Схематично, величина теплового потока и возможное направление сдвижения границы мерзлой породы при нагреве и циркуляции теплоносителя в замораживающей колонке (а) и после ее отключения (б)

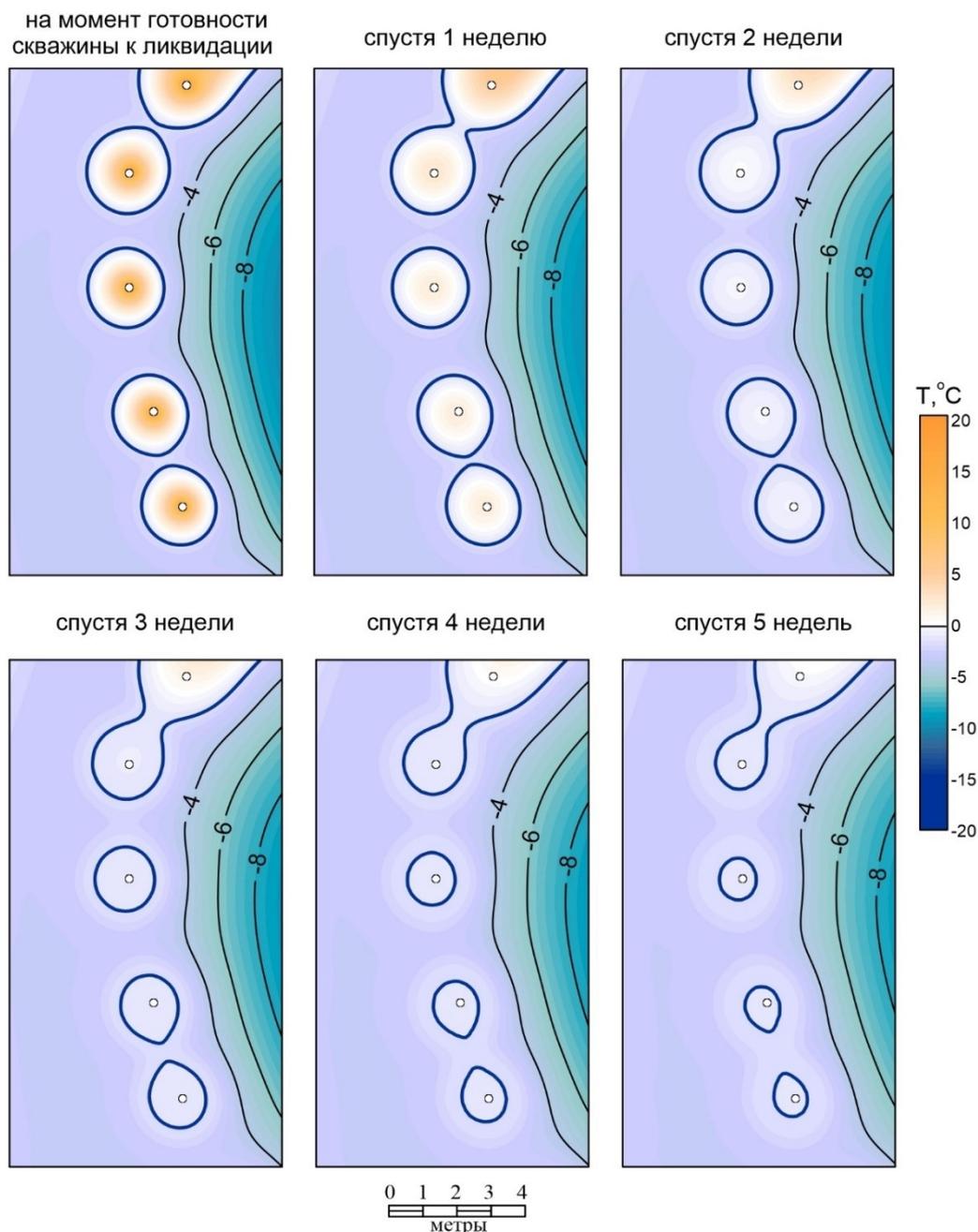
Если объем замороженной породы велик по сравнению с объемом талой зоны и температура мерзлой породы сильно отличается в меньшую сторону от температуры фазового перехода, то плавление льда прекратится и возобновится кристаллизация воды с обратным продвижением границы зоны оттаивания в направлении замораживающей колонки. Интенсивность возвратной реакции тем более, чем ниже температура породы в мерзлой зоне на момент отключения нагрева и циркуляции теплоносителя.

Рассмотрим практический пример и поставим следующую задачу: температура теплоносителя в замораживающей колонке поддерживается на уровне  $+30^{\circ}\text{C}$  в течение следующих 150 суток. Циркуляция осуществляется с расходом  $11 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Цель активного растепления – формирование зоны оттаивания вокруг всех замораживающих скважин с минимальным радиусом 1 м – критерий готовности скважины к ликвидационному тампонажу.

Начальное распределение температуры и теплофизическая модель соответствуют условиям одного из шахтных стволов рудника, строительство которого производилось с использованием искусственного замораживания горных пород. После достижения критерия готовности к тампонажу нагрев и циркуляция теплоносителя в замораживающих колонках отключались. Через короткий промежуток времени порода в зоне оттаивания начинала охлаждаться вследствие контакта с замороженной породой. Интенсифицировавшись, процесс протекал с повторным фазовым переходом. Вблизи границы мерзлой породы талая вода вновь превращалась в лед.

На рисунке 3 представлены результаты математического моделирования в программном обеспечении «FrozenWall» [4, 5, 6], используемом в процессе термометриче-

ского контроля состояния ЛПО строящегося шахтного ствола. На картах температур границы зоны оттаивания проведены по изотерме со значением температуры начала замерзания воды – полного плавления льда в поровом пространстве породы.



**Рис. 3.** Динамика изменения поля температур и границы зоны оттаивания (изолинии темно-синего цвета) в течение пяти недель с момента отключения циркуляции и нагрева теплоносителя, т.е с момента достижения критерия готовности скважин к ликвидационному тампонажу

Особенностью исследуемой области является двухрядное замораживание, где между двумя контурами замораживающих скважин образуется область аккумуляции холода (на картах температур на рисунке 5 — область слева от замораживающих колонок, температура породы в которой ниже  $-8^{\circ}\text{C}$ ). Существенное влияние оказывает увеличенное расстояние между замораживающими колонками, обуславливающее их некоторую взаимную изолированность в смысле теплового влияния. Уже спустя 3 недели ра-

диус зоны оттаивания становится меньше минимально требуемого значения в 1 м, а спустя 5 недель границы мерзлой породы почти вплотную приближаются к замораживающей скважине. Уменьшение зоны оттаивания не дает возможности качественного выполнения тампонажных работ, которые, судя по результатам математического моделирования, во всех замораживающих скважинах должны быть завершены в срок до 3-4 недель с момента прекращения нагрева и циркуляции теплоносителя. Количество замораживающих скважин, подлежащих ликвидации, обычно составляет порядка 20-40 единиц, а полная их ликвидация производится в течение нескольких месяцев в зависимости от объема работ и сложности их исполнения.

Математическое моделирование, выполняемое на этапе размораживания позволяет оценить интенсивность обратной реакции, определить оптимальную очередность ликвидации замораживающих скважин с учетом их взаимного расположения и температуры окружающего массива, рассчитать необходимый запас толщины зоны оттаивания. С позиций минимизации теплового влияния обратной реакции наиболее предпочтительным является поочередное отключение замораживающих колонок с последовательной ликвидацией. Остальные колонки, ожидающие ликвидации, в таком случае остаются в работе и обеспечивают поддержание требуемых размеров зоны оттаивания вокруг них, не допуская ее уменьшения. Такой подход полностью соответствует концепции размораживания по требованию, развивая ее на стадию растепления ЛПО [7], и обязательно найдет отражение в новой редакции регламентирующего документа [8].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения (рег. номер НИОКТР 122030100425-6, 124020500030-7).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семин М.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С. Выбор параметров и обоснование режима работы замораживающих колонок для поддержания толщины ледопородного ограждения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 5. – С. 194-205. – DOI: 10.15372/FTPPI20200522.
2. Семин М.А., Богомягков А.В., Левин Л.Ю. Определение технологических параметров систем замораживания пород из условия поддержания проектной толщины ледопородного ограждения // Горные науки и технологии. – 2021. – Т. 6, № 3. – С. 192-202. – DOI: 10.17073/2500-0632-2021-3-192-202.
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. «Frozen Wall»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2018666337 / Богомягков 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; опублик. 17.12.2018. – 1 с.
5. Левин Л.Ю., Семин М.А., Богомягков А.В., Паршаков О.С. Применение программного комплекса «Frozenwall» для расчета искусственного замораживания пород // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. – 2019. – № 4. – С. 269-282.
6. Богомягков А.В., Пугин А.В. Совершенствование математической модели тепломассопереноса в замораживаемом породном массиве, реализованной в программе FrozenWall // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 164-174. – DOI: 10.18799/24131830/2023/2/3808.
7. 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.
8. Инструкция по расчету параметров, контролю и управлению искусственным замораживанием горных пород при строительстве шахтных стволов на калийных рудниках ОАО «Беларуськалий». – Пермь; Солигорск, 2019. – 65 с.