

УДК 622.253.3

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2024

Исследование критериев надежности ледопородного ограждения при контроле и управлении искусственным замораживанием горных пород**А.В. Пугин, К.М. Агеева, С.А. Бублик**

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (Российская Федерация, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а)

Research of Reliability Criteria of Frozen Wall in Monitoring and Control of Artificial Ground Freezing**Aleksey V. Pugin, Ksenia M. Ageeva, Sergey A. Bublik**

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78a Sibirskaya st., Building A, Perm, 614007, Russian Federation)

Получена / Received: 28.03.2024. Принята / Accepted: 30.09.2024. Опубликовано / Published: 31.10.2024

Ключевые слова:

искусственное замораживание, горная порода, ледопородное ограждение, термометрический контроль, поле температур, изотерма, критерий, режим замораживания, управление.

Исследуются три термодинамических критерия надежности ледопородного ограждения (ЛПО), различным образом определяющие и сочетающие его толщину и температуру. Граничные изотермы для различных критериев определяются, исходя из 1) температуры замерзания поровой воды; 2) температуры, для которой рассчитывались толщины ЛПО по условиям прочности и ползучести, а также 3) плавающего значения температуры, определяемого исходя из обеспечения заданной средней температуры в объеме ЛПО. Рассматриваемые критерии используются в процессе термометрического мониторинга состояния ледопородного ограждения при оценке его несущей способности. Каждый из критериев детально описан, приведены связанные с ним достаточные условия надежности ледопородного ограждения и задача оптимального регулирования режима повышения температуры хладоносителя, которую возможно решить с его применением. Проведен сравнительный анализ критериев с позиций оптимального управления режимом искусственного замораживания, обеспечивающим минимально возможные энергетические затраты на поддержание ЛПО в течение его жизненного цикла при сохранении требуемой безопасности ведения горных работ. Определение «оптимального» режима работы замораживающей станции в рамках каждого критерия осуществлялось посредством серии численных расчетов теплофизической задачи в специализированном программном продукте FrozenWall. По результатам исследования к практическому применению рекомендован третий, наиболее гибкий критерий с плавающим значением температуры, определяющей граничные изотермы ЛПО из условия постоянства средней температуры в объеме замороженных пород. Для двух других критериев температуры границ ЛПО жестко фиксированы, что существенно ограничивает верхний предел повышения температуры хладоносителя в рассольной сети и приводит к меньшей энергоэффективности системы замораживания в целом. Результаты работы будут полезны специалистам в области термометрического контроля при строительстве горных выработок с применением способа искусственного замораживания горных пород.

Keywords:

artificial freezing, rock, ice wall, thermometric control, temperature field, isotherm, criterion, freezing mode, control.

Three thermodynamic criteria of frozen wall reliability are investigated, which determine and combine its thickness and temperature in different ways. Boundary isotherms for different criteria are determined based on 1) the freezing temperature of porous water; 2) the temperature for which the frozen wall thicknesses were calculated based on strength and creep conditions, and 3) a floating temperature value determined as a supremum of a zone with a given average temperature inside the frozen wall. The considered criteria are used in the process of thermal monitoring of the frozen wall statement when assessing its bearing capacity. Each criterion was described in detail, the sufficient conditions for the reliability of the frozen wall associated with it were presented, and the problem of optimal control of the coolant temperature increasing, which could be solved with its use, was presented. A comparative analysis of the criteria was carried out from the standpoint of optimal control of the artificial freezing regime, ensuring the minimum possible energy costs for the frozen wall holding during its life cycle while maintaining the required safety of mining operations. The "optimal" graph for the coolant temperature increasing within each criterion was determined by a series of numerical calculations of the thermophysical problem in the specialized software product "FrozenWall". Based on the results of the study, the third, most flexible criterion with a floating temperature value determining the boundary isotherms of the frozen wall as a supremum of a zone with a given average temperature was recommended for practical application. For the other two criteria, the temperatures of the frozen wall boundaries are rigidly fixed, which significantly limits the upper limit of the increase in the temperature of the coolant in the brine network and leads to lower energy efficiency of the freezing system as a whole. The results of the work will be useful to specialists in the field of thermal monitoring in the construction of mine workings using the method of artificial ground freezing.

© Пугин Алексей Витальевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник (тел.: +007 (950) 46 88 112, e-mail: dr.alexpugin@gmail.com). Контактное лицо для переписки.

© Агеева Ксения Михайловна – младший научный сотрудник (тел.: +007 (950) 47 94 120, e-mail: Kmageeva@gmail.com).

© Бублик Сергей Анатольевич – младший научный сотрудник (тел.: +007 (919) 49 04 709, e-mail: serega-bublik@mail.ru).

© Aleksey V. Pugin (Author ID in Scopus: 15729767700, ORCID: 0000-0002-3815-5003) – PhD in Physics and Mathematics, Researcher (tel.: +007 (950) 46 88 112, e-mail: dr.alexpugin@gmail.com). The contact person for correspondence.

© Ksenia M. Ageeva (Author ID in Scopus: 57830395100, ORCID: 0000-0003-0147-3259) – Junior Researcher (tel.: +007 (950) 47 94 120, e-mail: Kmageeva@gmail.com).

© Sergey A. Bublik (Author ID in Scopus: 57223084283, ORCID: 0000-0002-2084-0002) – Junior Researcher (tel.: +007 (919) 49 04 709, e-mail: serega-bublik@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Пугин, А.В. Исследование критериев надежности ледопородного ограждения при контроле и управлении искусственным замораживанием горных пород / А.В. Пугин, К.М. Агеева, С.А. Бублик // Недропользование. – 2024. – Т.24, №4. – С.247–259. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.4.9

Please cite this article in English as:

Pugin A.V., Ageeva K.M., Bublik S.A. Research of Reliability Criteria of Frozen Wall in Monitoring and Control of Artificial Ground Freezing. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2024, vol.24, no.4, pp.247-259. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.4.9

Введение

Проходка вертикальных шахтных стволов с предварительным искусственным замораживанием грунтов применяется в сложных гидрогеологических условиях при наличии в разрезе обводненных неустойчивых (рыхлых или слабосцементированных) пород, реже – в обводненных устойчивых породах при невозможности водоподавления другими способами. Метод искусственного замораживания является одним из наиболее эффективных при укреплении обводненных грунтов и широко применяется при строительстве стволов шахт и рудников, горизонтальных выработок, тоннелей [1–8].

Формируемое при замораживании ледопородное ограждение (ЛПО) играет роль временной крепи и призвано решать две основные задачи: 1) гидравлическую (противофильтрационную) – предотвращение фильтрации подземных вод в строящуюся выработку и 2) механическую – поддержание целостности стенок выработки до полного завершения работ по ее креплению [9–10].

Необходимые гидроизоляционные свойства ЛПО обеспечиваются путем снижения поровой и трещинной проницаемости породы до значения, не допускающего фильтрацию подземных вод при заданном гидравлическом напоре.

Требуемые механические характеристики ЛПО обеспечиваются достижением требуемой прочности породы и ее малой ползучести в течение заданного времени под воздействием внешней нагрузки в виде суммы горного и гидростатического давления.

При моделировании в процессе изучения различных аспектов поведения массива грунтов под воздействием искусственного замораживания или размораживания подавляющее большинство современных исследователей рассматривают задачу в наиболее полной термодинамической постановке [11–17].

На практике выполнять контроль решения двух задач, механической и гидравлической, при производстве работ по искусственному замораживанию напрямую затруднительно, поэтому производится косвенная оценка на основании взаимосвязи физико-механических параметров с термодинамическими, т.е. с температурой и объемом замороженной породы. Таким образом, при контроле формирования и состояния ЛПО в процессе строительства шахтного ствола термодинамические критерии выходят на первый план и служат основой для остальных критериальных оценок. Их соблюдение является приоритетным и достаточным условием для одновременного решения механической и гидравлической задач и вынесения суждения о надежности ЛПО [18].

В формализованном виде анализ термодинамического состояния ледопородного ограждения обычно сводится к сопоставлению его фактической минимальной толщины и средней температуры с требуемыми значениями, определенными для каждого слоя пород на стадии проектирования, где толщина определяется по заданному радиальному направлению от центра ствола через тело ЛПО. Термометрический метод является основным, поставляющим исходные данные для непрерывного контроля и осуществляющим обратную связь между искусственным замораживающим воздействием и реакцией среды на него.

В основе оценок толщины и температуры ЛПО, назовем их эксплуатационными характеристиками, лежит математическое (теплофизическое) моделирование, позволяющее восстановить поле температур в породном массиве с определенной точностью по данным

дискретных измерений. Конфигурация ЛПО в таком случае определяется изотермами поля температур и может быть изучена в любой плоскости, секущей объем замороженных пород [19].

Вообще механическая задача налагает более строгие требования к состоянию ЛПО нежели гидравлическая. Традиционно считается, что для предотвращения сквозной фильтрации необходимо заморозить воду в порово-трещинном пространстве породы, «запереть» ее на некотором участке массива. Тогда как для обеспечения критериев неразрушения ЛПО и малости деформаций незакрепленной стенки ствола при проходке необходимо обеспечить замораживание породы в определенном объеме до некоторой отрицательной температуры. Последнее одновременно обеспечивает и решение гидравлической задачи, т.е. (1) снижение проницаемости породы и (2) предотвращение ее разрушения при проходке с образованием сквозных трещин и вторичной проницаемости, поскольку в последнем случае проникновение подземных вод в строящуюся выработку неизбежно. Поэтому в данном исследовании соблюдение термодинамических критериев рассматривается в связи с обеспечением механических условий надежности ЛПО в процессе эксплуатации, а между собой они сопоставляются с точки зрения их применимости к решению задачи оптимального управления искусственным замораживанием в период поддержания ЛПО.

Гибкое управление режимом работы замораживающего комплекса в зависимости от процесса строительных работ и фактического развития ситуации получило название «концепции замораживания по требованию» [20, 21] или Freezing on Demand (FoD) [22, 23]. Применение данной концепции стало возможным с развитием средств автоматического мониторинга физических процессов, протекающих в массиве горных пород под техногенной нагрузкой. В ее основу легли не только новые средства автоматизации измерений, но и мощный инструмент математического моделирования с разработкой детальной теплофизической модели, учитывающей тепловое влияние всевозможных естественных и техногенных источников. В целом замораживание в концепции «по требованию» позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты на этапе формирования и поддержания ЛПО и повысить безопасность ведения горных работ под его защитой, поскольку позволяет не только заблаговременно отслеживать предвестники возможного негативного развития процесса, но и оперативно выполнять прогнозные расчеты, разрабатывать на их основе и внедрять компенсирующие мероприятия.

Технология рассольного замораживания горных пород, мониторинг состояния ЛПО и управление режимом искусственного замораживания

Технология искусственного замораживания горных пород рассольным способом в достаточной мере описана в литературе [10, 24–26]. Область породного массива, которую необходимо укрепить и сделать водонепроницаемой, «пронзают» специальными замораживающими скважинами. Каждая скважина оборудуется замораживающей колонкой, в которой циркулирует хладоноситель – водный раствор солей (рассол), не замерзающий при низких отрицательных температурах.

Замораживающие колонки объединены в замкнутую рассольную сеть с кольцевыми рассолопроводами, расположенными в замораживающей галерее вокруг устья шахтного ствола, и наземными магистральными рассолопроводами, подводящими рассол к холодильному

оборудованию. Встроенные в наземную часть рассольной сети насосы обеспечивают циркуляцию хладоносителя в рассольпроводах и замораживающих колонках, а холодильное оборудование – его постоянное охлаждение до требуемой температуры. Вместе с блоком управления они составляют единый комплекс замораживающей станции.

Управление искусственным замораживанием осуществляется через управление режимом работы замораживающего комплекса и выражается в возможности регулирования двух определяющих параметров: температуры T_c и расхода V_c хладоносителя в рассольной сети. Изменение расхода хладоносителя в меньшей степени определяет интенсивность процесса замораживания при сохранении режима течения флюида в замораживающих колонках (ламинарного или турбулентного), дает меньший экономический эффект снижения затрат на работу насосного оборудования. Кроме того, допустимые вариации расхода хладоносителя ограничены пределами, которые накладывает холодильное оборудование, требующее минимального протока хладоносителя через теплообменный аппарат.

Основное регулирование режима работы замораживающего комплекса осуществляется путем изменения температуры хладоносителя. В зависимости от возможностей холодильных машин повышение температуры может быть плавным и осуществляться путем изменения уставок или ступенчатым – путем вывода из работы холодильного блока. В любом случае именно управление температурой хладоносителя позволяет наиболее эффективно воздействовать на процесс замораживания и снижать экономические затраты. Далее в работе под управлением искусственным замораживанием будет подразумеваться именно изменение температуры хладоносителя при неизменном его расходе в рассольной сети.

Управление невозможно без наличия обратной связи об изменении термодинамических параметров массива горных пород в ответ на замораживающее воздействие [27]. Современная инженерная наука позволяет развернуть на промплощадке строящегося рудника интеллектуальную систему термометрического контроля и управления состоянием ЛПО [28], общая принципиальная схема взаимодействия элементов которой представлена на рис. 1.

На участке строительства шахтного ствола для наблюдений за температурами замораживаемого массива обустраиваются несколько контрольно-термических (КТ) скважин, обычно в количестве одной скважины на каждые 10 замораживающих колонок. Измерение температур производится при помощи оптоволоконного кабеля, опущенного в термометрические колонки КТ скважин, заполненные теплопроводящей жидкостью, чаще всего в качестве которой выступает хладоноситель, циркулирующий в замораживающих колонках.

Данные с КТ скважин поступают в обработку на информационно-аналитический сервер, где производятся все необходимые вычисления, на основании которых разрабатываются рекомендации по поддержанию либо изменению текущего режима работы замораживающей станции с последующим контролем отклика среды на прилагаемое воздействие.

Процедура расчета параметров ЛПО в процессе термометрического контроля

Чтобы понять, насколько каждый из описанных ниже критериев удобен в практическом применении, следует вначале описать процедуру расчета параметров ЛПО



Рис. 1. Принципиальная схема системы термометрического контроля и управления искусственным замораживанием горных пород на участке строительства ствола

при термометрическом контроле искусственного замораживания. Процесс базируется на математическом моделировании, для чего разрабатывается детальная теплофизическая модель среды, способная учесть все влияющие тепловые факторы естественного и техногенного генезиса [29, 30].

Моделирование производится с применением численных методов расчета в программном комплексе FrozenWall [31]. Вследствие значительной трудоемкости и ограничений по времени, налагаемых прикладным характером задачи (отчеты о состоянии ЛПО необходимо формировать ежедневно), восстановление поля температур в массиве горных пород, окружающем будущий шахтный ствол, обычно производится в двумерной постановке, то есть в горизонтальной плоскости Ox . Геологический разрез представляется в виде системы укрупненных горизонтальных слоев мощностью более 5 м, при этом расчетная отметка глубины относится к середине каждого слоя.

При помощи математического моделирования с использованием разработанной теплофизической модели в каждом слое горных пород восстанавливается поле температур на заданный момент времени и представляется в виде карты изотерм (рис. 2).

Минимальная толщина ЛПО определяется как минимальное расстояние между изотермами с заданным значением температуры, пролегающими внутри и снаружи от контура замораживающих колонок [18, 32]. Расчет автоматизирован при помощи специального алгоритма, как и процедура определения средней температуры ЛПО по заданному профилю, например, по профилю ОА, как показано на рис. 2.

Три термодинамических критерия надежности ЛПО

Прежде чем перейти непосредственно к критериям надежности ЛПО, рассмотрим отличие теоретической постановки задачи статического расчета его толщины от реальной ситуации, наблюдаемой в процессе искусственного замораживания. Рассмотрим взаимное расположение центра строящегося шахтного ствола, заданного в точке O , и замораживающих колонок, расположенных в точках A и B , в проекции на земную поверхность (вид сверху) и определим необходимые названия вертикальных секущих плоскостей (рис. 3). Плоскость, проходящую по линии AB через две соседние замораживающие колонки, принято называть осевой; по линии OB , т.е. через центр ствола и любую

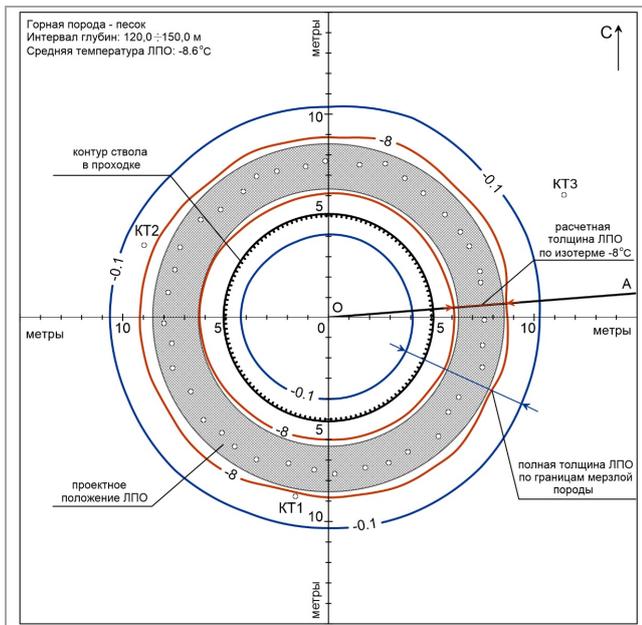


Рис. 2. Основные элементы ЛПО на карте изотерм

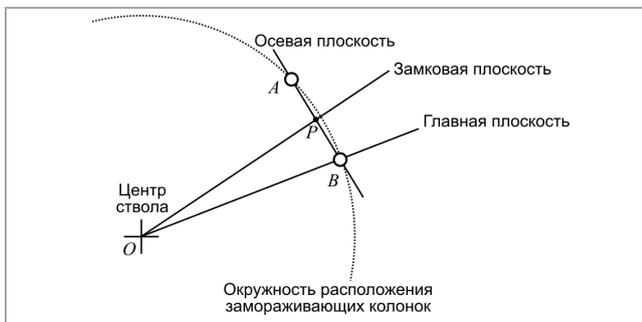


Рис. 3. Схематичное расположение замораживающих колонок относительно центра ствола в проекции на земную поверхность с обозначением проекций секущих плоскостей

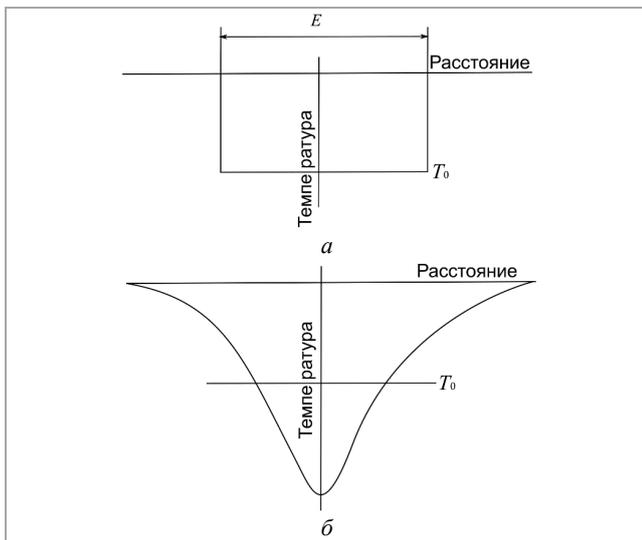


Рис. 4. Распределение температуры породы в замковой плоскости: идеализированное теоретическое (а) и реальное гладкое (б)

замораживающую колонку, – главной; по линии OP через центр ствола и середину отрезка AB – замковой [10].

Примем случай, когда все замораживающие колонки работают в нормальном режиме, т.е. отсутствуют выключенные из работы колонки или не обеспечивающие по какой-либо причине нормальный

тепловой поток, например, если расход хладоносителя в колонке существенно снижен относительно остальных. Физико-механические и теплофизические свойства среды изотропны, а сама среда – однородна. В таком случае ЛПО будет иметь наименьшую толщину в замковой плоскости. Здесь и далее направление OP будет приниматься как обеспечивающее минимальную толщину ЛПО. Именно для данной плоскости будут сделаны основные выводы.

На рис. 4 схематически проиллюстрировано распределение температур по радиальному профилю от центра ствола в замковой плоскости в двух вариантах, соответствующих (см. рис. 4, а) математической постановке задачи статического расчета ЛПО на прочность и ползучесть, и (см. рис. 4, б) реальной ситуации. Вертикальная ось проходит через точку P , где в случае (см. рис. 4, б) расположен минимум неравномерного распределения температур. В случае математической постановки распределение температур внутри ЛПО принимается равномерным с некоторой заданной температурой прочной породы T_0 и ее скачкообразным изменением при переходе к незамороженной породе. К данной границе и прилагается внешняя нагрузка. Формулы статического расчета толщины ЛПО, например, формулы Ляме, Домке [33, 34], Вялова [9], не учитывающие неравномерный характер распределения температур внутри него, выведены для математической постановки по типу, указанному на рис. 4, а [35].

В настоящее время сделаны попытки приблизить имеющиеся формулы статического расчета к реальности [36], учесть неравномерное распределение температур в замораживаемом массиве пород [37, 38]. Однако последнее требует детальных сведений о взаимосвязи прочностных и деформационных характеристик мерзлой породы с температурой. С практической точки зрения это означает выполнение лабораторных испытаний керна на прочность и ползучесть для каждой литологической разности в интервале замораживания на участке строительства шахтного ствола. Причем испытания каждого образца мерзлой породы должны выполняться при серии значений отрицательной температуры.

Подобные исследования весьма ресурсозатратны и потому крайне редко выполняются на предпроектной стадии изысканий. Обычно все лабораторные испытания пород производятся при одном единственном значении отрицательной температуры, подбираемом эмпирически – оно должно: а) быть ниже температуры заморзания воды во всех присутствующих литологических разностях; б) обеспечивать большой процент заморзания воды в порых, но при этом в) не быть слишком низким.

Поскольку механические (прочностные и деформационные) характеристики мерзлой горной породы имеют прямую связь с ее температурой [39–41], неравномерность распределения температур в случае (б) влечет за собой неравномерность распределения механических параметров внутри ЛПО [42]. В этом случае отсутствует резкий контакт прочной мерзлой породы с температурой T_0 и незамороженной части массива, как в случае (а). Следует отметить, что температура мерзлой породы T_0 в практических расчетах соответствует температуре, при которой проводятся лабораторные геомеханические испытания мерзлых грунтов с определением их прочностных и деформационных характеристик.

В распределении температур по типу (б) часть мерзлой породы, примыкающая к незамороженному массиву, будет иметь температуру выше T_0 , другая

часть, примыкающая к замораживающим колонкам – ниже T_0 . Соответственно механические характеристики породы, слагающей эти части ЛПО, будут ниже и выше аналогичных величин, определенных в испытаниях для температуры T_0 .

Вследствие различий теоретической и практической постановок задачи возникает неопределенность в выборе практических критериев оценивания надежности ЛПО в термометрическом методе контроля его состояния. Допустим, лабораторные испытания грунтов были проведены для образцов керна с температурой T_0 , а расчетное значение минимально требуемой толщины E_0 по критериям прочности и ползучести рассчитано на основе характеристик, полученных в результате этих испытаний. Обозначим T_0 как температуру прочной мерзлой породы. Величины T_0 и E_0 выступают в качестве расчетных критериев надежности ЛПО, соблюдение которых обеспечивает его неразрушение под воздействием внешней нагрузки и допустимую величину деформации породной стенки ствола до момента ее крепления.

Возможны три сочетания параметров толщины E и температуры T , которые могут быть использованы в качестве критериев при определении надежности ЛПО:

1) толщина ЛПО E определяется по температуре начала замерзания воды в породе (назовем это температурной границей мерзлой породы), при этом его средняя температура \bar{T} в замковой плоскости должна соответствовать температуре прочной породы T_0 , т.е. условию $\bar{T} \leq T_0$;

2) толщина ЛПО E определяется по минимальному расстоянию между изотермами с температурой прочной породы T_0 , средняя температура ЛПО T в этом случае не отслеживается.

3) внутри ЛПО специальным образом выделяется зона, имеющая среднюю температуру породы $\bar{T} \leq T_0$, тогда толщина ЛПО E определяется по границам данной зоны.

Рассмотрим каждый из критериев в отдельности с позиций удобства их использования при управлении режимом замораживания.

Критерий 1

На практике отсутствует ступенчатое распределение температур с резкостными границами (рис. 5, а), свойственное математической постановке задачи статического расчета ЛПО на прочность и ползучесть. При определении границ ЛПО по температуре начала замерзания воды в ее порах внутри ограждения можно выделить две зоны: <1> – мерзлая порода здесь имеет температуру выше требуемого среднего значения, равного температуре прочной породы T_0 , а значит, имеет относительно него дефицит прочности и большую ползучесть; <2> – мерзлая порода здесь имеет температуру ниже требуемого среднего значения, а значит, имеет запас по прочностным и деформационным характеристикам.

Эквивалентны ли постановки, представленные на рис. 5, с точки зрения напряженно-деформированного состояния замороженного породного массива? Очевидно, нет. Какова степень их несоответствия, в частности, было указано в работе [42]. Не заостряя внимание на геомеханическом аспекте критерия 1, рассмотрим целесообразность его применения с позиций управления режимом искусственного замораживания горных пород.

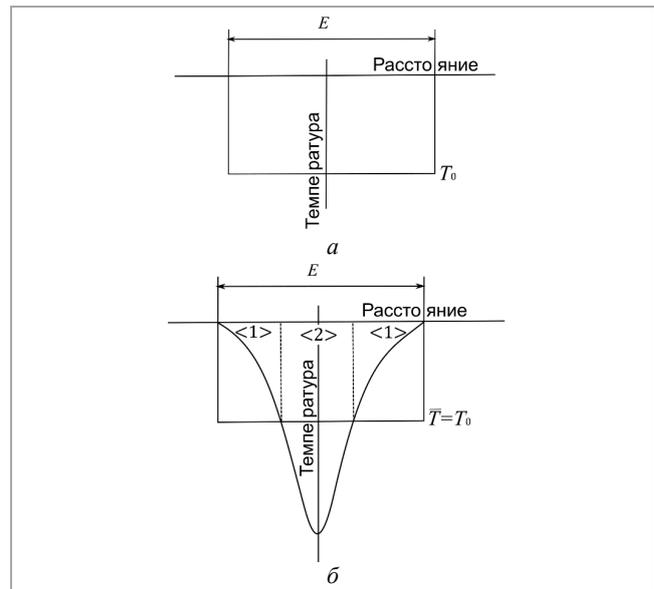


Рис. 5. Определение степени надежности ЛПО в идеализированной теоретической постановке (а) и на практике с применением критерия 1 (б)

Пусть A – состояние надежности ЛПО, иначе – если A соблюдается, то ЛПО полностью отвечает условиям безопасной проходки. Запишем достаточное условие для истинности утверждения A с позиций критерия 1:

$$\begin{aligned} B &:= (E \geq E_0), \\ C &:= (\bar{T} \leq T_0), \\ B \wedge C &\Rightarrow A. \end{aligned} \quad (1)$$

С позиции математической логики импликация не эквивалентная, поскольку существуют и другие состояния A по толщине ЛПО и температуре мерзлой породы, отвечающие условиям безопасной проходки.

Допустим, что в некоторый момент времени t_0 состояние ЛПО стало минимально удовлетворять критерию 1, т.е. толщина ЛПО E по границам мерзлой породы достигла минимально требуемого значения E_0 , и при этом его средняя температура \bar{T} в замковой плоскости равна температуре прочной породы T_0 . Данный факт является основанием для перевода замораживающего комплекса в менее энергозатратный режим пассивного замораживания.

Нахождение оптимального графика повышения температуры хладоносителя $T_c = T_c(t)$ в замораживающих колонках при решении задачи оптимизации должно обеспечивать одновременно сохранение надежности ЛПО по критерию 1 и предотвращение экспансии его границ, то есть поддерживать минимально допустимое состояние ЛПО в рамках критерия 1, что математически можно записать как:

$$T_c = T_c(t): A_t(E, T) \rightarrow \min_{t > t_0} B_t \wedge \max_{t > t_0} C_t. \quad (2)$$

В привязке к задаче оптимизации режима замораживания рассмотрим задачу определения границ ЛПО в проекции на декартовую плоскость Oxy (вид сверху), считая их положение неизменным по вертикальной координате z . Пусть S_{in} и S_{out} есть проекции внутренней и внешней границ ЛПО на указанную плоскость, определяемые по температуре начала замерзания воды в породе, а точки $M \in S_{in}$

и $N \in S_{out}$ расположены таким образом, что $d(M, N) = \min_{Oxy} d(S_{in}, S_{out})$, где $d(M, N)$ – евклидово расстояние в замковой плоскости по направлению MN наименьшей толщины.

Положим, в момент времени t_0 $d(M, N) = E$, но при неизменной температуре хладоносителя T_c в момент времени $t_0 + dt$ расстояние $d(M, N) = E + dE$, что нарушает условие нераспространения границ ЛПО во вне. Напомним, избыточный рост ЛПО приводит к непродуктивным затратам энергии.

В первом приближении распределение температур внутри ЛПО в замковой плоскости можно представить в виде направленного вниз треугольника, т.е. функции вида $T = a|r - b| - T_l$ (рис. 6), где a – коэффициент, определяющий угол наклона; r – расстояние до расчетной точки от центра ствола; b – расстояние от центра ствола до точки пересечения замковой и осевой плоскостей; T_l – температура начала кристаллизации воды в породе.

В таком случае средняя температура породы внутри ЛПО будет определяться интегральным выражением $\bar{T} = \frac{1}{E_\tau} \int_{r_M}^{r_N} T dr$, в котором величина интеграла с учетом знака может быть определена через площадь треугольника, ограниченного указанной функцией,

т.е. $\int_{r_M}^{r_N} T dr = \frac{1}{2} E_\tau (T_p - T_l)$, где E_τ – толщина ЛПО по границам мерзлой породы в момент времени τ ; r_M и r_N – расстояния до внутренней и внешней границ ЛПО от центра ствола в замковой плоскости; T_p – минимальная температура породы в замковой плоскости в заданных пределах, которая обычно наблюдается в точке P пересечения замковой и осевой плоскостей или ее окрестности (см. рис. 3). Объединяя оба выражения, получаем, что средняя температура мерзлой породы $\bar{T} = \frac{1}{2} (T_p - T_l)$ в замковой плоскости определяется не размерами ЛПО, а минимальной температурой породы T_p при фиксированном значении T_l .

Поддержание минимальной температуры мерзлой породы в точке P или ее окрестности после достижения минимально требуемой толщины ЛПО E напрямую зависит от поддержания некоторой температуры породы T_{min} в примыкании к замораживающим колонкам, которая, в свою очередь, входит в уравнение теплопередачи для замораживающей колонки:

$$\Delta Q_f = \frac{T_{min} - T_c}{R}, \quad (3)$$

где ΔQ_f – тепловой поток через стенку единичной замораживающей колонки, Дж/с; R – термическое сопротивление замораживающей колонки.

Зная это, попробуем в момент времени t_0 повысить температуру T_c таким образом, чтобы в момент времени $t_0 + dt$ сохранить $d(M, N) = E$. В результате реакции среды неизбежно получим $\bar{T} > T_0$, что нарушает условие C в рамках критерия 1, а значит, при соблюдении условия B выводит состояние надежности ЛПО A за рамки допустимого.

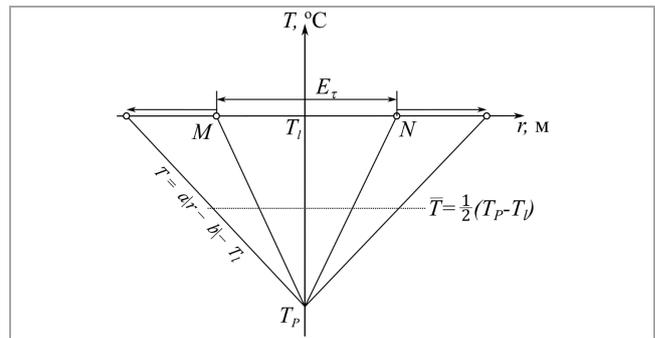


Рис. 6. Упрощенное представление поля температур в замковой плоскости

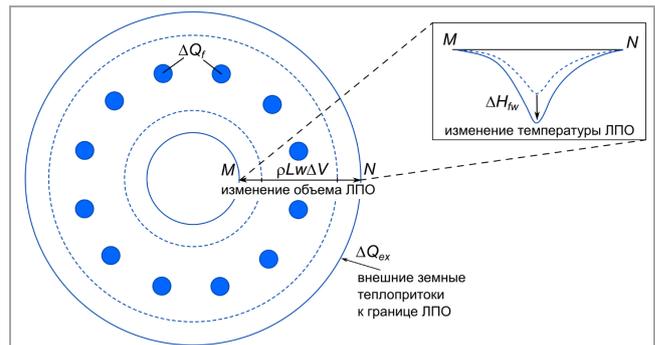


Рис. 7. Схематическое представление элементов уравнения теплового баланса

Возникает закономерный вопрос: если необходимо, например, поддерживать среднюю температуру ЛПО $\bar{T} = -8$ °C в замковой плоскости, то для этого необходимо удерживать минимальную температуру породы $T_{min} = -16$ °C, при этом фактические размеры ЛПО не определяют возможности управления режимом замораживания? Данное утверждение неверно.

На внешнюю границу ЛПО воздействуют земные теплопритоки, а поскольку его толщина постоянно увеличивается, градиент температуры вблизи границы фазового перехода уменьшается, снижается величина земных теплопритоков к замораживающим колонкам [43]. Рассмотрим уравнение теплового баланса системы «замораживающие колонки – породный массив» (рис. 7):

$$\Delta Q_{\Sigma f} = \Delta Q_{ex} + \Delta H_{fw} + \rho L w \Delta V, \quad (4)$$

где $\Delta Q_{\Sigma f} = n \Delta Q_f$ – суммарный тепловой поток, обеспечиваемый замораживающими колонками в количестве n единиц, Вт; ΔQ_{ex} – величина земных теплопритоков, Вт; ΔH_{fw} – изменение теплосодержания породы внутри ЛПО в результате изменения ее температуры, без свершения фазового перехода, Вт; ρ – плотность породы, кг/м³; L – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; w – весовое количество воды в породе, способной к замерзанию в используемом диапазоне температур, кг/кг; ΔV – изменение объема ЛПО, м³.

Таким образом, первое слагаемое в правой части уравнения (4) отвечает за внешние земные теплопритоки к границе ЛПО, второе – за изменение температуры мерзлой породы внутри ЛПО без изменения его объема; третье – за изменение объема ЛПО.

Предположим, что последние два слагаемых в правой части уравнения (4) возможно обнулить физически, т.е. после достижения требуемых параметров ЛПО режим работы замораживающей станции отрегулирован так, что ледопородное ограждение более не увеличивается в размерах, а температура породы внутри него не изменяется. Тогда суммарный тепловой поток к замораживающим колонкам должен быть отрегулирован таким образом, чтобы полностью компенсировать только внешние земные теплопритоки:

$$\frac{T_{\min} - T_c}{R} = \frac{1}{n} \Delta Q_{ex}. \quad (5)$$

При условии, что температура T_{\min} , линейно связанная с T_p , должна оставаться неизменной, чтобы поддерживать неизменную величину средней температуры \bar{T} , температура хладоносителя в замораживающих колонках T_c должна быть повышена до значения:

$$T_c = T_{\min} - \frac{R}{n} \Delta Q_{ex}, \quad (6)$$

после которого ее дальнейшее повышение невозможно.

В таком идеальном случае предельное значение температуры T_c , определяемое уравнением (6), будет достаточно высоким. На практике соблюдение минимального условия $C := (\bar{T} = T_0)$ требует достаточно низкой величины \bar{T} и соответствующих ей T_p , T_{\min} и T_c . Величина теплового потока, который обеспечивают замораживающие колонки, превышает величину внешних теплопритоков, и разница затрачивается на дальнейший рост ЛПО и понижение его температуры. Свести к нулю последние два слагаемых в уравнении (4) практически невозможно при одновременном сохранении несущей способности ЛПО по критерию 1.

Учитывая вышесказанное, повышение температуры хладоносителя T_c осуществимо при одновременном продвижении границ ЛПО вовне. Теоретически на шаге времени $t_0 + dt$ при $d(M, N) = E + dE$ возможно скорректировать температуру $T_c + \delta T$ так, чтобы сохранилось условие $\max_{t > t_0} C_t := (\bar{T} = T_0)$, но условие $\min_{t > t_0} B_t := (E = E_0)$ невыполнимо. Задачу повышения температуры хладоносителя в рамках критерия 1 с точки зрения предельно допустимого снижения непродуктивных энергетических издержек возможно оптимизировать только по условию С:

$$T_c = T_c(t): A_t(E, T) \rightarrow B_t \wedge \max_{t > t_0} C_t. \quad (7)$$

Задача решается только по условию поддержания средней температуры мерзлой породы. Сдерживание роста ЛПО, как и снижение связанного с ним перерасхода энергии, остается невыполнимым.

Критерий 2

Вновь рассмотрим задачу определения границ ЛПО в проекции на декартовую плоскость Oxy (вид сверху), считая их положение неизменным по вертикальной

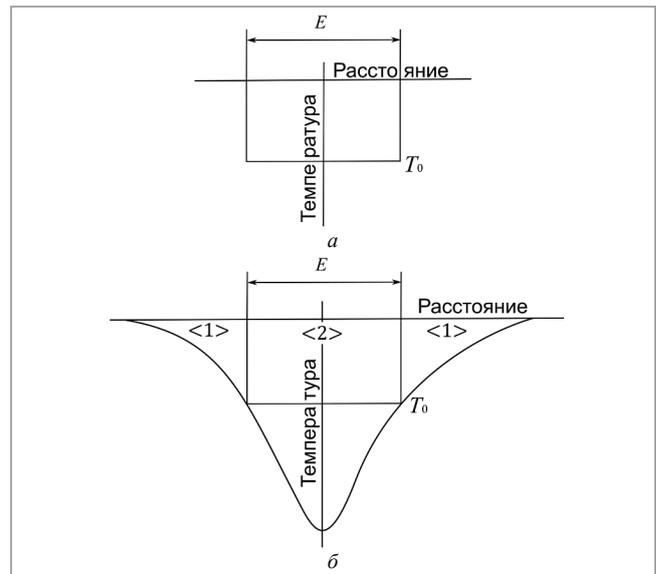


Рис. 8. Определение степени надежности ЛПО в идеализированной теоретической постановке (а) и на практике с применением критерия 2 (б)

координате z . Пусть S_{in} и S_{out} есть проекции внутренней и внешней границ ЛПО на указанную плоскость, определяемые по изотермам со значением температуры, равным температуре прочной мерзлой породы T_0 , а точки $M \in S_{in}$ и $N \in S_{out}$ расположены таким образом, что $d(M, N) = \min_{Oxy} d(S_{in}, S_{out})$, где $d(M, N)$ – евклидово расстояние в замковой плоскости по направлению MN наименьшей толщины.

При определении границ ЛПО по изотерме с температурой прочной мерзлой породы T_0 так же, как и в случае критерия 1, внутри ЛПО можно выделить две зоны: <1> – мерзлая порода здесь имеет температуру выше требуемого значения T_0 , а значит, имеет относительно него дефицит прочности и большую ползучесть; <2> – мерзлая порода здесь имеет температуру ниже требуемого значения T_0 , а значит, имеет запас по прочностным и деформационным характеристикам. Назовем зону <1> «буферной», а <2> – «зоной прочного ЛПО». Границы между зонами условные и определяются лишь изотермой с некоторым значением температуры.

В постановке задачи для критерия 2 внешняя нагрузка не прилагается непосредственно к границам ЛПО. Ее воспринимает «буферная зона», сложенная замороженной, но «более податливой» породой, и, демпфируя, передает далее к границам «зоны прочного ЛПО».

В соответствии с условиями критерия 2 за фактическую толщину ЛПО E , сопоставляемую с минимально требуемым значением E_0 , принимается расстояние $d(M, N)$, а средняя температура мерзлой породы не контролируется, поскольку в данной постановке между точками M и N , в зоне <2> априори существует толща мерзлой породы со средней температурой $\bar{T} < T_0$ (рис. 8), что является гарантией надежности ЛПО. Математически критерий 2 записывается просто:

$$\begin{aligned} B &:= (E \geq E_0), \\ C &:= (T|_r = T_0), \\ B \wedge C &\Rightarrow A, \end{aligned} \quad (8)$$

где Γ – границы ЛПО по изотермам со значением температуры T_0 .

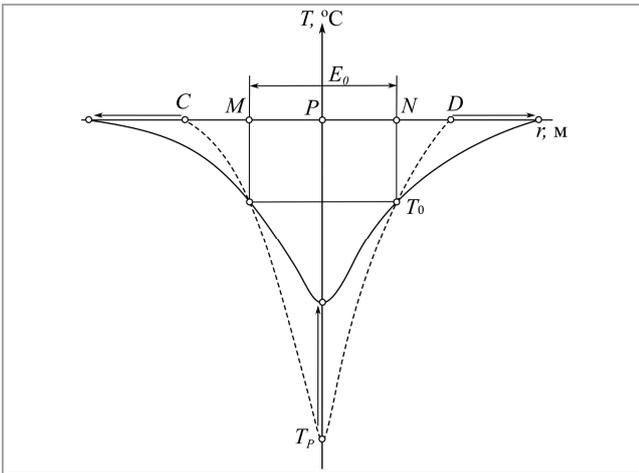


Рис. 9. Сохранение толщины ЛПО по критерию 2 при повышении температуры хладоносителя и последующего за ним изменения температуры породы

С позиций управления режимом замораживания задача оптимального повышения температуры хладоносителя $T_c = T_c(t)$ после достижения минимально требуемой толщины ЛПО E_0 достаточно понятна и относительно легко реализуема:

$$T_c = T_c(t): A_t(E, T) \rightarrow \min_{t > t_0} B_t \wedge C_t. \quad (9)$$

Зафиксировав положение изотерм с температурой T_0 в точках M и N , необходимо подобрать такой режим повышения температуры $T_c = T_c(t)$, чтобы их положение было неизменно (рис. 9). При этом по границам мерзлой породы ЛПО продолжает увеличиваться в размерах, как и в случае критерия 1. Точки C и D смещаются. Температура мерзлой породы в точке P повышается вместе с температурой хладоносителя. Средняя температура всего ЛПО \bar{T} , т.е. между точками C и D , как указано выше, при использовании данного критерия не контролируется и с определенного момента времени может быть выше T_0 .

Опять же возможности повышения температуры хладоносителя T_c определяются тепловым балансом в системе «замораживающие колонки – породный массив» и тем количеством земных теплопритоков, которое достигает замораживающих колонок в зависимости от роста толщины ЛПО. Следует отметить, что здесь также не ставится задача полной остановки экспансии границ ЛПО (имеются в виду границы мерзлой породы по температуре начала замерзания воды) как физически невыполнимая. Косвенно экспансия ЛПО в рамках критерия 2 минимизируется фиксацией его фиктивных границ по изотермам с температурой T_0 .

Критерий 2 поднимает предел повышения температуры хладоносителя, определенный критерием 1, поскольку средняя температура всего ЛПО \bar{T} по направлению минимальной толщины на большем временном интервале выше T_0 и средней температуры породы в зоне $<2>$. Соответственно температуры T_p , T_{\min} и T_c также будут выше, чем при использовании критерия 1. Управление режимом замораживания по критерию 2 легко алгоритмизируется, как показывают авторы работы [44], при этом надежность ЛПО сохраняется.

Критерий 3

Данный критерий является наиболее неоднозначным из трех и несколько сложнее в применении. Внутри ЛПО выделяется «зона прочного ЛПО» со средней температурой породы $T = T_0$. Контроль фактической толщины ЛПО E производится по границам этой зоны, которые в физическом отношении являются условными, поскольку выражены не изменением физического состояния вещества (например, фазовым переходом), а только некоторым значением температуры породы. Критерий основан на допущении, что если внутри ЛПО имеется зона мерзлой породы, имеющей среднюю температуру не менее T_0 , то эта зона отвечает требуемым критериям статического расчета ЛПО на прочность и ползучесть. Аналогично критерию 2 внешняя нагрузка прилагается к границам зоны опосредованно, через «буферную» толщину замороженной породы с более высокой температурой, а на границах самой зоны ее величина снижена [18] (рис. 10).

Существует определенный произвол в нахождении границ «зоны прочного ЛПО», допускающий несколько вариантов. Пусть точки M и N , как и ранее, определяют эти границы в замковой плоскости. В первом варианте их положение можно найти из условия симметрии относительно точки P , то есть на равном расстоянии $d(M, P) = d(P, N)$ от нее в обе стороны, в сторону ствола и от него. Но так как само ЛПО обладает известной асимметрией относительно окружности замораживающих колонок, температуры на границах зоны не будут равны, т.е. $T_M \neq T_N$ (см. рис. 10, а).

Возможен второй вариант, когда внутренняя и внешняя границы «зоны прочного ЛПО» определяются по изотермам с равным значением температуры внутри (в направлении ствола) T_M и снаружи T_N от окружности замораживающих колонок на профиль:

$$\begin{cases} \bar{T} = \int_M^N T dr, \\ \sup T_{hsz} = T_M = T_N, \end{cases} \quad (10)$$

где $\sup T_{hsz}$ – суть верхняя температурная граница зоны прочного ЛПО (hsz – сокр. от *high strength zone*), \bar{T} – необходимая средняя температура породы (см. рис. 10, б).

Второй вариант критерия 3 подобен критерию 2 с той разницей, что толщина ЛПО E определяется не по изотермам с фиксированной температурой T_0 , а с «плавающей» $\sup T_{hsz}$. Пусть в первом приближении распределение температур внутри ЛПО в замковой плоскости соответствует направленному вниз треугольнику (рис. 11). Тогда средняя температура породы в «зоне прочного ЛПО» будет определяться

интегральным выражением $\bar{T} = \frac{1}{E} \int_{r_M}^{r_N} T dr$, в котором величина интеграла с учетом знака может быть определена через соответствующие площади прямоугольника и треугольника, обозначенные заливкой серого цвета, как

$$\int_{r_M}^{r_N} T dr = E_\tau (T_M - T_l) + \frac{1}{2} E_\tau (T_p - T_M - T_l),$$

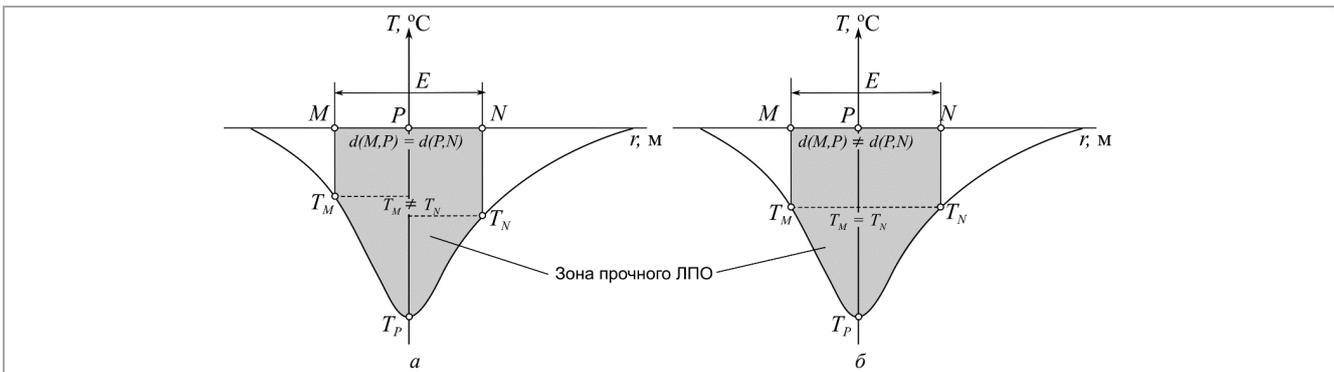


Рис. 10. Определение границ «зоны прочного ЛПО» для критерия 3 из условия равенства расстояний (а) и температур (б)

где E_t – толщина ЛПО по границам мерзлой породы в момент времени t ; r_M и r_N – расстояния до внутренней и внешней границ «зоны прочного ЛПО» от центра ствола в замковой плоскости; T_p – минимальная температура породы в замковой плоскости в заданных пределах, которая обычно наблюдается в точке P пересечения замковой и осевой плоскостей или ее окрестности (см. рис. 3). Объединяя оба выражения, получаем, что средняя температура «зоны прочного ЛПО» в замковой плоскости равна $\bar{T}_z = \frac{1}{2}(T_p + T_M) - T_l$. Отсюда $\sup T_{hsz} = 2\bar{T}_z - T_p + T_l$. Принимая условие $\bar{T}_z = T_0$, получаем $\sup T_{hsz} = 2T_0 - T_p + T_l$.

В случае, когда $T_p \leq 2T_0$, «зона прочного ЛПО» определяется по границам мерзлой породы, и критерий 3 соответствует критерию 1. В остальных случаях при управлении режимом работы замораживающего комплекса верхний предел температуры T_p теоретически может располагаться в промежутке $T_0 < T_p < 2T_0$ и зависит от полной толщины ЛПО. В целом для утверждения о надежности ЛПО по критерию 3 требуется всего лишь показать, что внутри него имеется зона со средней температурой $\bar{T}_z = T_0$, имеющая размеры $E \geq E_0$.

Математически критерий 3 записывается в виде выражения

$$\begin{aligned} B &:= (E \geq E_0), \\ C &:= (\bar{T}_{hsz} = T_0), \\ B \wedge C &\Rightarrow A. \end{aligned} \quad (11)$$

С позиций управления режимом замораживания задача оптимального повышения температуры хладоносителя $T_c = T_c(t)$ после достижения минимально требуемой толщины ЛПО E_0 по критерию 3 запишется аналогично выражению (9) для критерия 2:

$$T_c = T_c(t): A_t(E) \rightarrow \min_{t > t_0} B_t \wedge C_t. \quad (12)$$

Критерий 3 поднимает предел повышения температуры хладоносителя, определенный критериями 1 и 2, поскольку средняя температура всего ЛПО T по направлению минимальной толщины на большом временном интервале выше средней температуры породы T_{hsz} в «зоне прочного ЛПО», а величина $\sup T_{hsz} > T_0$. Соответственно температуры T_p , T_{min} и T_c также будут выше, чем при использовании критериев 1 и 2. Как для

предыдущих критериев, управление режимом работы замораживающей станции по критерию 3 не позволяет полностью остановить экспансию границ мерзлой породы, но лишь сдерживает ее скорость в определенных пределах.

Сравнительный анализ применимости критериев на модельном примере

Как показано выше, постановки задач, отвечающие каждому из критериев, в различной степени отличаются от математической (для которой выведены основные формулы статического расчета на прочность и ползучесть) по распределению температур и определению границ ЛПО. Поэтому, собственно, оценки надежности ЛПО по каждому из критериев имеют различную степень запаса. В критериях 2 и 3 она связана с «буферной зоной» мерзлой породы, имеющей температуру выше минимально требуемого значения, которая создает запас толщины, воспринимает внешнюю нагрузку и, «демпфируя», передает ее далее к «условным» границам ЛПО. Порода в «зоне прочного ЛПО» имеет температуру ниже T_0 , что также создает запас.

В критерии 1 запас надежности связан с тем, что толщина ЛПО по границам мерзлой породы после достижения минимально требуемого значения неизбежно продолжает нарастать на всем протяжении искусственного замораживания, иначе – в течение всего периода, пока поддерживается требуемая средняя температура ЛПО. При этом запас прочности и сопротивления ползучести относительно заранее определенной минимально требуемой величины подразумевается, исходя из однородности и изотропности физико-механических и теплофизических свойств массива. Локальные неоднородности в породном массиве (включения, трещины, каверны и пр.) могут снижать прочностные, деформационные и противополимерные свойства ЛПО, но их рассмотрение находится за рамками данной работы.

Определим наиболее рациональный график повышения температуры хладоносителя согласно каждому из критериев и продемонстрируем расчеты на модельном примере. Зададим слой горной породы – песка, – обладающий характеристиками согласно приведенной ниже таблице.

Задачу искусственного замораживания решим в двумерной постановке в плоскости Oxy в программном обеспечении FrozenWall [31]. Секторальный фрагмент расчетной области с нанесенными узлами сети и положением замораживающих колонок приведен на рис. 12. Расчеты в ПО FrozenWall производятся методом конечных разностей, а сама задача решается в энталпийной постановке. Используется адаптивная радиальная сетка со сгущением в области границ

Параметры теплофизической модели

№ п/п	Параметр	Символьное обозначение величины	Значение
<i>Характеристики замораживаемой породы</i>			
1	Естественная температура породы, °С	T_0	10,0
2	Температура начала кристаллизации воды в породе, °С	T_l	-0,1
3	Температура полной кристаллизации воды в породе, °С	T_s	-1,0
4	Коэффициент теплопроводности незамороженной породы, Вт/(м·°С)	λ_1	2,5
5	Коэффициент теплопроводности замороженной породы, Вт/(м·°С)	λ_2	3,5
6	Удельная теплоемкость незамороженной породы, Дж/(кг·°С)	c_1	1200
7	Удельная теплоемкость замороженной породы, Дж/(кг·°С)	c_2	900
8	Количество замерзающей воды в породе, кг/кг	w	0,15
9	Плотность породы, кг/м ³	ρ	2000
<i>Технологические параметры</i>			
№	Параметр		Значение
<i>Параметры системы замораживания</i>			
1	Радиус контура замораживающих колонок, м		7,0
2	Расстояние между соседними замораживающими колонками, м		1,22
3	Количество замораживающих колонок, ед.		36
<i>Параметры шахтного ствола</i>			
4	Радиус в проходке, м		5,0
<i>Свойства хладоносителя (CaCl₂)</i>			
5	Плотность, кг/м ³		1280
6	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)		2659
7	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)		0,49
8	Динамическая вязкость, 10 ⁴ Па·с		212,8

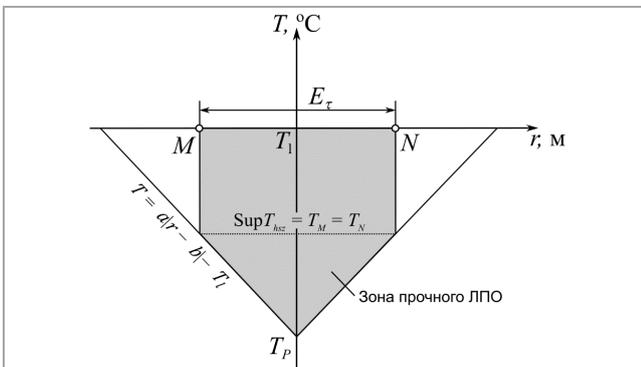


Рис. 11. Упрощенное представление поля температур в замковой плоскости с нанесенной «зоной прочного ЛПО»

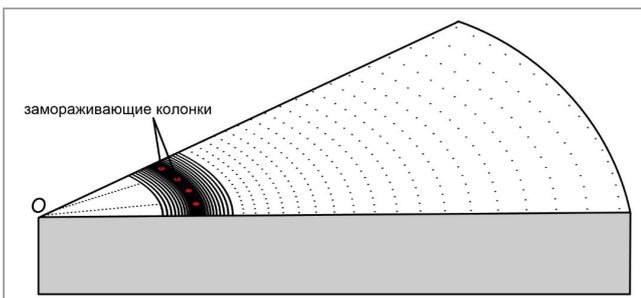


Рис. 12. Секторальный фрагмент расчетной области с нанесенной сеткой узлов и положением замораживающих колонок (красным цветом)

крепи ствола (при его наличии в модели) и источников теплоты («холода»). Более подробно математическая модель и алгоритмы расчета описаны в работах [29, 30, 45, 46].

Для расчета холодопроизводительности замораживающих колонок требовалось задать их рабочую длину, поэтому мощность модельного слоя принималась равной 100 м. Величину минимально допустимой толщины ЛПО определим $E = 2,0$ м, рассчитанную для температуры прочной породы $T_0 = -8$ °С. Расход хладоносителя в рассольной сети примем из расчета $6 \text{ м}^3/\text{ч}$ на одну замораживающую колонку, что соответствует практике искусственного замораживания. Минимальную температуру хладоносителя в процессе формирования ЛПО ограничим значением -30 °С.

Результаты многовариантного моделирования с определением наиболее рациональных режимов поддержания ЛПО после достижения его требуемых параметров по всем трем критериям проиллюстрированы на рис. 13 в виде графиков изменения температуры хладоносителя, холодопроизводительности замораживающих колонок, минимальной толщины ЛПО по границам мерзлой породы и его средней температуры.

Необходимо отдельно уделить внимание подбору режима замораживания по критерию 1. Для данного критерия рассчитаны два варианта по следующей причине: с ограничением нижней температуры хладоносителя -30 °С невозможно одновременно достичь на какой-либо момент времени средней температуры ЛПО $T = -8$ °С и его толщины по границам мерзлой породы $E = 2,0$ м. Так, например, на 63-и сутки с начала замораживания средняя температура ЛПО достигнет значения $T = -8$ °С, но его толщина E по границам мерзлой породы будет составлять уже 3,7 м, т.е. будет заведомо более минимально требуемых 2 м. Данный вариант расчета обозначен на графиках как «критерий 1.v2» (*литера «v» – вариант*).

На случай строгого соблюдения условий критерия 1 был рассчитан вариант, обозначенный «критерий 1.v1», в котором температура хладоносителя в период формирования ЛПО понижалась до -47 °С. Тем самым удалось добиться на 29-е сутки с начала замораживания средней температуры ЛПО $T = -8$ °С одновременно с его толщиной по границам мерзлой породы $E = 2,0$ м. Однако затраты холодильной мощности на это, как показали расчеты, в среднем в 1,4 раза больше, чем в предыдущем варианте.

Анализ графиков показывает, что наиболее экономичным в плане снижения затрат холодильной мощности является критерий 3, и при этом он полностью отвечает условиям безопасной эксплуатации ЛПО. Соответствующие ему графики выделены красным цветом. Он достаточно удобен в применении, поскольку поиск верхнего предела температуры, как и определение границ «зоны прочного ЛПО», несложно алгоритмизуется. Критерий 3 обеспечивает надежность ЛПО при его наименьшей средней температуре, а также минимальную из всех трех критериев скорость экспансии границ мерзлой породы вовне, в том числе и внутрь контура проходки шахтного ствола.

Соотношение границ ЛПО, определяемых по трем критериям надежности, продемонстрируем наглядно. Распределение температур по радиальному профилю от центра ствола в замковой плоскости на 73-и сутки с начала замораживания проиллюстрировано на рис. 14. Режим работы замораживающей станции соответствовал представленному на рис. 13 для критерия 3.

Согласно приведенному на рис. 14 распределению температур, толщина «зоны прочного ЛПО» со средней температурой породы -8 °С составляет 2,0 м, что

соответствует условию его надежности по критерию 3. В то время как два других критерия не соблюдаются, поскольку расстояние между изотермами со значением температуры $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ по обе стороны от точки P составляет всего $1,2\text{ м}$, а по границам мерзлой породы хотя и составляет $4,1\text{ м}$, что более минимально требуемого значения в $2,0\text{ м}$, но при средней температуре всего ЛПО $T = -5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, что выше принятого значения температуры прочной породы в $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, а значит, неприемлемо.

Температура мерзлой породы в точке P составляет всего лишь $-9,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. При соблюдении двух других критериев ее требовалось бы опустить существенно ниже (около $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ для выполнения условий по критерию 1), поскольку оба они «ограничивают» себя более жестким условием задания температур. А значит, и температура хладоносителя и затраты холодильной мощности при применении критерия 3 с «плавающей» верхней температурной границей ниже, чем при использовании остальных двух критериев.

Закключение

В работе рассмотрены три основных критерия оценки надежности ЛПО при термометрическом контроле его состояния в процессе искусственного замораживания горных пород при строительстве вертикальных шахтных стволов.

Расчеты и практический опыт показывают, что в рамках соблюдения приведенных критериев невозможно подобрать оптимальный режим работы замораживающей станции с повышением температуры хладоносителя в период поддержания ЛПО, который обеспечил бы полную остановку экспансии его границ по температуре начала замерзания воды в породе.

Касательно критериев: первый из них является наименее гибким для управления искусственным замораживанием. Входящий в него параметр толщины ЛПО по границам мерзлой породы играет роль критической отметки, ниже которой опускаться недопустимо. Но, как показано выше, использовать его как одно из условий задачи оптимизации невозможно. Второе условие поддержания средней температуры ЛПО существенно ограничивает градиент и верхний предел повышения температуры хладоносителя.

Второй критерий удобен в применении. Поиск минимального расстояния между изотермами с заданным значением температуры просто алгоритмизовать, а положение выбранных изотерм – легко фиксируется соответствующим подбором режима повышения температуры хладоносителя. Простота и экономичность критерия позволяют рекомендовать его в качестве второго основного к применению на практике в процессе термометрического контроля состояния ЛПО.

Несмотря на кажущуюся сложность критерия 3, поиск верхнего предела температуры, как и определение границ «зоны прочного ЛПО», также несложно алгоритмизовать. А поскольку верхний предел является «плавающим» во времени, а не зафиксирован жестко заданными значениями температуры, как в критериях 1 и 2, третий из них является наиболее экономичным в плане холодильной мощности замораживающего комплекса. Как показали

Библиографический список

1. Akagawa, S. Artificially frozen ground and related engineering technology in Japan / S. Akagawa // Sciences in Cold and Arid Regions. – 2021. – Vol. 13, № 2. – P. 77–86. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.20046
2. Modeling Artificial Ground Freezing for Construction of Two Tunnels of a Metro Station in Napoli (Italy) / A. Mauro, G. Normino, F. Cavuoto, P. Marotta, N. Massarotti // Energies. – 2020. – Vol. 13, № 5. – 1272. DOI: 10.3390/en13051272
3. Pimentel, E. Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunnelling / E. Pimentel, S. Papakonstantinou, G. Anagnostou // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2012. – Vol. 28. – P. 57–69. DOI: 10.1016/j.tust.2011.09.005

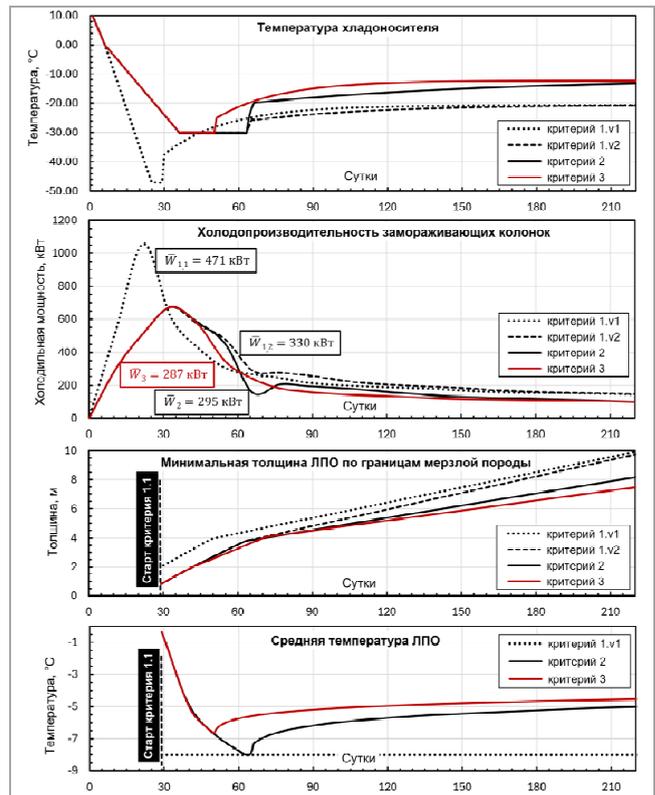


Рис. 13. Результаты математического моделирования для определения наиболее рационального режима поддержания ЛПО по трем критериям

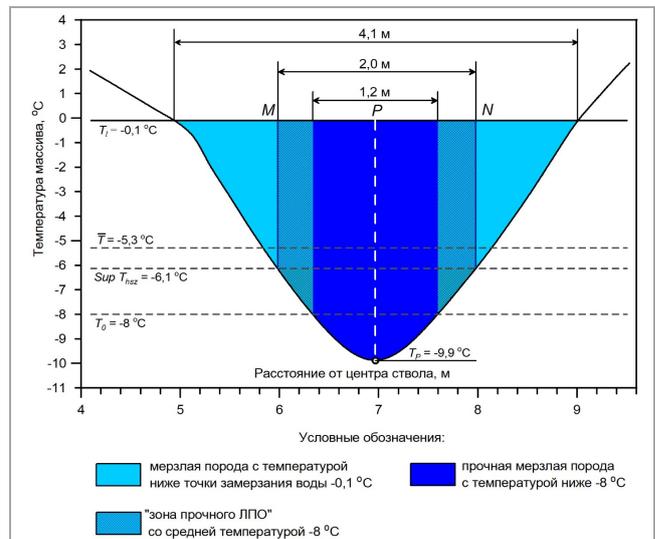


Рис. 14. Соотношение размеров ЛПО, определяемых по трем критериям надежности

расчеты, его применение позволяет подобрать режим поддержания ЛПО, обеспечивающий наименьший рост толщины при наименьшем значении средней температуры. На основании результатов исследования критерий рекомендуется к применению в качестве основного при термометрическом контроле состояния ЛПО и гибком управлении режимом работы замораживающего комплекса.

4. Artificial Ground Freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis / G. Russo, A. Corbo, F. Cavuoto, S. Auttuori // *Tunneling and Underground Space Technology*. – 2015. – Vol. 50. – P. 226–238. DOI: 10.1016/j.tust.2015.07.008
5. Analyses of the Ground Surface Displacement under Reinforcement Construction in the Shield Tunnel End Using the Artificial Ground Freezing Method / H. Xiang, G. Zhang, P. Cheng, J. Hu, Z. Wang, D. Zeng // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, № 14. – 8508. DOI: 10.3390/app13148508
6. Monitoring and Evaluation of Artificial Ground Freezing in Metro Tunnel Construction-A Case Study / Q. Yan, W. Wu, C. Zhang, S. Ma, Yu. Li // *KSCE Journal of Civil Engineering*. – 2019. – Vol. 23. – P. 2359–2370. DOI: 10.1007/s12205-019-1478-z
7. Analysis of moisture and temperature fields coupling process in freezing shaft / Yu. Yang, D. Lei, H. Cai, S. Wang, Ya. Mu // *Thermal Science*. – 2019. – Vol. 23. – P. 1329–1335. DOI: 10.2298/TSCI180519130Y
8. Numerical simulation and measurement analysis of the temperature field of artificial freezing shaft sinking in Cretaceous strata / Z. Yao, H. Cai, W. Xue, X. Wang, Z. Wang // *AIP Advances*. – 2019. – Vol. 9, № 2. – 025209. DOI: 10.1063/1.5085806
9. Вялов, С.С. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов, и расчеты ледогрунтовых ограждений / С.С. Вялов. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – 253 с.
10. Трупак, Н.Г. Замораживание грунтов в подземном строительстве горных выработок / Н.Г. Трупак. – М.: Недра, 1974. – 281 с.
11. Artificial ground freezing: A review of thermal and hydraulic aspects / M.A. Alzoubi, M. Xu, F.P. Hassani, S. Poncet, A.P. Sasmito // *Tunneling and Underground Space Technology*. – 2020. – Vol. 104. – 103534. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103534
12. Study on theory model of hydro-thermal-mechanical interaction process in saturated freezing silty soil / Yu. Lai, P. Wansheng, M. Zhang, J. Zhou // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 78. – P. 805–819. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.035
13. Sweidan, A.H. A unified water/ice kinematics approach for phase-field thermos-hydro-mechanical modeling of frost action in porous media / A.H. Sweidan, Yo. Heider, B. Markert // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2020. – Vol. 372. – 113358. DOI: 10.1016/j.cma.2020.113358
14. Tounsi, H. Thermo-hydro-mechanical modeling of artificial ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid / H. Tounsi, A. Rouabhi, E. Jahangir // *Computers and Geotechnics*. – 2020. – Vol. 119. – 103382. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103382
15. Coupled thermo-hydro-mechanical modeling of frost heave and water migration during artificial ground freezing of soils for mineshaft sinking / M. Zhelmin, A. Kostina, A. Prokhorov, O. Plekhov, L. Levin // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2022. – Vol. 14, № 2. – P. 537–559. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.07.015
16. Thermal and hydraulic analysis of selective artificial ground freezing using air insulation: Experiment and modeling / A. Zueter, A. Nie-Rouquette, M.A. Alzoubi, A. Sasmito // *Computers and Geotechnics*. – 2020. – Vol. 120. – 103416. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103416
17. Zhou, M.M. A three thermos-hydro-mechanical finite element model for freezing soils / M.M. Zhou, G. Meschke // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2013. – Vol. 37. – P. 3173–3193. DOI: 10.1002/nag.2184
18. Путин, А.В. Анализ состояния ледопородного ограждения в условиях асимметричного распределения температур в замораживаемом массиве горных пород / А.В. Путин, А.А. Оглоблина, А.В. Богомяков // *Горное эко.* – 2022. – № 2. – С. 133–139. DOI: 10.7242/echo.2022.2.22
19. Семин, М.А. Теоретический анализ динамики ледопородного ограждения при переходе на пассивный режим замораживания / М.А. Семин, А.В. Богомяков, Л.Ю. Левин // *Записки горного института*. – 2020. – № 243. – С. 319–328. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.319
20. Реализация принципов замораживания “по требованию” при строительстве стволов Дарасинского рудника / И.И. Головатый, Л.Ю. Левин, М.А. Семин, А.В. Путин // *Горный журнал*. – 2023. – № 8. – С. 34–39. DOI: 10.17580/gzh.2023.08.05
21. Enhancing efficiency in the control of artificial ground freezing for shaft construction: A case study of the Darasinsky potash mine / M. Semin, I. Golovaty, L. Levin, A. Pugin // *Cleaner Engineering and Technology*. – 2024. – Vol. 18. – 100710. DOI: 10.1016/j.clet.2023.100710
22. Freezing on Demand (FoD): An Energy Saving Technique for Artificial Ground Freezing / M.A. Alzoubi, A.P. Sasmito, A. Madiseh, F.P. Hassani // *Energy Procedia*. – 2019. – Vol. 158. – P. 4992–4997. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.667
23. Freezing on demand: A new concept for mine safety and energy savings in wet underground mines / M.A. Alzoubi, A. Zueter, A. Nie-Rouquette, A.P. Sasmito // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2019. – Vol. 29, № 4. – P. 621–627. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.06.015
24. Дорман, Я.А. Искусственное замораживание грунтов при строительстве метрополитенов / Я.А. Дорман. – М.: Транспорт, 1971. – 302 с.
25. Дорман, Я.А. Специальные способы работ при строительстве метрополитенов / Я.А. Дорман. – М.: Транспорт, 1981. – 302 с.
26. Andersland, O.V. An introduction to frozen ground engineering / O.V. Andersland, B. Ladanyi. – Springer Science & Business Media, 1994. – 352 p.
27. Оптимизация процессов формирования ледопородного ограждения при сооружении шахтных стволов / И.И. Головатый, Л.Ю. Левин, О.С. Паршаков, Д.А. Диулин // *Горный журнал*. – 2018. – № 8. – С. 48–53. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.06
28. Паршаков, О.С. Разработка автоматизированной системы термометрического контроля ледопородных ограждений: дис. ... канд. техн. наук / О.С. Паршаков. – Пермь, 2020. – 140 с.
29. Применение программного комплекса “FrozenWall” для расчета искусственного замораживания пород / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, А.В. Богомяков, О.С. Паршаков // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2019. – № 4. – С. 269–282.
30. Богомяков, А.В. Совершенствование математической модели теплоемкости в замораживаемом породном массиве, реализованная в программе FrozenWall / А.В. Богомяков, А.В. Путин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334, № 2. – С. 164–174. DOI: 10.18799/24131830/2023/2/3808
31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018666337. FrozenWall / Богомяков А.В., Зайцев А.В., Клюкин Ю.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Путин А.В., Семин М.А.; заявитель и правообладатель: ПФИЦ УрО РАН. – № 2018663501 заявл. 28.11.2018. опублик. 17.12.2018. Реестр программ для ЭВМ – 1 с.
32. Инструкция по расчету параметров, контролю и управлению искусственным замораживанием горных пород при строительстве шахтных стволов на территории Республики Беларусь. – Минск: Солигорск: ОАО «Беларуськалий», 2019. – 67 с.
33. ВСН 189-78. Ведомственные строительные нормы. Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей. – М.: ЦНИИС, 1978. – 68 с.
34. Временное руководство по проектированию процесса замораживания пород для проходки вертикальных стволов шахт / ВНИИОМШС. – Харьков, 1971. – 103 с.
35. Левин, Л.Ю. Сравнительный анализ существующих методов расчета толщины ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, О.А. Плехов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2018. – № 4. – С. 93–103. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.09
36. An Applicability of Vyalov's equations to ice wall strength estimation / A. Kostina, M. Zhelmin, O. Plekhov, I. Pantelev, L. Levin, M. Semin // *Frattura Ed Integrità Strutturale*. – 2020. – Vol. 14, № 53. – P. 394–405. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.53.30
37. Семин, М.А. Методы расчета искусственного замораживания пород при строительстве шахтных стволов / М.А. Семин, Л.Ю. Левин. – М.: Научный мир, 2021. – 152 с.
38. Calculation method of the design Thickness of a Frozen Wall with Its Inner Edge Radially Incompletely Unloaded / C. Hu, Z. Yang, T. Han, W. Yang // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13. – 12650. DOI: 10.3390/app132312650
39. Цытович, Н.А. Механика мерзлых грунтов: учебн. пособие. / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.
40. Цытович, Н.А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для строит. вузов / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.
41. Anderson, D.M. Physics, chemistry and mechanics of frozen ground / D.M. Anderson, N.R. Morgenstern // *2nd International Conference on Permafrost*. – 1973. – P. 257–288.
42. Исследование влияния неоднородности поля температур на прочность ледопородных ограждений стволов шахт / М.А. Семин, Г.П. Бровка, А.В. Путин, С.А. Бублик, М.С. Желнин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2021. – № 9. – С. 79–93. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_79
43. Семин, М.А. Расчет земных теплопритоков при искусственном замораживании породного массива / М.А. Семин, Л.Ю. Левин, А.В. Путин // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2020. – № 1. – С. 162–171. DOI: 10.15372/FTPRP20200118
44. Zhelmin, M.S. Optimization of the Passive Regime of Artificial Freezing of a Water-Saturated Rock Mass / M.S. Zhelmin, O.A. Plekhov, L.Y. Levin // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2020. – Vol. 93. – P. 685–692. DOI: 10.1007/s10891-020-02167-8
45. Левин, Л.Ю. Совершенствование методов прогнозирования состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов с использованием распределенных измерений температуры в контрольных скважинах / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, О.С. Паршаков // *Записки Горного института*. – 2019. – Т. 237. – С. 268–274. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.274
46. Thermal monitoring of frozen wall thawing after artificial ground freezing: Case study of Petrikov Potash Mine / L. Levin, I. Golovaty, A. Zaitsev, A. Pugin, M. Semin // *Tunneling and Underground Space Technology*. – 2021. – Vol. 107. – 103685. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103685

References

1. Akagawa S. Artificially frozen ground and related engineering technology in Japan. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 77-86. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.20046
2. Mauro A., Normino G., Cavuoto F., Marotta P., Massarotti N. Modeling Artificial Ground Freezing for Construction of Two Tunnels of a Metro Station in Napoli (Italy). *Energies*, 2020, vol. 13, no. 5, 1272. DOI: 10.3390/en13051272
3. Pimentel E., Papakonstantinou S., Anagnostou G. Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunneling. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2012, vol. 28, pp. 57-69. DOI: 10.1016/j.tust.2011.09.005
4. Russo G., Corbo A., Cavuoto F., Auttuori S. Artificial Ground Freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2015, vol. 50, pp. 226-238. DOI: 10.1016/j.tust.2015.07.008
5. Xiang H., Zhang G., Cheng P., Hu J., Wang Z., Zeng D. Analyses of the Ground Surface Displacement under Reinforcement Construction in the Shield Tunnel End Using the Artificial Ground Freezing Method. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 14, 8508. DOI: 10.3390/app13148508
6. Yan Q., Wu W., Zhang C., Ma S., Li Yu. Monitoring and Evaluation of Artificial Ground Freezing in Metro Tunnel Construction-A Case Study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, vol. 23, pp. 2359-2370. DOI: 10.1007/s12205-019-1478-z
7. Yang Yu., Lei D., Cai H., Wang S., Mu Ya. Analysis of moisture and temperature fields coupling process in freezing shaft. *Thermal Science*, 2019, vol. 23, pp. 1329-1335. DOI: 10.2298/TSCI180519130Y
8. Yao Z., Cai H., Xue W., Wang X., Wang Z. Numerical simulation and measurement analysis of the temperature field of artificial freezing shaft sinking in Cretaceous strata. *AIP Advances*, 2019, vol. 9, no. 2, 025209. DOI: 10.1063/1.5085806

9. Vialov S.S. Prochnost' i polzuchest' merzlykh gruntov, i raschety ledogruntovykh ograzhdenii [Strength and creep of frozen soils, and calculations of ice-soil barriers]. Moscow: Akademiia nauk SSSR, 1962, 253 p.
10. Trupak N.G. Zamorazhivanie gruntov v podzemnom stroitel'stve gornykh vyrabotok [Freezing of soils in underground construction of mine workings]. Moscow: Nedra, 1974, 281 p.
11. Alzoubi M.A., Xu M., Hassani F.P., Poncet S., Sasmito A.P. Artificial ground freezing: A review of thermal and hydraulic aspects. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2020, vol. 104, 103534. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103534
12. Lai Yu., Wansheng P., Zhang M., Zhou J. Study on theory model of hydro-thermal-mechanical interaction process in saturated freezing silty soil. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 78, pp. 805-819. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.035
13. Sweidan A.H., Heider Yo., Markert B. A unified water/ice kinematics approach for phase-field thermos-hydro-mechanical modeling of frost action in porous media. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2020, vol. 372, 113358. DOI: 10.1016/j.cma.2020.113358
14. Tounsi H., Rouabhi A., Jahangir E. Thermo-hydro-mechanical modeling of artificial ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid. *Computers and Geotechnics*, 2020, vol. 119, 103382. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103382
15. Zhelnin M., Kostina A., Prokhorov A., Plekhov O., Levin L. Coupled thermo-hydro-mechanical modeling of frost heave and water migration during artificial ground freezing of soils for mineshaft sinking. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 537-559. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.07.015
16. Zuetter A., Nie-Rouquette A., Alzoubi M.A., Sasmito A. Thermal and hydraulic analysis of selective artificial ground freezing using air insulation: Experiment and modeling. *Computers and Geotechnics*, 2020, vol. 120, 103416. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103416
17. Zhou M.M., Meschke G. A three thermos-hydro-mechanical finite element model for freezing soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, vol. 37, pp. 3173-3193. DOI: 10.1002/nag.2184
18. Pugin A.V., Oglolina A.A., Bogomiagkov A.V. Analiz sostoianii ledoporodnogo ograzhdeniia v usloviakh asimmetrichnogo raspredeleniia temperatur v zamorazhivaemom massive gornykh porod [Analysis of the state of the ice wall under conditions of asymmetric temperature distribution in a frozen rock mass]. *Gornoe ekho*, 2022, no. 2, pp. 133-139. DOI: 10.7242/echo.2022.2.22
19. Semin M.A., Bogomiagkov A.V., Levin L.Iu. Teoreticheskii analiz dinamiki ledoporodnogo ograzhdeniia pri perekhode na passivnyi rezhim zamorazhivaniia [Theoretical analysis of frozen wall dynamics during transition to ice holding stage]. *Zapiski gornogo instituta*, 2020, no. 243, pp. 319-328. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.319
20. Golovaty I.I., Levin L.Iu., Semin M.A., Pugin A.V. Realizatsiia printsipov zamorazhivaniia "po trebovaniu" pri stroitel'stve stolov Darasinskogo rudnika [Implementation of freezing-on-demand concept in shaft construction in Belaruskali's Darasinsky mine]. *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 8, pp. 34-39. DOI: 10.17580/gzh.2023.08.05
21. Semin M., Golovaty I., Levin L., Pugin A. Enhancing efficiency in the control of artificial ground freezing for shaft construction: A case study of the Darasinsky potash mine. *Cleaner Engineering and Technology*, 2024, vol. 18, 100710. DOI: 10.1016/j.clet.2023.100710
22. Alzoubi M.A., Sasmito A.P., Madiseh A., Hassani F.P. Freezing on Demand (FoD): An Energy Saving Technique for Artificial Ground Freezing. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 4992-4997. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.667
23. Alzoubi M.A., Zuetter 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, vol. 29, no. 4, pp. 621-627. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.06.015
24. Dorman Ia.A. Iskustvennoe zamorazhivanie gruntov pri stroitel'stve metropolitenov [Artificial freezing of soils during the construction of subways]. Moscow: Transport, 1971, 302 p.
25. Dorman Ia.A. Spetsial'nye sposoby rabot pri stroitel'stve metropolitenov [Special methods of work in the construction of subways]. Moscow: Transport, 1981, 302 p.
26. Andersland O.B., Ladanyi B. An introduction to frozen ground engineering. Springer Science & Business Media, 1994, 352 p.
27. Golovaty I.I., Levin L.Iu., Parshakov O.S., Diulin D.A. Optimizatsiia protsessov formirovaniia ledoporodnogo ograzhdeniia pri sooruzhenii shakhtnykh stolov [Optimization of ice wall formation processes during construction of mine tables]. *Gornyi zhurnal*, 2018, no. 8, pp. 48-53. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.06
28. Parshakov O.S. Razrabotka avtomatizirovanoi sistemy termometricheskogo kontroliia ledoporodnykh ograzhdenii [Development of an automated system for thermometric control of ice barriers]. Ph D. thesis. Perm', 2020, 140 p.
29. Levin L.Iu., Semin M.A., Bogomiagkov A.V., Parshakov O.S. Primenenie programmno kompleksa "FrozenWall" dlia rascheta iskustvennogo zamorazhivaniia porod [The application of "FrozenWall" software in simulation of artificial ground freezing]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2019, no. 4, pp. 269-282.
30. Bogomiagkov A.V., Pugin A.V. Sovershenstvovanie matematicheskoi modeli teplomassopere-nosa v zamorazhivaemom porodnom massive, realizovannoi v programme FrozenWall [Improvement of the mathematical model of heat and mass transfer in frozen soils implemented in the FrozenWall program]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 164-174. DOI: 10.18799/24131830/2023/2/3808
31. Bogomiagkov A.V., Zaitsev A.V., Kliukhin Iu.A., Levin L.Iu., Parshakov O.S., Pugin A.V., Semin M.A. FrozenWall. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM no. 2018666337 (2018).
32. Instrukttsiia po raschetu parametrov, kontroliu i upravleniiu iskustvennym zamorazhivaniem gornykh porod pri stroitel'stve shakhtnykh stolov na territorii Respubliki Belarus' [Instructions for calculating parameters, monitoring and managing artificial freezing of rocks during the construction of mine shafts in the Republic of Belarus]. Minsk; Soligorsk: OAO "Belarus'kalii", 2019, 67 p.
33. VSN 189-78. Vedomstvennye stroitel'nye normy. Instrukttsiia po proektirovaniu i proizvodstvu rabot po iskustvennomu zamorazhivaniu gruntov pri stroitel'stve metropolitenov i tonnelei [VSN 189-78. Departmental building codes. Instructions for design and execution of works on artificial freezing of soils during construction of subways and tunnels]. Moscow: TsNIIS, 1978, 68 p.
34. Vremennoe rukovodstvo po proektirovaniu protsessa zamorazhivaniia porod dlia prokhodki vertikal'nykh stolov shakht [Interim Guidelines for the Design of Rock Freezing Processes for Sinking Vertical Mine Shafts]. Khar'kov: VNIOMShS, 1971, 103 p.
35. Levin L.Iu., Semin M.A., Plekhov O.A. Sravnitel'nyi analiz suschestvuiushchikh metodov rascheta tolschiny ledoporodnogo ograzhdeniia stroiashchikhshia shakhtnykh stolov [Comparative analysis of existing methods for calculating frozen wall thickness for mine shafts under construction]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2018, no. 4, pp. 93-103. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.09
36. Kostina A., Zhelnin M., Plekhov O., Pantelev I., Levin L., Semin M. An Applicability of Vyalov's equations to ice wall strength estimation. *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 2020, vol. 14, no. 53, pp. 394-405. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.53.30
37. Semin M.A., Levin L.Iu. Metody rascheta iskustvennogo zamorazhivaniia porod pri stroitel'stve shakhtnykh stolov [Methods of calculating artificial freezing of rocks during the construction of mine shafts]. Moscow: Nauchnyi mir, 2021, 152 p.
38. Hu C., Yang Z., Han T., Yang W. Calculation method of the design Thickness of a Frozen Wall with Its Inner Edge Radially Incompletely Unloaded. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, 12650. DOI: 10.3390/app132312650
39. Tsytovich N.A. Mekhanika merzlykh gruntov [Mechanics of frozen soils]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1973, 448 p.
40. Tsytovich N.A. Mekhanika gruntov (kratkii kurs) [Soil Mechanics (short course)]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1983, 288 p.
41. Anderson D.M., Morgenstern N.R. Physics, chemistry and mechanics of frozen ground. *2nd International Conference on Permafrost*, 1973, pp. 257-288.
42. Semin M.A., Brovka G.P., Pugin A.V., Bublik S.A., Zhelnin M.S. Issledovanie vliianiia neodnorodnosti polia temperatur na prochnost' ledoporodnykh ograzhdenii stolov shakht [Effects of temperature field nonuniformity on strength of frozen wall in mine shafts]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii buil'ten'*, 2021, no. 9, pp. 79-93. DOI: 10.25018/0236.1493.2021.9.0.79
43. Semin M.A., Levin L.Iu., Pugin A.V. Raschet zemnykh teploritokov pri iskustvennom zamorazhivaniia porodnogo massiva [Analysis of earth's heat flow in artificial ground freezing]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2020, no. 1, pp. 162-171. DOI: 10.15372/FTPRP120200118
44. Zhelnin M.S., Plekhov O.A., Levin L.Y. Optimization of the Passive Regime of Artificial Freezing of a Water-Saturated Rock Mass. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2020, vol. 93, pp. 685-692. DOI: 10.1007/s10891-020-02167-8
45. Levin L.Iu., Semin M.A., Parshakov O.S. Sovershenstvovanie metodov prognozirovaniia sostoianii ledoporodnogo ograzhdeniia stroiashchikhshia shakhtnykh stolov s ispol'zovaniem raspredelennykh izmerenii temperatury v kontrol'nykh skvazhinakh [Improving Methods of Frozen Wall State Prediction for Mine Shafts under Construction Using Distributed Temperature Measurements in Test Wells]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2019, vol. 237, pp. 268-274. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.274
46. 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. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2021, vol. 107, 103685. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103685

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (проекты № 122030100425-6 и № 124020500030-7).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.