

18. Фельдман Л.П., Святный В.А., Касимов О.И. и др. Исследование утечек воздуха через выработанное пространство участка методами математического моделирования // Разработка месторождений полезных ископаемых: сб. – Киев, 1971. – № 22. – С. 105-110.
19. Палеев Д.Ю., Брабандер О.П. Математическое моделирование активного воздействия на взрывоопасные области и очаги горения в угольных шахтах. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1999. – 202 с.
20. Палеев Д.Ю. Сетевая задача проветривания горных выработок и выработанного пространства шахты // Вестн. Кузбасского гос. технич. ун-та. – 2006. – № 5 (56). – С. 58-62.
21. Худосовцев Н.М., Болбат И.Е., Тепер В.Б., Хорольский В.Т. Автоматизированная система составления на ЭВМ типа ЕС планов ликвидации аварий шахт (АСС ПЛА) // Предупреждение и тушение подземных пожаров: тез. докл. I Всесоюз. науч.-практ. конф. 4 секция: Управление вентиляцией шахт при подземных пожарах. – Донецк, 1978. – С. 65-66.
22. Потёмкин В.Я., Козлов Е.А., Кокоулин И.Е. Автоматизация составления оперативной части планов ликвидации аварий на шахтах и рудниках. – Киев: Техника, 1991. – 125 с.: ил.
23. Палеев Д.Ю. Автоматизированное рабочее место руководителя ликвидации аварии в угольных шахтах // Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф: докл. VI Междунар. конф., 29 окт. - 2 нояб. 2001 г. – Красноярск, 2001. – Т. 1. – С. 237-244.
24. Медведев Б.И., Почтаренко Н.С., Павловский В.А. Тепловые расчёты горных выработок в условиях рудничных пожаров на ЭЦВМ // Разработка месторождений полезных ископаемых: сб. ст. – Киев, 1973. – Вып. 34. – С. 103-108.
25. Левин Л.Ю., Палеев Д.Ю., Семин М.А. Расчет устойчивости воздушных потоков в выработках шахтных вентиляционных сетей по фактору тепловой депрессии // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – № 1. – С. 81-85.
26. Медведев Б.И., Павловский В.А. Расчёт вентиляционных сетей шахт. – Киев: Техніка, 1977. – 120 с.: ил.
27. Медведев Б.И. Тепловые основы вентиляции шахт при нормальных и аварийных режимах проветривания. – Киев, Донецк: Вища школа. – 1978. – 154 с.: ил.
28. Круглов Ю.В., Исаевич А.Г., Левин Л.В. Сравнительный анализ современных алгоритмов расчета вентиляционных сетей // Изв. вузов. Горн. журн. – 2006. – № 5. – С. 32-37.
29. Танцов П.Н. Разработка метода динамического расчёта шахтной вентиляции для моделирования аэрологических чрезвычайных ситуаций: дис. ... канд. техн. наук. 05.26.02 / Танцов Петр Николаевич. – М., 2013. – 132 с.: ил.
30. Вашилов В.В. Разработка газодинамической модели и метода расчета нестационарных режимов проветривания угольных шахт: дис. ... канд. техн. наук. 25.00.20 / Вашилов Валерий Валерьевич. – Кемерово, 2010. – 126 с.: ил.
31. Вашилов В.В., Палеев Д.Ю. Изменение характеристик вентиляционного потока при пожаре // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2009. – № 2. – С. 128-132.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2024.2.15

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА УСТОЙЧИВОСТИ ПРОВЕТРИВАНИЯ РУДНИКОВ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ, СВЯЗАННЫХ С НАЛИЧИЕМ ТЕПЛОВЫХ ДЕПРЕССИЙ

М.Д. Попов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Данная статья посвящена исследованию динамики конвективных потоков воздуха в пределах наклонных горных выработок, позволяющий определить критическую тепловую мощность источника тепловыделения и условия опрокидывания воздушного потока при наличии тепловой депрессии. В статье рассмотрен один из способов проведения натурального эксперимента с использованием имитационного стенда. Выполнено трехмерное численное моделирование с целью определения основных требований, которым должна отвечать проектируемая установка. Так же на основании трехмерного численного моделирования получены качественные зависимости устойчивости проветривания от изменяемых параметров наклонной выработки при наличии интенсивного источника нагрева.

**Ключевые слова:** рудничная вентиляция, устойчивость проветривания, подземный пожар, аварийная ситуация, моделирование.

## Введение

В последние десятилетия в горнодобывающей промышленности в России и за рубежом имеется тенденция, связанная с увеличением мощности добычи полезных ископаемых. При этом запасы легкодоступных ресурсов истощаются и это в свою очередь приводит к увеличению глубины ведения горных работ и расширению шахтных полей. Как следствие увеличивается протяженность транспортных конвейеров и линий электропередач. Вместе с этим увеличивается количество применяемой на рудниках дизельной техники. Таким образом, количество потенциальных источников подземных экзогенных пожаров значительно увеличивается, что негативно сказывается на количестве инцидентов, связанных с возгораниями в подземных условиях. Так в период с 1980 по 2000 год на горнодобывающих предприятиях России было зафиксировано 36 подземных возгораний, в то время как за тот же период начиная с 2000 года количество возгораний возросло в полтора раза.

При этом наибольший интерес при исследовании подземных пожаров с точки зрения локализации и ликвидации последствий аварий представляет направление распространения продуктов горения по горным выработкам. В горизонтальных горных выработках распространение продуктов горения совпадает с направлением движения воздушного потока в нормальном режиме проветривания и данные вентиляционные сети являются легко анализируемыми с точки зрения составления планов по ликвидации и локализации последствий аварий. [3] Однако для наклонных горных выработок характерно возникновение тепловых депрессии обусловленных разницей плотностей воздуха, возникающих вследствие его нагрева при прохождении очага возгорания. При этом при превышении значения тепловой депрессии выше значения депрессии ГВУ в рассматриваемой выработке возможно изменение направления движения воздушного потока с нисходящего на восходящий. И как следствие изменение направления распространения продуктов горения от нормального режима проветривания. В настоящий момент требованием пункта 26 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы» [1] устанавливается необходимость производства инженерных расчётов параметров развития пожара, а также определение устойчивости проветривания в вертикальных и наклонных горных выработках при пожаре [4, 5].

Также для наклонных выработок характерно наличие вихревых структур выше очага пожара. Проходя источник пожара воздух нагревается дальше вследствие перемешивания с более холодным воздухом и теплообменом с массивом нагретый воздух остывает опускается и возвращается обратно к источнику. Кроме того, в зависимости от характеристики вентиляционной сети в точке пожара и характеристик самого источника тепловыделения возможна ситуация, когда изменение направления движения воздушного потока отсутствует, но за счет вихревой структуры часть нагретых продуктов горения вырывается в сквозную выработку против нормального направления движения воздушного потока (рис.1).

На данный момент расчет устойчивости проветривания наклонных выработок при пожаре сотрудниками ВГСЧ выполняется по методике, которая подразумевает расчет при фиксированной температуре воздуха во всей наклонной горной выработке равной 1000 градусов. При этом данный подход не учитывает характеристики самого источника возгорания, а именно количество тепла, которое может быть передано воздуху в единицу времени. Также не учитывает характеристику вентиляционной сети как начальный расход воздуха до аварийной ситуации. Данный расчет не учитывает теплообмен воздуха с породным массивом и как следствие его остывание при движении по горным выработкам [2]. Так же следует отметить, что расчет выполняется в ручном

режиме для каждой отдельной горной выработки. При этом анализ больших разветвленных сетей в условиях сложных постоянно изменяющихся топологий вентиляционных сетей, а также анализ всех возможных сценариев появления и развития подземного пожара является трудоемким процессом, который требует больших затрат времени и является практически невозможным для ручного расчета без использований современных компьютеров и методов численного расчета [6, 7].

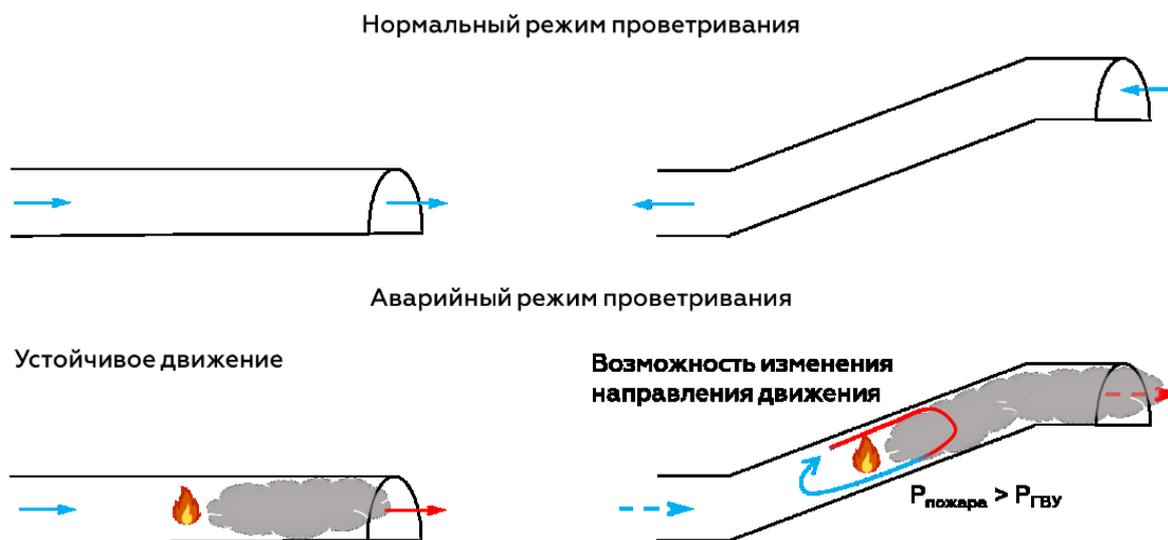


Рис. 1. Принципиальная схема распространения продуктов горения в выработках с нисходящим проветриванием

### Цель и идея исследования

Цель работы разработка методики и алгоритма расчета воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях с учетом тепловых депрессий при подземных пожарах, на основе комплексного учета параметров источника тепловыделения, характеристик наклонной выработки и особенностей воздухораспределения в вентиляционной сети рудника.

Основная идея работы заключается в анализе динамики конвективных потоков воздуха в пределах наклонных горных выработок, позволяющий определить критическую тепловую мощность источника тепловыделения и условия опрокидывания воздушного потока при наличии тепловой депрессии. Полученные результаты будут использованы для реализации алгоритма одномерного сетевого расчета воздухораспределения в вентиляционных сетях произвольной топологии с учетом тепловой депрессии интенсивного источника тепловыделения в наклонной выработке.

### Этапы исследования

Экспериментальное исследование процессов тепломасса-переноса в наклонных горных выработках в шахтных условия практически невозможно. В первую очередь из-за стихийности процесса возникновения очага возгорания и как следствие невозможности заранее разместить измерительное оборудование в месте пожара. Во-вторых, воздействие высоких температур, которые характеризуют подземные пожары накладывает серьезные ограничения не только на пребывание человека в подземной части рудника, но и на измерительные приборы, которые могут быть использованы в ходе замеров.

Одним из инструментов, позволяющих провести анализ процессов тепломассопереноса наклонной выработке при возвратных и частично-возвратных течениях, вызванных тепловой депрессией с учетом изменяемых характеристик вентиляционной сети,

геометрии горной выработки и характеристик источника, является трехмерное численное моделирование [8-10]. Однако для получения достоверных результатов необходима валидация трехмерной численной модели. В рамках данного исследования валидацию численной модели планируется выполнить с использованием экспериментальных данных, полученных на стенде, имитирующем наклонную горную выработку с источником тепловыделения.

Таким образом после валидации численная модель позволит получить зависимость теплового напора пожара от параметров горной выработки и источника тепловыделения и их влияние на устойчивость проветривания. Полученные зависимости будут использованы при решении задач расчета воздухораспределения в аварийных условиях в сетевой постановке.

### Разработка имитационного стенда

На этапе разработки имитационного стенда выделены следующие параметры, которые должны быть изменяемыми в ходе эксперимента, – это напор и расход источника тяги, угол наклона рассматриваемого участка, мощность источника нагрева, а также количество сопряжений выше и ниже источника нагрева. Имитационный стенд представляет собой систему стальных воздухопроводов размерами поперечного сечения 300 на 500, движение воздуха в которых осуществляется за счет канального вентилятора с возможностью регулирования его производительности. Вентилятор обеспечивает скорость воздушного потока от 0,5 до 3 м/с. Также в стенде предусмотрена возможность изменения угла наклона наклонной части участка трубопровода в диапазоне от  $-15$  до  $15$  градусов, что позволяет добиться имитации наклонной горной выработки с нисходящим и восходящим проветривания как в бремсберговой так и в уклонной части шахтного поля (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид геометрии имитационного стенда

Источник нагрева представляет собой каналный электрический калорифер с мощностью нагрева до 22 кВт и возможностью ее регулирования в заданном диапазоне. Дополнительно в конструкции предусмотрено два ответвления, выше и ниже источника нагрева, имитирующие сопряжения наклонной выработки с горизонтами.

### Предварительное численное моделирование, планирование эксперимента

Для корректного составления плана эксперимента, было выполнено предварительное численное моделирование в ПК ANSYS на геометрии, повторяющей геометрию планируемого стенда. Моделирование выполнялось для разных начальных скоростей от 0,5 до 3 м/с с шагом 0,5 м/с и различными углами наклона от  $-15^\circ$  до  $15^\circ$  с шагом 5 градусов. По результатам моделирования предварительно были выявлены участки трубопровода, в которых прогнозируется или изменение направления воздушного потока или частичное изменение с разнонаправленным движением потока. Также были определены сечения, в которых необходимо выполнять измерения параметров воздуха: скорости, температуры потока, а также давления. Измерению подлежит сечение между вентилятором и первым ответвлением, сечение первого ответвления, после первого перед нагревателем после нагревателя, второе ответвление и выход из трубопровода (рис. 3).

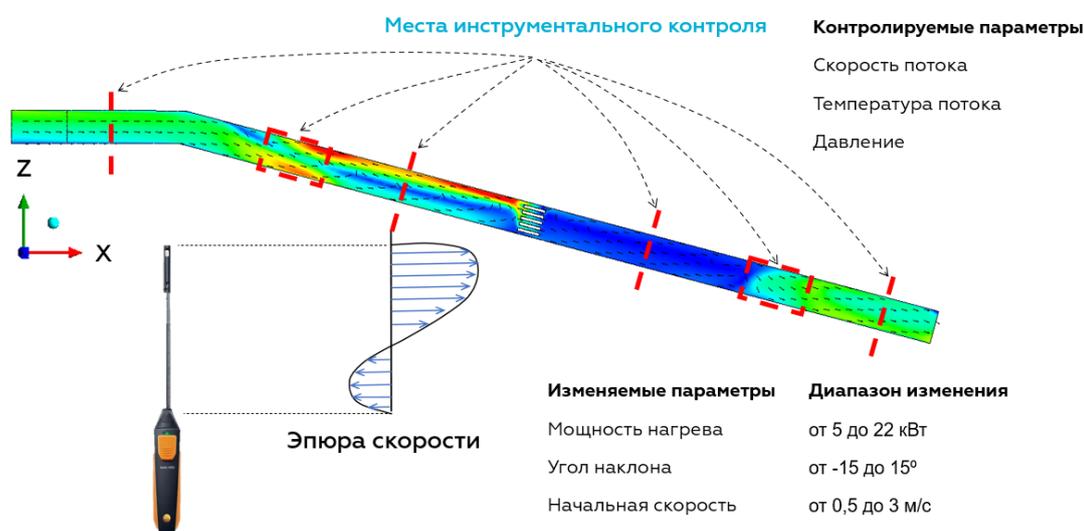


Рис. 3. Места инструментального контроля

Так как скорость и температура воздушного потока при нагреве по сечению неравномерна, особенно при наличии возвратных или частично возвратных течений, то измерения предполагается выполнять каналным термоанемометром с возможностью погружения его в среду на различную глубину, что позволит получить эпюры скорости во всех характерных сечения исследуемой геометрии.

### Результаты предварительного моделирования

Также для всех вариантов численного моделирования были построены графики изменения массового расхода на граничных поверхностях. На рис. 4 приведен пример одного из графиков, где пунктирной линией показан массовый расход до нагрева, а сплошными линиями изменение массового расхода в сечениях при нагреве при различных углах наклона участка трубопровода. Заштрихованные на графике области показывают зону, в которой происходит изменение направления движения воздушного потока при исследуемой начальной скорости.

По результатам моделирования получены зависимости взаимовлияния изменяемых параметров и интенсивности возвратных и частично возвратных потоков. Например в случае нисходящего проветривания при увеличении угла наклона и мощности нагрева интенсивность возвратных течений тоже возрастает, при этом увеличение начальной скорости приводит к уменьшению интенсивности возвратного течения.

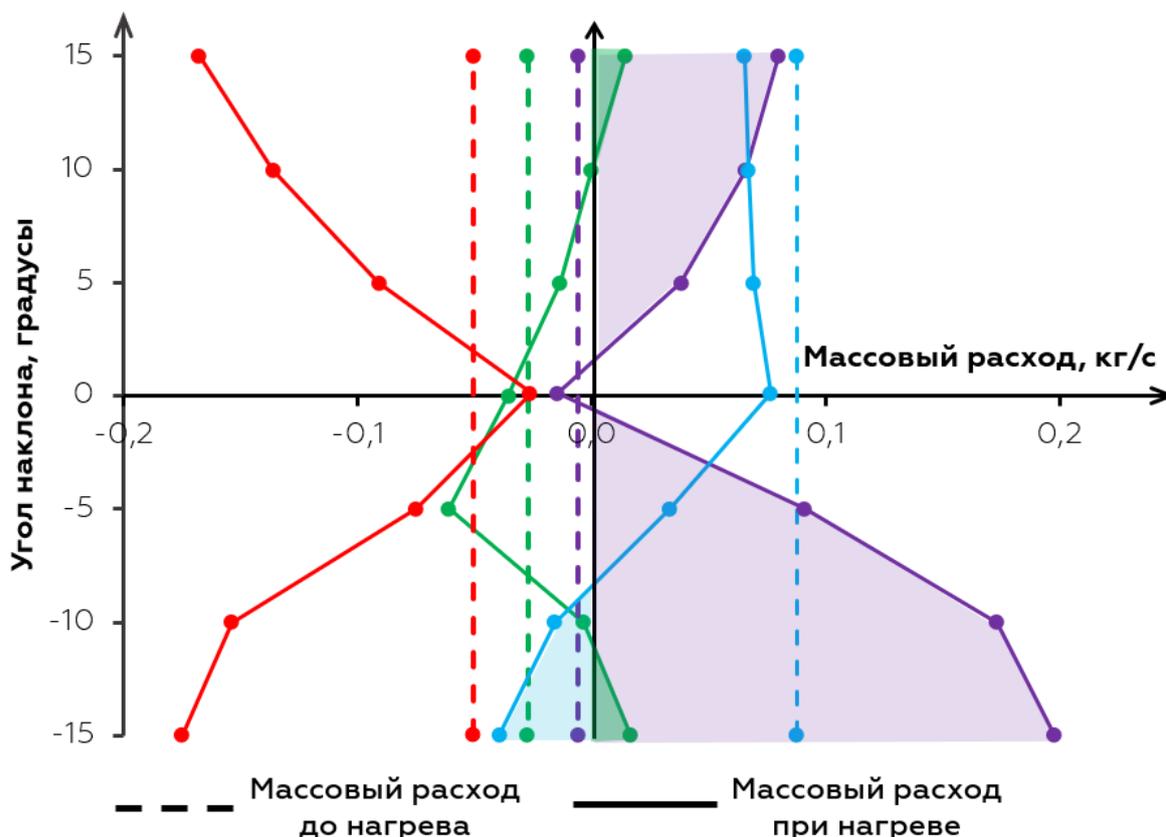


Рис. 4. График изменения массового расхода при нагреве

Полученные результаты моделирования позволили определить условия возникновения частично-возвратных течений воздуха, а также полного теплового «запирания» потока в наклонной части выработки. Эти результаты далее планируется использовать при составлении плана измерений на лабораторном стенде наклонной горной выработки, при подборе параметров работы вентиляционных устройств, входящих в состав стенда.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (проект № 124020500030-7).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы»: утв. 11.12.2020, № 520. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573140267>. Дата обращения (15.05.2024).
2. Гришин Е.Л. Научное обоснование способов повышения надежности вентиляционных сетей подземных рудников: дис. ... к.т.н.; 25.00.20 / Гришин Евгений Леонидович. – Пермь, 2013. – 133 с.
3. Гришин Е.Л., Кормщиков Д.С., Левин Л.Ю. Использование результатов теплогазодинамического расчета при анализе аварийных ситуаций и разработке плана ликвидации аварий в аналитическом комплексе «АэроСеть» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 9. – С. 185-189.
4. Попов М.Д., Кормщиков Д.С., Семин М.А., Левин Л.Ю. Расчет устойчивости воздушных потоков в горных выработках по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе «Аэросеть» // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 10. – С. 24-32. – DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-24-32.

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].