

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.253.3

DOI:10.7242/echo.2025.1.10

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУР ЗАКРЕПНОГО ПРОСТРАНСТВА ПРИ РАЗМОРАЖИВАНИИ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ

А.В. Пугин, А.И. Кузнецов, К.М. Агеева

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Искусственное замораживание горных пород обеспечивает надежную защиту шахтного ствола при проходке от проникновения подземных вод и разрушения стенок под действием внешней нагрузки. Завершающей стадией строительства в интервале водоносных горизонтов является гидроизоляция горной выработки. Помимо возведения тюбинговой крепи и чеканки ее стыков, для отведения воды от ствола и консолидации нарушенного массива за крепью требуется выполнение тампонажа. Необходимым условием для начала тампонажных работ является полное размораживание породы, примыкающей к крепи, и ее нагрев до температуры, обеспечивающей быстрое отверждение тампонажного раствора в порово-трещинном пространстве. Контроль температур крепного пространства производится путем измерений в контрольно-термических шпурах, пробуренных через крепь ствола. В статье приводятся два типа датчиков температуры, разработанных специалистами института, позволяющих а) полностью автоматизировать измерительный процесс и б) сделать его условно непрерывным во времени (с заданной частотой замеров), организовав тем самым полноценный мониторинг состояния породного массива. Рассматриваются преимущества и недостатки, возможности и ограничения в применении каждого типа датчиков при различных технологических условиях строительства шахтных стволов.

Ключевые слова: искусственное замораживание, размораживание, ледопородное ограждение, гидроизоляция ствола, тампонаж, датчики температуры.

Процесс размораживания ледопородного ограждения (ЛПО) является наиболее ответственным этапом строительства. Деградация ЛПО означает проверку надежности всех систем крепления и гидроизоляции строящейся горной выработки, созданных строителями под защитой замороженного массива. К этому времени проходка ствола в интервале водоносных горизонтов завершена, а его стенки закреплены передовым бетоном. Работы по монтажу и чеканке стыков тюбинговой крепи завершены или близятся к завершению. В отсутствие сплошного и прочного ЛПО крепь принимает на себя все защитные функции, и дефекты ее строения могут привести к фатальным последствиям.

Важной процедурой на данном этапе является тампонаж крепного пространства, имеющий целью отведение подземных вод от крепи ствола и консолидацию примыкающего к ней породного массива, нарушенного процессами проходки, замораживания и оттаивания.

Основными условиями, определяющими готовность массива за крепью ствола к производству тампонажных работ, являются (а) полное размораживание породы за крепью на расстояние 1,0 м – формирование зоны оттаивания, (б) нагрев породы в зоне оттаивания до положительной температуры, обеспечивающей быстрое отверждение цементного тампонажного раствора в порово-трещинном пространстве, и (в) сохранение сплошности ледопородного ограждения за пределами зоны оттаивания. Сохраняющее сплошность ледопородное ограждение выполняет роль экрана, не допускающего утечку тампонажного раствора за пределы зоны оттаивания, и тем самым его перерасхода.

Готовность закрепного пространства к тампонажу определяется замерами температуры породы, примыкающей к передовой бетонной крепи. Через технологические отверстия в тубинговой крепи производится бурение шпуров, в которых производятся периодические замеры температуры погружным термометром. Процедура достаточно трудоемкая и неудобна в исполнении, учитывая, что доступ к шпuru осуществляется с малой бадьи, предназначенной для спуска-подъема горнорабочих, или с большого бадьевого сосуда, используемого для перемещения отбитой породы.

В период с 2018 по 2023 годы специалистами «ГИ УрО РАН» разработаны и успешно апробированы на практике два типа термометрических датчиков, позволяющих автоматизировать процесс измерений температуры в шпурах, сделать его «условно непрерывным» (измерение и передача данных конечному пользователю выполняются с заданной периодичностью, соответствующей скорости растепления массива), повысив частоту наблюдений и снизив трудозатраты.

Первый тип датчиков основан на оптоволоконной технологии распределенных измерений температуры (DTS – Distributed Temperature Sensing) и передачи данных по оптическому каналу на поверхность. Принципы оптоволоконной технологии широко описаны в литературе [1]. Современные DTS регистраторы позволяют снимать значения температуры с разрешением 0,25-0,50 м по длине оптоволоконного кабеля при протяженности линии до 5 км.

Глубина термометрического шпура, пробуренного в крепи ствола, обычно не превышает 2,0-2,5 м. Особая конструкция датчика позволяет повысить детальность измерений до 0,05 м, увеличив при необходимости количество точек замера до 50 на один шпур. Обычно такая детальность является избыточной, поэтому шаг измерений выбирается в пределах 0,10-0,15 м.

Конструктив разработанного оптоволоконного датчика, представленный на рисунке 1, ранее был описан в литературе [2, 3] и запатентован [4]. Чувствительным элементом (сенсором температуры) является оптическое волокно в тонкой металлической оболочке, заполненной гелем, навитое на направляющую стальную трубу. Собственно, повив кабеля и обеспечивает повышение пространственной разрешающей способности, поскольку 25-сантиметровый участок оптоволоконного кабеля, навитый на 10-сантиметровый участок направляющей трубы и обеспечивает измерение температуры с данного 10-сантиметрового участка термометрического шпура. Ограничение детальности определяется допустимой кривизной изгиба оптоволоконного кабеля.

Защиту кабеля от внешнего механического воздействия гарантирует стальная гильза (пенал). Обеспечивается плотное примыкание оптоволоконного кабеля к гильзе изнутри датчика, а высокая теплопроводность материалов приводит к пренебрежительно малой величине тепловой инерции измерений во времени и сглаживания в пространстве.

При термометрическом контроле размораживания ЛПО температурные датчики закладываются на нескольких отметках глубины в соответствии с гидрогеологическими особенностями разреза на участке строительства ствола, могут устанавливаться как в тубинги, так, при необходимости, и в передовую бетонную крепь. Контролю подлежат все водоносные слои, а также отдельные слои горных пород, демонстрирующие аномальную динамику замораживания – более быструю или медленную относительно большинства пород в разрезе.

Датчики данного типа внутри ствола объединяются в линию последовательным соединением при помощи магистрального оптоволоконного кабеля и далее соединяются с находящимся на поверхности DTS регистратором. Структурная схема измерительного комплекса представлена на рисунке 2.

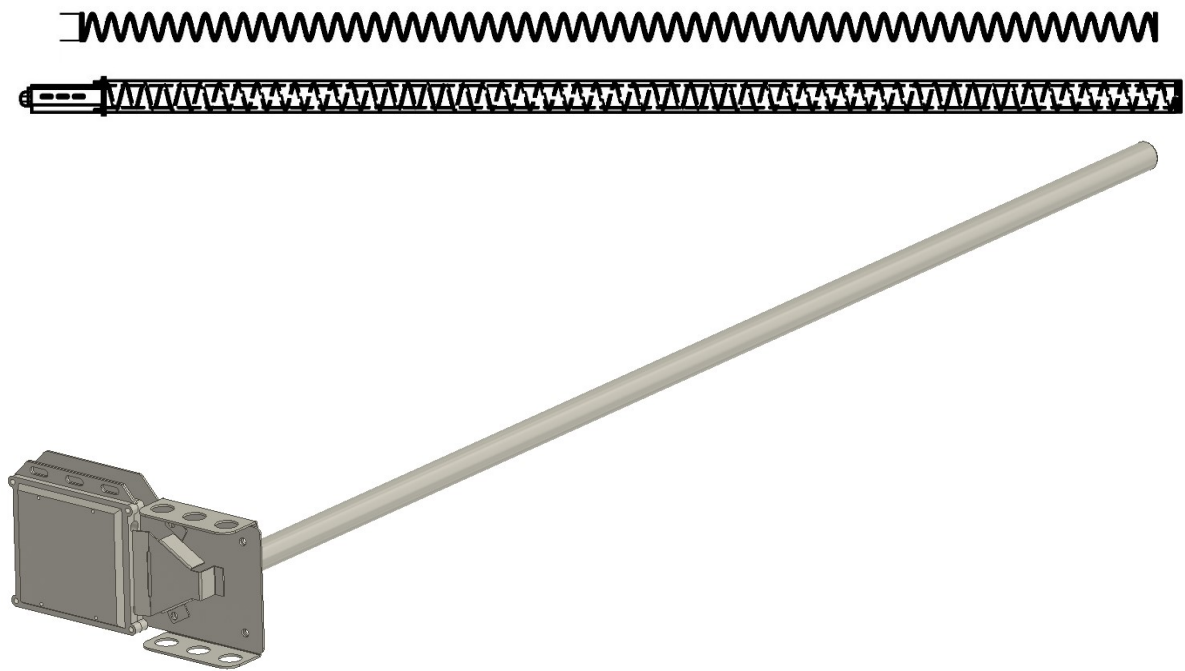


Рис. 1. Конструкция оптоволоконного датчика для измерения температур в шпуре.
Сверху-вниз: повитое спиралью измерительное оптоволоконно;
вертикальный разрез датчика (вид сбоку) и внешний вид (2-е поколение)

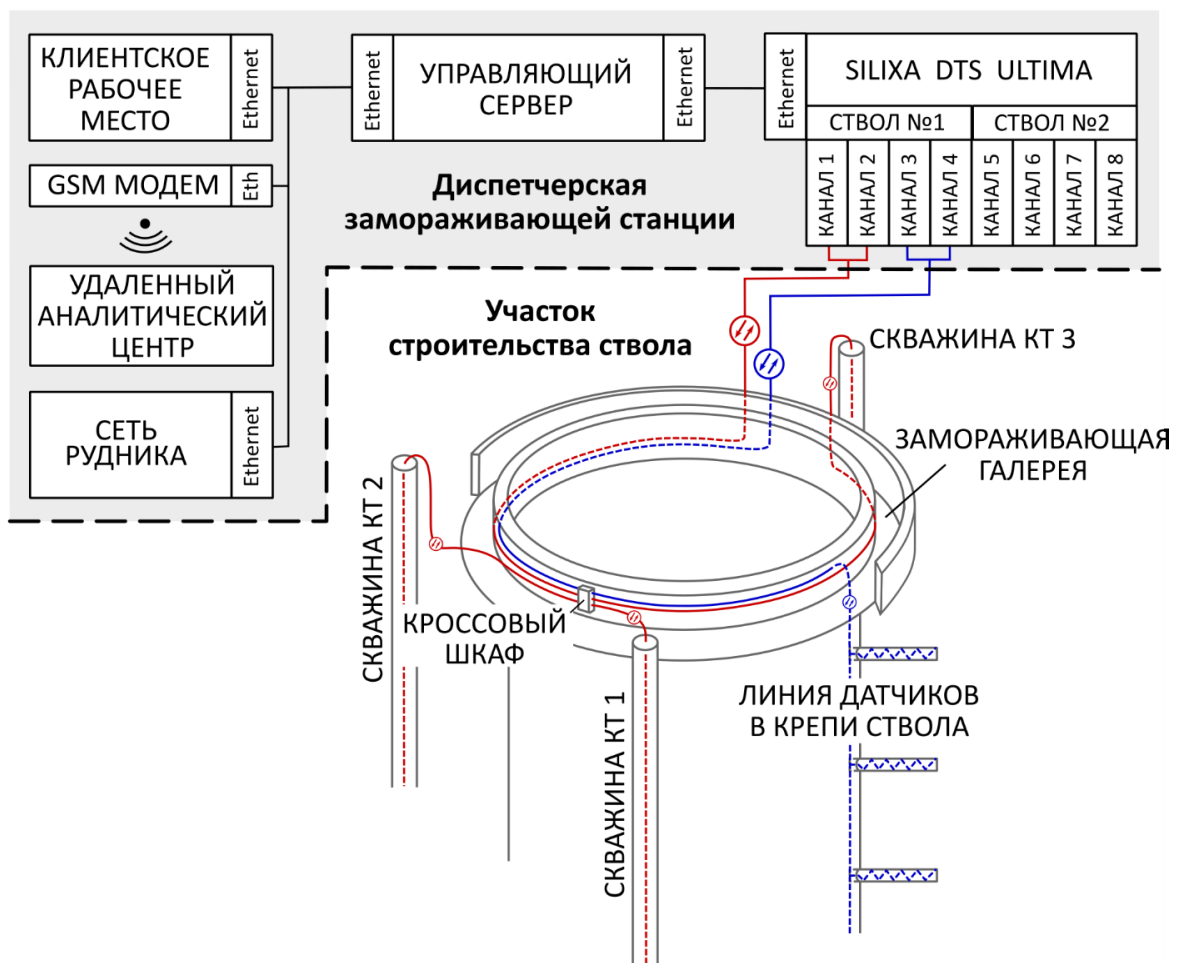


Рис. 2. Структурная схема измерительного оптоволоконного комплекса

Используемый специалистами института DTS регистратор Silixa Ultima производства Великобритании позволяет использовать двухканальный режим измерений. Внутри кабеля проложено два оптических волокна, подключенных к двум каналам регистратора. На крайнем снизу датчике линия закольцована и оптические волокна соединены между собой.

Регистратор с заданной периодичностью подает лазерный импульс в оптоволокну сначала через один оптический канал, затем через другой, то есть импульс проходит по линии дважды – в прямом и обратном направлении. Обратно рассеянное излучение, возникающее на микроструктурных неоднородностях оптоволокну, регистрируется DTS регистратором в качестве полезного сигнала и пересчитывается в температуру. Сложение прямого и обратного сигналов позволяет компенсировать их затухание по длине линии, повысив тем самым точность измерения температуры.



Рис. 3. Оптоволоконные датчики 1-го поколения (Петриковский ГОК)

В случае повреждения магистрального оптоволокну строительными работами в стволе измерения быстро переводятся в одноканальный режим и продолжаются на всех датчиках, расположенных выше места обрыва линии. После восстановления целостности линии измерения вновь могут быть продолжены в двухканальном режиме с участием всех датчиков.

Недостатком данного типа датчиков является необходимость проложения оптоволоконной линии по стенке ствола и некоторая сложность процесса монтажа. Перед установкой в шпуров гирлянда (линия) датчиков аккуратно раскладывается на верхнем этаже монтажной платформы (полка). Магистральный оптоволоконный кабель заводится через отверстие в стенке форшахты в галерею замораживающих колонок, где обычно располагается кроссовый шкаф с коммутационной коробкой для подключения к внешнему каналу, следующему до DTS регистратора.

При движении монтажной платформы сверху вниз производится постепенная размотка гирлянды и установка датчиков в заранее подготовленные термометрические шпуров. Магистральный кабель прочно закрепляется на поверхности тубингов, что практически исключает его повреждение движущимся полком, бадьевыми механизмами или перемещаемыми грузами.

Калибровка всей линии датчиков производится одновременно по нескольким контрольным замерам по аналогии с измерительным оптоволоконным, погруженным в контрольно-термическую скважину.

При значительной глубине замораживания длина оптоволоконной линии получается большой, что представляет проблему в плане размещения на монтажном полке и монтажа в целом. Датчики данного типа успешно использовались для контроля размораживания ЛПО строящихся стволов Петриковского ГОК (рис. 3) и Дарасинского рудника (рис. 4) ОАО «Беларуськалий» с глубинами замораживания 297 м и 187 м.



Рис. 4. Оптоволоконные датчики 2-го поколения (Дарасинский рудник)

Второй тип датчиков – цифровой – в качестве измерительного элемента использует цифровые термометры, объединенные в термокосу. Соединение датчиков параллельное, поэтому выход из строя отдельного чувствительного элемента не влияет на работоспособность остальных. Нижний предел детальности измерений по глубине шпура меньше, чем у оптоволоконных датчиков, и ограничивается диаметром шпура, определяющим суммарную толщину термокосу и, соответственно, количество цифровых термометров в шпуре.

Принципиальная схема измерительной системы, включающей данный тип датчиков, представлена на рисунке 5. Каждый датчик оборудован антенной и микроконтроллером (рис. 6), выводящим его по расписанию из «режима сна», считывающим показания и запускающим передачу данных по радиоканалу на станцию сбора данных, установленную на устье ствола. По окончании передачи данных датчик вновь вводится в «режим сна» в целях экономии электропитания, которое осуществляется от аккумуляторной батареи. Конструкция датчика обеспечивает степень защиты IP68.

Станция сбора данных расположена на устье ствола, подключена к электросети рудника и всегда активна в ожидании приема радиосигнала. Передача данных с нее на сервер осуществляется по кабелю через RS-485 интерфейс.

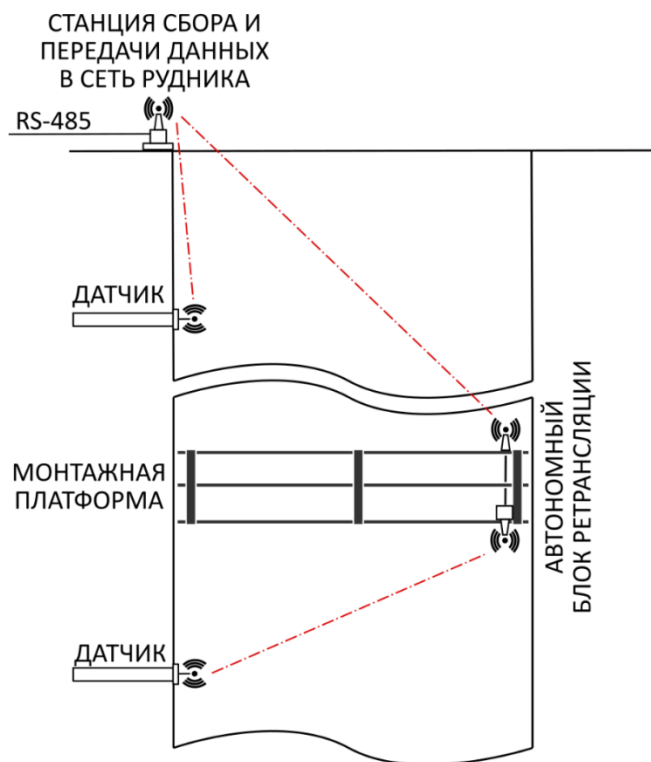


Рис. 5. Принципиальная схема измерительного цифрового комплекса с передачей данных по радиоканалу

Монтажная платформа, движущаяся вверх-вниз по стволу, является экраном для радиосигнала. Проблема передачи данных с датчиков, оказавшихся ниже платформы, решается установкой на нем ретранслятора, приемная антенна которого выводится под нижний этаж полка, а передающая устанавливается на верхнем этаже. Передача данных между антеннами ретранслятора (между этажами полка) осуществляется по кабелю, а питание всего блока – от аккумуляторных батарей. При наличии в стволе двух полков при необходимости ретрансляторы устанавливаются на каждом из них.

Необходимо отметить, что датчики первого типа, оптоволоконные, конструктивно были исполнены таким образом, что вводились в шпур без герметизации входного от-

верстия. Вода, поступающая из талой породы, свободно вытекала из шпура, сочилась по стенке тубинга и собиралась в забое ствола. Это способствовало повышению общей влажности воздуха в стволе и образованию капежа, что в некоторой степени осложняло условия труда горнорабочих. Поэтому для датчиков второго типа был разработан специальный вид закладной с резьбовым соединением (рис. 7, в центре) по аналогии с «пробкой», перекрывающей технологическое отверстие в тубинге. Закладная оборудовалась герметичным вводом для выпуска кабеля, соединяющего датчик и внешний микроконтроллер. Разработанные закладные доказали свою герметичность в реальных условиях при гидростатическом давлении более 70 атм.

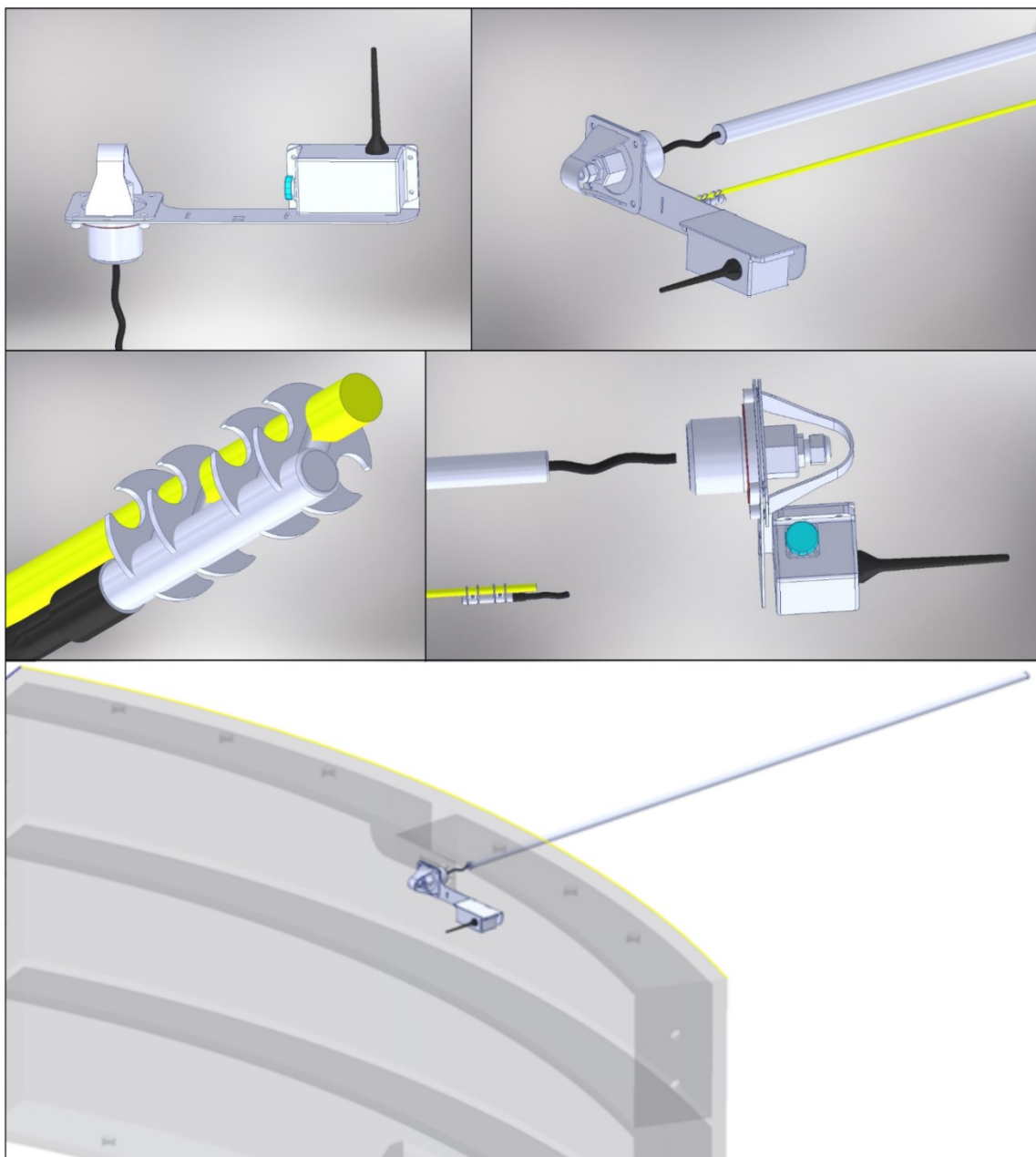


Рис. 6. Элементы конструкции и внешний вид цифрового термометрического датчика

Датчики не требуют калибровки в процессе монтажа. Высокие требования к влагозащищенности цифровых термометров, работающих на слабых электрических токах (слаботочные системы), налагают сложности в обеспечении той самой защиты, по-

сколько давление подземных вод, воздействующее на датчик при размораживании ЛПО, может достигать нескольких десятков атмосфер. Преимуществами датчиков второго типа являются простота монтажа, отсутствие соединяющего их кабеля и независимость друг от друга в плане отказа.



Рис. 7. Цифровые термометрические датчики на строящемся шахтном стволе Гремячинского ГОКа. Сверху-вниз: приемник станции сбора данных на устье ствола, внешний вид датчиков с радиомодулями и датчик, установленный в тубинговой крепи

Датчики данного типа удобно использовать при значительной глубине замораживания. Они показали высокую эффективность при измерении температур крепи и закрепного массива на одном из строящихся стволов Гремячинского ГОКа (рис. 7) с глубиной замораживания 840 м. При этом нижние датчики располагались на глубине 770-780 м от нулевой отметки ствола и успешно передавали данные по радиоканалу, несмотря на большое количество металла (чугунные тубинги, направляющие, бадьевые сосуды, вентиляционный трубопровод и пр.) и перемещающийся монтажный полук. Срок функционирования отдельных датчиков составил более 1 года, что подтверждает надежность конструкции.

Представленные разработки дополняют друг друга и могут быть использованы в различных горнотехнических условиях не только при строительстве шахтных стволов, но и в любых исследованиях, связанных с контролем температур породного массива. Показания датчиков обоих типов используются при калибровке теплофизической модели с целью повышения достоверности математических расчетов и корректности выполняемых оценок температурного состояния ЛПО. Температурные поля, восстановленные с опорой на натурные измерения, служат отправной точкой для выдачи заключений о готовности интервала разреза к производству тампонажных работ.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hartog, A.H. An introduction to distributed optical fibre sensors. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 472 p.
2. Levin L., Golovaty I., Zaitsev A., Pugin A., Semin M. Thermal monitoring of frozen wall thawing after artificial ground freezing: Case study of Petrikov Potash Mine // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2021. – V. 107. – № статьи 103685. – DOI 10.1016/j.tust.2020.103685.
3. 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. – V. 18, – номер статьи 100710. – DOI: 10.1016/j.clet.2023.100710.
4. Сквжинный оптоволоконный датчик непрерывного контроля температуры: Пат. 038447 Евразийское патентное ведомство (ЕПВ): E21B 47/07 (2012.01)... / Головатый И.И., Барбиков Д.В., Зайцев А.В., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Пугин А.В., Семин М.А., Дьяконов А.С.; заявитель и патентообладатель: ОАО «Беларуськалий», ПФИЦ УрО РАН. – № 2019000097; заявл. 06.09.2019; опубл. 30.08.2021. Бюл. № 8. – 4 с.