

УДК 622.261:622.363

**МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИИ БЕТОННОЙ КРЕПИ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ
С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ**

В. В. Тарасов¹, В. Н. Аптуков^{1,2}

¹АО “ВНИИ Галургии”, E-mail: Vladislav.Tarasov@uralkali.com,
ул. Сибирская, 94, 614000, г. Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет,
E-mail: Aptukov@psu.ru, ул. Букирева, 15, 614000, г. Пермь, Россия

Рассмотрены известные методы мониторинга бетонной крепи шахтных стволов и предложен способ проведения оперативных замеров перемещений внутренней поверхности бетонной крепи ствола, основанный на лазерном сканировании. Представлены результаты предварительной фильтрации и последующей обработки конкретных мониторинговых измерений двух стволов ПАО “Уралкалий” в виде оценки изменения диаметра ствола, окружной деформации, показателя эллипсности. Данные мониторинга могут эффективно использоваться для верификации математических моделей при численных расчетах деформаций и оценки прочности бетонной крепи ствола, в том числе в области сопряжений с горизонтальными выработками.

Лазерное сканирование, геомониторинг, шахтный ствол, бетонная крепь, оценка деформаций, оценка состояния крепи

DOI: 10.15372/FTPRPI20220518

В пределах Пермского края на площади распространения калийных запасов Верхнекамского месторождения солей (ВКМС) действует большое количество калийных рудников, на каждом из которых функционируют вертикальные стволы [1, 2]. Поскольку средний срок службы калийных рудников составляет 50–70 лет, геомеханический мониторинг состояния крепи вертикальных стволов — актуальная задача, требующая постоянного внимания горнотехнического персонала рудника. Это обусловлено тем, что породный массив совместно с производственными объектами горнодобывающих предприятий представляет собой сложную физико-механическую систему, прогнозирование поведения которой нуждается в постоянном наблюдении с использованием корректируемых математических моделей [3].

Цель проведения мониторинга в шахтных стволах — наблюдение и своевременное выявление тенденций негативного изменения геометрических параметров крепи с дальнейшей оценкой несущей способности системы “крепь ствола – породный массив”. Последнее — предмет натурных исследований с определением фактических изменений геометрических параметров монолитной бетонной крепи эксплуатационного ствола с последующей оценкой текущего напряженно-деформированного состояния [4].

В соответствии с проектами проходки и крепления в соляной части разреза большинство шахтных стволов на ВКМС закреплены монолитной бетонной крепью. Как показывает практика, принятие подобных проектных решений весьма неэффективно, так как монолитная бетонная крепь, расположенная в соляной части разреза, не способна долгое время сдерживать нагрузку от постоянно деформирующегося соляного массива [5]. Причина — горное давление, под действием которого соляные породы испытывают необратимые деформации без видимого разрушения (неограниченная ползучесть). Такое явление широко распространено, однако при проектировании шахтных стволов на Верхнекамском месторождении в 1960–1970 гг. для соляной части разреза была выбрана жесткая монолитная бетонная крепь, а возведение примыкающих к стволу сопряжений в соляных породах выполнено как одно целое с вертикальной кольцевой крепью стволов. По этой причине спустя 5–7 лет после ввода шахтных стволов в эксплуатацию вследствие деформации соляного массива начали развиваться процессы трещинообразования бетона и разрушения монолита крепи вертикальных стволов. С целью минимизации непрекращающихся процессов разрушения крепи службой горнотехнического персонала рудника осуществлены локальные ремонтные работы по восстановлению целостности бетонной крепи ствола.

Деформация бетонной крепи вертикальных стволов проявляется на отдельных участках в виде отслоений, трещин, заколов и вывалов, которые часто происходят одновременно с вывалами прилегающих к ним нарушенных горных пород, например карналлита или глины. В этой связи постоянно возникают трудности в проведении своевременного контроля для наблюдений за деформациями вертикальности бетонной крепи шахтных стволов, особенно на глубине более 300 м.

В настоящее время для оценки текущего состояния несущих конструкций шахтных стволов используются разные методы инструментальных измерений [6, 7]: профилирование шахтных стволов с помощью отвесов; струнных датчиков деформации; лазерных сканирующих систем; волоконно-оптических датчиков деформации, выполненных на основе волоконных брэгговских решеток.

Для контроля геометрических параметров вертикальности проводников и стенок шахтных стволов широко применяются мерная рейка и отвес [7]. Данный способ подразумевает спуск в ствол отвесов (металлическая проволока или трос), расположенных на расстоянии 20–30 см от стенок шахтного ствола. С помощью рейки определяют расстояние между отвесами и соответствующим элементами крепи. Это устаревший, трудоемкий и недостаточно точный метод оценки радиальных перемещений проводников и стенок ствола, к тому же выполнение этих работ в стволе небезопасно для исполнителей.

Струнные датчики используются для измерения деформаций, возникающих в элементах различных строительных конструкции. В основе работы прибора — принцип колеблющейся струны, которая меняет собственную частоту колебаний в зависимости от силы натяжения. Струна из высокопрочной металлической проволоки закрепляется по обоим краям датчика в концевых блоках. Блоки крепятся на поверхности конструкции в монтажных хомутах, таким образом струна находится в механическом контакте с установочными хомутами датчика. При деформации поверхности хомуты перемещаются относительно друг друга, изменяя силу натяжения струны. Основной недостаток применения струнных датчиков — измерение деформаций возможно только на локальных участках крепи ствола.

Волоконно-оптические датчики — это приборы, предназначенные для фиксации изменения рабочих показателей системы и трансляции сигнала по оптоволоконному каналу. Они используются для отслеживания температуры и механического напряжения, а также для контроля давления, вибрации и других показателей. В основе датчиков такого типа лежит оптическое волокно. Общий принцип работы всех категорий данных устройств: световое излучение перемещается по оптоволокну, при этом его параметры меняются в брэгговских решетках. При механическом и температурном воздействии волоконные брэгговские решетки определяют относительную деформацию и изменения температуры. Внедрив волоконно-оптические сенсоры в структуру сооружений шахтных стволов, можно отслеживать изменение их состояния в течение времени, собирая на центральном пункте слежения большое число измерений.

Выбор методов измерений обусловлен техническими возможностями, надежностью эксплуатации, долговечностью и материальными затратами.

МЕТОД ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

В настоящее время лазерное сканирование применяется в маркшейдерско-геодезических работах: топографическая съемка, создание 3D-моделей горных выработок, мониторинг деформаций, создание съемочного и опорного обоснования, сканирование подземных полостей и решение других инженерно-геодезических задач [6–9].

Для определения геометрических параметров бетонной крепи скипо-клетевого (№ 1) и скипового стволов (№ 2) ПАО “Уралкалий” рассмотрен результат исследования с использованием переносного лазерного сканера модели Leica RTC360 со скоростью сканирования до 2 млн точек в секунду, дальность действия 130 м, точность $\pm 0.1^\circ$, разрешение 3D-сканирования 6 мм на 10 м. Лазерный сканер состоит из трех камер по 36 Мпикс и выполняет захват панорамного изображения $360 \times 360^\circ$, время сканирования 2 мин [10].

Основные элементы лазерного сканера — лазерный дальномер и механическая система развертки направления визирования. Важная часть методики съемки — решение задачи внешнего ориентирования результатов измерений. Для привязки сканпозиций использовались плоские отражающие марки на магнитах, так как они без труда закрепляются на расстрелах. Для одной сканпозиции закреплялось не менее пяти марок, на максимальных расстояниях друг от друга и на разных высотах, что позволяет минимизировать ошибку привязки сканера к местной системе координат. Точность сшивки сканов напрямую зависит от точности измерений на эти марки, типа марок и геометрии фигуры [11].

Правильная установка сканирующей системы и оборудования в клетки — один из важнейших этапов сканирования ствола. Как правило, сканер устанавливается на смотровую площадку подъемного сосуда либо через технологическое отверстие в днище клетки, а при его отсутствии можно изготовить и приварить кронштейн к днищу клетки. Полученная информация заносится в базу данных и совмещается с эталонной моделью ствола. В результате выполнения сканирования получается плотное облако точек, с высокой точностью повторяющее форму горной выработки.

В процессе сканирования бетонной крепи ствола можно зафиксировать дефекты, относящиеся к разным конструктивным элементам инфраструктуры ствола. Каждый из зафиксированных дефектов имеет разную степень тяжести, требует немедленного ремонта или определенного времени для его устранения.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА

По представленной выше методике обследована бетонная крепь шахтных стволов № 1 (апрель 2021 и 2022 гг.) и № 2 (апрель 2022 г.) ПАО “Уралкалий” в диапазоне глубин 305–385 м. Бетонная крепь на этих глубинах пересекает породные слои каменной соли, карналлита, сильвинита, подстилающей каменной соли и маркирующей глины.

Данные обработки мониторинговых измерений геометрии внутренней поверхности ствола после предварительной фильтрации представлены в виде диаграмм радиальных перемещений U_r в горизонтальных сечениях ствола (с шагом 1 м по высоте) с шагом по углу $\sim 3.5^\circ$ относительно некоторой начальной идеальной окружности (рис. 1).

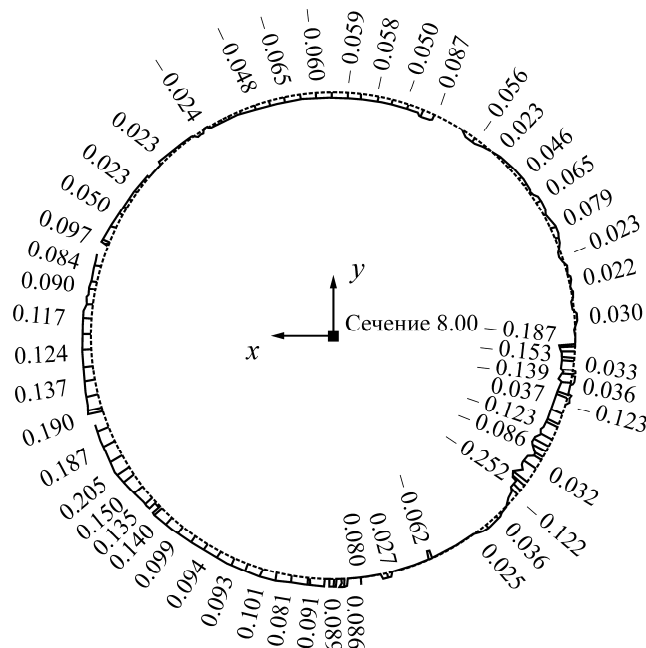


Рис. 1. Диаграмма измерений радиальных перемещений внутренней поверхности ствола

Для правильной обработки полученных данных мониторинга необходимо определить фактические начальные размеры выработки — диаметр ствола и толщину бетонной крепи по различным направлениям и в различных сечениях. В табл. 1 приведены начальные размеры внутреннего диаметра ствола № 1 в различных направлениях и сечениях.

ТАБЛИЦА 1

Отметка, м	Ярус	D (юг-сев), м	D (зап-вост), м	D (юв-сз), м	D (юз-св), м
312.0	103–104	7.09	7.14	7.12	7.13
319.0	105–106	7.12	7.11	7.11	7.14
327.0	108–109	7.10	7.10	7.10	7.09
335.5	111	7.11	7.11	7.14	7.09
343.0	113–114	7.11	7.11	7.09	7.14
351.0	116	7.12	7.11	7.05	7.14
359.0	120	7.13	7.11	7.05	7.10
367.0	122	7.11	7.08	7.11	7.07
375.0	125	7.10	7.09	7.12	7.09
383.0	127	7.12	7.13	7.11	7.10
Среднее		7.11	7.11	7.10	7.10

Средний внутренний диаметр ствола в чистоте может быть принят равным 7.105 м, что на 105 мм больше номинального (проектного) размера 7.0 м (табл. 1). Минимальное значение 7.05 м (уровень – 351 и 359 м, направление юго-восток–северо-запад) достигается ниже уровня глубин проведенных измерений. Максимальное значение 7.140 м достигается на нескольких уровнях. Наибольшие среднеквадратичные отклонения диаметров ствола наблюдаются в направлениях юго-восток–северо-запад и юго-запад–северо-восток, минимальные отклонения — в направлении юг-север. Аналогичные расхождения отмечаются и в значениях толщин бетонной крепи, следуя маркшейдерским измерениям при строительстве ствола. В табл. 2 приведены значения толщин бетонной крепи ствола № 2 по восьми направлениям на некоторых отметках глубин. Средние значения толщин (без учета утолщенных участков на отметках – 360.8 и – 382.0 м) составляют от 0.57 (север) до 0.64 м (северо-запад и северо-восток).

ТАБЛИЦА 2

Отметка, м	Ярус	h , сев	h , сев-зап	h , зап	h , юг-зап	h , юг	h , юг-вост	h , вост	h , сев-вост
305.9	72	1.55	1.45	1.50	1.59	1.45	1.65	1.60	1.61
314.0	74	0.74	0.75	0.90	0.84	0.84	0.90	0.84	0.78
323.0	76	0.68	0.83	0.44	0.54	0.69	0.60	0.57	0.77
333.0	78	0.53	0.62	0.52	0.62	1.03	0.48	0.49	0.54
341.0	80	0.62	0.77	0.65	0.46	0.47	0.75	1.02	0.73
350.0	82	0.60	0.63	0.67	0.63	0.41	0.43	0.44	0.56
360.8	85	1.25	1.39	1.37	1.52	1.43	1.35	1.40	1.32
369.0	88	0.36	0.44	0.43	0.50	0.57	0.46	0.54	0.51
375.0	89	0.47	0.46	0.55	0.44	0.54	0.43	0.46	0.56
382.0	91	1.40	1.31	1.21	1.51	1.40	1.35	1.39	1.46

Минимальное значение толщины бетонной крепи 0.36 м зафиксировано на отметке – 369 м в северном направлении, наибольшие отклонения толщин бетонной крепи ствола наблюдаются в направлении восток (0.221) и юг (0.220), наименьшие — северо-восток (0.118) и север (0.129).

С помощью данных радиальных перемещений внутренней поверхности ствола, представленных на рис. 1, и с учетом начальных значений диаметров ствола (табл. 1) можно получить фактические изменения диаметров ствола по различным (в нашей обработке — четырем) направлениям. Представляет интерес относительное изменение диаметров ΔD по отношению к начальным значениям D_0 , поскольку по ним можно оценить окружную деформацию ε_θ на поверхности ствола:

$$\varepsilon_\theta = \frac{U_r}{R} = \frac{\Delta D}{D_0},$$

где U_r — радиальное перемещение; R — радиус ствола [12].

На рис. 2 приведены результаты обработки мониторинговых данных в виде средней по четырем направлениям в сечении окружной деформации на внутренней поверхности бетонной крепи в зависимости от номера яруса для ствола № 2. В некоторых сечениях окружная деформация поверхности бетонной крепи ствола в 2–3 раза превышает предельное по Своду правил (СП) значение деформации [13], а также уровни деформаций, полученных в [14]. В пластическом состоянии находится бетонная крепь на ярусах 80–82, 84, 89, в состоянии разрушения — на ярусах 75–77, 85, 91.

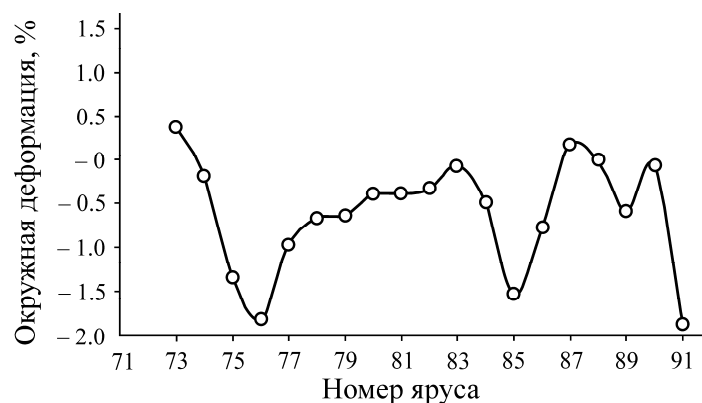


Рис. 2. Зависимость средней окружной деформации от номера яруса (ствол № 2)

Сопоставление полученных оценок с данными натурных измерений состояния поверхности бетонной крепи ствола показало, что на ярусах 75–78 зафиксированы вывалы с заколами и сериями трещин, закрепленные анкерами. На ярусе 85 — незначительное выкрашивание, однако деформация крепи может быть значительной, поскольку ярус находится над вентиляционной сбойкой. На ярусе 91 зафиксированы значительные вывалы и заколы, укрепленные стальным листом на анкерах. В прогнозируемых областях развитой пластической деформации: на ярусах 80–82 наблюдается увлажнение и выкрашивание бетона; вблизи яруса 84 — увлажнение и выкрашивание, а также заколы, закрепленные анкерами; на ярусе 89 — заколы и вывалы.

На рис. 3 представлены результаты обработки мониторинговых данных в виде средней по четырем направлениям в сечении окружной деформации на внутренней поверхности бетонной крепи в зависимости от номера яруса для ствола № 1. Отметим, что почти во всех сечениях наблюдается увеличение окружной деформации при переходе от 2021 к 2022 г.

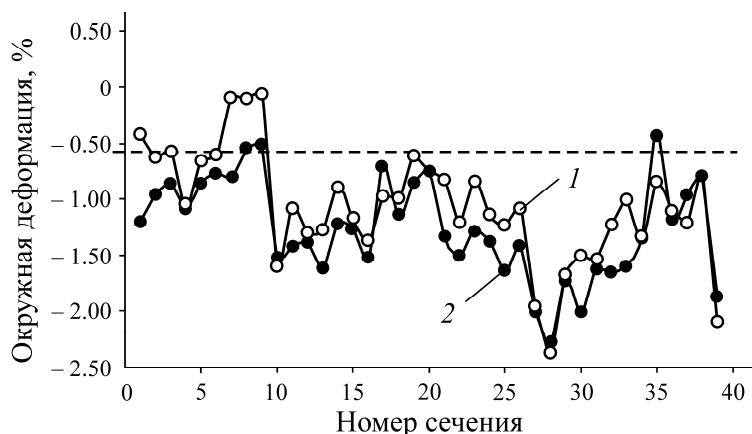


Рис. 3. Зависимость средней окружной деформации от номера яруса: 1 — 2021 г.; 2 — 2022 г.

Среднее увеличение средней окружной деформации по всем сечениям за один год составляет $\sim 0.2\%$. Если перейти к абсолютному уменьшению диаметра крепи ствола, то в течение рассматриваемого периода времени оно составило по разным направлениям: 12 мм (юг-север), 3 мм (запад-восток), 30 мм (юго-восток – северо-запад), 12 мм (юго-запад – северо-восток). Среднее абсолютное уменьшение диаметра крепи ствола составило по всем сечениям и направлениям 14 мм.

Большие изменения диаметра говорят о наличии разрушений практически по всей внутренней поверхности крепи ствола. Речь идет об оценке радиальных перемещений внутренней поверхности бетонной крепи ствола, оценить деформацию ее внешней части, граничащей с породным массивом, а также уровень напряжений в крепи можно только с привлечением методов математического моделирования.

Данные мониторинга позволяют определить показатель эллипсности k_e внутренней поверхности ствола, который отклоняется от нуля вблизи сопряжений ствола с горизонтальными выработками, а также в условиях несимметричной геометрии и действия горного давления:

$$k_e = 100\%(-1 + D_1 / D_2),$$

где D_1, D_2 — диаметры ствола во взаимно перпендикулярных направлениях.

Вследствие просачивания воды и растворения карналлита на границе бетонной крепи и породного массива в некоторых местах наблюдались значительные полости, расположенные несимметрично по окружности крепи [15]. Эти полости могут являться значимым фактором, приводящим к эллипсности крепи ствола и образованию концентраторов напряжений на границе слоев карналлит — каменная соль и, как следствие, появлению трещин в бетонной крепи.

На рис. 4 приведены показатели эллипсности в зависимости от номера яруса (ствол № 1): белый кружок — для диаметров в направлениях юг-север и запад-восток; черный — для диаметров в направлениях юго-восток — северо-запад и юго-запад — северо-восток. Большой (по абсолютной величине) показатель эллипсности наблюдается для 86, 87, 89 и 91 ярусов, что в данном случае связано с наличием сопряжений с горизонтальными выработками.

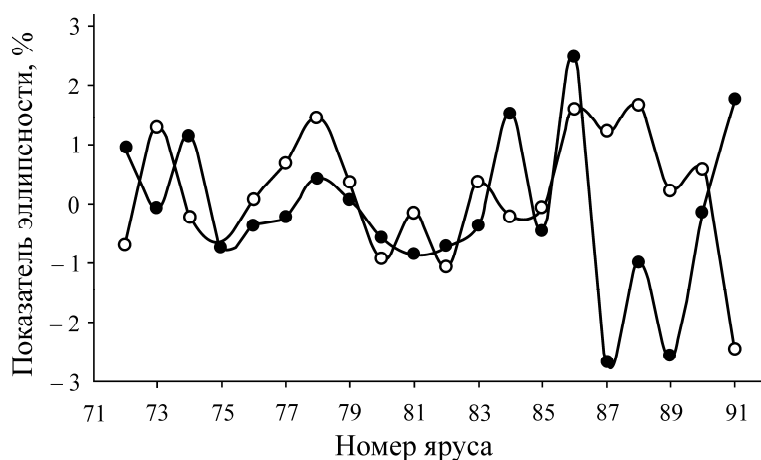


Рис. 4. Зависимость показателя эллипсности от номера яруса (ствол № 1)

ВЫВОДЫ

На основании проведенных мониторинговых измерений с помощью метода лазерного сканирования представлен способ предварительной фильтрации полученной информации и обработки данных мониторинга с определением дальнейшей оценки изменения диаметра ствола, окружной деформации и показателя эллипсности.

Обработка данных мониторинговых измерений согласно предложенному подходу позволяет адекватно оценить изменения диаметра и окружную деформацию бетонной крепи ствола. Полученные значения окружной деформации показывают хорошее соответствие данным непосредственных натурных измерений состояния бетонной крепи.

Технология проведения мониторинговых измерений может эффективно использоваться для верификации математических моделей при численных расчетах деформации и оценки прочности бетонной крепи ствола, в том числе в области сопряжений с горизонтальными выработками. Прогнозные оценки по устойчивости крепи ствола (достижение пластических деформаций, появление трещин, потеря несущей способности крепи) в течение его эксплуатации могут быть получены методами математического моделирования в сочетании с проведением регулярного мониторинга, который должен начинаться непосредственно после завершения строительства ствола.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ольховиков Ю. П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных месторождений. — М.: Недра, 1984. — 238 с.
2. Тарасов В. В., Пестрикова В. С., Русаков М. И. Жизненные циклы комплекса сооружений шахтных стволов Верхнекамского месторождения. — Новосибирск: Наука, 2021. — 232 с.
3. Леонтьев А. В. Геомеханический мониторинг как элемент горной технологии // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2017. — № 2. — С. 329–335.
4. Казикаев Д. М., Сергеев С. В. Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов. — М.: Горн. кн., 2011. — 244 с.
5. Тарасов В. В., Иванов О. В. Реконструкция бетонной крепи шахтного ствола № 3 рудника БКПРУ-2 ПАО “Уралкалий” в условиях непрерывно действующего производства // ГИАБ. — 2016. — № 9. — С. 303–315.
6. Волохов Е. М., Новоженин С. Ю., Нгуен С. Б. Современные системы контроля сдвижений и деформаций при строительстве подземных сооружений // Зап. ГИ. — 2012. — Т. 199. — С. 253–259.
7. Баловцев С. В., Шевчук Р. В. Геомеханический мониторинг шахтных стволов в сложных горно-геологических условиях // ГИАБ. — 2018. — № 8. — С. 77–83.
8. Токин А. А., Токин А. А. Мониторинг деформаций подземных горных выработок с помощью лазерных сканирующих систем // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2013. — Т. 1. — № 3. — С. 120–123.
9. Люфт С. К., Бесимбаева О. Г., Бесимбаев Н. Г., Капасова А. З. Использование метода лазерного сканирования для выполнения маркшейдерских работ в шахтном стволе // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2015. — С. 204–209.
10. Лазерный 3D-сканер Leica RTC360. [Эл. ресурс]: сайт [leica-geosystems.com](https://leica-geosystems.com/ru/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360.pdf). Режим доступа: <https://leica-geosystems.com/ru/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360.pdf>.
11. Хмырова Е. Н., Бесимбаева О. Г., Кусаинова Г. Д., Кошеров О. К. Создание трехмерной модели уникального здания “Хан-Шатыр” с использованием лазерного сканера // Вестн. ЕНУ им. Л. Н. Гумилева. — 2013. — № 6. — С. 188–193.
12. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. — М.: Наука, 1975. — 576 с.
13. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
14. Репко А. А., Южанин И. А., Савельев А. И., Рубан М. Б. О предельных деформациях сжатия бетонной крепи вертикальных стволов // Шахт. стр.-во. — 1984. — № 4. — С. 10–11.
15. Ольховиков Ю. П., Тарасов В. В., Пестрикова В. С. Особенности поддержания в безопасном состоянии крепи шахтных стволов Верхнекамского месторождения, установленной в карналлитовых породах // ГИАБ. — 2015. — № 8. — С. 30–34.

Поступила в редакцию 30/VI 2022

После доработки 15/VII 2022

Принята к публикации 21/IX 2022