

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.833

DOI:10.7242/echo.2022.4.4

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КРЕПИ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Н.Л. Бельтюков¹, М.А. Семин¹, А.И. Кузнецов¹, А.В. Гущин²¹ Горный институт УрО РАН, г. Пермь² ООО «Инкаб», г. Пермь

Аннотация: В статье представлены результаты модельных исследований по оценке возможности применения технологии распределенного измерения деформаций (Distributed Strain Sensing – DSS) в волоконно-оптических линиях для долговременного мониторинга состояния крепи шахтных стволов. В рамках исследований проведены натурные испытания физической модели участка крепи в виде бетонного кольца, деформация которого измерялась DSS-кабелем. Достоверность результатов натурных измерений обоснована с помощью численных расчетов.

Ключевые слова: мониторинг, деформация, оптическое волокно, шахтный ствол, крепь, distributed strain sensing, модельные исследования.

Шахтные стволы являются одними из самых дорогостоящих и трудоемких инженерных сооружений шахт. Данные выработки пересекают комплексы резко различных пород и имеют наибольший срок службы, в течение которого подвергаются многочисленным изменчивым воздействиям. Остановка некоторых стволов либо приводит к остановке шахты в целом, либо чрезвычайно сильно сказывается на показателях работы предприятия, а на ремонт стволов после аварии требуются значительные затраты. На фоне увеличения глубины разработки, ухудшения горно-геологических условий и наращивания мощностей предприятий к надежности конструкции стволов предъявляются повышенные требования [1]. В связи с этим все больше возрастает внимание к долговременному мониторингу состояния крепи шахтных стволов. Специфика такой задачи состоит в труднодоступности объекта наблюдений, его значительной протяженности, наличии агрессивной и взрывоопасной среды в пространстве ствола. В этих обстоятельствах многообещающим представляется метод контроля состояния объекта при помощи технологии распределенного измерения деформаций (Distributed Strain Sensing – DSS) в волоконно-оптических линиях. Данная технология основана на эффекте смещения спектрального максимума бриллюэновского рассеяния (рассеяния Мандельштама-Бриллюэна) на участке оптического волокна, подверженного воздействию напряжений и/или температуры. Кроме того, метод бриллюэновской рефлектометрии позволяет получить распределение спектральных максимумов вдоль волокна. В результате можно не только определить величину деформации участка, но и локализовать его положение на оптической линии [2]. С целью оценки перспективности использования технологии DSS применительно к мониторингу состояния крепи шахтных стволов были проведены исследования, моделирующие условия деформирования участка монолитной бетонной крепи.

Эксперименты выполнялись на бетонном кольце марки КС-15 с внутренним диаметром 1500 мм, толщиной стенки 90 мм и высотой 890 мм (рис. 1). На внешней поверхности кольца в плоскости срединного сечения, перпендикулярного оси и расположенного на равном удалении от верхней и нижней кромки, была проделана штроба шириной 25 мм и глубиной 15 мм для закладки специального волоконно-оптического кабеля с DSS-

модулями производства ООО «Инкаб» (г. Пермь). Конструкция кабеля представлена на рис. 2. В процессе закладки кабелю придавалось некоторое преднапряжение с целью регистрации не только деформаций растяжения, но и сжатия. Штроба с уложенным кабелем заполнялась клеем для кладки газобетонных блоков. Измерение параметров волоконно-оптического кабеля осуществлялось с помощью прибора fTV 5020 производства компании «FibrisTerre» (Германия) [2].

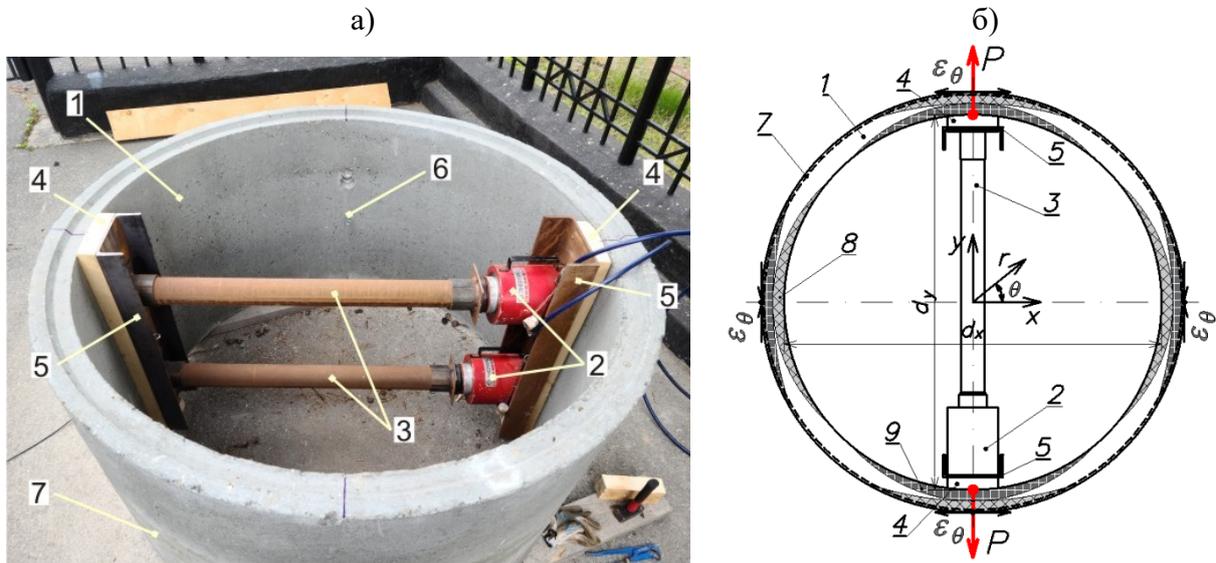


Рис. 1. Стенд для испытаний DSS-технологии измерения деформаций в конструкциях:

a – общий вид стенда; *б* – схема нагружения

(1 – бетонное кольцо КС-15; 2 – гидроцилиндр; 3 – труба d_{93} мм; 4 – доска 50x200 мм; 5 – швеллер 24П; 6 – шуруп-кольцо; 7 – штроба с кабелем DSS; 8 – зоны растяжения; 9 – зоны сжатия)

Деформирование кольца производилось за счет двух гидроцилиндров, установленных внутри в одной плоскости, проходящей через ось кольца и образующую. Гидроцилиндры создавали нагрузку в виде радиальной силы P , действующей на внутреннюю поверхность кольца. Давление в гидроцилиндры нагнеталось с помощью ручного насоса и контролировалось манометром, встроенным в линию. Перед экспериментами была произведена градуировка гидроцилиндров на испытательном прессе, в результате которой получены зависимости развиваемого усилия от величины давления в гидросистеме.

Испытания заключались в ступенчатом нагружении кольца гидроцилиндрами. При этом на каждой ступени выполнялась регистрация давления в системе, производились измерения диаметров кольца в направлении осей x и y (рис. 1б) с помощью ленточного экстензометра E3 «Soil Instruments» и параметров волоконно-оптического кабеля прибором fTV 5020. Для измерений диаметров экстензометром на внутренней поверхности кольца в соответствующих точках были размещены шуруп-кольца. Всего было произведено 5 ступеней нагружения.

На рис. 3 представлены зависимости суммарного усилия (P), развиваемого двумя гидроцилиндрами, от величины изменения диаметров кольца в продольном (Δd_y) и поперечном направлениях (Δd_x). Из полученных зависимостей следует, что разрушение кольца произошло на 2-й ступени нагружения. На это указывает спад усилия в процессе дальнейшего деформирования с выходом на постоянное значение – величину остаточной прочности, а также образование трещин вдоль образующей кольца в зонах локализации деформаций растяжения после 2-й ступени (рис. 4). Предельная нагрузка, которую способно было выдержать бетонное кольцо, состав-

вила 28,4 кН. Также следует отметить, что до предела прочности диаграммы ведут себя почти линейно. Соотношение значений Δd_x к Δd_y изменяется в диапазоне $0,9 \div 1,1$ в зависимости от стадии нагружения.



Рис. 2. Схема конструкции DSS-кабеля

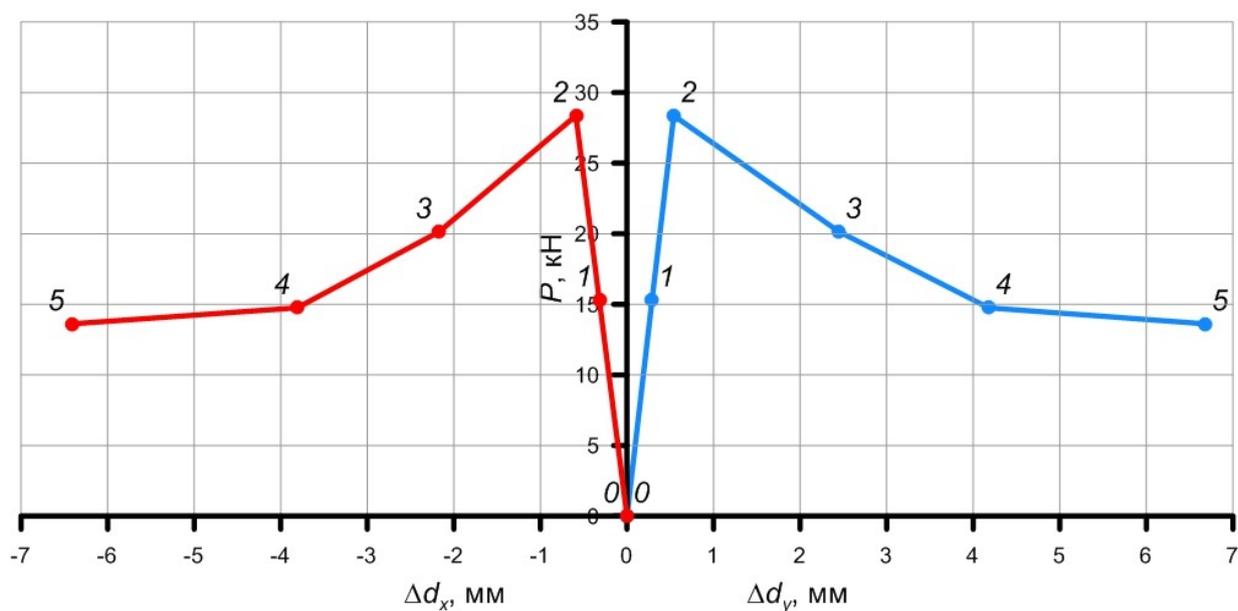


Рис. 3. Зависимости усилия от перемещений в плоскости кольца на различных ступенях нагружения (цифрами показан номер ступени)

Результаты измерений параметров волоконно-оптического кабеля прибором fTV 5020 представлены на рис. 5 в виде зависимостей относительной деформации элементарного участка волокна от его положения на оси кабельной линии для различных ступеней нагружения кольца. Необходимо отметить, что так как волокно наиболее чувствительно к осевым деформациям растяжения, то представленные графики характеризуют прежде всего тангенциальные деформации ε_θ бетона на внешней поверхности кольца и в прилегающем слое некоторой толщины (рис. 1б). Длина подключенного к прибору DSS-кабеля составляла около 150 м, однако непосредственно в штробе был уложен участок протяженностью 5,3 м, соответствующий длине внешней окружности кольца. Поэтому результаты измерений на рис. 5 показаны в интервале $60 \div 70$ м, включающем рабочий участок кабеля.

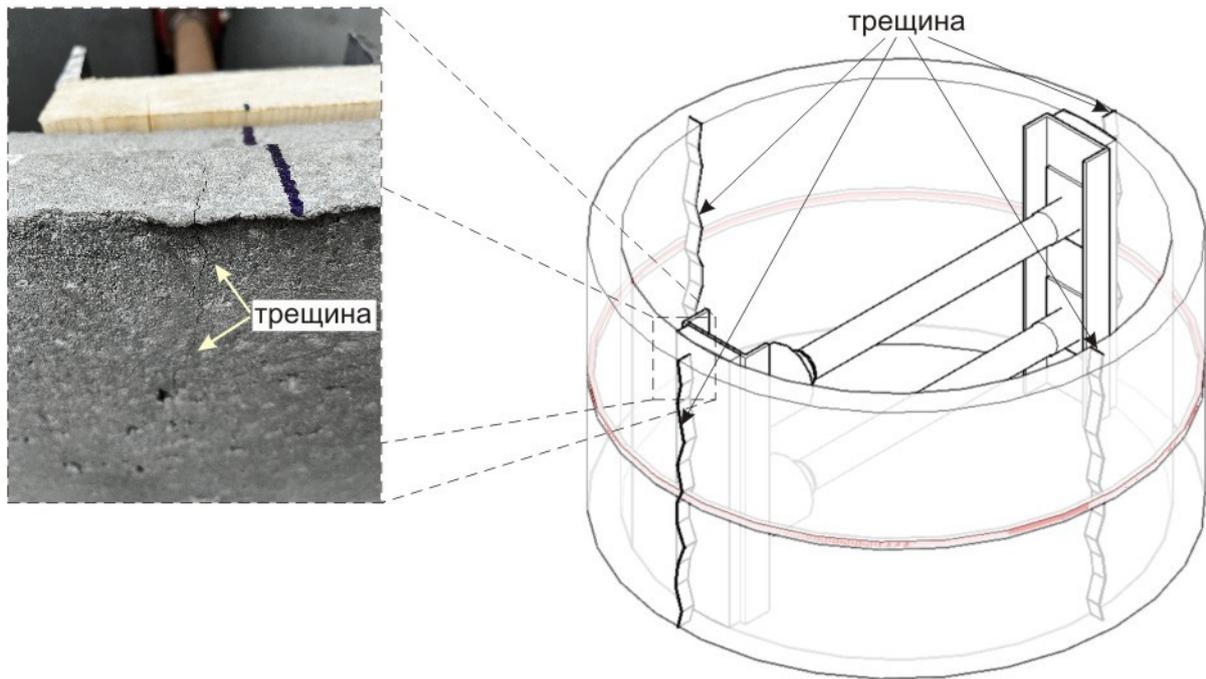


Рис. 4. Расположение трещин растяжения в бетонном кольце (вдоль оси нагружения трещины на внешней поверхности кольца, перпендикулярно оси нагружения – на внутренней поверхности)

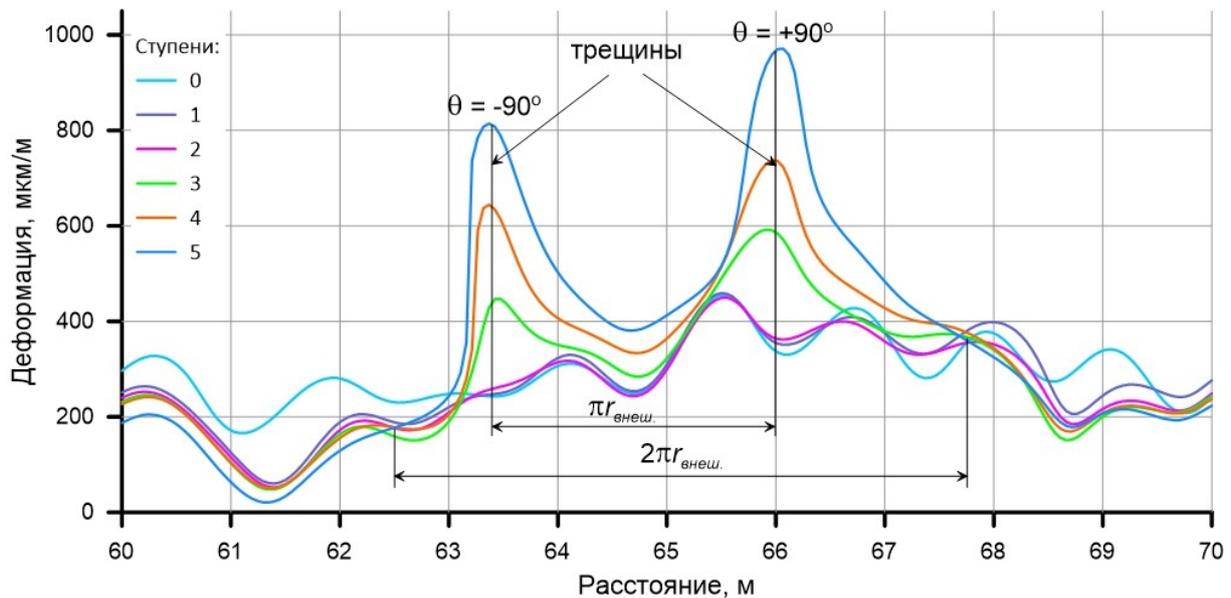


Рис. 5. Результаты измерений параметров волоконно-оптического кабеля ($r_{внеш.}$ – внешний радиус кольца в исходном состоянии, $r_{внеш.} = 0,84$ м)

Анализ полученных зависимостей показал следующее. На ступенях нагружения 0-2 наблюдается значительная вариация значений деформации по длине кабеля. Это можно объяснить, во-первых, температурными колебаниями из-за неравномерного нагрева поверхностей кабеля и кольца солнцем. Во-вторых, влиянием укладки оптического волокна в кабеле. На начальных ступенях нагружения установить однозначную взаимосвязь между изменениями деформаций кабеля и нагрузкой затруднительно. Однако при этом можно различить 2 участка с координатами по оси абсцисс 63,4 м и 66,0 м, где наблюдается незначительное увели-

чение деформации с повышением уровня нагрузки (рис. 5). Начиная с 3-й ступени на данных участках отчетливо выделяются максимумы деформаций. Разность координат максимумов по горизонтальной оси составляет 2,6 м, что эквивалентно половине длины окружности диаметром 1,68 м. Следовательно, точки максимумов в кольце располагаются диаметрально противоположно вблизи от внешней поверхности. Кроме того, положение данных точек соответствует местам, где впоследствии были обнаружены трещины растяжения (рис. 4). В таком случае угловые координаты точек составляют $\theta = +90^\circ$ и $\theta = -90^\circ$. Здесь необходимо отметить, что точность локализации зон пластического деформирования зависит от соотношения разрешающей способности применяемого оборудования и размеров конструкции. В настоящем исследовании разрешающая способность прибора fTV 5020 составляет 0,2 м, а длина рабочего участка кабеля, уложенного в штробе, – 5,3 м.

Дальнейшее деформирование кольца на ступенях 4-5 приводит к возрастанию значений деформации в точках максимумов и в прилегающих к ним областях в интервале от 62,5 м до 67,8 м. Это говорит о том, что кабель начинает испытывать общее растяжение по всей длине зацементированного участка.

С целью оценки значений тангенциальных деформаций ε_θ бетона на внешней поверхности кольца и сравнения с результатами измерений DSS-кабелем построена численная упругопластическая модель «bilinear kinematic hardening» сегмента бетонного кольца (рис. 6). Выбор билинейной модели деформирования обусловлен тем, что в рассматриваемой задаче хрупкое разрушение бетонного кольца будет осуществляться, в первую очередь, вследствие появления растягивающих напряжений в локальных областях кольца. Такое разрушение бетона происходит в соответствии с первой теорией прочности – опасное состояние наступит в том случае, когда наибольшее по абсолютной величине нормальное напряжение превысит заданное допустимое значение [3].

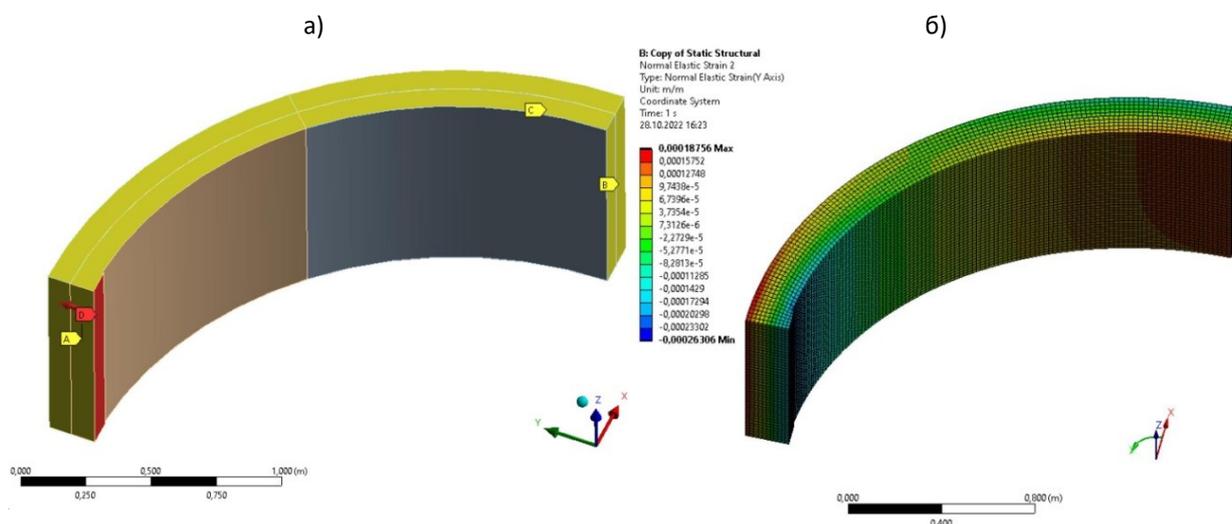


Рис. 6. Конечно-элементная модель сегмента бетонного кольца:

- a* – граничные условия (*A* – запрет перемещений по оси *X*, *B* – запрет перемещений по оси *Y*, *C* – запрет перемещений по оси *Z*, *D* – распределенная сила в направлении оси *Y*);
б – распределение тангенциальной компоненты деформаций

На первом этапе численных экспериментов была произведена калибровка модели по результатам инструментальных измерений, выполняемых в процессе деформирования кольца. Критерием калибровки было соответствие измеренных и вычисленных измене-

ний диаметров кольца в продольном (Δd_y) и поперечном направлениях (Δd_x). Установленные параметры модели: эффективный модуль упругости железобетонной конструкции – 72,1 ГПа, предел прочности бетона на растяжение – 2,0 МПа, предел прочности бетона на сжатие – 20,0 МПа, коэффициент Пуассона – 0,18.

На следующем этапе решалась численная задача, где в качестве одного из граничных условий были заданы перемещения точек поверхности D в направлении оси Y (рис. 6б). Величины перемещений задавались в соответствии с реальными значениями Δd_y , полученными при нагружении кольца. Результаты расчета тангенциальных деформаций ε_θ бетона на внешней поверхности кольца в точках с угловыми координатами $\theta = -90^\circ$ и $\theta = +90^\circ$ представлены в табл. 1. Также в таблице для сравнения приведены результаты измерения деформаций в данных точках с помощью DSS-кабеля, которые представляют собой разность между значениями, полученными на конкретной ступени нагружения, и 0-й ступенью (рис. 5).

Таблица 1

Сравнение результатов численного моделирования
с инструментальными измерениями

№ ступени	Изменение диаметра Δd_y , мм	Деформации ε_θ на внешней поверхности кольца, мкм/м			
		при $\theta = -90^\circ$		при $\theta = +90^\circ$	
		модель	DSS-кабель	модель	DSS-кабель
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,29	17,1	6,7	17,1	20,6
2	0,54	31,1	21,2	31,1	30,9
3	2,45	206,2	202,8	206,2	259,0
4	4,18	336,8	401,7	336,8	407,1
5	6,68	533,4	570,8	533,4	639,3

Сравнительный анализ результатов показал превышение значений деформации ε_θ в точке с угловой координатой $\theta = +90^\circ$ относительно точки $\theta = -90^\circ$, существенное на некоторых ступенях нагружения. Это может быть связано, как уже отмечалось, с неравномерным нагревом солнцем боковой поверхности кольца, неодинаковой адгезией оболочки кабеля и клея, и в конечном счете с неоднородной деформацией кольца. На ступенях нагружения с 1 по 3 результаты моделирования укладываются в диапазон значений, определенный результатами измерений DSS-кабелем в точках $\theta = -90^\circ$ и $\theta = +90^\circ$, а начиная с 4-й ступени наблюдаются их отклонения в меньшую сторону. Кроме влияния факторов, указанных выше, расхождение результатов моделирования и натурного измерения на 4-5 ступенях можно объяснить следующей особенностью используемой билинейной модели. В действительности при превышении предельного растягивающего напряжения в локальной области бетона происходит образование трещин, после чего указанная область уже не оказывает значимого сопротивления действующей на конструкцию нагрузке. При этом в модели в рамках использованного билинейного закона локальная область, где напряжения достигли критических величин, соответствующих

пределу прочности на растяжение, продолжает оказывать некоторое постоянное сопротивление дальнейшему деформированию конструкции. Данное обстоятельство может приводить к заниженным результатам численного расчета по сравнению с действительными деформациями конструкции. Таким образом, результаты измерения деформаций с помощью DSS-технологии в целом согласуются с теоретическими представлениями о деформировании бетонного кольца.

Обобщая результаты исследований, можно сделать следующие выводы. Чувствительности DSS-кабеля достаточно для регистрации деформаций в локальных зонах растяжения на стадии упругого (допредельного) деформирования бетонного кольца. Однако на результаты измерений сильное влияние оказывают такие факторы, как изменение температуры и условия контакта кабеля с объектом контроля. Для оценки точности измерения деформаций DSS-кабелем необходимо проведение сравнительных экспериментов с применением других инструментальных методов непосредственно на объекте контроля. Тем не менее предложенная технология на данном этапе исследований не позиционируется как прецизионный инструмент измерения деформаций конструкций. Область применения технологии скорее сводится к насколько можно более полному охвату наблюдением ответственных участков объекта контроля и надежному обнаружению критических изменений его параметров, сопутствующих аварийному режиму работы. Как показали результаты исследования, с помощью DSS-технологии возможно локализовать области пластического деформирования бетона, являющихся местами зарождения трещин, с точностью, удовлетворяющей задачи мониторинга бетонной крепи шахтных стволов. В этой связи технология распределенного измерения деформаций в волоконно-оптических линиях представляется довольно перспективным решением. Дальнейшие усилия в исследованиях на данную тему, на наш взгляд, необходимо сосредоточить на разработке способов монтажа кабеля к существующей крепи шахтных стволов и методов компенсации влияния температуры на результаты измерения деформаций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122030100425-6), а также гранта РФФИ № 20-45-596011 «Разработка научных основ комплексной оценки напряженно-деформированного состояния массивов горных пород при освоении соляных и калийных месторождений».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крупенников Г.А., Булычев Н.С., Козел А.М., Филатов Н.А. Взаимодействие массивов горных пород с крепью вертикальных выработок. – М.: Недра, 1966. – 314 с.: ил.
2. Кузнецов А.И. Распределенные измерения в волоконно-оптических линиях. Технология DSS // Горное эхо. – 2022. – № 2 (87). – С. 47-57. – DOI: 10.7242/echo.2022.2.8.
3. Трапезников Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.