

УДК 624.191.814

Плешко Михаил Степанович

ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет путей сообщения»
Россия, Ростов-на-Дону¹

Профессор кафедры «Изыскания, проектирование и строительство транспортных сооружений»
Доктор технических наук, доцент
E-Mail: mixail-stepan@mail.ru

Насонов Андрей Андреевич

ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет
(Новочеркасский политехнический институт) им. М.И. Платова»
Шахтинский институт (филиал)²

Доцент кафедры «Технология и комплексы горных,
строительных и металлургических производств»
Кандидат технических наук
E-Mail: naanpi@rambler.ru

Пашкова Ольга Валерьевна

ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет путей сообщения»
Россия, Ростов-на-Дону³

Аспирант кафедры «Изыскания, проектирование и строительство транспортных сооружений»
E-Mail: olia51084@rambler.ru

Разработка технических решений по повышению устойчивости участков сопряжений вертикальных стволов

¹ 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного ополчения, 2

² 346500, Ростовская обл., г. Шахты, пл. Ленина, 1

³ 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного ополчения, 2

Аннотация. Участки сопряжений вертикальных стволов являются сложными и ответственными элементами тоннельного комплекса. Крепь ствола при строительстве сопряжения подвергается интенсивным воздействиям и нуждается в дополнительном усилении. Изучение этих процессов требует проведения математического моделирования. В исследовании разработаны объемные численные модели с различной протяженностью сопряжения. Использован программный комплекс «Лира», реализующий метод конечных элементов. Выполнено поэтапное численное моделирование участка ствола. Проанализированы полученные данные и установлены основные закономерности изменения напряженно-деформированного состояния крепи ствола. По мере строительства сопряжения в крепи ствола над ее сводом формируется зона активного влияния. Она характеризуется увеличением эквивалентных напряжений в два раза и более. Исследована эффективность усиления крепи ствола путем устройства армирующего слоя из высокопрочного углепластикового ламината. Установлено, что армирующий слой вступает в работу не сразу, а только после реализации в крепи упругих деформаций и переходе в стадию пластического деформирования бетона. Получена зависимость несущей способности крепи ствола от процента армирования. Разработана методика по определению требуемого процента армирования для усиления бетонной крепи вертикальных стволов и определена область применения этого технического решения

Ключевые слова: вертикальный ствол; сопряжение; бетонная крепь; метод конечных элементов; напряжения; деформации; несущая способность; армирование.

Вертикальные стволы связывают тоннель с поверхностью земли и служат в период строительства тоннельного комплекса для подъема на поверхность разработанного грунта, спуска и подъема людей, целей энергоснабжения, вентиляции и водоотлива. Связь ствола с тоннелем обеспечивается через сопряжения с выработками околоствольного двора и подходными штольнями.

Крепление вертикальных стволов, как правило, осуществляется монолитным бетоном, эффективно работающим при действии равномерных сжимающих нагрузок. В то же время в период проходки сопряжений в крепи ствола наблюдаются значительные деформации растяжения и изгиба. В ряде случаев они приводили к разрушению крепи и потере устойчивости участка ствола [1]. Для недопущения такой ситуации на практике необходимо комплексное изучение напряженно-деформированного состояния участков сопряжений вертикальных стволов и обоснование эффективных решений по повышению несущей способности крепи.

Исследование такой сложной горнотехнической системы требует применения физических и математических моделей с пространственной геометрией и нелинейным деформированием материалов. Научно-методические основы диагностики и моделирования горных выработок рассмотрены в работах [2-6]. Примеры решения конкретных научно-практических задач на современном уровне развития компьютерной техники и программных средств представлены в трудах [7-9]. В качестве наиболее эффективного можно выделить метод конечных элементов, получивший широкое распространение при решении геомеханических задач с применением специализированных комплексов ANSYS, COSMOS/M, Лира-Windows, SCAD GROUP, STAAD Pro, FEM models, PLAXIS, Robot Millennium, FLAC (Itasca Company), ABAQUS, ADAPT, CRISP, SOFiStiK, CivilFEM, LS-DYNA, Z_SOIL и др.

В настоящем исследовании создание численных моделей, расчеты и анализ полученных данных выполнено с помощью программного комплекса «Лира – 9.4». Для более полной адекватности модели реальным условиям выбран объемный тип конечно-элементной модели цилиндрической формы.

Разбивка модели осуществлялась объемными конечными элементами типа универсального пространственного изопараметрического восьмиузлового элемента. При построении модели использован принцип совмещения густой и укрупненной сеток. Массив пород в исследуемой области (зона влияния сопряжения) представлен конечными элементами с максимальным размером грани 10 см. Окружающий эту зону породный массив на расстоянии 5 - 10 м представлен в виде сетки с постепенным увеличением размера грани конечного элемента от 10 до 50 см. Внешние области модели представлены конечными элементами размером 1,0 - 5,0 м. Бетонная крепь ствола моделируется в исследуемой области конечными элементами с размером грани 2,5 - 5 см, а на удалении от нее – 10 - 15 см.

Исключение влияния граничных условий на результаты расчета обеспечено большими размерами модели: диаметр – 60 м, высота – 80 м. Пример разреза полученной конечно-элементной модели с укрупненной для наглядности сеткой конечных элементов приведен на рис. 1.

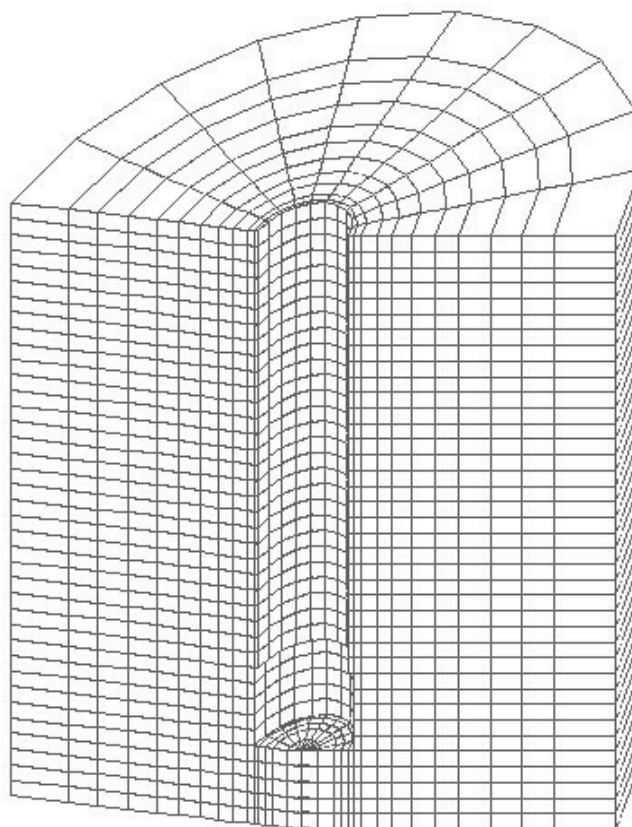


Рис. 1. Конечно-элементная модель участка ствола

Граничные условия приняты следующие: для нижней грани задано ограничение вертикальных смещений, для боковой цилиндрической поверхности – ограничение смещений в перпендикулярном к ней направлении. Верхняя грань модели нагружена равномерно распределенным вертикальным давлением от вышележащей породной толщи. Для каждого конечного элемента задан режим учета собственного веса, а также следующие исходные характеристики:

- коэффициент поперечной деформации;
- объемный вес, кН/м^3 ;
- начальное значение модуля упругости на сжатие, МПа;
- предельное значение напряжения на сжатие, МПа;
- начальное значение модуля упругости на растяжение, МПа;
- предельное значение напряжения на растяжение, МПа.

Основные элементы модели обладают пластическими свойствами. Моделирование физической нелинейности материалов выполнено с помощью физически нелинейных конечных элементов, воспринимающих информацию согласно принятому закону деформирования материалов. В соответствии с современными представлениями геомеханики принята экспоненциальная зависимость $\sigma = f(\epsilon)$. Расчет осуществляется шагово-итерационным методом, который позволяет наиболее точно смоделировать процесс нелинейного деформирования модели в процессе поэтапной реализации проходческих работ.

В результате расчета создавался табличный массив данных по перемещениям в узлах и напряжениям в конечных элементах модели.

Анализ напряженно-деформированного состояния элементов модели осуществляется путем определения шести осевых компонентов тензора напряжений. Далее возможен анализ по различным теориям прочности. В настоящем исследовании для оценки запаса прочности горных пород использован критерий прочности Кулона-Мора. В соответствии с ним эквивалентные напряжения определяются по формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_3 &= \sigma_1 - \chi \cdot \sigma_3; \\ \sigma_s &= \lambda \cdot \sigma_1 - \sigma_3,\end{aligned}\tag{1}$$

где

$$\chi = \frac{\sigma_0^+}{\sigma_0^-}; \quad \lambda = \frac{\sigma_0^-}{\sigma_0^+};$$

здесь σ_0^+ – предельное напряжение при одноосном растяжении;

σ_0^- – то же, при сжатии.

В соответствии с рассмотренным алгоритмом разработан ряд численных моделей участков стволов с различной протяженностью пройденной части сопряжения. Это позволяет более точно проанализировать влияние строительства сопряжения на крепь ствола. Для качественной и количественной оценки интенсивности влияния принят коэффициент $K_{вл}$, представляющий отношение эквивалентных напряжений в крепи в зоне влияния сопряжения к аналогичным величинам, действующим в конструкции до начала проходческих работ.

На основании анализа полученных данных максимальные концентрации напряжений выявлены в области перехода свода сопряжения в боковую стенку на расстоянии до 1,0 м от высотной отметки свода. Пример характерной зависимости параметра $K_{вл}$ в этой области от длины пройденной части сопряжения показан на рис. 2.

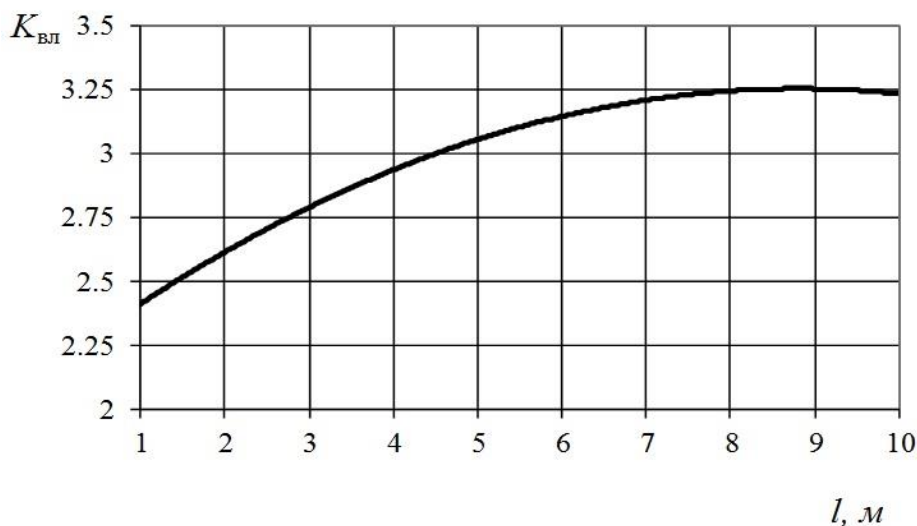


Рис. 2. Зависимость коэффициента $K_{вл}$ от длины пройденной части сопряжения

Таким образом, процесс строительства сопряжения приводит к значительному росту интенсивности напряжений в крепи ствола, обусловленных, прежде всего развитием вертикальных деформаций в породном массиве и крепи. Уже на начальном этапе работ действовавшие в крепи эквивалентные напряжения увеличиваются в среднем в 2,3 раза и далее нелинейно возрастают. Стабилизация происходит при удалении забоя сопряжения от стенки ствола на 7,5 - 8,0 м, при этом формируются два участка влияния на крепь ствола. Первый

участок наиболее интенсивного влияния располагается на высоте 0 - 1,0В от свода сопряжения, где В – ширина сопряжения. На участке ствола на высоте 1,0В - 2,0В от свода влияние сопряжения проявляется менее интенсивно и далее практически не сказывается на напряженно-деформированное состояние крепи ствола.

На рис. 3 показана характерная картина изменения средних значений параметра $K_{вл}$ в крепи ствола по мере удаления от свода сопряжения на высоту h .

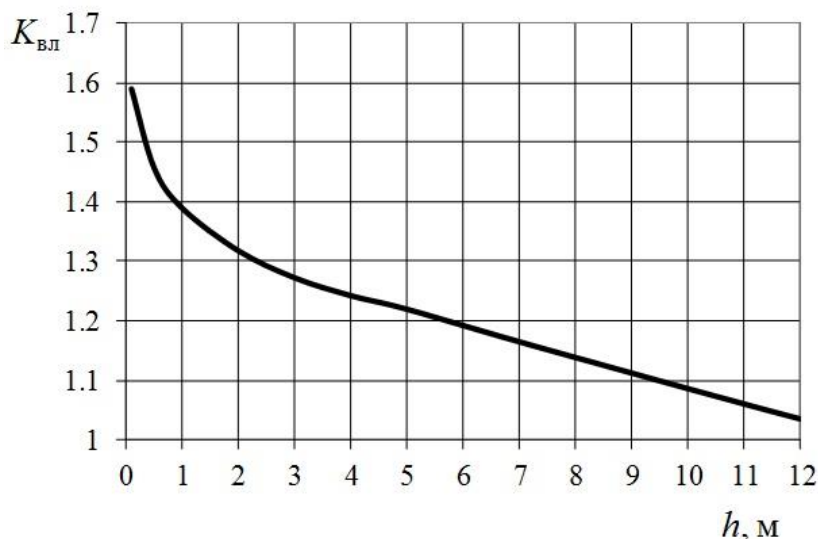


Рис. 3. Изменение средних значений параметра $K_{вл}$ в крепи ствола над сводом приствольной выработки

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости разработки дополнительных технических решений по усилению крепи в зоне влияния сопряжения. Анализ известных на практике способов показывает, что повышение несущей способности бетонных и железобетонных конструкций может быть обеспечено путем их дополнительного армирования ламинатом на основе высокопрочных углеродных волокон. Этот материал обладает высокой прочностью на растяжение и сжатие, близким к стали модулем упругости, хорошей стойкостью к агрессивным средам. В настоящее время углепластиковые холсты и ламинаты широко применяются в мостостроении [10,11].

Для оценки эффективности применения ламинатов для усиления крепи ствола в зоне влияния сопряжения в разработанные численные модели были дополнительно включены объемные конечные элементы, моделирующие слоистый углепластиковый ламинат. Они размещались на внутренней поверхности крепи ствола в зоне влияния приствольной выработки по схеме, представленной на рис. 4.

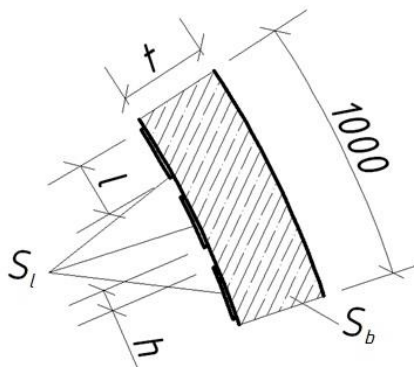


Рис. 4. Схема армирования крепи ствола углепластиковым ламинатом

Процент армирования крепи определяется из выражения

$$\mu = \frac{S_l}{S_b} \cdot 100\% , \quad (2)$$

где S_l – площадь поперечного сечения ламината из расчета на 1 погонный метр сечения бетонной крепи;

S_b – площадь одного погонного метра сечения бетонной крепи.

Характеристики ламината приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики ламината

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Тип ламината	Sika Carbodur S / Sika Carbodur M / Sika Carbodur H
2	Толщина, мм	1,4
3	Ширина, мм	50-120 / 60; 90; 120 / 50
4	Модуль упругости, ГПа	155 / 210 / 300
5	Прочность при растяжении, МПа	2400 / 2000/ 1400
6	Относительное удлинение, %	1,9 / 1,1 / 0,8
7	Диапазон изменения процента армирования крепи, μ , %	0,05 – 0,5

Полученные в результате расчетов моделей значения напряжений и деформаций в крепи показали, что армирующий слой вступает в работу не сразу, а только после реализации в крепи упругих деформаций и переходе в стадию пластического деформирования бетона крепи. Наиболее эффективной областью применения армирующего слоя являются участки ствола над проемом сопряжения на высоте до $(1,2 - 1,4)B$. Наличие ламината позволяет увеличить несущую способность крепи, определенную из условия прочности Кулона-Мора и уменьшить максимальные величины деформаций крепи. Основным влияющим фактором является процент армирования. Изменение модуля упругости армирующего материала в диапазоне 155 - 300 ГПа не оказывает существенного влияния на несущую способность конструкции. Полученная в результате обработки данных зависимость коэффициента увеличения несущей способности бетонной крепи от процента армирования представлена на рис. 5.

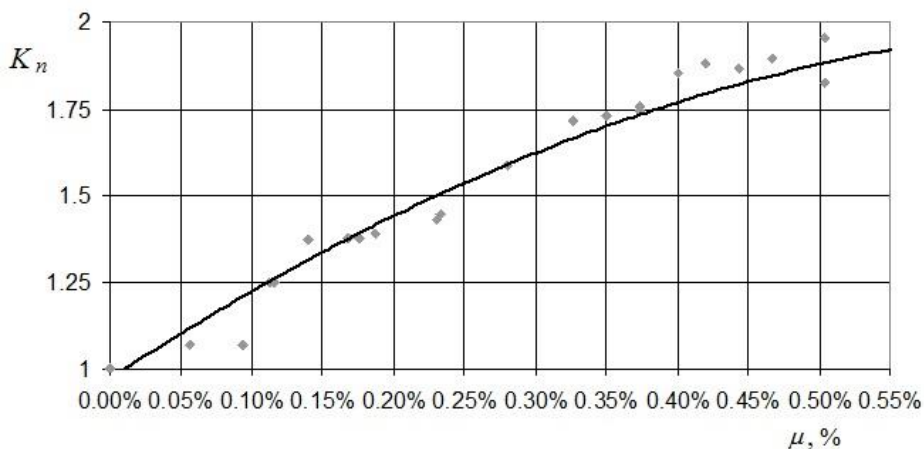


Рис. 5. Зависимость коэффициента увеличения несущей способности крепи ствола от процента армирования

Предварительное обоснование параметров армирования участка крепи в зоне влияния строительства приствольной выработки может быть произведено при рассмотрении несущей способности сегмента кольца крепи как изгибаемой балки. Предельный изгибающий момент, воспринимаемый сечением, шириной один погонный метр, усиленным армирующим слоем, может быть определен из выражения

$$M = \sigma_l S_l t - 0,5 R_b x^2, \quad (3)$$

где σ_l – предельные значения напряжений для композитного материала армирующего слоя, могут быть определены по выражению [11]:

$$\sigma_l = k_s \sqrt{\frac{R_b E_l b}{\sum t_l}} \leq 0,9 R_l; \quad (4)$$

R_b – расчетная прочность бетона крепи на сжатие, МПа;

x – относительная высота сжатой зоны бетона, находится из уравнения проекций внутренних усилий

$$x = \frac{\sigma_l S_l}{R_b}; \quad (5)$$

k_s – коэффициент, учитывающий тип и схему усиления, для ламинатов может быть принят равным $k_s = 0,45$ [11];

E_l – модуль упругости материала армирующего слоя, МПа;

b – единичная ширина полосы упрочнения внутреннего слоя крепи, мм;

$\sum t_l$ – общая толщина слоев армирующего слоя, мм;

R_l – расчетное сопротивление материала армирующего слоя растяжению, МПа.

Окончательные параметры армирующего слоя участка крепи в зоне влияния сопряжения следует определять на основе математического моделирования и шахтных исследований в конкретных горно-геологических и технических условиях.

Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Ресурсосберегающие и экологически безопасные геотехнологии освоения подземного пространства на основе комплексного мониторинга всех стадий жизненного цикла инженерных объектов и систем» по базовой части Госзадания Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородуля А.А. Обоснование параметров анкерно-бетонной крепи при сооружении сопряжений вертикальных стволов угольных шахт: дис...канд. техн. наук. Донецк, 2002. 153 с.
2. Казикаев Д.М., Сергеев С.В. Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов. М.: Горная книга, 2011. 244 с.
3. Манец И.Г., Грядущий Б.А., Левит В.В. Техническое обслуживание и ремонт шахтных стволов. Донецк: Світ книги, 2012. 418 с.
4. Shashenko, O., Majcherczyk, T. Geomechanics: History, modern state and prospects of development. *New Technological Solutions in Underground Mining International Mining Forum*, 2006, pp. 35 - 37.
5. Баклашов И.В. Геомеханика: Учебник для вузов. В 2 т. Т. 2. Геомеханические процессы. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. 208 с.
6. Jing, L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, no 40, pp. 283 - 353.
7. Zhang X., Han Y., Liu S., Su C. Deformation prediction analysis model for the mine shaft-wall. *Liaoning Gongcheng Jishu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban). Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 2014, no 33 (8), pp. 1070 - 1073.
8. Плешко М.С., Крошнев Д.В. Влияние горизонтальной выработки на напряженно-деформированное состояние крепи ствола // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 5. С. 366-368.
9. Прокопов А.Ю. Саакян Р.О. Исследование воздействия околоствольного массива на напряженно-деформированное состояние жесткой армировки вертикальных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 1. С. 207-212.
10. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 1. экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций / И.Г. Овчинников, Ш.Н. Валиев, И.И. Овчинников, В.С. Зиновьев, А.Д. Умиров // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2012. №4. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/7tvn412.pdf> (дата обращения 10.09.2014).
11. Неровных А.А. Совершенствование методики оценки грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, усиленных композиционными материалами: дис...канд. техн. наук. Новосибирск, 2012. 201 с.

Рецензент: Прокопов Альберт Юрьевич, Доктор технических наук, профессор, Заведующий кафедрой " Инженерная геология, основания и фундаменты" ГОУ ВПО "Ростовский государственный строительный университет".

Michail Pleshko

Rostov State Transport University
Russia, Rostov-on-Don
E-Mail: mixail-stepan@mail.ru

Andrey Nasonov

Shakhty Institute (branch) of South-Russian State Polytechnic University (NPI) M.I. Platov
Russia, Shakhty
E-Mail: naanpi@rambler.ru

Olga Pashkova

Rostov State Transport University
Russia, Rostov-on-Don
E-Mail: olia51084@rambler.ru

Development of technical solutions to improve the sustainability areas conjugation vertical shafts

Abstract. Lots of conjugations vertical shafts are complex and critical elements of the tunnel complex. Shoring barrel during the construction of conjugation exposed to intensive influence and needs further strengthening. The study of these processes requires mathematical modeling. The study developed three-dimensional numerical models with different length of conjugation. Used software system "Lira" that implements the finite element method. Implemented in phases numerical modeling portion of the vertical shaft. Analyzed the data and the main regularities of stress-strain state of the lining of the vertical shaft. As the construction of conjugation in the lining of the vertical shaft over its arch formed by the active zone of influence. It is characterized by an increase in equivalent stresses in two or more times. The effectiveness of strengthening the lining of the vertical shaft by installing a reinforcing layer of high-strength carbon-fiber laminate. Established that the reinforcing layer comes into operation after the implementation of the lining of elastic deformations and the transition to the stage of plastic deformation of concrete. The dependence of the bearing capacity of the lining of the vertical shaft of the reinforcement ratio. Developed a method to determine the required percentage of reinforcement concrete lining vertical shafts. Sets out the scope of the technical solution

Keywords: vertical shaft; conjugation; concrete lining; finite element method; stress; strain; strength; reinforcement

REFERENCES

1. Borodulja A.A. Obosnovanie parametrov ankerno-betonnoj krepri pri sooruzhenii soprjazhenij vertikal'nyh stvolov ugol'nyh shaht: dis...kand. tehn. nauk. Doneck, 2002. 153 p.
2. Kazikaev D.M., Sergeev S.V. Diagnostika i monitoring naprjazhennogo sostojanija krepri vertikal'nyh stvolov. M.: Gornaja kniga, 2011. 244 p.
3. Manec I.G., Grjadushhij B.A., Levit V.V. Tehnicheskoe obsluzhivanie i remont shahtnyh stvolov. Doneck: Svit knigi, 2012. 418 p.
4. Shashenko, O., Majcherczyk, T. Geomechanics: History, modern state and prospects of development. New Technological Solutions in Underground Mining International Mining Forum, 2006, pp. 35 - 37.
5. Baklashov I.V. Geomehanika: Uchebnik dlja vuzov. V 2 t. T. 2. Geomehanicheskie processy. M.: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2004. 208 p.
6. Jing, L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, no 40, pp. 283 - 353.
7. Zhang X., Han Y., Liu S., Su C. Deformation prediction analysis model for the mine shaft-wall. Liaoning Gongcheng Jishu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban). Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2014, no 33 (8), pp. 1070 - 1073.
8. Pleshko M.S., Kroshnev D.V. Vlijanie gorizontal'noj vyrabotki na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie krepri stvola // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. 2010. № 5. P. 366-368.
9. Prokopov A.Ju. Saakjan R.O. Issledovanie vozdejstvija okolostvol'nogo massiva na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie zhestkoj armirovki vertikal'nyh stvolov // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). 2011. № 1. P. 207-212.
10. Voprosy usilenija zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitami: 1. jeksperimental'nye issledovanija osobennostej usilenija kompozitami izgibaemyh zhelezobetonnyh konstrukcij / I.G. Ovchinnikov, Sh.N. Valiev, I.I. Ovchinnikov, V.S. Zinov'ev, A.D. Umirov // Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE». 2012. №4. Rezhim dostupa: <http://naukovedenie.ru/PDF/7tvn412.pdf> (data obrashhenija 10.09.2014).
11. Nerovnyh A.A. Sovershenstvovanie metodiki ocenki gruzopod#emnosti zhelezobetonnyh proletnyh stroenij zheleznodorozhnyh mostov, usilennyh kompozicionnymi materialami: dis...kand. tehn. nauk. Novosibirsk, 2012. 201 p.