

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2022, №3, Том 9 / 2022, N 3, Vol. 9 <https://t-s.today/issue-3-2022.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/07SATS322.pdf>

DOI: 10.15862/07SATS322 (<https://doi.org/10.15862/07SATS322>)

Напряжения в бетонной крепи тоннелей, находящихся в неоднородных горных массивах

Быкова Н.М., Зайнагабдинов Д.А., Баранов Т.М.

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Быкова Наталья Михайловна, e-mail: Bikova_nm@irgups.ru

Аннотация. В представленных исследованиях подтверждены закономерности формирования в бетонных крепях напряжений, являющихся суммой гравитационных, тектонических и переменных составляющих, особенно, в районах с активной геодинамикой. Проблема надежности крепей подземных выработок обусловлена необходимостью решения задач по определению уровня напряженно-деформированного состояния с учетом всех перечисленных составляющих сил и прочностных свойств бетонной крепи. Параметры главных напряжений в крепи транспортного тоннеля определены с помощью деформаций разгрузки. Для разгрузки бурится скважина с отбором керна. В процессе бурения измеряются линейные деформации керна в трех направлениях, для чего на поверхность бетона обделки устанавливается дельта-розетка тензодатчиков. Изъятый из скважины керн используется также для определения фактического класса бетона по прочности и модуля упругости. Главные деформации и главные напряжения определяются аналитическим путем.

В результате измерений выявлены участки тоннеля, работающие преимущественно на горное давление и участки с существенным вкладом горизонтальных напряжений, установлена также связь главных напряжений крепи с траекториями трещин тектонических разрывов в горном массиве. На практике предложено учитывать при проектировании вклад горизонтальных тектонических составляющих и переменных напряжений, определяемых при специальном научном сопровождении и соответственно армировать бетонную крепь. В период эксплуатации на территориях с активной геодинамикой для обеспечения надежности и безопасности крепи рекомендовано использовать автоматизированный деформационный контроль изменения ее напряженно-деформированного состояния.

Ключевые слова: бетонная крепь тоннелей; деформации разгрузки; напряженно-деформированное состояние обделок; трещинообразование обделок; физико-механические свойства бетона обделок; дельта-розетка; разгрузочные скважины

Stresses in the concrete lining of tunnels located in heterogeneous mountain massifs

Natalya M. Bikova, Damir A. Zainagabdinov, Timofey M. Baranov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Natalya M. Bikova, e-mail: Bikova_nm@irgups.ru

Abstract. The presented studies confirmed stress formation patterns in concrete supports, which are the sum of gravitational, tectonic, and variable components, especially in areas with active geodynamics. The problem of the underground workings lining reliability is due to the need to solve problems of determining the stress-strain state level, taking into account all the listed components of the forces and the concrete lining strength properties. The main stress parameters in the transport tunnel support are determined using the unloading deformations. For unloading, a borehole is drilled with core sampling. In the drilling process, linear deformations of the core are measured in three directions, for which a delta socket of strain gauges is installed on the concrete lining surface. The core taken from the borehole is also used to determine the actual concrete strength class and modulus of elasticity. Principal deformations and principal stresses are determined analytically.

As a result of the measurements, were identified tunnel sections that work mainly on rock pressure and sections with a significant contribution of horizontal stresses, and a relationship was also established between the main stresses of the lining and the tectonic fault cracks trajectories in the mountain massif. In practice, it is proposed to take into account when designing the contribution of horizontal tectonic components and variable stresses, determined with special scientific support, and, accordingly, reinforce the concrete lining. During operation in areas with active geodynamics, to ensure reliability and lining safety, it is recommended to use automated deformation control of changes in its stress-strain state.

Keywords: concrete lining of tunnels; unloading deformations; stress-strain state of linings; cracking of linings; physical and mechanical properties of concrete linings; delta rosette; relief borehole

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

На больших просторах России эксплуатируются и строятся подземные транспортные сооружения. Эффективность и безопасность работы конструкций транспортных тоннелей зависит от многих факторов, одним из которых является влияние на них геодеформационных процессов в горных массивах. Эта проблема является предметом исследования как фундаментальных, так и прикладных наук. В фундаментальной геологии задачи напряженно-деформированного состояния горных массивов рассматриваются в области тектонофизики, сейсмогеодинамики. В прикладных науках — это область исследования горной индустрии и транспортной промышленности. Многие вопросы получают свое развитие на стыке исследований разных направлений.

Бетонная крепь рудников, транспортных тоннелей предназначена для обеспечения безопасности производственных процессов в подземных сооружениях. Надежность крепи зависит от напряжений в горном массиве, условий передачи этих напряжений и несущей способности самой крепи. Напряжения в горном массиве как части земной коры формируются с учетом проявления гравитационных и тектонических сил Земли, а также, астрофизических космических сил [1; 2]. В каждой точке земной коры сочетание этих сил индивидуально. Наиболее просто определяется гравитационная составляющая в зависимости от плотности пород и глубины заложения, используемая как «горное давление» при расчете тоннельных крепей. Астрофизические напряжения только недавно стали изучаться, в качестве примера приведено изменение горизонтальных напряжений в штольне на глубине 700 м до 8 МПа за 7 лет [2]. Тектоническая составляющая зависит от структуры блоков земной коры, скоростей протекания тектонических процессов и характера сейсмической активности. Изучение напряженно-деформированного состояния горных массивов в увязке с развитием в них деструктивных процессов является областью задач тектонофизики, и во многих работах отмечается связь крупных тектонических нарушений с направлениями действия главных напряжений [6; 7]. Опыт эксплуатации протяженных транспортных сооружений, например, Транссибирской и Байкало-Амурской железнодорожных магистралей показывает более высокую частоту проявления отказов пути в виде деформаций земляного полотна, неисправностей верхнего строения пути, повреждений мостов, труб и тоннелей в зонах расположения тектонических нарушений [8]. При этом характер деформаций искусственных сооружений увязывается с особенностями проявления активности разломов.

В связи с этим является актуальным изучение напряженно-деформированного сооружения геологических структур в зонах эксплуатации транспортных сооружений. В том числе, наблюдения за напряженно-деформированным состоянием системы «крепь-массив» дают полезную количественную информацию, как о проявлении полей природных напряжений, так и о ресурсе несущей способности самой крепи. Такие наблюдения ведутся на подземных рудниках [3–5]. Измерение напряжений выполнялись методом щелевой разгрузки по методике Института горного дела УрО РАН [3]. В работе [5] установлено, что исходное поле измеряемых напряжений на руднике «Заполярный» имеет гравитационный характер при отношении горизонтальных напряжений к вертикальным — 0,7. При этом горизонтальные напряжения направлены вдоль простирания Норильско-Хараелахского разлома. В исследованиях [4] получены закономерности формирования напряженного состояния бетонной крепи шахтных стволов, как функция конструктивных параметров и полного тензора гравитационно-тектонических напряжений. Сделан вывод о том, что аварийные ситуации сооружений в массиве горных пород, могут быть связаны с изменением его напряженно-деформированного состояния, одной из причин которого является периодическое объемное расширение и сжатие Земли. При этом напряженное состояние массива горных пород формируется в результате наложения полей напряжений, обусловленных гравитационными и тектоническими силами, а также переменными пульсирующими составляющими.

Несомненно, закономерности развития напряженно-деформированного состояния в горном массиве и влияние их на крепи инженерных сооружений будут отличаться в зависимости от расположения горного массива на территории Земли и особенностей конструкций искусственного сооружения.

В развитие подобных исследований в настоящей статье приводятся результаты измерений напряженно-деформированного состояния бетонной крепи транспортного тоннеля, расположенного в Байкальской рифтовой зоне.

Краткая характеристика объекта

Brief characteristic of the subject

Наблюдения напряженно-деформированного состояния осуществлялись в бетонной крепи Северомуйского железнодорожного тоннеля, сданного в эксплуатацию в 2003 году. Тоннель протяженностью 15,3 км построен в горной перемычке северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны [9; 10]. Горная перемычка раздроблена

тектоническими нарушениями, наиболее сложными являются III и IV тектонические зоны. Постоянную крепь представляют преимущественно бетонные и железобетонные подковообразные обделки, на припортальных участках применялись чугунные обделки, в IV тектонической зоне применена комбинированная обделка из чугуна с железобетонной обоймой усиления.

При строительстве использовались различные виды временной крепи, но преимущественно был использован «черновой» бетон с арочной крепью для восприятия начального горного давления, затем сооружалась «чистовая» обделка.

Сложность условий эксплуатации заключается в раздробленности горной перемычки, расположенной между формирующимися Ангараканской и Муяканской рифтовыми впадинами [10–12]. Потенциально в районе расположения тоннеля возможны землетрясения высокой интенсивности 9–10 баллов по шкале MSK-64. Фактически за период строительства и эксплуатации известны два расчетных землетрясения: 4 января 1989 года 8 баллов и 23 мая 2014 г. — 7 баллов по шкале MSK-64. Для района характерно проявление частых сейсмических событий малой и средней интенсивности. Зарегистрировано два роя землетрясений: Ангараканский — 1979 г. [13]) и Муяканский — 2015 г. [14] с частотой до двух десятков в сутки в течение от нескольких месяцев до нескольких лет сейсмических событий низкой и средней интенсивности (2–6 баллов).

Горный массив обводнен, по замерам в эксплуатации максимальное гидростатическое давление на отдельных участках составляло величину 0,14 МПа.

Строительный пикетаж по тоннелю разбит на два участка: западный участок (ЗУ) и восточный участок (ВУ) с нулевым пикетом на расстоянии 6,5 километра от западного портала и 8,9 км от восточного портала.

Выбор методов определения напряжений

Stresses determination methods selection

В зависимости от целей и задач для определения напряжений в горном массиве применяют деформационные, структурные и геофизические методы [1], среди которых количественные показатели можно получить только с помощью деформационных методов. В горных структурах широко используются методы различной разгрузки [3–5]. В тоннельные обделки устанавливают датчики систем мониторинга, которые фиксируют деформации, как во время строительства, так и во время эксплуатации [15; 16]. В Северомуйском тоннеле далеко не все

датчики сохранились со времени строительства, к тому же использование струнных датчиков в течение многих лет не обеспечивает достоверность показаний.

Для оценки деформированного состояния поверхностного слоя обделки Северомуйского тоннеля в 2007 году применялся метод щелевой «разгрузки» с использованием фотоупругих датчиков [17; 18] (рис. 1).

Примененный метод «разгрузки» позволил оценить напряженно-деформированное состояние внутреннего поверхностного контура обделки. Горизонтальные деформации бетона в стенах обделки в разных точках тоннеля в основном являлись деформациями сжатия и изменялись от $-2,6 \cdot 10^{-5}$ до $-13,8 \cdot 10^{-5}$ при предельном сжатии для бетонов обделки $-47,6 \cdot 10^{-5}$. Исключение составили деформации в сечении ПК 40+10 западного участка, на правой стороне которого зафиксировано растяжение $2,4 \cdot 10^{-5}$ при предельном растяжении $3,38 \cdot 10^{-5}$. Вертикальные деформации бетона в стенах обделки, измеренные в двух сечениях: ПК 68+41 восточный участок и ПК 50+80 западный участок характеризовались сжатием $5,6 \cdot 10^{-5}$ – $10,8 \cdot 10^{-5}$.

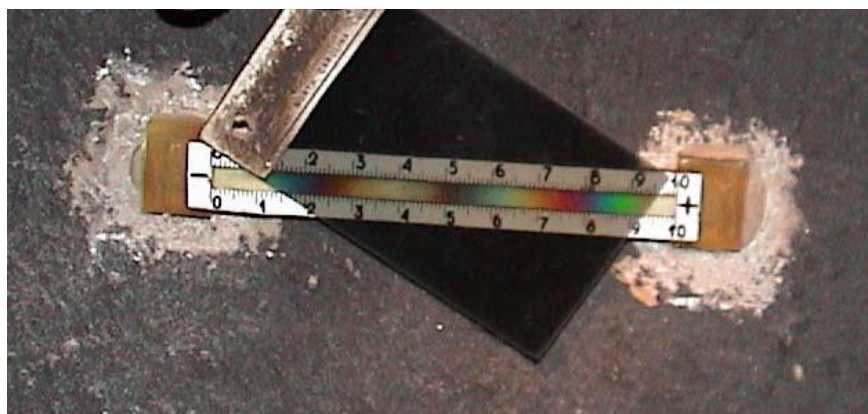


Рисунок 1. Интерференционные полосы в фотоупругом датчике, видимые в поляризованном свете (фотография авторов)

Figure 1. *Interference fringes in a photoelastic sensor, visible in polarized light (photo by the authors)*

Сравнительный анализ работы противоположных стен показал, что вертикальные деформации на противоположных стенах практически одинаковы, горизонтальные деформации на отдельных пикетах могут отличаться в два раза и даже менять знак. Можно предположить, что на отдельных участках имеет место изгиб тоннеля в плане с растяжением одной стены и сжатием другой.

Таким образом, анализ продольных деформаций в стенах и путевом бетоне показывает, что тоннель подвержен неравномерному пространственному деформированию. Можно предположить, что вдоль оси действуют продольные силы, создавая области большего сжатия в

районе 0 и 40 пикетов восточного участка и области растяжения — в районе западного участка.

Однако метод щелевой разгрузки с использованием фотоупругих датчиков ограничен в применении, прежде всего, в связи с отсутствием промышленного изготовления таких датчиков.

В настоящее время наиболее технологичными являются оптоволоконные датчики, которые не чувствительны к электромагнитным полям, обладают высокой точностью передачи сигналов.

Определение и анализ напряженно-деформированного состояния крепи

Determination and analysis of the stress-strain state of the support

Для оценки фактических действующих напряжений в обделке тоннеля применялся метод разгрузки с использованием оптоволоконных датчиков для измерения деформаций.

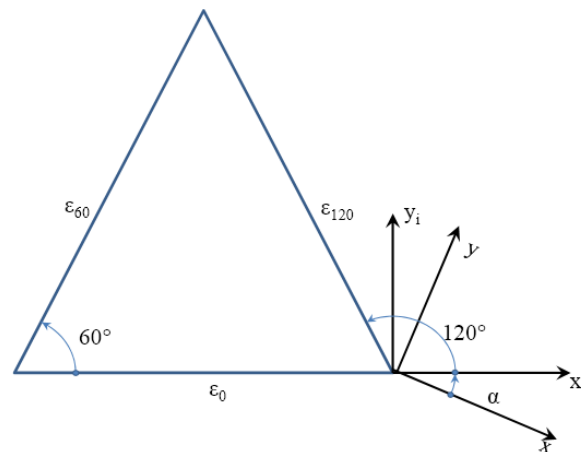
В соответствие с положениями теории упругости при известных величинах модуля упругости E и коэффициента Пуассона ν с использованием замеренных деформаций вычисляются главные напряжения и определяются их направления. Тоннельная обделка испытывает сложное напряженное состояние, поэтому направление главных напряжений заведомо неизвестно и, соответственно, для оценки фактического напряженно-деформированного состояния более подходящим является метод полной разгрузки. Для разгрузки бурится скважина с отбором керна, измеряются его деформации. КERN также используется для определения характеристик бетона в лабораторных условиях.

Для определения деформаций керна измеряются линейные деформации в трех направлениях, для чего на поверхность бетона обделки устанавливается дельта-роzetка тензодатчиков. В дельта-роzetке, схема которой приведена на рисунке 2, датчики расположены под углами 0° , 60° и 120° к горизонтальной оси x_i , что позволяет получить надежные результаты даже при неблагоприятной ориентировке датчиков относительно направления главных напряжений [19].

Главные деформации ε_1 , ε_2 и их ориентация относительно выбранной системы координат, характеризующаяся углом α , определяются из выражений (1):

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3} + \sqrt{\left(\varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120}}{\sqrt{3}}\right)^2}, \\ \varepsilon_2 &= \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3} - \sqrt{\left(\varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120}}{\sqrt{3}}\right)^2}, \\ \alpha &= \arctg \frac{(\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120})/\sqrt{3}}{\varepsilon_0 - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120})/3},\end{aligned}\quad (1)$$

где $\varepsilon_0, \varepsilon_{60}, \varepsilon_{120}$ — линейные относительные деформации, измеренные под углом $0^\circ, 60^\circ$ и 120° к горизонтальной оси x_i соответственно.



α — угол поворота выбранной системы координат относительно главных осей, знак (+) против часовой

Рисунок 2. Дельта-розетка из датчиков линейных деформаций (рисунок авторов)

Figure 2. Delta socket from linear strain gauges (illustration by the authors)

Главные напряжения σ_1 и σ_2 определяются из выражений (2):

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= E \left[\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3(1-\nu)} + \frac{1}{1+\nu} \sqrt{\left(\varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120}}{\sqrt{3}}\right)^2} \right], \\ \sigma_2 &= E \left[\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3(1-\nu)} - \frac{1}{1+\nu} \sqrt{\left(\varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120}}{\sqrt{3}}\right)^2} \right].\end{aligned}\quad (2)$$

Места определения напряжений в обделках тоннеля расположены на стенах на высоте 1 м от головки рельса. Участки выбраны с учетом материалов предыдущих обследований и результатов визуального осмотра: ПК 50+59 ЗУ северная стена, ПК 40+90 ЗУ южная стена, ПК 17+00 ЗУ южная стена, ПК 9+50 ЗУ южная стена, ПК 20+76 ВУ южная стена, ПК 40+27 ВУ южная стена, ПК 54+27 ВУ северная стена, ПК 67+90 ВУ южная стена.

Оптоволоконные датчики устанавливались на химические анкера, пример установки показан на рисунке 3. После установки снимаются начальные показания, затем выполняется разгрузка путем выбуривания керна, снимаются конечные показания. Процесс бурения показан на рисунке 4. Изъятый из скважины керн используется также для определения фактического класса бетона по прочности и модуля упругости (рис. 5).

Расчеты главных деформаций и напряжений проведены согласно формулам (1) и (2), сведены в таблицу 1 и показаны на рисунке 6.

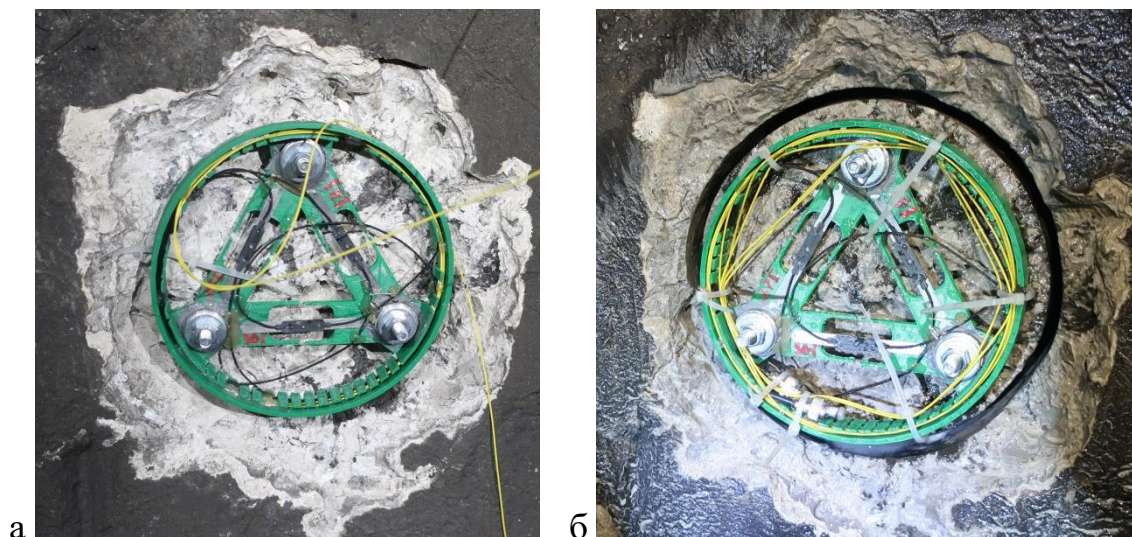


Рисунок 3. Дельта-розетка датчиков деформаций на стене обделки: а — до разгрузки; б — после разгрузки (фотографии авторов)

Figure 3. Delta socket of strain gauges on the lining wall: а — before unloading; б — after unloading) (photos by the authors)

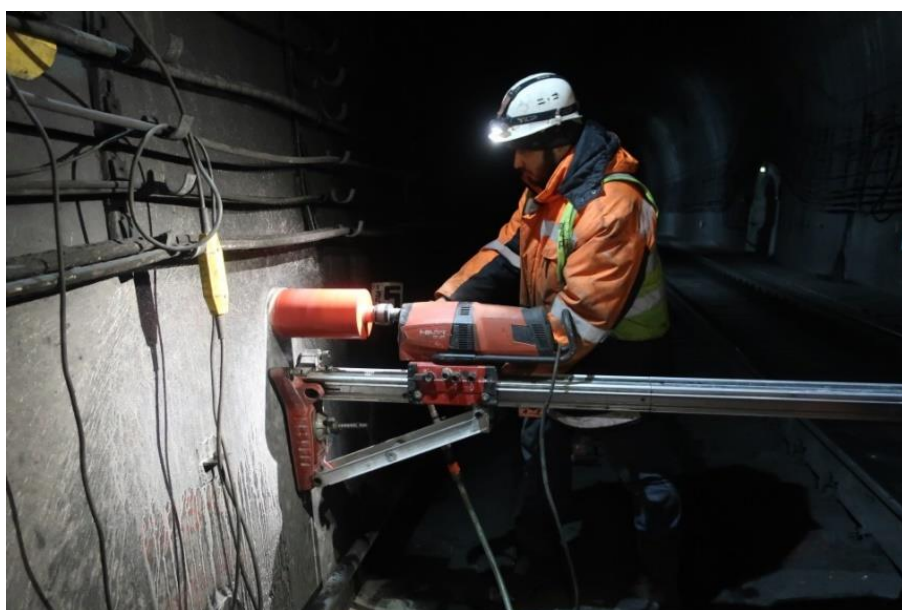


Рисунок 4. Бурение разгрузочной скважины (фотография авторов)

Figure 4. Drilling a relief borehole (photo by the authors)



Рисунок 5. Испытание кернов на прессе (фотография авторов)

Figure 5. Core testing on a press (photo by the authors)

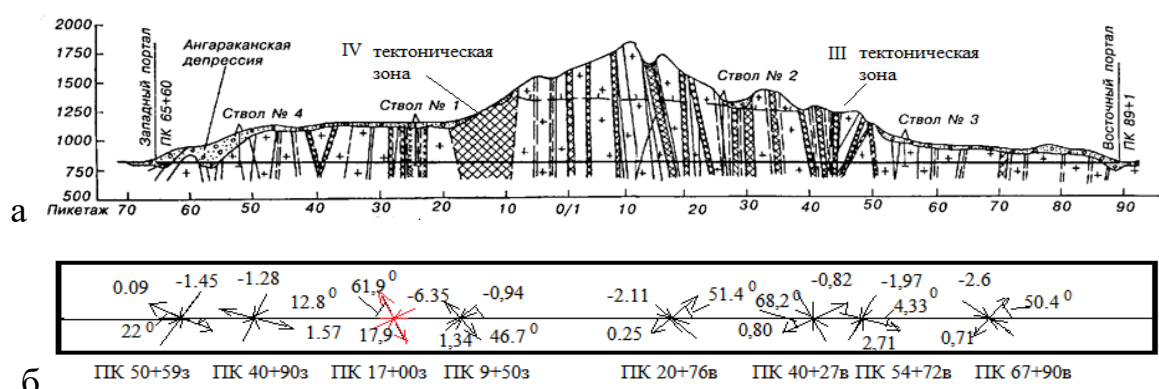


Рисунок 6. Траектории главных напряжений относительно проектного инженерно-геологического разреза: а — инженерно-геологический разрез; б — траектории главных напряжений) (рисунок авторов)

Figure 6. Principal stress trajectories relative to the design engineering-geological section: a — engineering-geological section; b — trajectories of principal stresses) (illustration by the authors)

Как видно из таблицы 1 максимальные главные сжимающие напряжения в бетонных и железобетонных обделках не превышают 2,6 МПа, максимальные растягивающие напряжения не превышают 2,7 МПа. Углы поворота главных площадок относительно горизонтальной оси варьируются в диапазоне $\pm 65^\circ$. Исключением являются главные напряжения в железобетонной обойме усиления комбинированной обделки на ПК 17+00 западного участка в IV тектонической зоне, значения напряжений составили: 17,9 МПа — для главных растягивающих; 6,4 МПа — главных сжимающих.

Таблица 1 / Table 1
Расчет главных напряжений по результатам измерений методом разгрузки
Calculation of the principal stresses based
on the measurements results by the unloading method

Положение точки замера, тип отделки Measuring point position, lining type	Главные относительные деформации Main relative strain		Главные напряжения, МПа Principal stresses, MPa		Угол наклона, град. Angle of inclination, hail.	Направление главных напряжений Direction of principal stresses
	ε_1	ε_2	σ_1	σ_2		
ПК 50+59 ЗУ, северная стена, отделка бетонная Surface contour 50+59 western section, northern wall, concrete lining	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$-4,52 \cdot 10^{-5}$	0,09	-1,45	22,6	
ПК 40+90 ЗУ, южная стена, отделка бетонная Surface contour 40+90 western section, south wall, concrete lining	$5,63 \cdot 10^{-5}$	$-4,89 \cdot 10^{-5}$	1,57	-1,28	12,8	
ПК 17+00 ЗУ, южная стена, комбинированная отделка, круглая чугунная с ж.б. обоймой усиления Surface contour 17+00 western section, south wall, combined lining, round cast iron with reinforced concrete amplification clip	$58,98 \cdot 10^{-5}$	$-30,56 \cdot 10^{-5}$	17,90	-6,35	61,9	
ПК 9+50 ЗУ, южная стена, отделка бетонная Surface contour 9+50 western section, south wall, concrete lining	$4,69 \cdot 10^{-5}$	$-3,71 \cdot 10^{-5}$	1,34	-0,94	-46,7	
ПК 20+76 ВУ, южная стена, отделка бетонная Surface contour 20+76 eastern section, south wall, concrete lining	$2,06 \cdot 10^{-5}$	$-6,63 \cdot 10^{-5}$	0,25	-2,11	-51,4	
ПК 40+27 ВУ, южная стена, отделка бетонная Surface contour 40+27 eastern section, south wall, concrete lining	$2,95 \cdot 10^{-5}$	$-3,01 \cdot 10^{-5}$	0,80	-0,82	-68,2	
ПК 54+72 ВУ, северная стена, отделка бетонная Surface contour 54+72 eastern section, northern wall, concrete lining	$9,55 \cdot 10^{-5}$	$-7,73 \cdot 10^{-5}$	2,71	-1,97	4,33	
ПК 67+90 ВУ, южная стена, отделка железо бетонная Surface contour 67+90 eastern section, southern wall, reinforced concrete lining	$3,78 \cdot 10^{-5}$	$-8,44 \cdot 10^{-5}$	0,71	-2,60	-50,4	

*Составлена авторами на основе проведенных измерений / Compiled by the authors on
the basis of measurements*

Главные сжимающие напряжения в стене обделки ориентированные близко к вертикальной оси, характерные для работы конструкций на горное (гравитационное) давление определены на ПК 40+90 ЗУ, ПК 50+59 ЗУ, ПК 54+72 ВУ.

На других участках более характерно направление главных напряжений по диагонали с различным углом наклона, что говорит о вкладе в напряженно-деформированное состояние горизонтальных напряжений, предположительно от изменения тектонической составляющей сил. На ПК 9+50 ЗУ, ПК 17+00 ЗУ главные растягивающие напряжения по величине больше, чем главные сжимающие. Такое направление главных напряжений отвечает направлениям трещин дробления блоков в горной перемычке (рис. 6).

Главные сжимающие напряжение меньше расчетного сопротивления бетона сжатию в 6–7 раз, главные растягивающие напряжения на некоторых участках превышают расчетное сопротивление бетона на растяжение до двух раз, что приводит к образованию и развитию трещин в обделке. Если бы обделка была обжата горным (гравитационным) давлением, такой бы ситуации с главными растягивающими напряжениями не сложилось, но горное давление в период строительства было передано на «черновой» бетон. Очевидно, что какая-то доля обжатия чистовой обделки горного давления при строительстве могла бы сыграть положительную роль при сопротивлении обделки горизонтальным силам растяжения.

Выводы

Conclusions

1. Бетонные и железобетонные крепи транспортных тоннелей и подземных предприятий находятся в сложном напряженном состоянии, при этом вертикальное гравитационное давление не всегда является определяющей нагрузкой. Существенный вклад вносят составляющие горизонтальных тектонических сил и другие переменные силы. Характер переменных сил мало изучен. Очевидно, в нем заложена составляющая астрофизических сил, а также, изменение напряжений в результате деструктивных процессов в горном массиве и крепи при активной геодинамике.

2. Для создания надежной крепи транспортных тоннелей и длительно действующих подземных предприятий при проектировании следует учитывать влияние горизонтальных сил и соответственно защищать бетонные обделки армированием. Значения этих сил следует определять в ходе специального научно-технического сопровождения с

привлечением научных институтов или специализированных предприятий в этой области.

3. В период эксплуатации подземных сооружений на территориях сложных проявлений геодинамических процессов следует устанавливать автоматизированные системы деформационных мониторингов, позволяющие оценивать характер изменения напряжений и своевременно применять превентивные мероприятия по усилению крепи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зубков, А.В.** Геомеханика и геотехнология / А.В. Зубков, Рос. акад. наук. Урал. отд-ние. Ин-т гор. дела. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2001. — 333 с.
2. **Зубков, А.В.** Закон формирования природного напряжённого состояния земной коры / А.В. Зубков. — DOI <https://doi.org/10.31857/S086956520003251-9> // Доклады Академии наук. — 2018. — Т 483. — № 3. — С. 293–295. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36749790> (дата обращения: 11.07.2022).
3. **Лизункин, М.В.** Оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород стрельцовского рудного поля / М.В. Лизункин, А.В. Бейдин // Геомеханика в горном деле. Доклады всероссийской научно-технической конференции с международным участием 4–5 июня 2014 г. / Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2014. — С. 30–38. — URL: <https://igduran.ru/files/eshop/elibrary/geomech2014.pdf> (дата обращения: 11.07.2022).
4. **Сентябов, С.В.** Геомеханические аспекты формирования природных напряжений в бетонной крепи шахтных стволов / С.В. Сентябов. — DOI <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-199-207> // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020 — № 3–1. — С. 199–207. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42922921> (дата обращения: 11.07.2022).
5. **Сергунин, М.П.** Определение параметров исходного поля напряженного состояния на руднике «Заполярный» / М.П. Сергунин, В.А. Еременко. — DOI <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-63-74> // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019 — № 4. — С. 63–74. — URL: <https://giab-online.ru/catalog/12743> (дата обращения: 11.07.2022).
6. **Ребецкий, Ю.Л.** Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов / Ю.Л. Ребецкий. — М.: ИКЦ Академкнига, 2007. — 406 с.
7. **Figueiredo, B.** Determination of the stress field in a mountainous granite rock mass / B. Figueiredo, F.H. Cornet, L. Lamas, J. Muralha. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.07.017> // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. — 2014. — Т 72. — С. 37–48. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1365160914002123> (дата обращения: 19.07.2022).
8. **Быкова, Н.М.** Протяженные транспортные сооружения на активных геоструктурах: технология системного подхода / Н.М. Быкова. — Новосибирск: Наука, 2008. — 340 с.
9. Байкало-Амурская железнодорожная магистраль: Тоннели: Проектирование и стр-во, 1974–1998 гг. / В.А. Бессолов и др. — Сост. и ред. С.Н. Власов. — Вельск: АО корпорация "Трансстрой", 1999. — 230 с.
10. **Быкова, Н.М.** Северо-Муйский тоннель — из XX в XXI век / Н. М. Быкова, С. И. Шерман. — ответственный редактор С.В. Елисеев. — Новосибирск Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр РАН "Издательство "Наука", 2007. — 186 с. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20807550> (дата обращения: 19.07.2022).
11. Разломы и сейсмичность Северо-Муйского геодинамического полигона / В.А. Саньков, Ю.И. Днепровский, С.Н. Коваленко и др. — Отв. ред. С.И. Шерман; АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т земной коры. — Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1991. — 108 с.

12. **Семенов, Р.М.** Оценка сейсмоопасности Северо-Муйского района / Р.М. Семенов, О.П. Смекалин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2005 — № 8. — С. 114–119. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11638016> (дата обращения: 19.07.2022).
13. Ангаро-канский рой землетрясений в Байкальской рифтовой зоне: Условия возникновения и особенности развития / В.М. Кочетков, Н.С. Боровик, Л.А. Мишарина и др. — Отв. ред. О.В. Павлов; АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т земной коры. — Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1987. — 80 с.
14. **Гилева, Н.А.** Сейсмическая активизация 2014–2015 гг. В Муяканском хребте вблизи Северомуйского тоннеля трассы БАМ / Н.А. Гилева, Е.А. Кобелева, О.К. Масальский // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Десятой Международной сейсмологической школы, Новоханы, 14–18 сентября 2015 года / Геофизическая служба РАН, Республиканский центр сейсмологической службы при Национальной академии наук Азербайджана Новоханы: Геофизическая служба Российской академии наук, 2015. — С. 96–100. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24153902&pff=1> (дата обращения: 02.08.2022).
15. **Безродный, К.П.** Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) в железнодорожных тоннелях Олимпийской трассы / К.П. Безродный, И.В. Култин, М. О. Лебедев // Наука и транспорт. — 2009. — С. 24–26.
16. **Лебедев, М.О.** Надежность тоннельных конструкций при эксплуатации Северомуйского тоннеля / М.О. Лебедев, Ю.С. Исаев, А.Д. Басов [и др.] // Метро и тоннели. — 2019 — № 3. — С. 22–25. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39842953> (дата обращения: 02.08.2022).
17. **Сахаров В.И.** Фотоупругие датчики деформаций при обследовании конструкций и сооружений / В.И. Сахаров, А.С. Исайкин, А.Н. Моргунов, А.В. Старчевский // Экспериментальная механика. (Хесинские чтения) / М.: Изд-во МГСУ, 2001. — С. 115–123.
18. **Быкова, Н.М.** Измерения деформаций в стенах обделки и путевом бетоне северо-муйского тоннеля с использованием фотоупругих датчиков / Н.М. Быкова, А.С. Исайкин, А.Н. Моргунов, Д.А. Зайнагабдинов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2007 — № 1. — С. 69–74. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11638162> (дата обращения: 02.08.2022).
19. Экспериментальная механика: В 2 кн. / Под ред. А. Кобаяси; Перевод с англ. Под ред. Б.Н. Ушакова. — М.: Мир, 1990. — 615 с.

Сведения об авторах:

Быкова Наталья Михайловна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия, e-mail: Bikova_nm@irgups.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0676-4752>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=633145

Зайнагабдинов Дамир Альфридович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия, e-mail: damirmt@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6335-3442>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=520144

Баранов Тимофей Михайлович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия, e-mail: Baranov-87@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3981-6413>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=926740

Статья получена: 20.09.2022. Принята к публикации: 08.11.2022. Опубликовано онлайн: 22.11.2022.

REFERENCES

1. Zubkov A.V. Geomekhanika i geotekhnologiya [Geomechanics and Geotechnology]. Yekaterinburg: IGD UrO RAN; 2001. (In Russ.).
2. Zubkov A.V. The Law of Formation of the Natural Stress State of the Earth's Crust. *Doklady Akademii nauk*. 2018; 483(3): 293–295. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S086956520003251-9>.
3. Lizunkin M.V., Beydin A.V. [Assessment of the stress-strain state of the rock mass of the Streltsovsky ore field]. In: [Geomechanics in mining. Reports of the All-Russian scientific and technical conference with international participation June 4–5, 2014]. Yekaterinburg: IGD UrO RAN; 2014. p. 30–38. Available at: <https://igduran.ru/files/eshop/elibrary/geomech2014.pdf> (accessed 11th July 2022).
4. Sentyabov S.V. Geomechanical Aspects of Formation of Natural Stresses in A Concrete Mount of a Shaft. *Mining informational and analytical bulletin*. 2020; (3–1): 199–207. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-199-207>.
5. Sergunin M.P., Eremenko V.A. Determining Parameters of Original Stress Field in Rock Mass in Zapolyarny Mine. *Mining informational and analytical bulletin*. 2019; (4): 63–74. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-63-74>.
6. Rebetskiy Yu.L. Tektonicheskiye napryazheniya i prochnost' prirodnykh gornyykh massivov [Tectonic stresses and strength of natural mountain ranges]. Moscow: IKTs Akademkniga; 2007. (In Russ.).
7. Figueiredo B., Cornet F.H., Lamas L., Muralha J. Determination of the stress field in a mountainous granite rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014; 72: 37–48. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.07.017>.
8. Bykova N.M. Protyazhennyye transportnyye sooruzheniya na aktivnykh geostrukturakh: tekhnologiya sistemnogo podkhoda [Extended transport structures on active geostructures: technology of a systematic approach]. Novosibirsk: Nauka; 2008. (In Russ.).
9. Bessolov V.A. et al. Baykalo-Amurskaya zheleznodorozhnaya magistral': Tonneli: Proyektirovaniye i strovo, 1974–1998 gg. [Baikal-Amur Railway: Tunnels: Design and construction, 1974–1998.]. Velsk: JSC Corporation "Transstroy"; 1999. (In Russ.).
10. Bykova N.M., Sherman S.I. [Severo-Muysky tunnel — from XX to XXI century]. Novosibirsk: Academic Scientific Publishing, Printing and Book Distribution Center of the Russian Academy of Sciences "Nauka Publishing House"; 2007. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20807550> (accessed 19th July 2022). (In Russ.).
11. San'kov V.A., Dneprovskiy Yu.I., Kovalenko S.N. et al. Razlomy i seysmichnost' Severo-Muyskogo geodinamicheskogo poligona [Faults and seismicity of the North Muya geodynamic test site]. Novosibirsk: Nauka: Siberian branch; 1991. (In Russ.).
12. R. M. Semenov, Smekalin O.P. [Seismic hazard assessment of the Severo-Muysky district]. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2005; (8): 114–119. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11638016> (accessed 19th July 2022). (In Russ.).
13. Kochetkov V.M., Borovik N.S., Misharina L.A. et al. Angaro-kanskiy roy zemletryaseniya v Baykal'skoy riftovoy zone: Usloviya vozniknoveniya i osobennosti razvitiya [Angara-Kan earthquake swarm in the Baikal rift zone: Conditions of occurrence and features of development]. Novosibirsk: Nauka: Siberian branch; 1987. (In Russ.).
14. Gileva N.A., Kobeleva E.A., Masal'skiy O.K. [Seismic activation 2014–2015 In the Muyakansky ridge near the Severomuysky tunnel of the BAM route]. In: [Modern methods of processing and interpretation of seismological data: Proceedings of the Tenth International Seismological School, Novkhany, September 14–18, 2015]. Novkhany: Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences; 2015. p. 96–100. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24153902&pf=1> (accessed 2nd August 2022).
15. Bezrodnyy K.P., Kul'tin I.V., Lebedev M.O. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya tekhnologicheskimi protsessami (ASU TP) v zheleznodorozhnykh tonnelyakh Olimpiyskoy trassy [Automated process control system (APCS) in the railway tunnels of the Olympic route]. *Nauka i transport [Science and transport]*. 2009: 24–26. (In Russ.).

16. Lebedev M.O., Isayev Yu.S., Basov A.D., Boyko O.V., Romanevich K.V., Larionov R.I., Trunov V.G. [Reliability of tunnel structures during the operation of the Severomuysky tunnel]. *Metro and tunnels*. 2019; (3): 22–25. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39842953> (accessed 2nd August 2022). (In Russ.).
17. Sakharov V.I., Isaykin A.S., Morgunov A.N., Starchevskiy A.V. Fotouprugiyе datchiki deformatsiy pri obsledovanii konstruktsiy i sooruzheniy [Photoelastic strain gauges for inspection of structures and facilities]. In: *Eksperimental'naya mekhanika. (Khesinskiye chteniya) [Experimental mechanics. (Khesin readings)]*. Moscow: MGSU publishing house; 2001. p. 115–123. Available at: (accessed).
18. Bykova N.M., Isaykin A.S., Morgunov A.N., Zaynagabdinov D.A. [Deformation measurements in the lining walls and running concrete of the Severo-Muya tunnel using photoelastic sensors]. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2007; (1): 69–74. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11638162> (accessed 2nd August 2022). (In Russ.).
19. Kobayashi A.S. Handbook on Experimental Mechanics. Englewood Cliffs, New Jersey: Society for Experimental Mechanics, Inc., Prentice-Hall, Inc.; 1993. (In Eng.).

Information about the authors:

Natalya M. Bikova — Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, e-mail: Bikova_nm@irgups.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0676-4752>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=633145

Damir A. Zainagabdinov — Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, e-mail: damirmt@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6335-3442>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=520144

Timofey M. Baranov — Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, e-mail: Baranov-87@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3981-6413>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=926740

Submitted: 20th September 2022. Revised: 8th November 2022. Published online: 22nd November 2022.