

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian journal of transport engineering <http://t-s.today/>

2015, Том 2, №1 / 2015, Vol 2, No 1 <http://t-s.today/issues/vol2-no1.html>

URL статьи: <http://t-s.today/PDF/02TS115.pdf>

DOI: 10.15862/02TS115 (<http://dx.doi.org/10.15862/02TS115>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Быкова Н.М., Зайнагабдинов Д.А., Белялов Т.Ш. Критерии контроля параметров электронного деформационного мониторинга в транспортных тоннелях // Транспортные сооружения, Том 2, No 1 (2015) <http://t-s.today/PDF/02TS115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Bykova N.M., Zainigabdinov D.A., Belyalov T.S. [Criteria for controlling parameters of the electronic deformation monitoring in the transport tunnels] Russian journal of transport engineering, 2015, Vol. 2, no. 1. Available at: <http://t-s.today/PDF/02TS115.pdf> (In Russ.)

Адрес для связи с авторами:

Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

УДК 624.1

Быкова Наталья Михайловна

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Россия, Иркутск
Заведующий кафедрой «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: bikovanm@mail.ru

Зайнагабдинов Дамир Альфридович

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Россия, Иркутск
Ассистент
E-mail: damirmt@mail.ru

Белялов Тимур Шамилович

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Россия, Иркутск
Аспирант
E-mail: belyalov_timur@mail.ru

Критерии контроля параметров электронного деформационного мониторинга в транспортных тоннелях

Аннотация. В статье обсуждаются подходы к оценке геодинамической безопасности транспортных тоннелей с использованием электронных деформационных мониторингов (ЭДМ) для наблюдения и контроля состояния их конструктивных элементов, как на стадии строительства, так и в период эксплуатации. Непрерывные наблюдения за деформациями позволяют оперативно фиксировать реакцию конструкций на факторы геодинамического происхождения, прогнозировать поведение тоннеля и предупреждают о развитии опасных процессов до образования повреждений, создавая резерв времени для принятия решений по стабилизации ситуации. Система может также показать скрытое ослабление ресурса в результате невидимой коррозии материалов, развития трещин и других повреждений. В качестве примера авторами приводится вариант системы мониторинга, установленной в Северо-Муйском железнодорожном тоннеле, включающий схему расположения и модели используемых датчиков деформаций. В статье анализируются параметры электронного деформационного мониторинга, представляющие относительные деформации в обделке, и критерии их контроля. Оценка геодинамической безопасности тоннеля предлагается выполнять по 3 категориям, характеризующих режим его работы (штатный, нештатный, граничное состояние). Авторами сформулированы правила анализа показателей датчиков электронного деформационного мониторинга и критерии назначения категорий геодинамической безопасности.

Ключевые слова: транспортные тоннели; деформационный мониторинг; геодинамическая безопасность; категории геодинамической безопасности; критерии контроля; обделка тоннеля; датчик деформации; интеррогатор; реакция конструкции; сейсмическое событие

Введение. Строительство транспортных тоннелей в сложных горно - геологических районах на современном этапе сопровождается использованием автоматизированных средств мониторинга, задачами которого, прежде всего, является безопасность и эффективность возведения сооружения [1-4]. Как правило, такие системы остаются после завершения строительного периода и служат для сбора и передачи информации во время эксплуатации. При этом меняются задачи использования этой информации в целях обеспечения надежной системы содержания объектов [5,6].

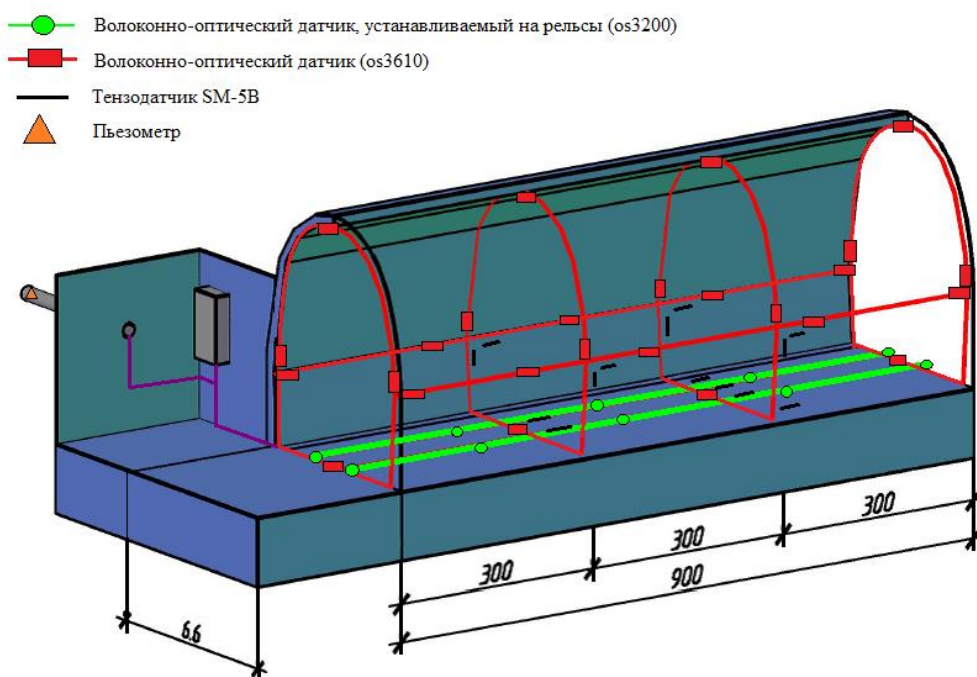
Кроме строительства новых существуют программы модернизации действующих тоннелей с целью поддержания их стабильного и работоспособного состояния в сложных природных условиях. Примером может служить Северо-Муйский железнодорожный тоннель, построенный на пути формирования двух рифтовых впадин в условиях активной сейсмической активности [7]. Причем исследованиями [8] показано, что в условиях высокой неоднородности горных массивов в связи с тектоническими нарушениями, для такого тоннеля потенциально опасными являются даже небольшие, но частые землетрясения менее 6 баллов, вызывающие смещения горных блоков. При проектировании транспортных тоннелей такие явления в связи с недостаточной их изученностью не учитываются. Внедрение автоматизированных систем мониторинга параметров внешней среды и реакции тоннельных конструкций позволит оперативно оценивать степень опасности, изменение остаточного ресурса конструкций и прогнозировать межремонтные сроки различных участков тоннеля [5]. Важной частью автоматизированного мониторинга является подсистема контроля деформаций в тоннельной обделке. Недостаточно проработанными в такой системе являются вопросы назначения критериев контроля входящей информации и оценки работоспособности тоннеля.

1. Основные положения ЭДМ. Подсистема электронного деформационного мониторинга предназначена для контроля изменения деформаций в результате механической работы тоннельной обделки от внешних геодинамических факторов, процесса образования трещин и иных повреждений в самой конструкции. Под геодинамическими факторами подразумевается сейсмические события, смещения горных блоков на их границах в виде геодеформационных воздействий, перераспределение горного давления в заобделочном пространстве. Непрерывные наблюдения за деформациями позволяют оперативно фиксировать реакцию конструкций на факторы геодинамического происхождения, прогнозировать поведение тоннеля и предупреждают о развитии опасных процессов до образования повреждений, что создает резерв времени для принятия решений стабилизации ситуации. Система может также показать скрытое ослабление ресурса в результате невидимой коррозии материалов, развития трещин и других повреждений.

Электронный деформационный мониторинг состоит из инструментальной и программной составляющих. Инструментальная часть включает системы датчиков, регистрирующих деформации, блоки сбора информации и систему передачи информации на сервер. Существует множество различных датчиков, фиксирующих деформации металлических и железобетонных конструкций. Важными требованиями, предъявляемыми к датчикам, являются точность и достоверность регистрируемых показателей, способность работать длительное время без отказов и проверок, нечувствительность к влажности, температурным перепадам и электромагнитным излучениям. В электрофицированных протяженных железнодорожных тоннелях могут быть использованы волоконно-оптические датчики деформаций. Такие датчики позволяют с высокой точностью фиксировать изменение

напряженно-деформированного состояния элементов тоннеля, надежно работают в температурном диапазоне -20°C $+80^{\circ}\text{C}$, исключают влияние электромагнитных помех. Контур оптоволоконного кабеля с датчиками (рис.1) подключается к системе сбора данных (интеррогатор и мультиплексор), откуда информация передается на сервер.

В качестве примера можно привести систему, использованную в Северо-Муйском тоннеле [3]. Для контроля деформаций использовались волоконно-оптические датчики двух типов: os3610, прикрепляемый на стены обделки (рис. 2); os3200, устанавливаемый на рельсе (рис. 3).



*Рис. 1. Фрагмент контура ЭДМ
[Fragment of the contour EDM]*

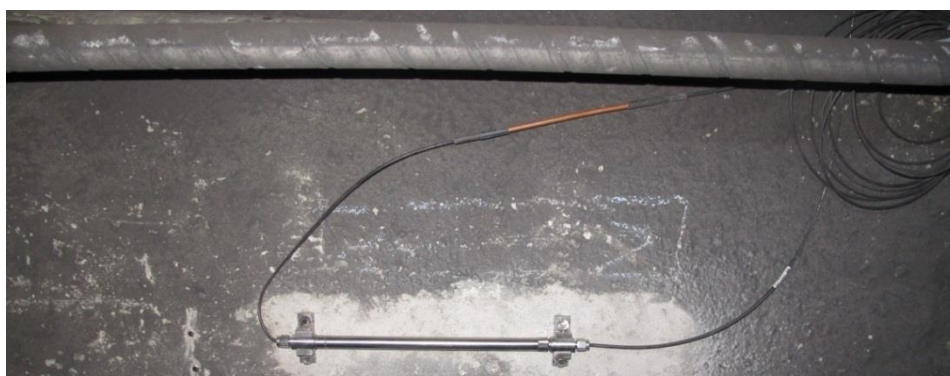


Рис. 2. Датчик os3610 на стене обделки

[Sensor os3610 on the lining wall]



*Рис. 3. Датчик os3200 на рельсе
[Sensor os3200 on the rail]*

Отличительной особенностью является последовательный способ соединения с помощью точечной сварки датчиков между собой и подключения датчиков к системе. Неоспоримым преимуществом является минимальная потеря измерительного сигнала, что позволяет размещать интеррогатор на существенном расстоянии от датчиков (до 50 км). Приемно-регистрирующее устройство интеррогатор sm125 является стационарным высокоточным измерительным прибором для мониторинга.

В рамках метрологического контроля система дублируется установкой в отдельных сечениях датчиков другого типа, например, струнного, которые могут сниматься и подвергаться поверке. Для контроля гидростатического давления могут быть использованы пьезометры.

Программное обеспечение ЭДМ выполняет функции передачи, приема, обработки, визуализации данных, а также, функции анализа, контроля и формирования сообщений и проектов решений, важных для систем эксплуатации и содержания тоннеля.

2. Параметры ЭДМ и критерии контроля. Параметрами электронного деформационного мониторинга являются относительные деформации в обделке тоннеля. Обычно тоннельная обделка работает на горное давление, вызывающие усилия сжатия и изгиба в поперечном сечении. Датчики, поставленные параллельно периметру поперечного сечения обделки, отражают основные деформации обделки от горного давления. Однако в неоднородных горных структурах транспортные сооружения подвержены дополнительным усилиям на границах горных блоков, включающих поперечные срезающие усилия, а также сложную пространственную работу конструкции в горизонтальных направлениях [8]. Поэтому важными являются также относительные деформации вдоль тоннеля. В отдельных сечениях на обделках установлены датчики под углом 45° . На рельсах датчики расположены в продольном направлении ориентировочно посередине высоты шейки и отражают продольное растяжение - сжатие рельса.

На рис. 4,5 приведены показания горизонтальных волоконно-оптических датчиков, отражающих относительные деформации стен в сечении обделки Северо-Муйского тоннеля за 2 месяца измерений (01.12.2014-30.01.2015). Получаемые величины деформаций можно разделить на 2 типа:

- мгновенные скачкообразные выбросы, возникающие при сейсмических событиях или иной нештатной ситуации;
- трендовое изменение деформаций по средним величинам, накапливаемое за длительный период времени, происходящее в результате пространственной

работы обделки тоннеля в условиях горного и гидростатического давления, смещения горных блоков по разломам, а также, изменения состояния конструкций в результате коррозии и деструкции бетона, нарушения конструктивных связей.

Для контроля поступающей от датчиков информации следует рассмотреть требования, предъявляемые к работе обделки тоннеля в штатном режиме. Принимается во внимание то, что металлические обделки используются, как правило, на особо сложных участках, а большая часть сжатой обделки проектируется в бетонном или железобетонном исполнении.

Важным вопросом является определение количественных значений сложившегося напряженно - деформированного состояния обделки к моменту установки систем контроля деформаций. Лучшим решением является использование систем мониторинга с начала строительства. Если таковых нет, то можно провести экспериментальные исследования с использованием различных методов. Так, контроль остаточных деформаций в обделке Северо-Муйского тоннеля методом «разгрузки» с использованием фотоупругих датчиков [9] показал, что вертикальные и горизонтальные напряжения сжатия в поверхностных слоях внутреннего контура обделки не превышают 0.1-0.5 МПа. Это объясняется тем, что технология сооружения Северо-Муйского тоннеля предусматривала передачу горного давления на черновую крепь. Обычно тоннельные обделки работают с высоким запасом прочности и им угрожают трудно прогнозируемые при проектировании изменения геодинамических воздействий.

Предлагается рассматривать 3 категории оценки геодинамической безопасности. 1 категория соответствует безопасному штатному режиму эксплуатации, 2 категория предупреждает о пограничном состоянии сооружения, 3 категория характеризует наступление нештатной ситуации, опасной для эксплуатации сооружения. Назначение категорий опасности должно выполняться с использованием расчетных моделей работы тоннеля [10] и регистрируемых внешних показателей горно-геологических факторов. Кроме этого, назначение категорий осуществляется при анализе данных электронного деформационного мониторинга.

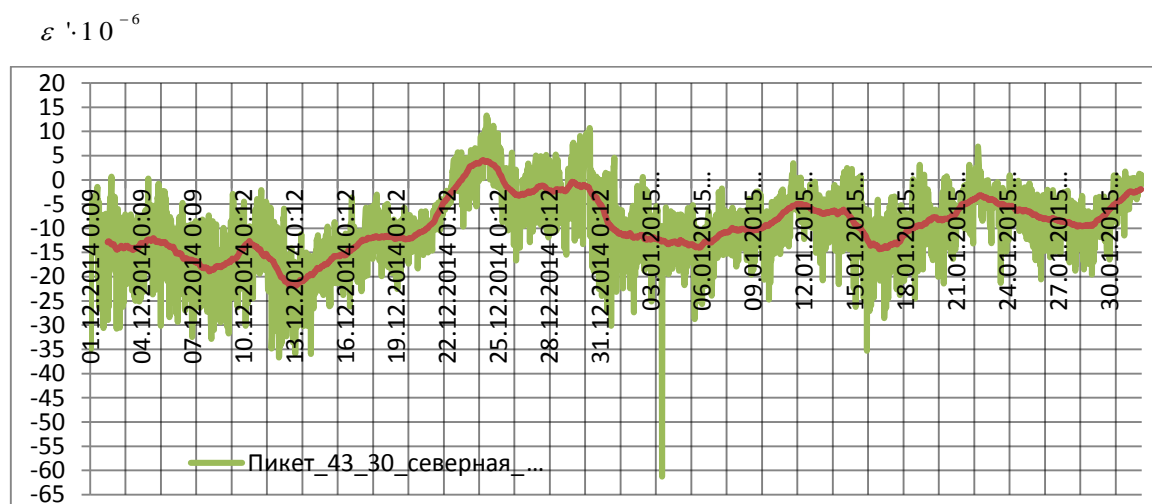


Рис. 4. Показания горизонтального датчика в стене обделки
(3.01.2015-землетрясение 6 баллов MSK-64)

*[Indications of the horizontal sensor in the lining wall
(3.01.2015-earthquake of 6 points according to scale MSK-64)]*

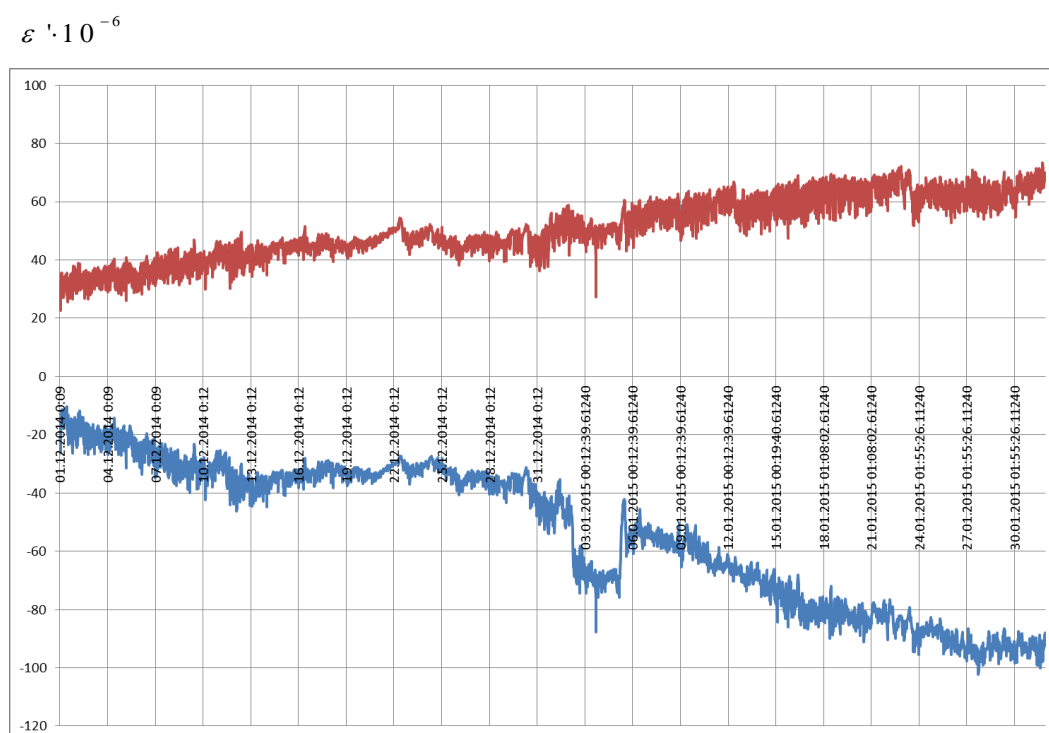


Рис. 5. Показания горизонтальных датчиков по правой (верхний) и левой (нижний) стенам в одном сечении за 2 месяца

[Indications of horizontal sensors on the right (top) and left (bottom) walls in one section for 2 months]

В этом случае можно сформулировать следующие правила, предъявляемые к контролю показаний датчиков, в основе которых лежат соблюдение условий ненаступления предельных состояний 1 и 2 группы.

1. Условно начальные напряжения в бетонной обделке можно принять равными не более $1/3$ расчетного сопротивления бетона на сжатие R_b , если нет других экспериментальных данных. Модуль упругости при отсутствии экспериментальных данных следует принять равным для бетона, соответствующего проектному классу бетона.

2. Независимо от начальных напряжений при регистрации скачков деформаций с учетом модуля упругости бетона напряжения не должны превышать расчетного сопротивления бетона R_b (скачком следует считать трехкратную разницу соседних показаний). Если скачок напряжений больше или равен расчетному сопротивлению R_b , присваивается 3 категория участку тоннеля, во всех остальных случаях – 1 категория.

3. При анализе трендовых деформаций сжатия с учетом начальных напряжений накопление деформаций от последнего зафиксированного минимума с учетом модуля упругости не должно давать напряжений, превышающих расчетное сопротивление бетона сжатию при условии недопущения продольных трещин $R_{b,mc2}$. Если напряжения больше $R_{b,mc2}$, но меньше R_b – присваивается 2 категория, если равны или больше R_b – 3 категория, во всех остальных случаях – 1 категория.

4. При анализе трендовых деформаций растяжения с учетом начальных напряжений накопление деформаций после погашения напряжений сжатия с учетом модуля упругости не должно давать напряжений, превышающих расчетное сопротивление бетона растяжению $R_{bt,ser}$. Если напряжения попадают в зону растяжения, но меньше $R_{bt,ser}$ – присваивается 2 категория, если равны или больше $R_{bt,ser}$ – 3 категория, во всех остальных случаях – 1 категория.

5. Анализ синхронности показаний двух горизонтальных датчиков на разных стенах позволяет выявить деформации тоннеля в плане. Если показания датчиков двух стен одного знака, ситуация рассматривается как штатная и соответствует 1 категории, если знаки разные, то очевидно, что наблюдается изгиб тоннеля. В этом случае присваивается 2 категория опасности. 3 категория может быть назначена при дополнительном контроле на участках со 2 категорией геометрических параметров положения пути в плане.

6. Анализ показаний соседних вертикальных датчиков, установленных по контуру поперечного сечения обделки, выполняется в случае критических показаний одного датчика по контуру. Если в контуре другие датчики не показали скачков, показания одного датчика ставятся под сомнение и проверки по п.2,3 игнорируются. То же относится к показаниям горизонтальных датчиков по одной линии.

Назначение категорий геодинамической безопасности по результатам анализа показаний электронного деформационного мониторинга выделяется в отдельный оценочный блок и формирует соответствующие сообщения для диспетчера Службы пути Управления железной дорогой и инженера АСУ ТП.

Выводы:

1. На современном этапе строительства и эксплуатации транспортных тоннелей в сложных инженерно-геологических условиях все шире внедряются автоматизированные системы мониторинга геодинамической безопасности, включающие и электронный деформационный мониторинг тоннельных конструкций. Одна из таких систем с использованием волоконно-оптических датчиков установлена на участке Северо-Муйского железнодорожного тоннеля.

2. Для оценки геодинамической безопасности тоннеля предлагается рассматривать 3 категории, из которых 1 соответствует штатному режиму эксплуатации, 2 – характеризует пограничные состояния, 3 – предупреждает о наступлении нештатных ситуаций. Назначение категорий выполняется по расчетным моделям с использованием внешних показателей геодинамических и геодеформационных факторов. Отдельно назначаются категории по результатам анализа показателей датчиков электронного деформационного мониторинга.

3. Сформулированы правила анализа показателей датчиков электронного деформационного мониторинга и критерии назначения категорий геодинамической безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безродный К. П. Геотехнический мониторинг при строительстве Северо-Муйского тоннеля [Текст] / К.П. Безродный, А.С. Никулин, В.Г. Трунев // Тоннельное строительство России и стран СНГ в начале века : тр. Междунар. практ. конф. – М. : [б.н.], 2002. – С. 436–439.
2. Безродный К.П. Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) в железнодорожных тоннелях Олимпийской трассы [Текст] / К.П. Безродный, И.В. Кульгин, М.О. Лебедев // Наука и транспорт – М.: 2009. – № 1. – С. 24–26.
3. Фролов Ю.С. Обеспечение эксплуатационной надежности железнодорожного тоннеля при проходке над ним автотранспортных тоннелей на трассе дублера Курортного проспекта в Сочи [Текст] / Ю.С. Фролов // Промышленное и гражданское строительство: сб.научн.тр. ПГУПС. - № 6, 2012.-С. 17-19.
4. Безродный К.П. Горно – экологический мониторинг при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей [Текст] / Безродный К.П., Лебедев М.О. // Интернет-журнал «Наукоедение», 2014 №5 [Электронный ресурс] - М.: Наукоедение, 2014 - Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/pdf/12ko514.pdf>.
5. Быкова Н.М. Содержание железнодорожных тоннелей с использованием автоматизированных систем геотехнического мониторинга / Н.М. Быкова, Д.А. Зайнагабдинов, Т.Ш. Белялов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – Иркутск, 2014. – с. 589-597.
6. Залуцкий В.Т. Геодезический мониторинг для изучения смещений горных блоков в районе Северо-Муйского тоннеля [Текст] / В.Т. Залуцкий, Н.М. Быкова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск, 2005. – № 4 (8). – С. 133–139.
7. Быкова Н.М. Северо-Муйский тоннель – из XX в XXI век [Текст] / Н.М. Быкова, С.И. Шерман. - Новосибирск: Наука, 2007. - 184 с.

8. Зайнагабдинов Д. А. Транспортные тоннели и геодинамика горных массивов [Текст] / Д. А. Зайнагабдинов, Н.М. Быкова // Интернет-журнал «Науковедение», 2014 №5 [Электронный ресурс] - М.: Науковедение, 2014] – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/pdf/13ko514.pdf> .

9. Быкова Н.М. Измерения деформаций в стенах обделки и путевом бетоне Северо-Муйского тоннеля с использованием фотоупругих датчиков [Текст] / Н. М. Быкова, А.С. Исайкин, А.Н. Моргунов, Д.А. Зайнагабдинов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск, 2007. – № 1 (13). –С. 69 - 74.

10. Зайнагабдинов Д. А. Математические модели при автоматизированном мониторинге тоннелей в зонах разломов [Текст] / Д. А. Зайнагабдинов, Май Дык Минь // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск, 2013. – №4 (40). – стр. 66–72.

Bykova Natalia Mikhaylovna

Irkutsk State Transport University, Russia, Irkutsk
E-mail: bikovanm@mail.ru

Zainigabdinov Damir Al'fridovich

Irkutsk State Transport University, Russia, Irkutsk
E-mail: damirmt@mail.ru

Belyalov Timur Shamilevich

Irkutsk State Transport University, Russia, Irkutsk
E-mail: belyalov_timur@mail.ru

Criteria for controlling parameters of the electronic deformation monitoring in the transport tunnels

Abstract. The article discusses approaches to the assessment of the transport tunnel geodynamic safety using *electronic deformation monitoring* (EDM) to observe and control the status of their structural elements, both at the stage of construction and in the period of operation. The continuous monitoring of deformations enables one to fix a rapid constructional response to the factors of geodynamic origin, forecast the behavior of tunnel and prevent development of the dangerous processes prior to the formation of damages, creating a float time for making decisions on stabilization of situation. The system can also show the hidden resource easing as a result of the invisible material corrosion, crack propagation and development of other damages. As an example, the authors gives the version of the monitoring system installed in the Severo-Mujskij railway tunnel, including the location map and models of the used strain gauges. The article analyzes the parameters of the electronic deformation monitoring representing the relative strains in the lining and criteria for their control. You may carry out evaluation of the tunnel geodynamic safety according to 3 categories that characterize its operating mode (standard, abnormal, boundary condition). The authors formulated the rules for analyzing indices of sensors of the electronic deformation monitoring and criteria for appointing categories of geodynamic safety.

Keywords: transport tunnels; deformation monitoring; geodynamic safety; categories of geodynamic safety; control criteria; tunnel lining; deformation sensor; interrogator; reaction of structure; seismic event

REFERENCES

1. Bezrodnyy K. P. Geotekhnicheskij monitoring pri stroitel'stve Severo-Muyskogo tonnelya [Tekst] / K.P. Bezrodnyy, A.S. Nikulin, V.G. Trunev // Tonnell'noe stroitel'stvo Rossii i stran SNG v nachale veka : tr. Mezhdunar. prakt. konf. – M. : [b.n.], 2002. – S. 436–439. [Bezrodnyy K. P. Geotekhnicheskij monitoring pri stroitel'stve Severo-Muyskogo tonnelya [Geotechnical monitoring during the construction of the Severomuysk tunnel]. Moscow, 2002].
2. Bezrodnyy K.P. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya tekhnologicheskimi protsessami (ASU TP) v zheleznodorozhnykh tonnelyakh Olimpiyskoy trassy [Tekst] / K.P. Bezrodnyy, I.V. Kul'gin, M.O. Lebedev // Nauka i transport – M.: 2009. – № 1. – S. 24–26. [Bezrodnyy K. P. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya tekhnologicheskimi protsessami (ASU TP) v zheleznodorozhnykh tonnelyakh Olimpiyskoy trassy [The automated control system of technological processes (ACS TP) in railway tunnels of the Olympic route]. Moscow, Nauka i transport, 2009].
3. Frolov Yu.S. Obespechenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti zheleznodorozhnogo tonnelya pri prokhodke nad nim avtotransportnykh tonneley na trasse dublera Kurortnogo prospekta v Sochi [Tekst] / Yu.S. Frolov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo: sb.nauchn.tr. PGUPS. - № 6, 2012.-S. 17-19. [Frolov Yu.S. Obespechenie jekspluatatsionnoj nadezhnosti zheleznodorozhnogo tonnelya pri prokhodke nad nim avtotransportnykh tonneley na trasse dublera Kurortnogo prospekta v Sochi [Ensuring operational reliability of the railway tunnel when penetration over it road tunnels on the road of Kurortny prospect in Sochi]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo: sb.nauchn.tr. PGUPS, 2012].
4. Bezrodnyy K.P. Gorno – ekologicheskij monitoring pri stroitel'stve i ekspluatatsii transportnykh tonneley [Tekst] / Bezrodnyy K.P., Lebedev M.O. // Internet-zhurnal «Naukovedenie», 2014 №5 [Elektronnyy resurs] - M.: Naukovedenie, 2014 - Rezhim dostupa: <http://naukovedenie.ru/pdf/12ko514.pdf> . [Bezrodnyy K.P. Gorno – jekologicheskij monitoring pri stroitel'stve i jekspluatatsii transportnykh tonneley [Mining – environmental monitoring during the construction and operation of transport tunnels] // On-line «Naukovedenie», 2014 №5 - Moscow, Naukovedenie, 2014].
5. Bykova N.M. Soderzhanie zheleznodorozhnykh tonneley s ispol'zovaniem avtomatizirovannykh sistem geotekhnicheskogo monitoringa / N.M. Bykova, D.A. Zaynagabdinov, T.Sh. Belyalov // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. – Irkutsk, 2014. – s. 589-597. [Bykova N.M. Soderzhanie zheleznodorozhnykh tonneley s ispol'zovaniem avtomatizirovannykh sistem geotekhnicheskogo monitoringa [Content railway tunnels using automated geotechnical monitoring systems]. Irkutsk, Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona, 2014]
6. Zalutskiy V.T. Geodezicheskij monitoring dlya izucheniya smeshcheniy gornykh blokov v rayone Severo-Muyskogo tonnelya [Tekst] / V.T. Zalutskiy, N.M. Bykova // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie. – Irkutsk, 2005. – № 4 (8). – S. 133–139. [Zalutskiy V.T. Geodezicheskij monitoring dlja izucheniya smeshheniy gornykh blokov v rajone Severo-Muyskogo tonnelya [Geodetic monitoring to study the displacement of mining blocks near the Severomuysk tunnel]. Irkutsk, Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie, 2005].
7. Bykova N.M. Severo-Muyskiy tunnel' – iz KhKh v KhKhI vek [Tekst] / N.M. Bykova, S.I. Sherman. - Novosibirsk: Nauka, 2007. - 184 s. [Bykova N.M. Severo-Muyskiy tunnel' [The Severomuysk tunnel]. Novosibirsk, Nauka, 2007].

8. Zaynagabdinov D. A. Transportnye tonneli i geodinamika gornyx massivov [Tekst] / D. A. Zaynagabdinov, N.M. Bykova // Internet-zhurnal «Naukovedenie», 2014 №5 [Elektronnyy resurs] - M.: Naukovedenie, 2014] – Rezhim dostupa: <http://naukovedenie.ru/pdf/13ko514.pdf> . [Zaynagabdinov D. A. Transportnye tonneli i geodinamika gornyx massivov [Transport tunnels and geodynamics of mountain ranges] // On-line «Naukovedenie», 2014 №5 - Moscow, Naukovedenie, 2014].

9. Bykova N.M. Izmereniya deformatsiy v stenakh obdelki i putevom betone Severo-Muyskogo tonnelya s ispol'zovaniem fotouprugikh datchikov [Tekst] / N. M. Bykova, A.S. Isaykin, A.N. Morgunov, D.A. Zaynagabdinov // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie. – Irkutsk, 2007. – № 1 (13). –S. 69 - 74. [Bykova N.M. Izmereniya deformatsiy v stenakh obdelki i putevom betone Severo-Muyskogo tunnelja s ispol'zovaniem fotouprugih datchikov [Measurements of deformations in the walls of lining and track concrete the Severomuysk tunnel using photoelastic gauges]. Irkutsk, Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie, 2007].

10. Zaynagabdinov D. A. Matematicheskie modeli pri avtomatizirovannom monitoringe tonneley v zonakh razlomov [Tekst] / D. A. Zaynagabdinov, May Dyk Min' // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie. – Irkutsk, 2013. – №4 (40). – str. 66–72. [Zaynagabdinov D. A. Matematicheskie modeli pri avtomatizirovannom monitoringe tonnelej v zonah razlomov [Mathematical models for automated monitoring of tunnels in fault zones]. Irkutsk, Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie, 2013].