

К.П. БЕЗРОДНЫЙ,
 М.О. ЛЕБЕДЕВ, Ю.С. ИСАЕВ,
 А.Д. БАСОВ, О.В. БОЙКО,
 К.В. РОМАНЕВИЧ, Р.И. ЛАРИОНОВ
 ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»
 В.Г. ТРУНЕВ
 ООО «НИЦ «Бамтоннель»

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ – ЗАЛОГ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТОННЕЛЕЙ

Геотехнический мониторинг на всех стадиях строительства и эксплуатации таких сложных инженерных сооружений, как тоннели, является важнейшим элементом предупреждения аварий, прогноза технического состояния конструкций и безопасной эксплуатации.

Мировая практика эксплуатации тоннелей свидетельствует: в первые 5–10 лет после строительства серьезных повреждений конструкций и оборудования не возникает. В последующие 15–25 лет от резких колебаний температуры воздуха, агрессивного воздействия воды, обледенений, изменения состояния грунтов оснований начинают проявляться дефекты, особенно в бетонных обделках. После полувека эксплуатации обнаруживаются повреждения, связанные с просчетами проектирования и строительства, старения материала конструкций, понижения деформационно-прочностных свойств во вмещающих тоннели породах.

На примере эксплуатации одного из самых сложных действующих тоннелей мира – Северомуйского, который располагается в сейсмичной Байкальской рифтовой зоне, российские ученые и практики подтвердили и обосновали необходимость геотехнического мониторинга, как возможности с помощью современных систем контроля, обеспечить безопасную эксплуатацию подземных сооружений подобного типа.

Северомуйский тоннель, как известно, входит в состав Байкало-Амурской магистрали, 45-летие которой строители БАМа отмечают в июле этого года.



Действующий Северомуйский тоннель (СМТ) в однопутном исполнении с параллельной транспортно-разведочно-дренажной штольной (ТРДШ) был сдан в эксплуатацию в 2004 году. Его строительство велось почти 30 лет, что было связано с необычно сложными природными условиями, недостаточной изученностью трассы тоннеля на стадии изысканий, отсутствием опыта проектирования и строительства тоннелей в сложных горно-геологических условиях. Сложность природных условий была обусловлена тем, что СМТ располагался в сейсмичной Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) с вероятным проявлением землетрясений интенсивностью более 9 баллов. Высокая сейсмическая активность территории связана с неотектоникой, развитием новейших тектонических структур.

По инженерно-геологическим и гидро-геологическим условиям строительства СМТ длиной 15,3 км и глубиной заложения в Гольцовоой части до 1 км является одним из наиболее сложных тоннелей мира. Блоково-разрывное строение Муякан-Ангара-канского междуречья явилось характерной особенностью геологии СМТ. Вдоль трассы

тоннеля при уточнении геологических условий проходки в ходе строительства были выделены структурные блоки, местоположение которых указано в табл. 1.

Горные породы СМТ представлены гранитами, которые в тектонических зонах в разной степени разрушены до состояния песка и глины. Устойчивость гранитов в забоях подземных выработок зависит от их прочностных свойств, трещиноватости и водонасыщенности. Раскрытие трещин и их водонасыщенность определяются напряженным состоянием и его видом: если преобладает напряжение растяжения, то раскрытие и водопроницаемость горных пород выше, а преобладание напряжений сжатия способствует закрытию трещин и уменьшению водопроницаемости и водообильности горных пород. Общая протяженность разломных зон по трассе тоннеля и штольни составила около 1/3 его длины.

При строительстве тоннеля были смонтированы замерные станции, оснащенные датчиками (рис. 1), фиксирующими местные суммарные деформации конструкций от горного давления, гидростатики и температурных воздействий. По измеренным мест-



ным деформациям вычисляются суммарные напряжения от всех воздействий.

Система замерных станций по трассе тоннеля предназначена для измерения, регистрации и оперативного анализа напряженно-деформированного состояния конструкций крепи и обделки Северомуйского тоннеля на воздействия горного и гидростатического давлений с учетом температурных напряжений, а также вычислением напряжений в обделках тоннеля от горного давления и сравнение результата с запасом несущей способности.

Получаемые данные служили основой оперативного контроля напряженно-деформированного состояния Северомуйского тоннеля, находящегося под воздействием горного и гидростатического давлений, а также сейсмоявлений, своевременного вмешательства в конструктивные изменения обделок.

Замерные станции на Северомуйском тоннеле были смонтированы, начиная с 1978 года, в различных горно-геологических условиях и предназначались для определения проявления горного и гидростатического давления, сил температурного и сейсмического воздействия на обделку основного тоннеля и транспортно-разведочно-дренажной штольни (ТРДШ).

Наличие таких замерных станций оказало большую роль в выборе рациональных конструкций крепи и обделки, а также в технологии их сооружения.

Учитывая высокую сейсмическую активность района строительства СМТ, особое внимание при строительстве и эксплуатации тоннеля уделялось проявлениям напряженно-деформированного состояния в виде остаточных деформаций, которые были зарегистрированы при долговременных наблюдениях на замерных станциях и расчетов соответствующих напряжений. По состоянию на 1989 год, на СМТ в работе находилось 18 замерных станций с датчиками деформометрами ПЛДС-400.

На рис. 2 приведены результаты измерений деформаций на замерной станции №12. Видно, что два датчика среагировали активно в июне 1988 года на землетрясение с $K = 13$ с эпицентром, расположенном примерно в 40 км от этой замерной станции. Также отмечены скачки деформаций, которые можно связать с землетрясениями 1986 г. — одним в апреле и двумя парами землетрясений в мае и июле с $K = 11$. Максимальные остаточные деформации составили $-2 \cdot 10^{-4}$.

Для обеспечения безопасной эксплуатации Северомуйского тоннеля при его строительстве и первых годах эксплуатации создавалась система геодинамической безопасности (геотехнический мониторинг —

Таблица 1
Местоположение структурных блоков

Тектонические блоки III порядка	Привязка			
	пикеты по поверхности		пикеты по тоннелю	
	от	до	от	до
Западный	65+56	÷ 18+50	65+56	÷ 18+00
IV тектоническая зона	18+50	÷ 07+10	18+00	÷ 08+10
Гольцовый блок	07+10	÷ 26+80 _{вост.}	08+60 _{зап.}	÷ 26+45 _{вост.}
Троговая тектоническая зона	26+80	÷ 29+60	26+45	÷ 31+47
Промежуточный тектонический блок	29+60	÷ 38+10	31+47	÷ 39+70
III тектоническая зона	38+10	÷ 47+70	39+70	÷ 45+80
Восточный блок В и его тектонические блоки IV порядка:	47+70	÷ 89+03	45+80	÷ 89+03
V ₁			45+80	÷ 53+50
V ₂			53+50	÷ 70+00
V ₃			70+00	÷ 81+10
V ₄			за пределами тоннеля	

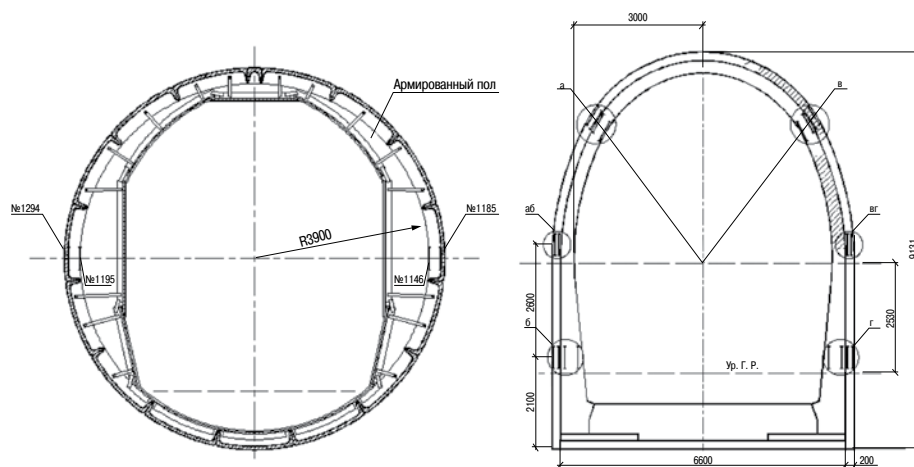


Рис. 1. Характерный вид замерных станций, оснащенных датчиками: а – чугунная тубинговая обделка (с датчиками на горизонтальном диаметре) с облойкой усиления в зоне ангараканской депрессии Западного тектонического блока; б – временная арко-бетонная крепь и постоянная обделка из монолитного железобетона в IV тектонической зоне.

ГТМ) тоннеля в составе АСУ ТП. В данную систему входили автоматизированные системы сейсмомониторинга и контроля напряженно-деформированного состояния вмещающего массива методом естественных импульсов электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ). Большая часть этого проекта была реализована — в тоннеле установлены датчики, размещено оборудование (рис. 3), выполняющее измерения по датчикам, проложены кабельные линии для передачи информации в помещение АСУ ТП, расположенном на Восточном портале. Оставалось выполнить только пусконаладочные работы. К сожалению, финансирование работ на этом было закончено.

На этом фоне контрастно выделяется система геодинамической безопасности (геотехнического мониторинга), реализованная

при строительстве олимпийских тоннелей на совмещенной дороге «Адлер — Альпика-Сервис».

Геотехнический мониторинг в составе АСУ ТП эксплуатации транспортных тоннелей на участке «Адлер — горноклиматический курорт «Альпика-Сервис», состоит из:

- контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) обделок;
- оценки устойчивости системы «обделка — вмещающий массив» методом ЕЭМИ;
- контроля состояния системы «обделка — вмещающий массив» по данным регистрации сейсмических колебаний с помощью сети сейсмостанций (сейсмомониторинг).

Информация с контрольно-измерительной аппаратуры девяти тоннелей в режиме реального времени поступает на серверы мониторинга в здание диспетчерской по авто-

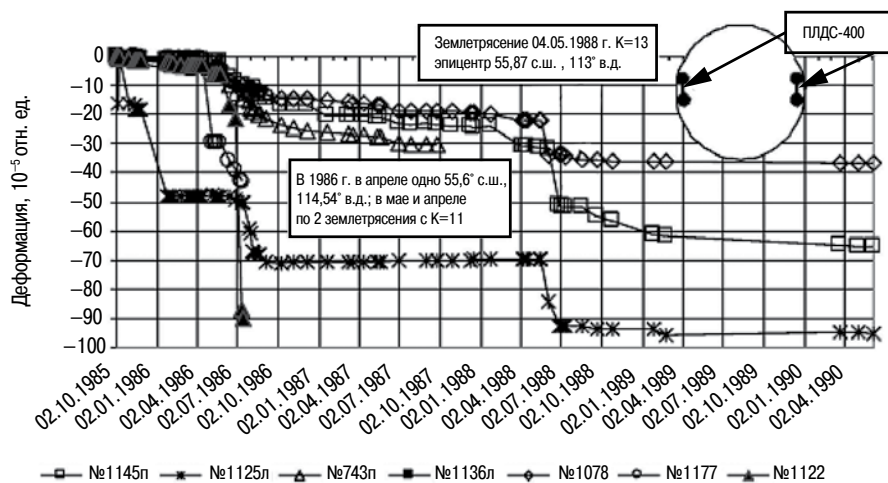


Рис. 2. Результаты долговременных измерений деформаций на замерной станции №12 ТРДШ пикет 45+80. Деформометры ПЛДС-400 установлены на железобетонные тубинги



Рис. 3. Размещение оборудования системы геодинамической безопасности в тоннеле: 1 – трехкомпонентный сейсмодатчик; 2 – блок обработки сейсмомониторинга; 3 – блок обработки ЕИЭМПЗ; 4 – коммутационный шкаф

мобильной дороге и в здание диспетчерской по железной дороге. После обработки поступающих данных информация визуализируется на отдельном АРМе, расположенном на столе перед диспетчером, осуществляющего контроль всех автоматизированных систем безопасной эксплуатации тоннелей.

Во время эксплуатации Северомуйского тоннеля за техническим состоянием тоннельной обделки, водопроявлениями, водопритоками и гидростатическим давлением воды на обделку ведет наблюдение Тоннелеобследовательская станция Восточно-Сибирской железной дороги (ТОС ВСЖД). В декабре 2016 года было проведено обследование дренажной и водоотводной систем тоннеля и дренажных коллекторов по теме «Реконструкция верхнего строения пути (ВСП) и дренажно-транспортной штольни Северомуйского тоннеля» силами ООО «НИЦ «Бамтоннель».

При обследовании обделки тоннеля зафиксированы следующие дефекты:

- водопроявления различной интенсивности, в том числе течи, капез, сырость;
- высолы;

- трещины разной направленности, в том числе продольные, косые, поперечные;
- отслоение штукатурки на отдельных участках обделки и у деформационных швов.

Обнаруженные в результате обследования дефекты в виде водопроявлений и высолов указывают на недостаточную эффективность работы дренажной системы тоннеля на этих участках. В обделке тоннеля зафиксировано большое количество участков с сыростью и капезом, в штольне на аналогичных участках, как правило, действуют течи из скважин, за исключением некоторых участков, на которых отсутствуют водопроявления.

Дренажная штольня функционирует не в полном объеме, так как помимо участков, на которых обводнена штольня и не обводнен тоннель, есть участки, на которых обводнены и штольня, а также отмечены несколько участков, где имеется сырость и капез в тоннеле, но при этом нет водопритоков в штольню.

Камеры заобделочного дренажа не решают вопрос осушения тоннеля в полной мере, так как вблизи многих КЗД имеются водопроявления на поверхности обделки тоннеля. Причиной слабой эффективности работы КЗД может быть сниженная со временем захватывающая способность дренажных скважин, а также малое их количество. Установлено, что из 48 камер заобделочного дренажа только пять можно признать работающими, остальные — практически сухие и не выполняют водозахватные функции.

При обследовании обделки тоннеля зафиксировано множество водопроявлений в виде течей по швам и трещинам обделки, капезей, мокрых пятен, указывающих на то, что несмотря на значительные водопритоки в ТРДШ, эффективное осушение тоннельной обделки не обеспечивается.

А что же при этом происходит с напряженным состоянием самих обделок? В 2017

году при ревизии всех замерных станций по трассе тоннеля были выполнены измерения по датчикам, установленным внутри обделок. На рис. 4 показаны кривые изменения напряженного состояния обделки во времени.

На всех замерных станциях по отдельным датчикам отмечены незначительные изменения напряженного состояния, как в сторону уменьшения напряжений, так и в сторону их увеличения. Но при этом в среднем напряженное состояние обделок остается стабильным.

Является ли такая информация достоверной? Безусловно, да. Струнные датчики (тензометры) установлены во многих искусственных сооружениях, в том числе транспортных тоннелях, гидротехнических, подземных сооружениях, объектах сложных геометрических форм большого поперечного сечения. И в течение десятилетий являются основным источником для получения информации о техническом состоянии сооружений. Но только в статической работе сооружений.

А что же с динамической работой обделок тоннеля? Для этого используется аппаратура системы сейсмомониторинга, которая обеспечивает непрерывную регистрацию сейсмических колебаний и вычисление по заданным критериям динамических воздействий от сейсмических процессов в обделке тоннеля и во вмещающем массиве горных пород с последующим суммированием с показаниями датчиков контроля НДС обделок.

Как показала практика эксплуатации системы автоматизированного мониторинга олимпийских тоннелей, с определенными формами динамических нагрузок, которые не являются одномоментными, справляется система контроля НДС обделок. Так, например на первом железнодорожном тоннеле было зафиксировано 5 событий, связанных с проливными дождями (18.09.2014, 25.06.2015, 04.06.2016, 29–30.08.2017, 25.10.2018, рис. 5.)

В это время происходит мгновенное увеличение напряженно-деформированного состояния обделки за счет роста гидростатического давления. Нормальные тангенциальные напряжения в обделке получают двукратное приращение по отношению к величинам напряжений, действующим до этого. Но сразу после прекращения дождя напряженное состояние обделки возвращается к первоначальному состоянию. Так, например, обильные атмосферные осадки 25.10.2018 привели к росту гидростатического давления, которое сохранялось в течение 10 часов (с 5:00 до 14:00), максимальное увеличение сжимающих нормальных тангенциальных напряжений составило 0,7 МПа. Быстрому росту гидростатического давления способствует трещиноватость массива,

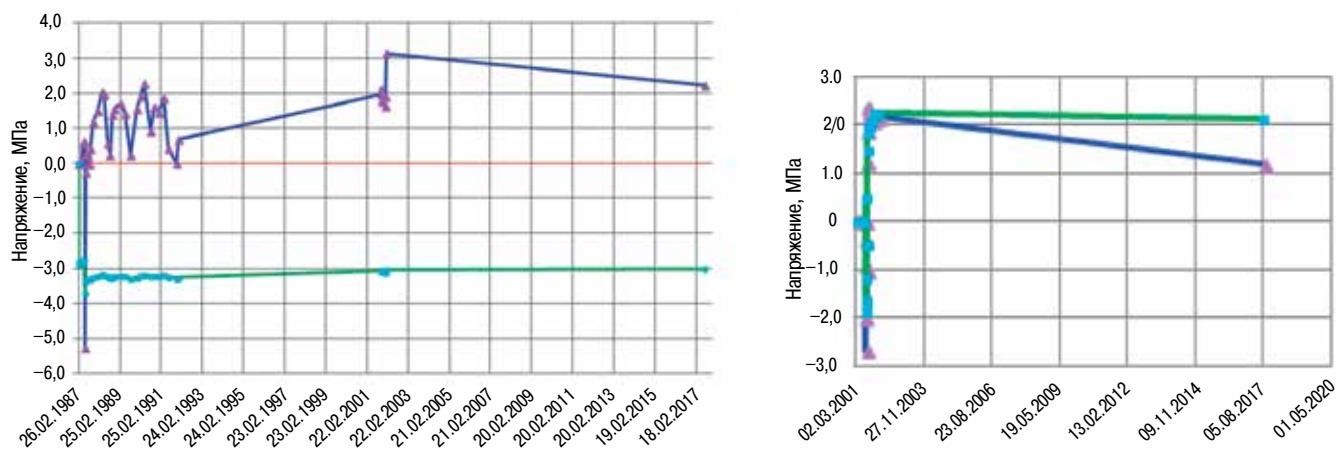


Рис. 4. Кривые изменения напряженного состояния обделки тоннеля: а – в зоне ангараканской депрессии; б – напряжения в монолитной железобетонной обделке на ПК 15+65 (ВП)

представленного серыми известняками, склонного к карстообразованию.

С учетом сложных гидрогеологических условий, в которых построен Северомуйский тоннель, при наличии автоматизированной системы контроля НДС обделки при помощи датчиков, размещенных внутри конструкций, можно было бы ответить на ряд вопросов, связанных с эффективностью работы дренажной системы и ее влиянием на НДС обделки.

При строительстве Северомуйского тоннеля произошло большое количество аварийных ситуаций с выносом в тоннель и штольню водогрунтовой массы объемом до 6500 м³, разрушением крепей и обделок, потерей проходческого оборудования и человеческими жертвами. Происходящие в таких случаях разуплотнения окружающего массива впоследствии могут влиять на изменение напряженного состояния обделок в течение многих лет. Поэтому на таких участках при эксплуатации необходим более тщательный контроль технического состояния конструкций.

По результатам заключения экспертной комиссии, созданной Госгортехнадзором России для расследования аварии в IV тектонической зоне 16–22 апреля 1999 года, был сделан вывод, что при эксплуатации СМТ, положение станет еще более опасным, поскольку на устойчивость обводненного массива вмещающих горных пород, представленного нарушенными и перематыми породами, будет оказывать значительное негативное воздействие вибрация от движения поездов в тоннеле. Такое же негативное воздействие будут оказывать землетрясения слабой и средней интенсивности (до 7 баллов).

Образовавшаяся при аварии депрессионная воронка и провал на поверхности над трассой тоннеля на ПК 15+50 диаметром 5 м и глубиной 12 м способствует дополни-

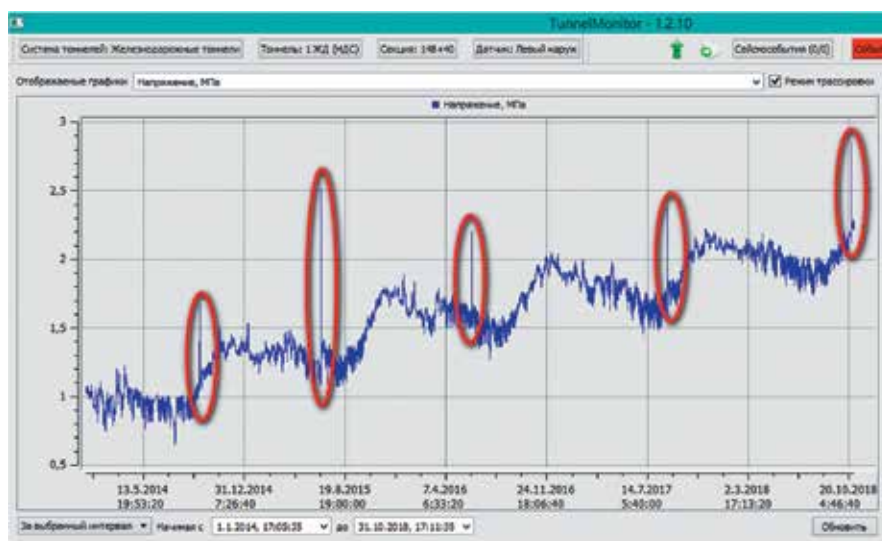


Рис. 5. Изменение нормальных тангенциальных напряжений в обделке из монолитного железобетона на ПК 148+40, МПа. Красным цветом выделено увеличение напряжений из-за проливных дождей

тельным водопритокам в тоннель и штольню от источников в четвертичных отложениях межгорных речных долин и коры выветривания. С учетом большого количества участков со значительными водоприточками, в период эксплуатации тоннеля очень важной задачей является контроль технического состояния дренажных систем тоннеля и штольни по всей трассе для исключения условий увеличения нагрузок на обделки за счет гидростатического давления.

Мировая практика эксплуатации тоннелей свидетельствует, что в первые 5–10 лет после строительства никаких серьезных повреждений конструкций и оборудования в тоннелях не возникает. Через 15–25 лет начинают проявляться некоторые дефекты, особенно в бетонных обделках от резких колебаний температуры воздуха, агрессивного воздействия воды, обледенений, просадок породы в основании тоннеля и т.п. Еще через 50–70 лет появляются повреждения, связанные с просчетами проектирования и

строительства, старения материала конструкций, понижения деформационно-прочностных свойств во вмещающих тоннели породах. Но серьезные нарушения в тоннелях, особенно построенных в сложных горно-геологических условиях с высокой сейсмичностью как СМТ, могут случиться практически в любое время из-за стихийных бедствий — землетрясений, наводнений и других, а также несоблюдения условий безопасной эксплуатации, дефектах в обделке, состоянии окружающего массива, порталах, пути, несвоевременном проведении осмотра и ремонта.

Любая авария в тоннелях представляет собой неконтролируемую ситуацию и может привести к тяжелым последствиям. В таких условиях геотехнический мониторинг на всех стадиях строительства и эксплуатации тоннеля представляется совершенно необходимым элементом предупреждения аварий, прогноза технического состояния конструкций и безопасной эксплуатации. ■