

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБДЕЛКИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ



ЛЕБЕДЕВ М.О., ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», канд. техн. наук,
БЕЗРОДНЫЙ К.П., ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», докт. техн. наук,
ШЛЯЕВ С.А., ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», инженер

В настоящее время оценку технического состояния железнодорожных тоннелей проводят на основании инструкции [1], выполняя визуальные осмотры с заданной периодичностью. Контрольную нивелировку выполняют один раз в пять лет.

К сожалению, при таком подходе невозможно дать своевременную оценку технического состояния несущих конструкций и, тем более, прогнозировать его. Искажению реальной оценки результатов визуальных осмотров способствуют косвенные факторы: неверная оценка значимости выявленных нарушений; формальный подход к выполнению рутинных задач; необъективное заключение специалиста по работе подземных сооружений (геотехника или геомеханика) и т.д.

Визуальные осмотры не позволяют определить причинно-следственные связи выявленных нарушений с процессами, происходящими в системе «обделка—вмещающий массив». Ведь при реализации проектной документации на строительство тоннеля в полном объеме видимые нарушения на внутреннем контуре обделки могут проявиться только вследствие изменения схемы взаимодействия обделки с вмещающим массивом, вызванного техногенными или природными воздействиями. Такое нарушение можно выявить только при наличии контрольно-измерительной аппаратуры в теле самой обделки, позволяющей получать информацию о реализованном горном давлении при строительстве тоннеля. Впоследствии, при эксплуатации тоннеля, можно следить за изменением давления.

Как показывает опыт, для контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) обделки транспортных тоннелей оптимальным решением является оснащение обделки на этапе строительства (с последующей передачей смонтированного оборудования эксплуатирующей организации) контрольно-измерительной аппаратурой в составе горно-экологического мониторинга [2].

В Российской Федерации самый масштабный горно-экологический мониторинг был реализован при строительстве транспортных тоннелей олимпийской трассы на участке Адлер—«Альпика-Сервис», на которой построено шесть железнодорожных тоннелей и три автодорожных тоннеля общей протяженностью подземных выработок около 32,5 км.

В состав горно-экологического мониторинга входили: геодезическо-маркшейдерские наблюдения; сейсмологические наблюдения и исследования; геофизические и геомеханические исследования; гидрогеологические наблюдения; оценка устойчивости оползневых склонов; система экологического мониторинга.

На основании данных геотехнического (горно-экологического) мониторинга осуществлялась корректировка проектных решений. Так, строительство железнодорожного тоннеля № 4 велось в массиве, представленном аргиллитами блочной структуры и полускального состояния. Напряженное состояние тяжелой аркобетонной крепи, возводимой с отставанием от забоя на 20—30 м, после ее устройства практически не изменялось. Максимальное значение сжимающих напряжений в бетоне не превышало 1 МПа. Разработка штроссовой части также не повлияла на напряженное состояние крепи. Для таких условий аркобетонная крепь является неэффективной при принятой технологии строительства: нанесение на призабойном участке набрызгбетона и установка анкерной крепи, а с отставанием на 20—30 м — возведение аркобетонной крепи. Поэтому были разработаны рекомендации по облегчению ее конструкции.

Напряженно-деформированное состояние крепи и обделок определяют с помощью струнных датчиков, измеряя относительные деформации в месте их установки. Затем, зная относительные деформации, вычисляют напряжения по специаль-

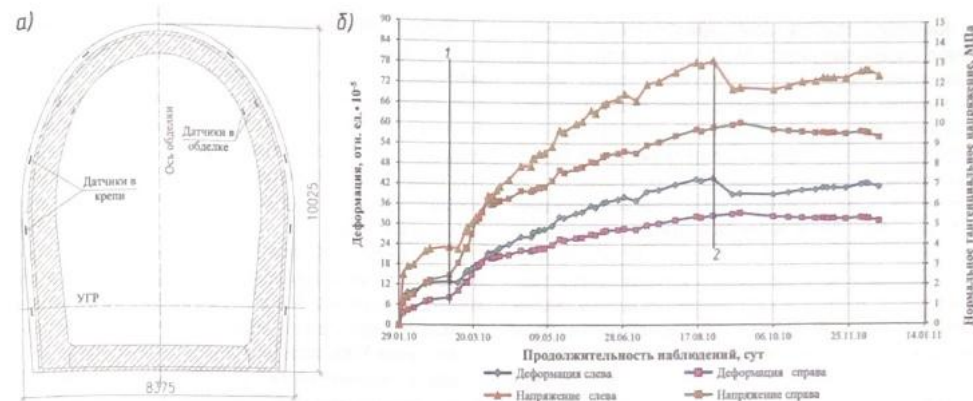


Рис. 1. Определение напряженно-деформированного состояния крепи и обделки: а — размещение струнных датчиков в крепи и обделке; б — формирование напряженного состояния временной крепи с учетом технологии строительства; 1 — разработка штроссовой части; 2 — возведение постоянной обделки; УГР — уровень головки рельсов

ной методике (для бетонных и железобетонных конструкций) с учетом загрузки бетона в раннем возрасте и его ползучести.

Комплексное применение датчиков (деформометров) внутри конструкций (рис. 1, а) и измерение деформаций внутреннего контура, начиная с момента их возведения, дают возможность получить наиболее полное представление о формировании НДС крепи и обделок. Такая система позволяет контролировать качественное и количественное изменение НДС крепи на всех этапах раскрытия тоннеля на полное сечение.

На рис. 1, б показано формирование НДС временной крепи для участка железнодорожного тоннеля № 1 со стороны Северного портала, отличающегося инженерно-геологическими условиями, описанными ранее для тоннеля № 4. Здесь отчетливо прослеживается реологическая составляющая формирования напряженного состояния крепи, а именно его незатухающее приращение вплоть до возведения постоянной обделки.

Раскрытие тоннеля на полное сечение (после разработки штроссовой части) значительно увеличило скорость приращения напряжений и деформаций внутреннего контура, которые составили до 100 мкм.

Такому развитию НДС способствовало дополнительное замачивание массива, представленного аргиллитами, по системе трещиноватости после раскрытия сечения тоннеля. Разработка проекта дополнительного усиления набрызгбетонной крепи с арматурными арками анкерной крепью позволило значительно уменьшить смещения крепи и обеспечить проектное сечение тоннеля к моменту возведения постоянной обделки.

Сопоставление напряжений в крепи с деформациями внутреннего контура для конкретного сечения позволяет с меньшими затратами оценить несущую способность крепи на остальных участках тоннеля, ограничиваясь только контролем деформаций внутреннего контура [3].

Наиболее сложные инженерно-геологические условия сопровождали строительство тоннельных комплексов № 5 и 6, которые пересекал геологический разрез, представленный большим разнообразием пород: магматическими, осадочными метаморфизованными и неметаморфизованными стратифицированными образованиями мезозойской эры. Участки тоннелей, представленные углистыми сланцами, редкими линзами аргиллитов, песчаниками и маломощными (от 1—5 до 60 м) телами различных порфиров, глинами, нуждались в материалоемких креплениях. Сланцы — от низкой прочности до прочных; в тектонических зонах перетерты до крупнопесчаной фракции, из листочков сланца и зерен кальцита. При воздействии воды такие сланцы быстро переходят в глинистое мягкопластичное состояние.

Осложнили строительство этих тоннелей также мощные (глубиной до 60 м и более) везы четвертичных отложений, приуроченные к древним водотокам, берущим начало от хребта Аибга. При большом (30—50 %) содержании крупнообломочной фракции (преимущественно порфиров и метаморфизованных аргиллитов) породы, особенно на контакте с коренным склоном, легко приобретают подвижное состояние при постороннем воздействии.

Контроль НДС крепей (аркобетонная крепь с применением двутавров № 27 и 30 с дополнительной установкой двух арматурных арок между стальными арками) тоннелей (в составе тоннельных комплексов № 5 и 6) показал, что сжимающие нормальные тангенциальные напряжения в бетоне калоттной части достигали 27 МПа, а в штроссовой части — до 11 МПа. На достаточно протяженных участках были зафиксированы значительные растягивающие напряжения (до 7 МПа) на внутреннем контуре с нагорной стороны. Такое распределение напряжений свидетельствует о значительном боковом давлении с нагорной стороны при достаточном отпоре с противоположной стороны, что подтверждается распределением деформаций внутреннего контура крепи. После раскрытия калоттной части деформации на отдельных участках достигали 150–200 мм, а после проходки штроссовой части увеличивались до 350 мм, что потребовало последующего перекрепления перед возведением постоянной обделки.

Наиболее сложные участки, выявленные по трассе тоннелей при строительстве, безусловно, являются потенциально опасными и при эксплуатации. Но как контролировать такие участки при эксплуатации? Можно ли полагаться только на визуальные осмотры? Ведь практика передачи информации о сложных участках от строительных организаций в эксплуатирующие до сих пор отсутствует.

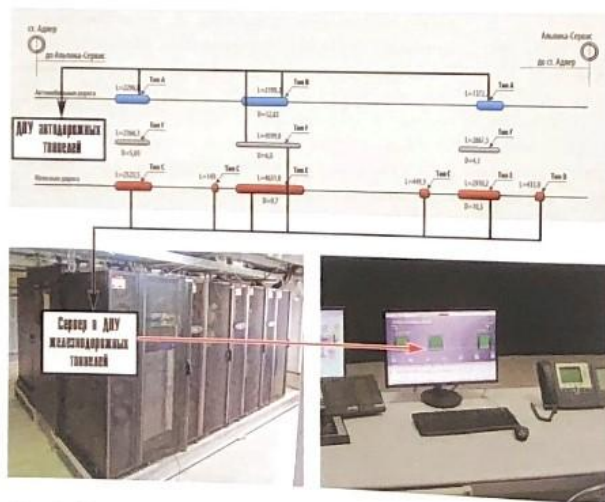


Рис. 2. Принципиальная схема сбора контролируемых параметров с систем мониторинга транспортных тоннелей и передачи их на серверы мониторинга (ДПУ — диспетчерский пункт управления)

Такой контроль можно осуществлять при помощи контрольно-измерительной аппаратуры, установленной при строительстве на (или в) строительных конструкциях, в том числе в обделках. Вся контрольно-измерительная аппаратура, размещенная в обделках олимпийских тоннелей, включена к автоматизированной системе геотехнического мониторинга, работающей в режиме реального времени.

Геотехнический мониторинг в составе АСУ технологическими процессами эксплуатации транспортных тоннелей на участке Адлер—«Альпика-Сервис» [4] включает в себя:

контроль НДС обделок;
оценку устойчивости системы «обделка—вмещающий массив» методом естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ);

контроль 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 диспетчерскую по автомобильной дороге и в диспетчерскую по железной дороге. После обработки поступающих данных информация визуализируется на отдельном автоматизированном рабочем месте (АРМ) диспетчера (рис. 2), контролирующего все автоматизированные системы безопасной эксплуатации тоннелей.

Контроль НДС обделок включает в себя определение нормальных тангенциальных напряжений и сопоставление их с расчетными значениями.

Для оценки устойчивости системы «обделка—вмещающий массив» регистрируют вариации поля ЕЭМИ в целях контроля развития геодинамических процессов [5] в зонах разупрочнений (места установки датчиков ЕЭМИ определены при строительстве тоннелей по профилированию участка поля ЕЭМИ в процессе горнопроходческих работ и возведения постоянной обделки).

Сейсмический мониторинг позволяет фиксировать амплитудно-частотные характеристики сейсмических событий как природного, так и техногенного характера в различных частотных

диапазонах. Измеренные ускорения смещений вследствие землетрясения (низкочастотная область — от 0 до 20 Гц) позволят определить дополнительные напряжения в обделке и суммировать их с показаниями датчиков НДС, а затем оценить запас несущей способности обделки искусственного сооружения. При фиксации землетрясений на АРМ диспетчера выводятся значения в баллах по шкале MSK-64.

Наглядным примером сейсмического мониторинга является район Северомуйского тоннеля [6], где была развернута временная сеть из шести сейсмостанций (три из них были установлены в Северомуйском тоннеле и в обходных тоннелях на бетонных основаниях). Были получены записи землетрясений с очагами, близкими к тоннелю. За период с 01.01.2014 по 31.05.2015 зарегистрировано 225 землетрясений с $K_p \geq 10$ (K_p — энергетический класс землетрясения). Столько же землетрясений произошло за 45 предшествующих лет во всем Муйском районе.

После обработки акселерограмм (записей) было получено выражение, определяющее затухание сейсмических колебаний, и выявлена зависимость виброскорости от расстояния и энергетического класса землетрясения непосредственно для района Северомуйского тоннеля. С помощью полумпирического метода, используемого для оценки сильного сейсмического воздействия по записям слабых землетрясений, были построены прогнозные расчетные акселерограммы для дневной поверхности и основания тоннеля: при землетрясении с магнитудой 7,6 с очагом, находящимся на расстоянии 30 км от тоннеля, максимальная амплитуда ускорений грунта на дневной поверхности будет составлять 538 см/с², а в основании тоннеля — 341 см/с². Сейсмический эффект на дневной поверхности составит 8,7 баллов, а внутри тоннеля — 8,0 баллов по шкале MSK-64. Основной максимум в спектрах колебаний грунта на дневной поверхности и в основании тоннеля приходится на 1,5–2,5 Гц.

Отношение спектров есть не что иное, как амплитудно-частотная характеристика грунтовой толщи, находящейся между основанием тоннеля и дневной поверхностью, которая определяет резонансные особенности грунтовой толщи, перекрывающей тоннель.

Все тоннельные участки со-

вмещенной (автомобильной и железной дороги) трассы Адлер—«Альпика-Сервис» находятся в зоне сейсмичности 8–9 баллов, местами с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями. В каждом тоннеле установлена аппаратура для непрерывной записи сейсмического сигнала как природного, так и техногенного характера. За весь период наблюдений не было зарегистрировано ни одного землетрясения, однако важную информацию, такую как спектральный состав колебаний при землетрясении, можно получить на основании записей сейсмостанции «Сочи».

В качестве примера на рис. 3 приведена сейсмограмма землетрясения амплитудой 5,7 баллов, произошедшего 11.10.2008 на Восточном Кавказе.

Энергия волны землетрясения распределяется в частотном диапазоне от 0,1 до 9,0 Гц, при этом наибольший вклад дают поперечные и поверхностные волны (рис. 4).

С увеличением магнитуды землетрясения максимум энергии сейсмических колебаний смещается в область низких частот, поэтому система сейсмического мониторинга в тоннелях настроена на фиксацию землетрясений в диапазоне частот до 10 Гц.

В то же время при фиксации сейсмических событий техногенного характера с большими амплитудами (например, от грузовых поездов) максимальная энергия колебаний системы «обделка—вмещающий массив» может распределяться в том же диапазоне. Изменение амплитудно-частотных характеристик во времени при известных (неизменных) параметрах подвижного состава свидетельствует о изменении условий совместной работы обделки и вмещающего массива. Автоматизированная система контроля НДС обделки по-

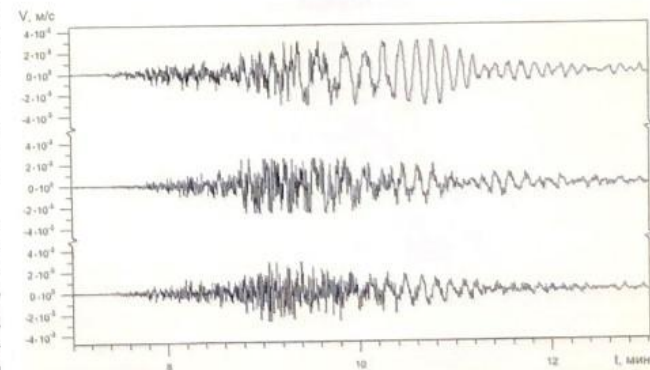


Рис. 3. Сейсмограмма землетрясения амплитудой 5,7 баллов, зарегистрированного 11.10.2008 сейсмостанцией «Сочи»



Рис. 4. Изменение нормальных тангенциальных напряжений, МПа, на ПК 148+40 (красным цветом выделено увеличение напряжений из-за проливных дождей)

звонит фиксировать его изменение от воздействия основных факторов: горного давления, температурных изменений, гидростатического давления.

За весь период наблюдений (с конца 2013 г. по настоящее время) системой геотехнического мониторинга по контролю НДС обделки на южном портале железнодорожного тоннеля № 1 на ПК 148+40 (см. рис. 4) зафиксировано пять событий, связанных с проливными дождями (18.09.2014, 25.06.2015, 04.06.2016, 29–30.08.2017, 25.10.2018).

Каждое такое событие сопровождается мгновенным увеличением НДС обделки за счет роста гидростатического давления. Нормальные танген-

циальные напряжения в обделке получают двукратное приращение. После прекращения дождя напряженное состояние обделки возвращается к первоначальному. Например, обильные атмосферные осадки 25.10.2018 привели к росту гидростатического давления, которое сохранялось в течение 10 ч (с 5:00 до 14:00), максимальное увеличение сжимающих нормальных тангенциальных напряжений составило 0,7 МПа.

Быстрому росту гидростатического давления способствует трещиноватость массива, представленного серыми известняками и склонного к карстообразованию. При проходке тоннеля на ПК 148+44 в восточной части забоя была вскрыта карстовая полость объемом около 120 м³, заполненная водой.

Система геотехнического мониторинга особенно важна для контроля технического состояния обделки участков тоннелей, расположенных в породах с реологическими свойствами. Например, для тоннеля № 1 (см. рис. 1, б) пятилетние наблюдения позволяют сделать однозначный вывод об увеличении горного давления вследствие ползучести вмещающего массива. В постоянной обделке приращение нормальных тангенциальных напряжений составило 7 МПа (рис. 5), достигнув абсолютного значения 17 МПа.

Качественное изменение НДС обделки свидетельствует о развитии этого процесса с почти линейной скоростью. Несложные расчеты позволяют определить время достижения материалом обделки критических напряжений.

В обделке тоннелей рассматриваемой трассы размещены сотни датчиков для контроля ее НДС во всех литологических зонах. При их установке учитывались тектонические нарушения и разломы, выявляемые при проходке. Впервые созданная в сейсмически опасном районе России автоматизированная система контроля НДС обделки тоннелей в сочетании с

контролем НДС вмещающего массива (ЕОМИ) и сейсмомониторингом способна контролировать и прогнозировать техническое состояние обделки на всем протяжении тоннелей.

В целях обеспечения безопасной эксплуатации функциональных тоннельных систем проводят контроль за техническим состоянием: эвакуационных выходов, противопожарной защиты и системы тушения пожаров, дорожного полотна, тоннельной обделки, порталов, дренажной системы, гидроизоляции, теленаблюдения, очистных сооружений, припортальных водоотводных устройств, вспомогательных подземных выработок и АСУ ТП.

Однако эти меры не в полной степени обеспечивают безопасную эксплуатацию тоннелей. В перечень обязательных мероприятий необходимо также включить геотехнический мониторинг, позволяющий решать задачи по оценке НДС системы «обделка—вмещающий массив», в том числе с учетом тектонических процессов, контроля гидростатического давления и работы дренажных устройств, контроля оползневых припортальных склонов.

В геотехническом мониторинге с точки зрения эксплуатации особую роль играет прогноз состояния системы «обделка тоннеля—вмещающий массив» на основе автоматически формируемой базы данных. Отсутствие заинтересованности организаций, эксплуатирующих тоннели, в такой системе объясняется их неадекватностью, ведь обработка результатов колоссальной по объемам базы данных важна не только для научного прогресса, она

имеет большую практическую ценность для безопасной эксплуатации искусственных сооружений.

Список источников

1. Инструкция по содержанию искусственных сооружений: утв. МПС РФ от 28.12.1998 № ЦП-628. Доступ через СПС «АСПИЖТ» (дата обращения 19.02.2019).
2. О методическом руководстве по комплексу горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей / К.П. Безродный, С.Г. Гендлер, Ю.С. Исаев, М.О. Лебедев, М.А. Иофис // Труды Международной научно-технической конференции «Основные направления развития инновационных технологий при строительстве тоннелей и освоении подземного пространства крупных мегаполисов». М., 2010. С. 18–20.
3. Безродный К.П., Лебедев М.О. Горно-экологический мониторинг при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей Северного Кавказа [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Наукоедение». 2014. № 5 (24). Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/12K0514.pdf>.
4. Безродный К.П., Культин И.В., Лебедев М.О. Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) в железнодорожных тоннелях Олимпийской трассы // Транспорт Российской Федерации. 2009. № 5. С. 24–26.
5. Характерные изменения спектров электромагнитного излучения при контроле напряженно-деформированного состояния обделки тоннеля / Ю.С. Исаев, М.О. Лебедев, А.Д. Басов, К.В. Романевич, С.А. Шляев // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 11. С. 29–36.
6. Черных Е.Н., Чечельницкий В.В. Прогноз реакции Северомуйского тоннеля на сильные землетрясения // Инженерная защита. 2016. № 4 (15). URL: <http://territoryengineering.ru/bez-rubriki/prognoz-reaktsii-severomujskogo-tonnelya-na-silnye-zemletryaseniya/>

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБДЕЛКИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Ключевые слова: обделка тоннелей, вмещающий массив, напряженно-деформированное состояние, автоматизированные системы, прогноз технического состояния.

Лебедев Михаил Олегович — канд. техн. наук, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе ОАО «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru

Безродный Константин Петрович — докт. техн. наук, советник генерального директора ОАО «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, Россия. E-mail: bestodny@lenmetro.ru

Шляев Сергей Алексеевич — инженер, ОАО «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vbstudio@mail.ru

Аннотация. При строительстве совмещенных автомобильной и железной дорог на участке Адлер—«Альпика-Сервис» девять транспортных тоннелей были оснащены автоматизированной системой геотехнического мониторинга, позволяющей выполнять оценку технического состояния системы «обделка—вмещающий массив» и давать прогноз такого состояния. Результаты измерений визуализируются в режиме реального времени и накапливаются в серверах, создавая базу данных.

ESTIMATION AND PREDICTION OF TECHNICAL CONDITION OF THE LINING WHEN OPERATION TRANSPORT TUNNELS

Keywords: lining of tunnels, enclosing solid mass, stress-strain condition, automated systems, prediction of technical condition.

Lebedev Michael — Ph.D., Deputy Director General for research activities, assistant professor, JSC Scientific Research, Design and Surveying Institute «Lenmetrogiprotans», Saint-Petersburg, Russia. E-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru

Bezrodny Konstantin — D.Sci., Adviser Director General, JSC Scientific Research, Design and Surveying Institute «Lenmetrogiprotans», Saint-Petersburg, Russia. E-mail: bestodny@lenmetro.ru

Shlyayev Sergei — Engineer, JSC Scientific Research, Design and Surveying Institute «Lenmetrogiprotans», Saint-Petersburg, Russia. E-mail: vbstudio@mail.ru

Abstract. During the construction of a combined road and railroad on the section Adler—«Alpika-Service», nine transport tunnels were equipped with an automated geotechnical monitoring system, which allows to access the technical condition of the «lining—enclosing solid mass» system and to forecast this condition. The results of measurements are visualized in real time and accumulated in servers to create a database.



Рис. 5. Визуализация нормальных тангенциальных напряжений, МПа, на наружном контуре обделки