УДК [622.1:528](031)

В.Н.ГУСЕВ, *д-р техн. наук, профессор, kmd@spmi.ru*
Е.М.ВОЛОХОВ, *канд. техн. наук, доцент, volohov@spmi.ru*
В.А.ГОЛОВАНОВ, *канд. техн. наук, доцент, kmd@spmi.ru*
И.П.ИВАНОВ, *канд. техн. наук, главный научный сотрудник, kmd@spmi.ru*
М.Ю.ВАСИЛЬЕВ, *аспирант, myv1307@rambler.ru*
В.К.НОСОВ, *аспирант, lmpty87@yandex.ru*
П.И.ЮШМАНОВ, *аспирант, afroman@inbox.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

V.N.GUSEV, *Dr. in eng. sc., professor, kmd@spmi.ru*
E.M.VOLOHOV, *PhD in eng. sc., associate professor, volohov@spmi.ru*
V.A.GOLOVANOV, *PhD in eng. sc., associate professor, kmd@spmi.ru*
I.P.IVANOV, *PhD in eng. sc., chief research assistant, kmd@spmi.ru*
M.U.VASILIEV, *post-graduate student, myv1307@rambler.ru*
V.K.NOSOV, *post-graduate student, lmpty87@yandex.ru*
P.I.USHMANOV, *post-graduate student, afroman@inbox.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ ТОННЕЛЕЙ ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНО-СКАНИРУЮЩЕЙ СЪЕМКИ

Изложена методика лазерно-сканирующей съемки гидротехнических тоннелей общей протяженностью 2,7 км. Приведен визуальный способ обследования тоннелей, выполняемый параллельно с их нивелировкой. Рассмотрен способ деформационной оценки состояния тоннелей путем геометрического анализа 3D-моделей, полученных по данным лазерно-сканирующей съемки.

Ключевые слова: деривационный и напорный тоннели, лазерно-сканирующая съемка, 3D-моделирование тоннелей, геометрический анализ 3D-моделей тоннелей.

METHODS OF THE ESTIMATION OF THE CONDITION OF HYDRAULIC ENGINEERING TUNNELS ACCORDING TO LASER-SCANNING SURVEY

Account method of laser-scanning survey of hydraulic engineering tunnels of 2,7 km is stated in the general extent. The visual way of inspection of the tunnels, carried out in parallel with their leveling is resulted. The way of a deformation estimation of a condition of tunnels by the geometrical analysis of 3D-models received according to laser-scanning survey is considered.

Keywords: the derivational and pressure tunnels, laser-scanning survey, 3D-modelling of tunnels, the geometrical analysis of 3D-models of tunnels.

Правая нитка напорной деривации Зеленчукской ГЭС (ПННД) в Карачаево-Черкесской Республике (агрегаты № 3, 4) сооружена в неполном объеме в 1999 г. и была законсервирована после пуска агрегатов № 1, 2 левой нитки. В настоящее время разрабатывается ТЭО – проект совмещенного варианта ГЭС-ГАЭС для агрегатов № 3, 4. В связи с этим возникла необходимость оценки возможного изменения состояния закрепленных, частично закрепленных и незакрепленных участков законсервированных тоннелей правой нитки.

В соответствии с требованиями технического задания обследованию подлежали только наклонные участки деривационного тоннеля длиной 2,2 км и напорного тоннеля длиной 0,5 км правой нитки деривации. Обследование носило комплексный характер и включало в себя визуальное обследование, маркшейдерско-геодезические и геофизические работы, инженерно-геологические изыскания, определение прочностных свойств бетона обделки. Маркшейдерско-геодезическая часть согласно техническому заданию включала: съемку тоннелей с построением маркшейдерских планов; разбивку пикетажа, нивелировку по пикетам с визуальным обследованием технического состояния тоннелей.

Визуальное обследование тоннелей производилось параллельно с нивелировкой с привязкой к пикетам и с фиксацией на цифровую камеру трещин в обделке, вывалов, водопроявлений на участках нарушения герметичности крепи, частично или полностью незакрепленных участков. Вся эта информация отражалась в пикетажном журнале, одна из страниц которого представлена на рис.1. Сочетание графического и фотографического отображения результатов визуального обследования позволило значительно повысить степень информативности об объекте обследования и в наглядной и компактной форме представить документацию в виде пикетажного журнала.

Собственно съемка деривационного и напорного тоннелей общей протяженностью 2,7 км, согласно «Инструкции по геодезическим и маркшейдерским работам при строительстве транспортных тоннелей» (ВСН 160-69, 1970), должна производится съемкой поперечных сечений через 5 м. Применение традиционного способа съемки предполагает большие затраты времени и сил на съемку сечений. Для сокращения затрат времени на маркшейдерскую съемку тоннелей (деривационного и напорного) была использована лазерно-сканирующая система IMAGER 5006,

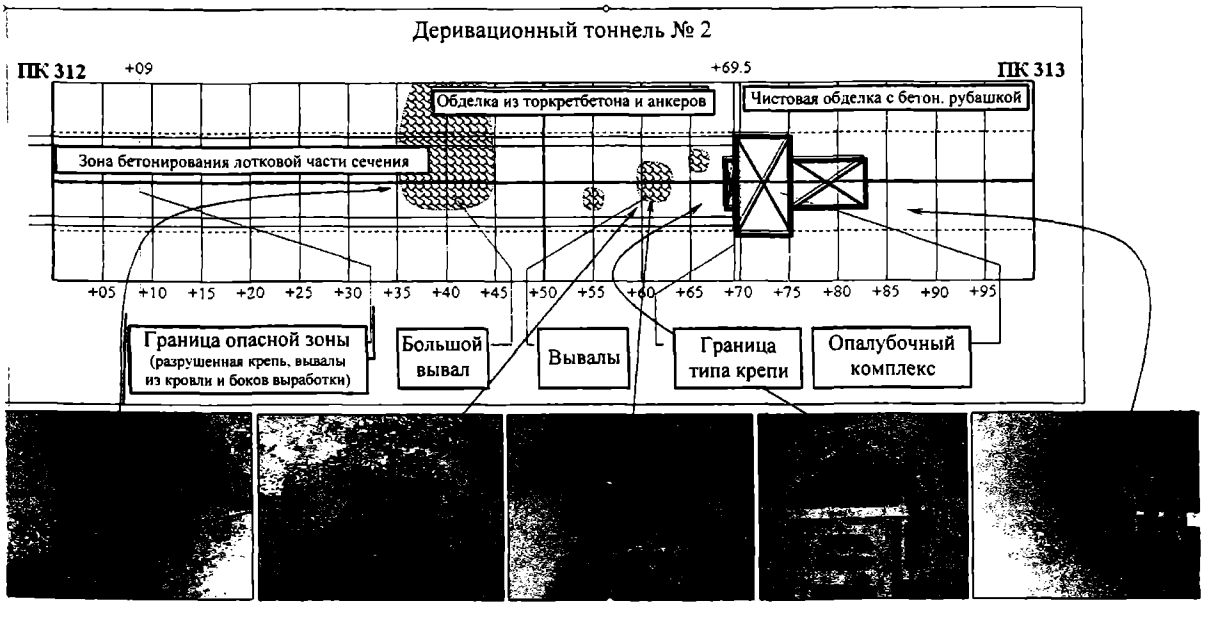


Рис.1. Вид станицы пикетажного журнала (участок тоннеля, развернутого на горизонтальной плоскости, результаты визуального обследования)

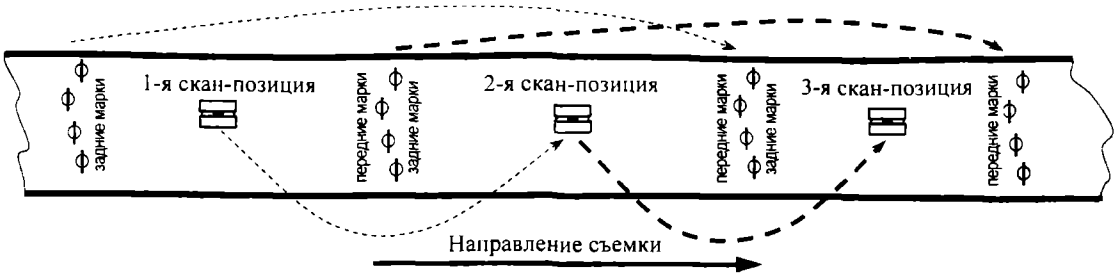


Рис.2. Схема лазерно-сканирующего хода

представляющая собой высокоточный наземный лазерный сканер фазового типа, выпускаемый фирмой «Z+F» (Германия). Производительность съемки этой измерительной системой до 500000 точек в секунду. Средняя точность лазерного сканера с учетом отражающей способности поверхности обделки тоннелей и дальностей съемки составляет 1,9 мм. Дальность действия IMAGER 5006 составляет 79 м. Выбор этой системы для производства маркшейдерских съемок тоннелей не случаен, так как предполагается, что ее высокая точность позволит выявить смещения и деформации обделки обследуемых тоннелей при геометрическом анализе результатов съемки.

Поскольку деривационный и напорный тоннели представляют собой вытянутые и протяженные объекты (2,2 и 0,5 км), то их съемка производилась методом прокладки лазерно-сканирующего хода (рис.2). На участке тоннеля устанавливался сканер и по обе стороны от него выставлялись по четыре марки внешнего ориентирования. При этом передние по ходу лазерно-сканирующей съемки четыре марки внешнего ориентирования будут служить для связи следующего скана с полученным на этой скан-позиции. Задние четыре марки служат для передачи на них координат, в которых производится съемка. После окончания сканирования на 1-й станции (скан-позиции) сканер переносится на другую позицию (за передние четыре марки внешнего ориентирования), а задние четыре марки предыдущей скан-позиции переносят и устанавливают за сканер по ходу съемки. В результате они становятся передними, а те марки, которые не переносили, стали задними для новой установки сканера (рис.2).

После окончания сканирования на 2-й скан-позиции сканер переносится на 3-ю скан-позицию (вперед по ходу съемки за передние марки 2-й скан-позиции), задние марки 2-й скан-позиции переносят вперед относительно новой установки сканера. В результате перенесенные марки становятся передними, а те марки, которые не переносили и которые являлись передними для 2-й скан-позиции, становятся задними марками. Последовательно перенося сканер и задние марки, сканируя после переноса очередной участок тоннеля, можно снять большой по протяженности участок тоннеля. При этом на каждых соседних двух сканах будут общими четыре марки внешнего ориентирования, что даст возможность всю цепочку сканов, полученных на 1-й, 2-й, 3-й и т.д. скан-позициях «сшить» в единый скан снятого тоннеля. Условие, чтобы четыре марки были зафиксированы на соседних сканах, предо-



Рис.3. Марки внешнего ориентирования

пределило использование в данном случае двухсторонних марок с совпадающими центрами. Для удобства использования при съемках двухсторонние марки вставлялись в рамки, которые в свою очередь закрепляли на подставках (рис.3). Подставки были выполнены из отрезков пластиковых труб разной высоты диаметром 150 мм.

Описанная схема съемки тоннеля по сути является лазерно-сканирующим ходом, близкий аналог которого прокладка полигонометрического хода по трехштативной системе. Опыт применения лазерно-сканирующего хода для съемки тоннелей показал, что оптимальное расстояние от сканера до передних (задних) марок должно

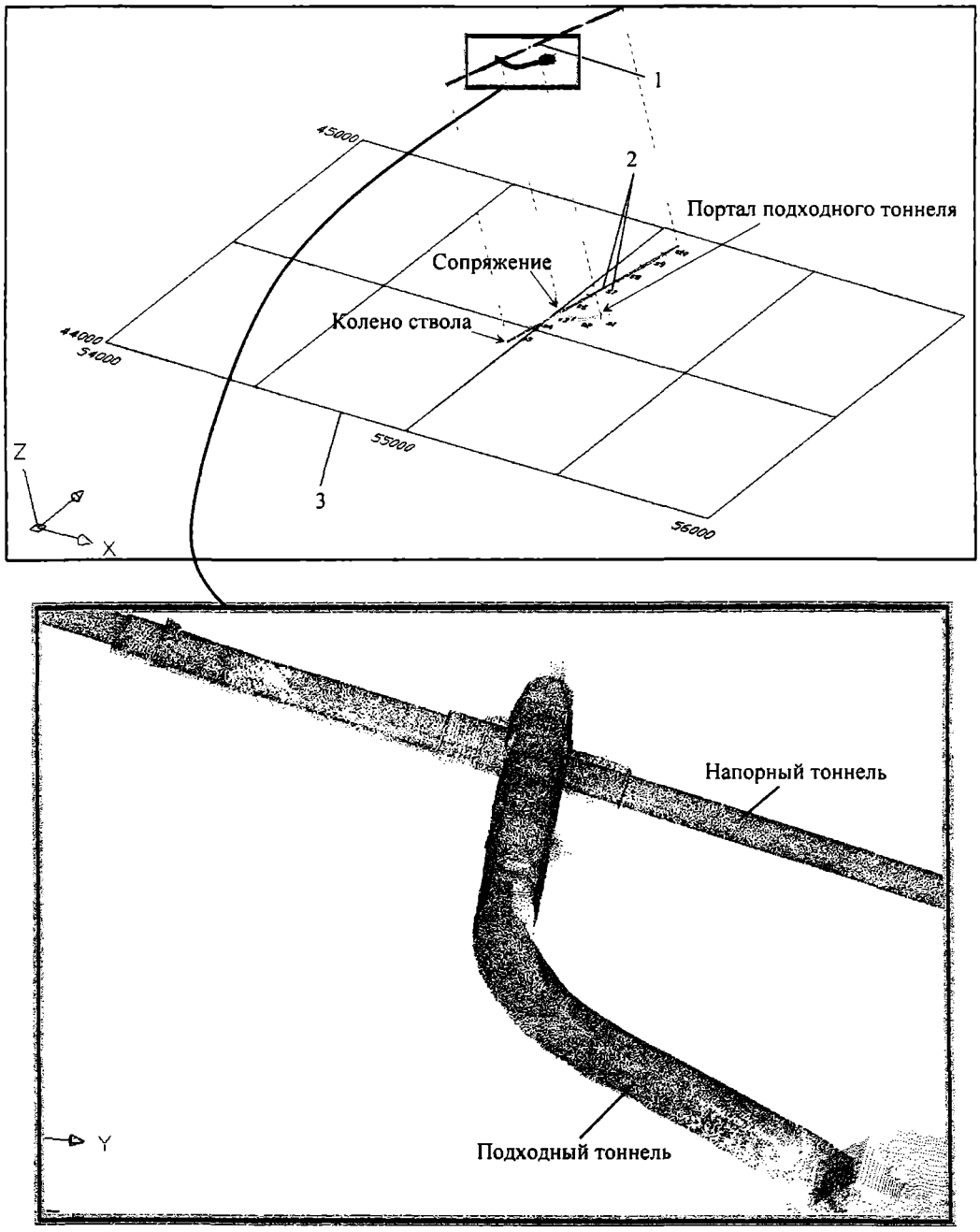


Рис.4. Комплекс съемочной информации о напорном тоннеле, организованной в единую систему средствами AutoCAD:

1 – «сшитые» в единую систему координат сканы напорного тоннеля; 2 – номер скана и участок тоннеля, относящегося к этому скану; 3 – собственно план напорного тоннеля

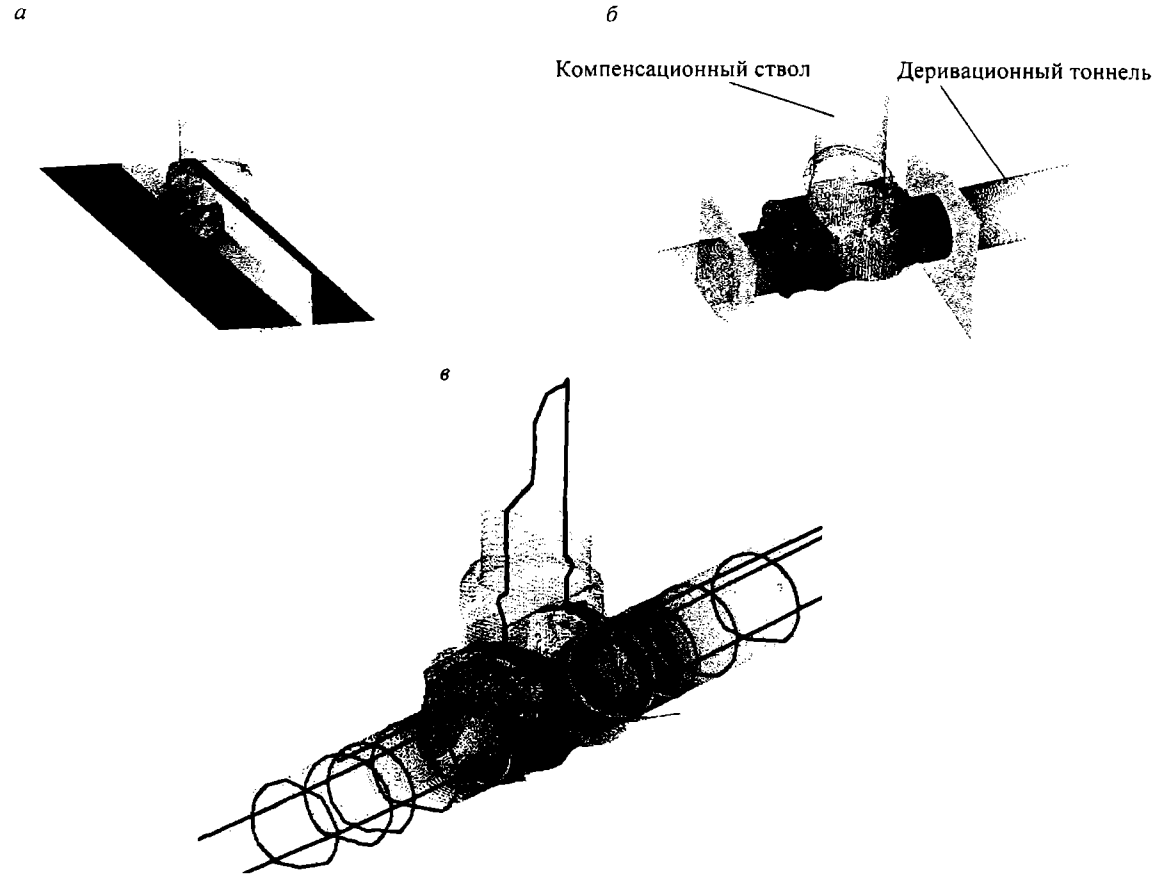


Рис.5. Принципиальное получение продольных горизонтальных и вертикальных (*а*), поперечных (*б*) сечений по облаку точек лазерных отражений скана и линии пересечения этих плоскостей с точечной поверхностью скана (*в*)

быть до 40 м. При расстоянии более 40 м угол наклона боковой поверхности тоннеля по отношению к направлению лазерного луча становится таким, что точки лазерных отражений не попадают при отражении в приемный тракт дальномерной системы. При этом закономерность возвращения отраженного лазерного сигнала примерно следующая: при расстоянии от лазерного сканера до 40 м – возвращается до 80-90 % отраженных от боковой поверхности тоннеля точек, при расстоянии 55-60 м – возвращается 5-10 % отраженных точек, при расстоянии более 65 м – практически точки лазерных отражений не фиксируются приемным трактом дальномерной системы сканера.

По данным лазерно-сканирующей съемки, проведенной описанным способом, была произведена регистрация («сшивка») всех сканов отдельно для напорного и деривационного тоннелей в единой для всех сканов местной системе координат, принятой на участке Зеленчукской ГЭС. В результате были получены 3D-точечные модели тоннелей в единой для них системе координат. По этим точечным моделям, являющимися полностью метрическими, были составлены планы напорного и деривационного тоннелей путем прорисовки их контуров средствами AutoCAD (рис.4). В этой же программе производилась разбивка полученных планов напорного и деривационного тоннелей на планшеты требуемого техническим заданием масштаба. При этом план и планшеты несут в себе информацию о 3D-точечной модели «сшитых сканов», о каждом отдельно скане, входящим в точечную модель, подземной полигонометрии, местоположении подходных пунктов, о прорисованных по «сшитой» точечной модели контуров напорного и деривационного тоннелей с нанесенной сеткой координат (рис.4).



Рис.6. 3-D модель сопряжения подходного и напорного тоннелей

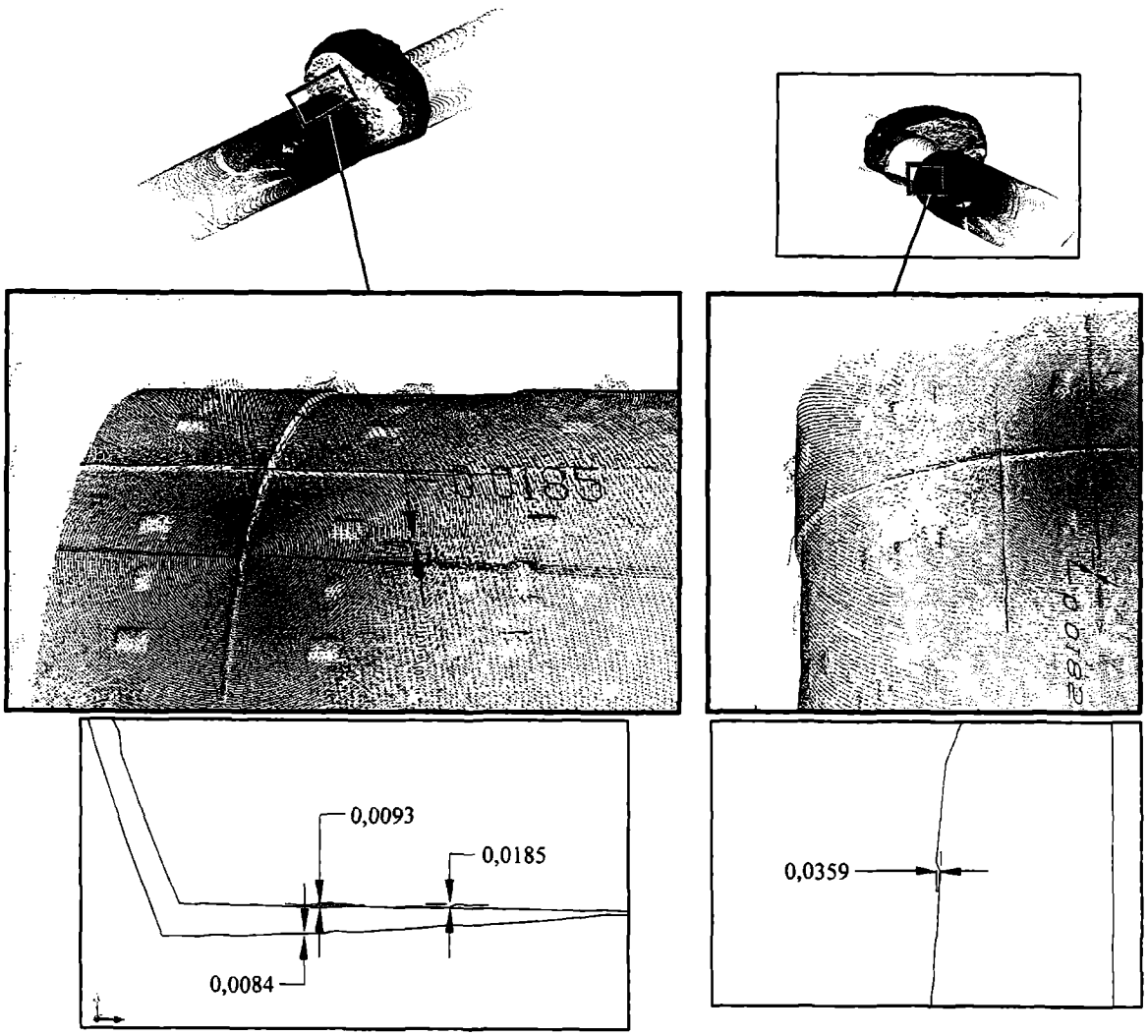


Рис.7. Смещение тюбингового кольца на одном из сканов деривационного тоннеля

Объектом геометрического анализа изменчивости формы тоннелей (деривационного и напорного) были взяты их точечные 3D-модели, полученные по результатам обработки данных лазерно-сканирующей съемки. Выявление изменчивости формы тоннелей осуществлялось путем пересечения точечной пространственной поверхности отдельных сканов, составляющих общую модель тоннелей, вертикальными и горизонтальными плоскостями в программной среде AutoCAD (рис.5). По виртуальным линиям пересечения плоскостей (вертикальных и горизонтальных) с внутренней поверхностью обделки тоннелей, представленной на сканах в виде набора точек лазерных отражений, оценивалась качественно и количественно ее изменчивость.

Пересечение пространственной точечной модели одного из сканов вертикальной и горизонтальной плоскостями по направлению оси тоннеля и перпендикулярном оси тоннеля показано на рис.5, *а* и 5, *б*. В результате в кровле и боках этого участка тоннеля наметились линии пересечения внутренней поверхности крепи с плоскостями, по которым появляется возможность оценивать смещения обделки, а по поперечным контурам сечения тоннеля оценить изменчивость формы сечения (рис.5, *в*).

Автоматизированное построение продольных и поперечных сечений тоннелей можно осуществить в программной среде Rapid form. Сначала, используя точечные модели, строятся поверхностные модели. Поверхность тоннелей создается в виде объемной триангуляционной поверхности. На рис.6 приведен пример построения поверхностной модели участка сопряжения подходного и напорного тоннелей. Затем на полученной модели намечаются места пересечения вертикальными и горизонтальными плоскостями и программа Rapid form в этих местах отстраивает след от пересечения вертикальной (горизонтальной) плоскости с триангуляционной поверхностью тоннеля. В результате по каждому скану напорного и деривационного тоннелей были получены поперечные и продольные сечения, которые были привязаны к пикетажу, что давало возможность оценить состояние крепи тоннелей через изменчивость геометрических параметров в конкретных местах тоннелей.

В частности, анализ съемочного материала лазерным сканером по изложенной схеме геометрического анализа позволил выявить в отдельных случаях смещения тюбинговых колец на одном из участков деривационного тоннеля (рис.7). В этой части деривационного тоннеля отсутствовало крепление и за счет обрушения пород в незакрепленном пространстве образовался купол. Одно из колец на границе куполения пород сместилось. Измеренное смещение непосредственно по скану и продольным сечениям этой части деривационного тоннеля составило от 8 до 18 мм (рис.7).

Таким образом, 3D-модели, получаемые на основе данных лазерно-сканирующей съемки, позволяют использовать их для составления маркшейдерской горно-графической документации с сопутствующей цифровой информацией о пространственном расположении гидротехнических тоннелей, результатах оценки их технического состояния на базе геометрического анализа изменчивости формы крепи по полученным точечным и поверхностным 3D-моделям тоннелей.