

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

М.О. Лебедев¹, К.В. Романевич¹

¹ ОАО «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: mail@imgt.ru

Аннотация: При реконструкции подземных сооружений необходимо определять нагрузки, которые будут действовать на вновь возводимую несущую конструкцию. Исходными данными для расчетов являются повторные инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания, проводимые по отдельному техническому заданию и программе с учетом особенностей сооружения. В составе таких изысканий широкий круг задач может быть решен с помощью современных методов инженерной геофизики, не всегда применяемых на практике. Предложен новый подход, обеспечивающий повышение экономической эффективности принимаемых проектных решений и последующей их реализации при реконструкции транспортных тоннелей и других подземных сооружений. Одним из ключевых элементов данного подхода является применение инженерно-геофизических исследований при проведении инженерно-геологических изысканий в период проектных работ по реконструкции. Приведены некоторые положения современных представлений формирования равновесного состояния массива вблизи горной выработки в процессе долгосрочной эксплуатации, подчеркивается необходимость учета этих данных в геотехнических расчетах при реконструкции подземных сооружений с возведением новых тоннельных обделок. Выполнение приведенного комплекса мер дает возможность оптимизировать параметры вновь возводимой обделки, не увеличивая нормативную нагрузку на конструкцию там, где такого увеличения фактически произойти не может и, увеличивая несущую способность там, где это обосновано за счет обеспечения альтернативного выбора способов и технологических схем строительства, параметров конструкций и характеристик применяемых материалов. Показана необходимость проведения геотехнического мониторинга на всех этапах реконструкции подземных сооружений с возведением новых обделок.

Ключевые слова: инженерно-геофизические исследования, подземные сооружения, тоннель, реконструкция, обделка, геотехнический расчет, горное давление, несущая способность, равновесное состояние массива горных пород, геотехнический мониторинг.

Для цитирования: Лебедев М.О., Романевич К.В. Инженерно-геофизические исследования при реконструкции подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 5. – С. 97–110. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-97-110.

Engineering and geophysical research in reconstruction of underground structures

M.O. Lebedev¹, K.V. Romanovich¹

¹ SJC «Research, Design and Survey Institute «Lenmetrogiprotrans», Saint-Petersburg, Russia, e-mail: mail@imgt.ru

Abstract: In reconstruction of underground structures, it is necessary to determine loads exerted on a new load-bearing structure. The calculation source data are the repeated geological and hydro-geological surveys implemented under specific assignment and program including features of the structure. A wide range of problems within such surveys can be solved using the modern yet rarely applied methods of engineering geophysics. The new proposed approach improves economic efficiency of the design decisions and their accomplishment in reconstruction of transport tunnels and other underground structures. One of the key elements of the approach is application of engineering geophysical studies in engineering geological surveys at the stage of the reconstruction design work. Some current aspects of equilibrium formation in rock mass around a long-term excavation are presented, and topicality of these data inclusion in geotechnical designs in reconstruction of underground structures with new lining is emphasized. The described package of measures allows optimizing parameters of new lining without an increase in the design load on the structure at the points where such increase is actually impossible, and with an increase in the load-bearing capacity at the reasoned points owing to an alternative choice of the construction methods and process charts, structure designs and characteristics of materials in application. The relevance of geotechnical monitoring at all stages of reconstruction of underground structures with new lining is emphasized.

Key words: engineering geophysical studies, underground structures, tunnel, reconstruction, lining, geotechnical design, rock pressure, load-bearing capacity, rock mass equilibrium, geotechnical monitoring.

For citation: Lebedev M. O., Romanevich K. V. Engineering and geophysical research in reconstruction of underground structures. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2019;5:97-110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-97-110.

Особенности реконструкции подземных сооружений

В действующей нормативной документации, устанавливающей требования к проведению инженерных изысканий, проектированию, производству и приемке работ при строительстве и реконструкции сооружений метрополитена¹, железнодорожных тоннелей на железных дорогах и автомобильных тоннелей на автомобильных дорогах общего пользования всех категорий² в Российской Федерации большинство требований относится к этапу нового строительства. Этап реконструкции подземных сооружений, в общем являясь комплексом строительных работ, имеет все же ряд особенностей, учет которых позволяет обеспечивать существенное уменьшение удельных затрат времени и увеличивать техническую скорость строительно-мон-

тажных работ при реконструкции подземных объектов. Например, учет особенностей и принципиальных отличий геомеханических процессов при производстве работ в период реконструкции подземных сооружений от аналогичных процессов при новом строительстве может приводить к существенному снижению расхода строительных материалов, затраты на которые при сооружении тоннелей составляют 20–40% общей стоимости строительства.

Одним из ключевых моментов, как при новом строительстве, так и при реконструкции подземных сооружений является выбор параметров проектируемой тоннельной обделки — постоянной несущей конструкции, которая должна удовлетворять ряду геомеханических, технических, экономических и эксплуатационных требований. Важной особен-

¹ СП 120.13330.2012 Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 (с Изменениями № 1, 2).

² СП 122.13330.2012 Тоннели железнодорожные и автомобильные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97 (с Изменением № 1).

ностью реконструкции транспортных тоннелей и других подземных сооружений является необходимость повторно определять нагрузки, которые будут действовать на вновь возводимую несущую конструкцию, с учетом современного равновесного состояния системы «обделка — вмещающий массив», сформированного в процессе длительной эксплуатации объекта.

Формирование нового равновесного состояния массива горных пород

В работе [1] рассмотрены вопросы принципиальной возможности учета нового равновесного состояния и оптимизации параметров тоннельной обделки при капитальных ремонтах и реконструкциях подземных сооружений для случаев, когда возникает необходимость демонтировать существующую обделку, и возвести новую. В частности приводятся данные 1970-х годов по работам [2, 3] в которых показано, что формирование нагрузки на обделку тоннелей, подвергающихся реконструкции, носит двухстадийный характер. На первой стадии формирования горного давления нагрузки на вновь возводимую обделку определяются весом пород, отслоившихся от породного массива при первоначальном сооружении тоннеля. Повторное нарушение равновесного состояния при капитальном ремонте или реконструкции приводит к увеличению зоны обрушения и возрастанию нагрузки примерно в 1,3–1,4 раза на второй стадии формирования горного давления по сравнению с фактической величиной, отмеченной до начала работ по реконструкции, т.е. на первоначальной стадии [3].

Окончательная нагрузка от горного давления, действующая на вновь возводимую обделку при реконструкции тоннелей представляется в [3] в общем виде как:

$$q = q_1 + q_A k_n \quad (1)$$

где q_1 — нагрузка на первой стадии формирования горного давления, т.е. установившаяся при первоначальной эксплуатации тоннеля до его реконструкции; q_A — дополнительная нагрузка, вызванная увеличением радиуса зоны неупругих деформаций при реконструкции тоннеля в случае максимально возможных смещений контура выработки; k_n — коэффициент, учитывающий величину смещений контура выработки, находящийся в пределах от 0 до 1.

По всей видимости, именно на основе приведенных выше представлений, за счет отсутствия достаточного количества исследований в данном направлении — в действующем своде правил СП 122.13330.2012 Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97 (с Изменением № 1) сформулировано следующее требование. «При реконструкции тоннеля с полной заменой обделки нормативную нагрузку от горного давления на тоннель необходимо увеличить в 1,3 раза, но она не должна превышать нагрузки от полного столба грунта».

В то же время, в [1] нами подчеркивается, что исходя из результатов натурных исследований, на определенном этапе существования подземного сооружения, вмещающий массив может получать новое равновесное состояние, при котором, в случае реконструкции, во вновь возводимых обделках напряженно-деформированное состояние оказывается не больше, а меньше, чем в ранее существовавших конструкциях.

Соответственно, окончательная нагрузка от горного давления, действующая на вновь возводимую обделку при реконструкции тоннеля может быть и меньше нагрузки, установившейся на стадии первоначальной эксплуатации тоннеля:

$$q \leq q_1 \quad (2)$$

Практические исследования нового равновесного состояния массива горных пород

Существующие в настоящее время методы расчета, среди которых аналитические и численные методы, работающие, в том числе с реологическими свойствами массива — не способны учитывать условия реконструкции подземного сооружения с полным демонтажем обделки. Достоверные результаты в состоянии предоставить лишь натурные исследования напряженно-деформированного состояния, на основании которых можно уверенно судить о работе новых несущих конструкций, возведенных после демонтажа старой тоннельной обделки.

Такие исследования были выполнены при реконструкции Большого Петлевого железнодорожного тоннеля Северо-Кавказской железной дороги (СКЖД) [4]. На одном из участков существующего тоннеля выполнялась перепроходка на полное сечение с возведением новой крепи и обделки. Исследования напряженно-деформированного состояния новой конструкции крепи показали, что количественно эти параметры были значительно меньше, чем для такой же крепи, в таких же инженерно-геологических условиях, на участках этого тоннеля, пройденного по новой трассе. Результаты экспериментальных наблюдений показывают, что процесс перераспределения напряженно-деформированного состояния системы «обделка — вмещающий массив» с течением времени стремится к затуханию вплоть до достижения массивом, ослабленного выработкой устойчивого равновесного состояния.

В связи с этим встает вопрос о целесообразности увеличения нормативной нагрузки от горного давления на обделку на 30%, регламентированного нормативной документацией во всех случаях реконструкции тоннелей с полной заменой обделки. Более обоснованным пред-

ставляется путь детального изучения технического состояния существующих конструкций и вмещающих пород в заобделочном пространстве подземного сооружения, и последующая оптимизация параметров вновь возводимых несущих конструкций крепей и обделок на каждом конкретном участке реконструируемого объекта.

Такие комплексные наблюдения в транспортных тоннелях, искусственных сооружениях метрополитенов и других подземных сооружениях в период их строительства и эксплуатации, а также в период реконструкции проводятся институтом ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс». Требования к системе наблюдений обобщены в «Методическом руководстве по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей», согласованном Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ и утвержденного тоннельной ассоциацией России [5]. В ходе выполнения комплексных наблюдений с учетом современных представлений о формировании общей нагрузки на тоннельную обделку институтом ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» выполняется последовательная систематизация и накопление результатов натурных измерений напряжений, деформаций и перемещений в элементах конструкций подземных сооружений.

Инженерно-геофизические исследования в составе повторных изысканий для объектов реконструкции

В период реконструкции подземных сооружений комплекс наблюдений должен включать в себя повторные инженерно-геологические, гидрогеологические и другие виды изысканий, которые проводятся по отдельному техническому заданию и программе с учетом особенностей

объекта реконструкции. В составе таких изысканий широкий круг задач может быть решен при помощи современных методов инженерной геофизики, среди которых мобильные малоглубинные шахтные и скважинные варианты сейсмо-, электро-, грави- и магниторазведки, а также георадиолокации. Инженерно-геофизические исследования самостоятельно решают отдельные инженерные задачи, одновременно, предоставляя дополнительную косвенную информацию при проведении прямых геомеханических и геологических исследований. Геофизические методы применяются в условиях отсутствия или незначительного уровня соответствующих природных и техногенных помех.

Среди задач, которые могут быть решены с помощью инженерно-геофизических исследований до начала работ по реконструкции — детальное изучение пород заобделочного пространства при частичном или полном отсутствии исполнительной геологической информации, оценка степени тектонической активности разломов на трассе тоннеля, определение современного состояния трещиноватых зон и оценка возможности реализации геодинамических явлений, выявление ослабленных разуплотненных зон и пустот за тоннельной обделкой, уточнение физико-механических характеристик пород, в том числе и за существующей бетонной, чугунной или другой обделкой тоннеля [6] и другие.

В работе [7] приводится пример реализации комплексных геофизических исследований при реконструкции Рокского автодорожного тоннеля, в ходе которых на первом этапе предусматривалось детальное изучение пород вдоль горных выработок тоннельного комплекса для дифференцирования разреза на отдельные блоки, отличающиеся по литологическому составу, структурно-тектоническим особенностям, физическим пара-

метрам, гидрогеологическому режиму. В ходе инженерно-геофизических исследований блоки дополнительно дифференцировались на зоны смятия, трещиноватости, тектонических нарушений и обводнений. На втором этапе каждый обособленный блок исследовался методом сейсморазведки, для определения упругих свойств пород и отдельных аномальных зон и вычислением физико-механических характеристик выделенных разностей пород и блоков.

Решение подобных задач в ходе инженерно-геологических изысканий с помощью геофизических методов, необходимо при проектировании временной крепи и постоянной обделки при реконструкции любых подземных сооружений. На одном участке, с проявлениями геологических осложнений во вмещающем массиве может потребоваться возведение конструкций с большей несущей способностью относительно ранее существовавших, а на другом участке с благоприятными горнотехническими условиями несущая способность обделки может быть снижена без риска потери эксплуатационной надежности в течение проектного срока эксплуатации.

На основе данных инженерно-геофизических исследований могут быть сделаны выводы о наличии или об отсутствии современных геодинамических процессов, о границах пород с измененными свойствами, дающих представление о размерах зоны вмещающего массива, в пределах которой может быть сформировано равновесное состояние. Полученная информация может способствовать принятию решения о применении опережающих крепей или по оптимизации несущей способности проектируемой обделки. При этом дополнительно все проектные решения по снижению несущей способности конструкций должны контролироваться посредством прямых геомеханических наблюдений в со-

ставе комплексного геотехнического мониторинга.

Комплекс геотехнического мониторинга, в который включены геомеханические наблюдения, инженерно-геофизические исследования, а также другие актуальные для конкретного объекта виды наблюдений — является системой научно-технического сопровождения реконструкции подземного сооружения. В ходе такого сопровождения, начиная уже с момента выполнения проектных работ по реконструкции, должен осуществляться непрерывный контроль состояния существующих несущих конструкций и пород вмещающего массива. Фиксация изменений ведется при демонтаже старой обделки, в период доработки и увеличения сечения выработки, после возведения опережающих крепей и новых несущих конструкций и в последующий период эксплуатации. Данная схема наблюдений способна обеспечить наибольшую экономическую эффективность, позволяя выполнять аналоговое проектирование при реконструкции подземного сооружения, что дает возможность своевременно корректировать технологию строительных процессов, оптимизировать параметры возводимых конструкций и характеристики применяемых материалов.

Помимо уже перечисленных выше задач, решаемых в ходе инженерно-геологических изысканий с помощью геофизических методов в период реконструкции, существенными являются и вопросы оценки взаимного влияния подземных сооружений. Для их решения также могут быть применены инженерно-геофизические методы, среди которых наиболее перспективными являются эмиссионные — метод регистрации электромагнитного излучения, метод ультразвукового профилирования, метод сейсмоакустической эмиссии и другие. В работе [8] отмечается, что являясь эффективным

техническим средством неразрушающего контроля, эмиссионные методы способны регистрировать и отображать даже незначительные изменения напряженно-деформированного состояния, как конструкций, так и вмещающего грунтового массива при строительстве и последующей эксплуатации подземных сооружений.

Опыт использования бесконтактных эмиссионных методов инженерной геофизики свидетельствует о возможностях оперативного выполнения инструментальной диагностики тоннелей и вмещающих их грунтов со скоростью до 1—2 км в сутки, включая время на обработку и анализ результатов. Применять эмиссионные методы инженерной геофизики в [8] предлагается как первичные — для обнаружения и локализации наиболее проблемных областей (по градиентам НДС) с целью выполнения в дальнейшем комплексных обследований конструкций, геотехнического мониторинга или для корректировки предварительной расчетной модели сооружения. Недостатком бесконтактных эмиссионных методов является сильное влияние на данные, получаемые в ходе измерений высокого уровня помех в действующих и строящихся сооружениях.

Влияние помех на результаты инженерно-геофизических исследований

Учет наличия источников помех различного рода вообще является крайне важным моментом при производстве всех видов инженерно-геофизических исследований в условиях подземного сооружения на любом этапе его жизненного цикла. В этом смысле период реконструкции представляется наиболее благоприятным для проведения геофизических исследований в виду полной или частичной ликвидации из сооружения оборудования, материалов и механизмов, пред-

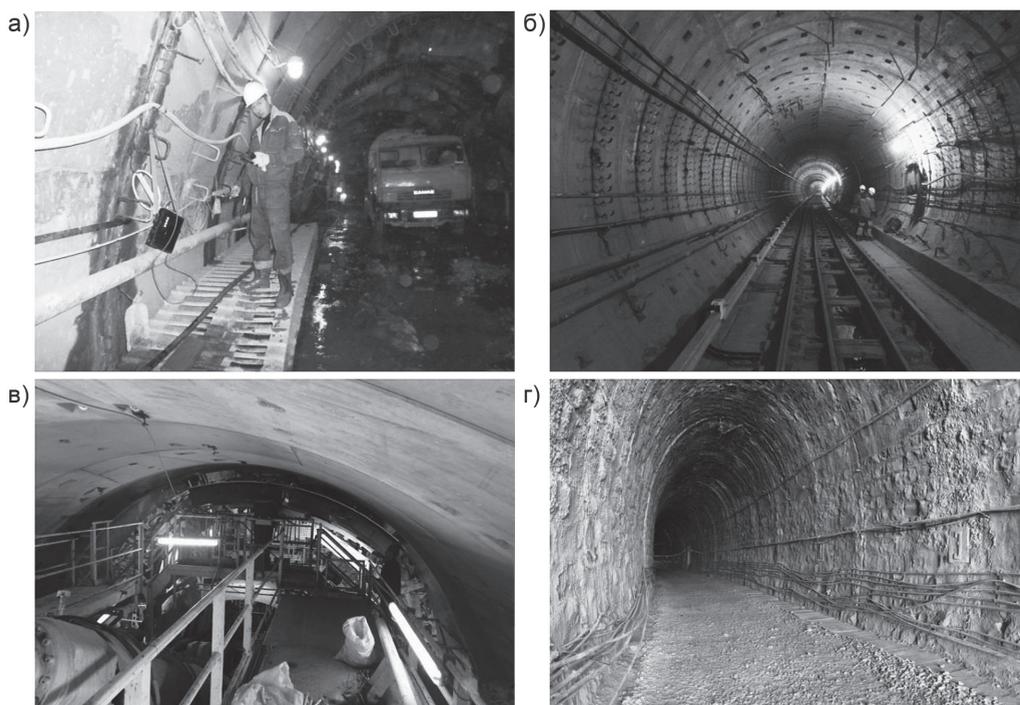


Рис. 1. Условия проведения инженерно-геофизических исследований в тоннелях: вид железнодорожного тоннеля в период строительства, отмечается большое количество промышленных помех, проведение геофизических работ затруднено (а); вид тоннеля метро в период строительства, отмечается большое количество промышленных помех, проведение геофизических работ затруднено (б); вид железнодорожного тоннеля в период строительства с помощью ТПМК, большое количество промышленных помех, проведение геофизических работ затруднено (в); вид железнодорожного тоннеля выведенного из эксплуатации, отмечается минимальное количество промышленных помех, благоприятные условия для проведения геофизических работ (г)

Fig. 1. Terms of engineering and geophysical studies in tunnels: view of the railway tunnel during the construction period, large amount of industrial interference, difficult conditions for geophysical work (a); view of the subway tunnel during the construction period, large number of industrial interference, difficult conditions for geophysical work (b); view of the railway tunnel during the construction period with TBM, large number of industrial interference, difficult conditions for geophysical work (v); view of the decommissioned railway tunnel; minimum amount of industrial interference, favorable conditions for geophysical work (g)

ставляющих источники помех. На рис. 1 представлены условия, в которых могут проводиться инженерно-геофизические исследования в транспортных тоннелях.

Применение комплекса инженерно-геофизических методов при реконструкции подземных сооружений оправдано в связи с возрастанием возможности выделения слабых аномалий практически любых регистрируемых геофизических полей — отсутствие помех значительно увеличивает информативность и

достоверность применяемых геофизических методов в условиях реконструкции. В этом смысле показательным является различие уровней электромагнитного поля при регистрации на дневной поверхности над горной выработкой, в выработке с наличием большого количества источников помех (металлические конструкции креплений, кабельные линии систем освещения, связи, сигнализации и электропередач и др.) и в выработке, где обеспечено отсутствие всех

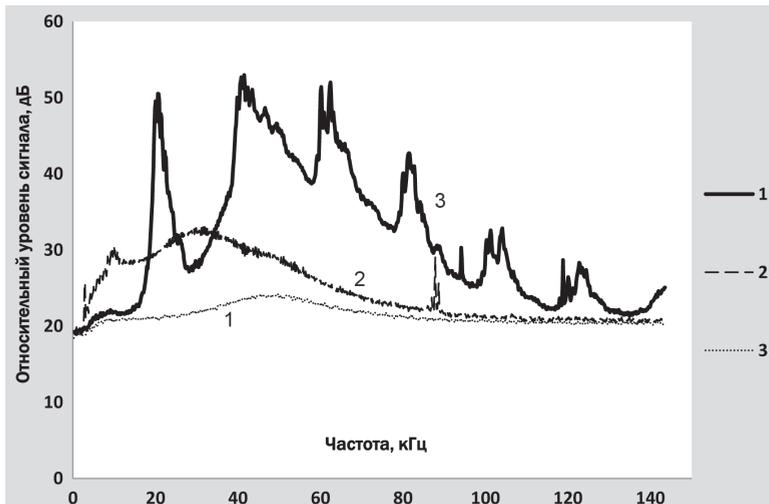


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика трех сигналов фонового электромагнитного излучения в полосе частот 1–150 кГц в разных условиях: 1 – регистрация сигнала выполнена на дневной поверхности над выработкой, 2 – регистрация сигнала выполнена в горной выработке с наличием большого числа источников помех, 3 – регистрация сигнала выполнена в горной выработке с минимальным количеством промышленных помех

Fig. 2. Amplitude-frequency characteristic of three signals of background electromagnetic radiation in the frequency band 1–150 kHz in different conditions: 1 – the signal was recorded on the surface above the tunnel, 2 – the signal was recorded in the tunnel with a large number of interference sources, 3 – the signal was recorded in the tunnel with the minimum amount of industrial electromagnetic noise

работающих агрегатов и не осуществляется движение транспорта (рис. 2).

На рис. 2 приведена амплитудно-частотная характеристика сигналов фонового электромагнитного излучения в полосе частот 1–150 кГц в разных условиях: 1 – регистрация сигнала выполнена на дневной поверхности над выработкой, 2 – регистрация сигнала выполнена в горной выработке с наличием большого числа источников помех, 3 – регистрация сигнала выполнена в горной выработке с минимальным количеством промышленных помех. Относительный уровень сигналов для разных условий отличается на 10–30 дБ.

В условиях низкого уровня или практически отсутствия естественных (атмосферных) и промышленных помех при регистрации естественного импульсного электромагнитного излучения в горных выработках после соответствующей компьютерной обработки становится

возможным выявление слабых электромагнитных импульсов с амплитудой на входе антенны до 5–10 микровольт. Это сопоставимо с уровнем электромагнитных импульсов, которые могут быть зарегистрированы в лабораторных условиях при разрушении образцов горных пород на прессах. В работе [9] приводятся характеристики импульса, полученного экспериментально при деформировании образца горной породы и рассчитанная модельная кривая – длительность сигнала составляет 25 мкс, частота ~100 кГц, амплитуда 0,02 мВ. Для электромагнитного сигнала, зарегистрированного в природных условиях при минимальном количестве промышленных помех в горной выработке метро в Санкт-Петербурге – длительность составляет 37 мкс, частота ~20 кГц, амплитуда 0,045 мВ. Регистрация в обоих случаях проводилась аналогичным оборудованием типа «Ангел» [10, 11]. При

проведении инженерно-геофизических исследований в условиях подземных сооружений при их реконструкции значительно снижается искажение полезных сигналов и других методов, например, сейсмоакустических — за счет исключения вибраций, производимых транспортом или строительными машинами и механизмами, имеющих место при строительстве и эксплуатации, георадиолокационных — за счет уменьшения случайных и регулярных шумов, а также воздушных помех и др.

Таким образом, выполнение инженерно-геофизических исследований в период реконструкции подземных сооружений позволяет обеспечивать проектировщиков необходимыми инженерными сведениями с высокой степенью достоверности, для корректирования предполагаемых технологий строительства и характеристик используемых материалов.

Примеры геотехнических ситуаций при эксплуатации и реконструкции подземных сооружений

Отказ от инженерно-геофизических исследований в составе инженерно-геологических изысканий в период проектирования реконструкции тоннеля или другого подземного сооружения может повлечь ситуацию, когда существенные исходные данные для рационального выбора расчетных схем, характеристик материалов, технологий проходки и перепроходки не будут учтены. Это обстоятельство в свою очередь с большой вероятностью приведет к увеличению сроков и стоимости работ, а также повысит геотехнические, строительные и эксплуатационные риски.

На рис. 3 представлен продольный инженерно-геологический разрез горного массива, вмещающего однопутный

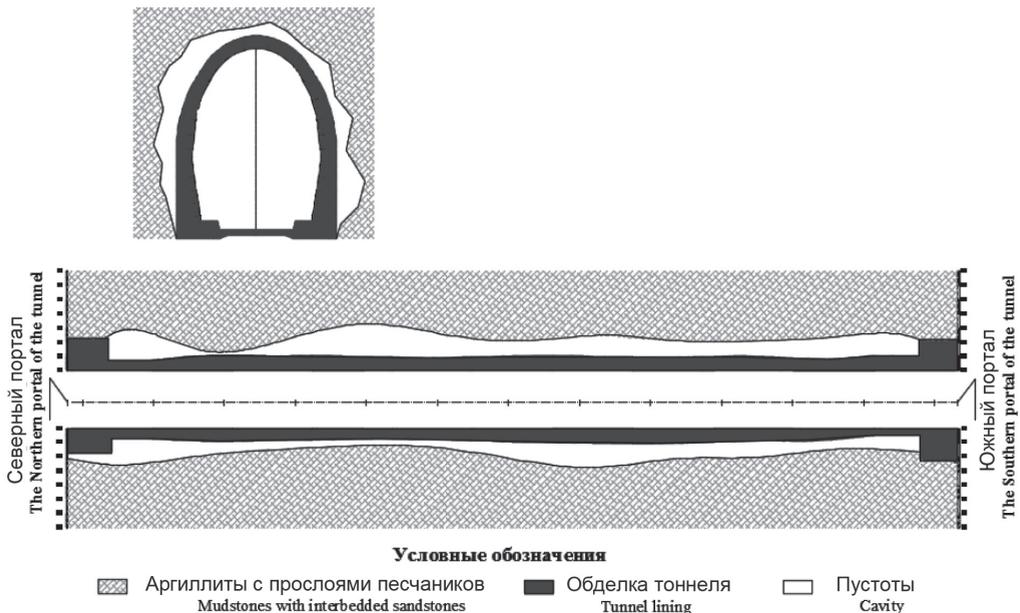


Рис. 3. Сечение тоннеля и продольный инженерно-геологический разрез горного массива, вмещающего тоннель по данным георадиолокации, бурения, исследования скважин и визуального обследования

Fig. 3. Tunnel cross-section and longitudinal engineering-geological section of a rock massif containing a tunnel according to GPR data, drilling, well-examination and visual inspection

железнодорожный тоннель и поперечное сечение тоннеля. Разрезы построены по данным георадиолокации, бурения, исследования скважин и визуального обследования обделки и заобделочного пространства. В результате такого комплексного исследования было выявлено, что при толщине обделки на протяжении всей длины горной выработки в пределах от 0,6 до 2,3 м, находящейся в относительно хорошем состоянии с единичными зонами разуплотнений на ее контакте с вмещающими горными породами, выявлены полости и пустоты, мощности которых колеблются от 0,2 до 2,4 м.

Эта геотехническая ситуация возникла в результате неправильной эксплуатации сооружения в течение длительного срока службы (тоннель эксплуатировался более 100 лет) за счет процессов выветривания и суффозионных процессов в условиях постоянной вибрации, вызванной интенсивным движением грузовых и пассажирских поездов в обоих направлениях.

Такие полости за слоем тоннельной обделки, тем более в условиях отсутствия промышленных помех могут быть однозначно обнаружены при выполнении качественных инженерно-геофизических исследований с использованием современного серийного геофизического оборудования. Задачу поиска пустот, полостей и нарушений наиболее часто решают с использованием различных вариантов сейсмоакустических методов [12, 13], применяя георадиолокацию [14, 15], а также комбинации различных геофизических методов [16, 17].

При выявлении подобной негативной геотехнической ситуации, связанной с обнаружением значительных объемов пустот за обделкой в случае текущих и капитальных ремонтов тоннелей, необходимо выполнить заполнение заобделочного пространства путем нагнетания

соответствующих растворов за обделку тоннеля. Это требуется для создания совместной работы конструкции с вмещающим массивом и исключения условий, при которых на обделку будут передаваться сосредоточенные нагрузки.

С другой стороны, физическая возможность существования мощной обделки без наличия контакта с вмещающим массивом по части периметра тоннеля в течение долгого периода времени, может указывать на возникновение устойчивой формы и состояния породного массива. Данный факт косвенно подкрепляет гипотезу о формировании нового равновесного состояния массива в процессе длительной эксплуатации подземного сооружения [1], подтверждаемую прямыми геомеханическими наблюдениями за поведением напряженно-деформированного состояния вновь возведенной обделки при реконструкции.

Похожие не прямые подтверждения гипотезы о формировании нового равновесного состояния в процессе длительной эксплуатации подземных сооружений можно найти при анализе геотехнических ситуаций на многих других подземных объектах.

Так, при обследовании тоннелей Кругобайкальской железной дороги (КБЖД) в 1986–1987 гг. [18] визуально, шупами и простукиванием было установлено, что между обделкой и горным массивом нет жесткой связи, которая передавала бы сдвигающие и растягивающие усилия. Известно, что при постройке в период 1900–1905 гг. пространство между обделкой и массивом заполняли колотым камнем насухо, без раствора. Обследованием не было обнаружено следов цементных растворов, которые могли бы нагнетать позднее. Тем не менее, какие-либо нарушения или повреждения конструкций, которые могли бы влиять на эксплуатацию тоннелей, обнаружены не были, также не известны сообщения

о серьезных повреждениях вплоть до настоящего времени. Необходимо отметить, что тоннели КБЖД возведены в крепких скальных вмещающих горных массивах, сложенных гранито-гнейсами разной степени трещиноватости, не обладающими свойствами ползучести, с чем вероятно и связана их повышенная устойчивость в течение долгого времени. Вместе с тем известны факты длительной устойчивости тоннелей, трасса которых, пролегает по горным породам средней крепости, представленными аргиллитами, сланцами, известняками и песчаниками различной крепости.

По данным [19] за длительный период строительства Гимринского тоннеля (с 1979 г.) в Республике Дагестан ни на одном участке подземных выработок обделка не была выполнена в полном объеме в соответствии с проектом — в связи с прекращением финансирования. В конце 1990 г. тоннель начал эксплуатироваться недостроенным и необорудованным необходимыми устройствами. По результатам проведенного инструментального (в том числе с применением инженерно-геофизических методов [20]) и визуального обследования были выявлены многочисленные локальные разрушения и дефекты в своде и на стенах обделок в виде трещин, смещений, отслоений, вывалов, каверн, пустот и разуплотнений грунтов за обделкой и прочее. В конструкциях были зафиксированы напряжения близкие к пределу прочности. На некоторых участках толщина обделки составляла 50% проектной толщины, а класс бетона в 40–50% оказался ниже проектного, в большинстве случаев фиксировалось отсутствие заполнительной цементации заобделочного пространства. По совокупности всех негативных факторов констатировалось, что согласно СП 13-102-2003 Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений обследованные

конструкции подземных сооружений Гимринского автодорожного тоннеля по техническому состоянию относятся к категории аварийного состояния. Тем не менее, в этих условиях устойчивость выработок в процессе эксплуатации обеспечивалась в течение более чем двадцатилетнего периода, что составляет около 40% прогнозного минимального срока службы отремонтированной конструкции.

Уже более 110 лет эксплуатируется железнодорожный тоннель *Vosruck* в Австрии с кирпичной арочной обделкой, возведенный в осадочных породах, включающих глины, песчаники, гипс, ангидрит, каменную соль, а также закарстованный известняк [21]. Этот тоннель был построен в 1906 г., при его строительстве применялось 6 типов тоннельной обделки в соответствии с геологическими условиями с шириной каменной кладки переменной толщины от 0,5 до 1,2 м. В 1960-х был выполнен капитальный ремонт тоннеля, в ходе которого нагнетанием раствора заполнялись пустоты между обделкой и породным массивом, при строительстве заложенные грунтом без уплотнения. Основными целями реконструкции этого тоннеля в 2016 г. были укрепление лотка и замена дренажной трубы, а также ремонт кирпичной обделки в сильно поврежденных секциях. Таким образом, для данного тоннеля, возведенного в нескальных породах, не потребовалось увеличения несущей способности обделки после его более чем вековой эксплуатации.

Выводы

1. При возведении новых обделок в период реконструкции тоннелей необходимо учитывать в расчетах современные представления формирования равновесного состояния массива вблизи выработки в процессе долгосрочной эксплуатации. Также необходимо учиты-

вать данные инженерно-геофизических исследований, выполняемых до реконструкции, характеризующиеся повышенной достоверностью и информативностью за счет значительного снижения промышленных помех в виду отсутствия оборудования, механизмов и конструкций в области проведения исследований в условиях реконструкции.

2. Инженерно-геофизические исследования при проведении инженерно-геологических изысканий в период выполнения проектных работ по реконструкции позволяют оценить качество взаимодействия породного массива и существующих несущих конструкций, а также характер работы существующей обделки, подлежащей демонтажу. Это в свою очередь дает возможность оптимизировать

параметры вновь возводимой обделки, не увеличивая нормативную нагрузку на конструкцию там, где такого увеличения фактически произойти не может и, увеличивая несущую способность там, где это действительно необходимо и обосновано.

3. При реконструкции тоннеля с полной заменой обделки необходимо предусматривать вариантный подход к выбору технологий строительства, параметров конструкций и характеристикам применяемых материалов под контролем комплекса наблюдений в составе геотехнического мониторинга.

Такой подход обеспечит повышение экономической эффективности принимаемых проектных решений и последующей их реализации при реконструкции подземных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев М. О., Романевич К. В. Оптимизация параметров тоннельной обделки подземных сооружений при их реконструкции / Инженерные изыскания в строительстве. Материалы докладов Четырнадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. — М.: ООО «Геомаркетинг», 2018. — С. 488—491.

2. Будаева А. Х. Исследование условий статической работы обделок, возводимых при реконструкции тоннелей с перекладкой свода. — Л.: ЛИИЖТ, 1972. — 20 с.

3. Лиманов Ю. А., Подчекаев В. А., Корольков Н. М., Меринов И. И. Содержание и реконструкция тоннелей / Под ред. Ю. А. Лиманова. Учебник для вузов ж.-д. трансп. — М.: Транспорт, 1976. — 192 с.

4. Лебедев М. О., Балыкин В. В. Горно-экологический мониторинг на примере Большого Петлевого тоннеля // Метро и тоннели. — 2006. — № 6. — С. 27—29.

5. Безродный К. П., Гендлер С. Г., Исаев Ю. С., Лебедев М. О., Иофис М. А. О методическом руководстве по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей / Труды международной научно-технической конференции «Основные направления развития инновационных технологий при строительстве тоннелей и освоении подземного пространства крупных мегаполисов». — М., 2010. — С. 18—20.

6. Бойко О. В. Использование псевдорэлеевских волн для изучения упругих параметров пород, вмещающих тоннель, с бетонной или другой несущей обделкой // Технические и естественные науки. — 2013. — № 5(67). — С. 162—167.

7. Чотчаев Х. О., Шелелев В. Д. Комплексование методов сейсморазведки (МПВ) и геолокационного зондирования для выделения геотектонических и геотехнических особенностей разреза Рокского тоннеля // Геология и геофизика Юга России. — 2014. — № 1. — С. 51—62.

8. Лебедев М. О., Романевич К. В., Басов А. Д. Оценка взаимного влияния подземных сооружений метрополитена при строительстве и эксплуатации // Геотехника. — 2018. — Т. X. — № 1—2. — С. 26—36.

9. Bahat D., Rabinovitch A., Frid V. Tensile fracturing in rocks. Tectonofractographic and Electromagnetic Radiation Methods. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 570 p.

10. Frid V., Mulev S. Rock stress assessment based on the fracture induced electromagnetic radiation / Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses Selected Papers from the 2018 European Rock Mechanics Symposium, Litvinenko (Ed.). Taylor and Francis group, London, 2018, pp. 303—307.

11. Яковлев Д. В., Мулев С. Н. Опыт применения многофункциональной геофизической аппаратуры Ангел-М в угольной и рудной промышленности // Уголь. — 2014. — № 10. — С. 16–21.
12. McCann D. M., Forde M. C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. NDT&E // International. 2001, Vol. 34, pp. 71–84.
13. Sloan S. D., Peterie S. L., Miller R. D., Ivanov J., Schwenk J. T., McKenna J. R. Detecting clandestine tunnels using near-surface seismic techniques // Geophysics. 2015, Vol. 80(5), pp. 127–135.
14. Nigel J. Cassidy, Rod Eddies, Sam Dods. Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground-penetrating radar and ultrasonic techniques // Journal of Applied Geophysics. 2011, Vol. 74, pp. 263–276.
15. Lalague A., Lebens M. A., Hoff I., et al. Detection of Rockfall on a Tunnel Concrete Lining with Ground-Penetrating Radar (GPR) // Rock Mechanics & Rock Engineering. 2016, No 49(7), pp. 2811–2823.
16. Haihong Ding, Weiwei Jiang Application of Geophysical Methods in Tunnel Exploration / Proceedings of the 5th International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering (ICCAHE 2016). 2016, pp. 188–192.
17. Qin Tu-guan, Feng Yi The Application of 2 Geophysical Exploration Methods to Guanyiyuan Tunnel Construction. Yunnan Geology. 2015, No 34(3), pp. 444–448.
18. Басов А. Д., Безродный К. П. Воздействия землетрясений на тоннели Кругобайкальской железной дороги // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2008. — № 1. — С. 60–66.
19. Аманбаев А. А. Опыт ремонта бетона при реконструкции Гимринского тоннеля // Метро и тоннели. — 2013. — № 3. — С. 18–20.
20. Безродный К. П., Алёхин А. В., Гевирц Г. Я. Результаты обследования Гимринского автомобильного тоннеля // Метро и тоннели. — 2010. — № 2. — С. 36–38.
21. Bernhard Kohlbock, Wolfgang Weinmar, Karl Hartleitner. Design and construction challenges of the refurbishment of the 110-year-old Bosruck rail tunnel, Austria. Paper Proceedings ITA – AITES World Tunnel Congress, Dubai International Convention & Exhibition Centre, UAE, 21 – 26 April 2018. 2018, pp. 1144–1157. **ITAB**

REFERENCES

1. Lebedev M. O., Romanevich K. V. Optimization of the parameters of underground structures tunnel lining during reconstruction. *Inzhenernyye izyskaniya v stroitel'stve. Materialy dokladov XIV Obshcherossiyskoy konferentsii izyskatel'skikh organizatsiy*, Moscow, OOO «Geomarketing», 2018, pp. 488–491. [In Russ].
2. Budaeva A. Kh. *Issledovanie usloviy staticheskoy raboty obdelok, vozvodimykh pri rekonstruktsii tonneley s perekladkoy svoda* [Investigation of the conditions for the static operation of lining, erected during the reconstruction of the tunnels with a rerun of the arch], Leningrad, LIIZhT, 1972, 20 p.
3. Limanov Yu. A., Podchekaev V. A., Korol'kov N. M., Merinov I. I. *Soderzhanie i rekonstruktsiya tonneley*. Pod red. Limanova Yu. A. Uchebnyk dlya vuzov [Using and reconstruction of tunnels. Limanova Yu. A. (Ed.) Textbook for high schools], Moscow, Transport, 1976, 192 p.
4. Lebedev M. O., Balykin V. V. Mining and environmental monitoring on the example of the Bolshoy Petlevoy Tunnel. *Metro i tonneli*. 2006, no 6, pp. 27–29. [In Russ].
5. Bezrodnyy K. P., Gendler S. G., Isaev YU. S., Lebedev M. O., Iofis M. A. On the Methodological Guide for Integrated Mining and Environmental Monitoring in the Construction phase and Operation phase of Transport Tunnels. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Osnovnye napravleniya razvitiya innovatsionnykh tekhnologiy pri stroitel'stve tonneley i osvoenii podzemnogo prostranstva krupnykh megapolisov»*, Moscow, 2010, pp. 18–20. [In Russ].
6. Boyko O. V. Use of pseudoreleic waves to study the elastic parameters of rocks containing a tunnel with a concrete or other bearing lining. *Tekhnicheskije i estestvennyye nauki*. 2013, no 5(67), pp. 162–167. [In Russ].
7. Chotchaev Kh. O., Shepelev V. D. Integrating the methods of seismic exploration and geolocation sounding to isolate the geotectonic and geotechnical features of the Roksky Tunnel section. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. 2014, no 1, pp. 51–62. [In Russ].

8. Lebedev M. O., Romanevich K. V., Basov A. D. Mutual influence of underground metro facilities assessment during construction and operation. *Geotekhnika*. 2018. T. X, no 1–2, pp. 26–36. [In Russ].
9. Bahat D., Rabinovitch A., Frid V. *Tensile fracturing in rocks. Tectonofractographic and Electromagnetic Radiation Methods*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 570 p.
10. Frid V., Mulev S. Rock stress assessment based on the fracture induced electromagnetic radiation. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses Selected Papers from the 2018 European Rock Mechanics Symposium*, Litvinenko (Ed.). Taylor and Francis group, London. 2018, pp. 303–307.
11. Yakovlev D. V., Mulev S. N. Experience of the use of multifunctional geophysical equipment Angel-M in the coal and ore industry. *Ugol'*. 2014, no 10, pp. 16–21. [In Russ].
12. McCann D. M., Forde M. C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT&E. International*. 2001, Vol. 34, pp. 71–84.
13. Sloan S. D., Peterie S. L., Miller R. D., Ivanov J., Schwenk J. T., McKenna J. R. Detecting clandestine tunnels using near-surface seismic techniques. *Geophysics*. 2015, Vol. 80(5), pp. 127–135.
14. Nigel J. Cassidy, Rod Eddies, Sam Dods. Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground-penetrating radar and ultrasonic techniques. *Journal of Applied Geophysics*. 2011, Vol. 74, pp. 263–276.
15. Lalague A., Lebens M. A., Hoff I., et al. Detection of Rockfall on a Tunnel Concrete Lining with Ground-Penetrating Radar (GPR). *Rock Mechanics & Rock Engineering*. 2016, No 49(7), pp. 2811–2823.
16. Haihong Ding, Weiwei Jiang Application of Geophysical Methods in Tunnel Exploration. *Proceedings of the 5th International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering (ICCAHE 2016)*. 2016, pp. 188–192.
17. Qin Tu-guan, Feng Yi The Application of 2 Geophysical Exploration Methods to Guanyiyuan Tunnel Construction. *Yunnan Geology*. 2015, No 34(3), pp. 444–448.
18. Basov A. D., Bezrodnyy K. P. The Impact of Earthquakes on the Tunnels of the Circum-Baikal Railway. *Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2008, no 1, pp. 60–66. [In Russ].
19. Amanbaev A. A. Experience of the repair of concrete during the reconstruction of the Gimrinsky tunnel. *Metro i tonneli*. 2013, no 3, pp. 18–20. [In Russ].
20. Bezrodnyy K. P., Alekhin A. V., Gevirts G. Ya. Results of the survey of the Gimrinsky road tunnel. *Metro i tonneli*. 2010, no 2, pp. 36–38. [In Russ].
21. Bernhard Kohlbock, Wolfgang Weinmar, Karl Hartleitner. Design and construction challenges of the refurbishment of the 110-year-old Bosruck rail tunnel, Austria. *Paper Proceedings ITA – AITES World Tunnel Congress, Dubai International Convention & Exhibition Centre, UAE, 21 – 26 April 2018*. 2018, pp. 1144–1157.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедев Михаил Олегович¹ — кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе, Романевич Кирилл Викторович¹ — кандидат технических наук, старший научный сотрудник,

¹ ОАО «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», e-mail: mail@lmgmt.ru.

Для контактов: Романевич К.В., e-mail: mail@lmgmt.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.O. Lebedev¹, Candidate of Technical Sciences, Deputy General Director for Scientific Research Work, K.V. Romanevich¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, ¹ SJC «Research, Design and Survey Institute «Lenmetrogioprotrans», 191002, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: mail@lmgmt.ru.

Corresponding author: K.V. Romanevich, e-mail: mail@lmgmt.ru.