

В. А. ГАРБЕР,  
д. т. н., главный научный сотрудник;  
Н. Н. СИМОНОВ,  
к. т. н., зав лабораторией;  
Е. В. ЩЕКУДОВ,  
к. т. н., директор филиала  
(АО ЦНИИС «НИЦ «Тоннели  
и метрополитены»)

*Despite all the complications related to insufficient funding, sectoral research in Russia successfully contributes to improvement of the process of construction and operation of the Moscow subway. For the recent period, Central Scientific Research Institute of Construction “Research-and-Development Center “Tunnels and subways”” has published a number of publications, reflecting a wide range of scientific and research, as well as design and experimental developments.*

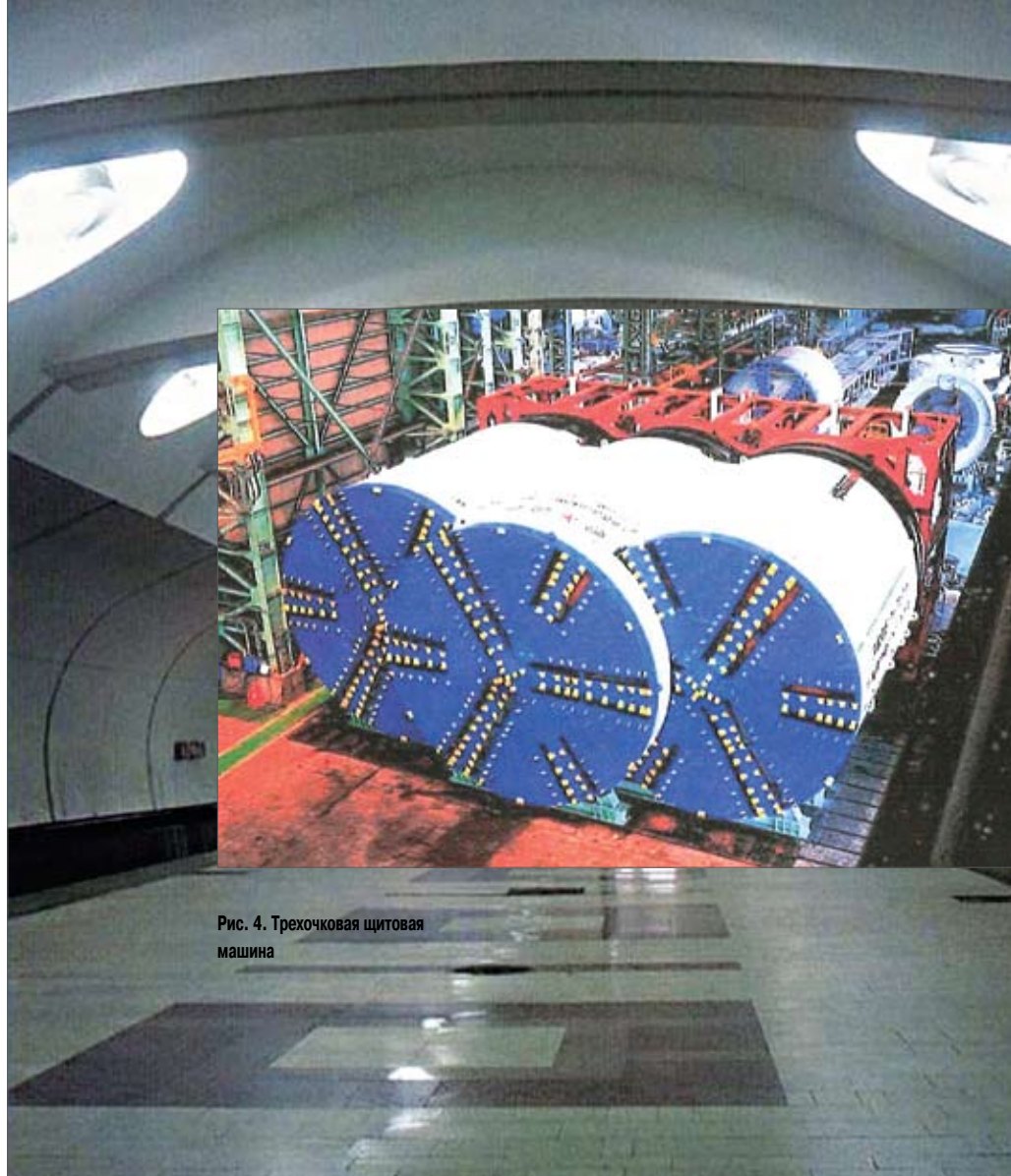


Рис. 4. Трехочковая щитовая машина

## НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

*Несмотря на все сложности, связанные с недостатком финансирования, отраслевая наука успешно развивается, обеспечивая, в частности, поступательное движение в совершенствовании процесса строительства и эксплуатации Московского метрополитена. За последний период ЦНИИС «НИЦ «Тоннели и метрополитены» выпустил ряд трудов, отражающих широкий спектр научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ коллектива.*

Назовем некоторые из этих публикаций:

- «Научные основы проектирования тоннельных конструкций с учетом технологии их сооружения»;

- «Метрополитен. Долговечность тоннельных конструкций в условиях эксплуатации и городского строительства»;

- «Методика комплексного обследования состояния строительных конструкций сооружений метрополитена, попадающих в зону влияния строительства городских объектов»;

- «Правила использования территорий технических и охранных зон метрополитена в городе Москве»;

- «Тоннели и метрополитены. Наука, проектирование, строительство, эксплуатация»;

- «Как сократить сроки и стоимость строительства метрополитенов в России»;

- «Как оптимизировать процесс проектирования новых линий метрополитенов»;

- «Вертикальные и наклонные тоннели в транспортном строительстве»;

- «Современный уровень знаний в области проектирования, строительства и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов».

Ниже приведено краткое описание основного содержания этих работ.

## Проектирование

Основная тематика научного обеспечения проектирования характеризовалась следующими направлениями:

- разработка системы автоматизированного проектирования метрополитенов (САПР-Метро);

- создание универсальной модели процесса загрузки подземных конструкций;

- разработка технических условий на проектирование метрополитенов в зонах карстово-суффозионной опасности;

- рекомендации по проектированию метрополитенов в агрессивных средах;

- математическое моделирование влияния конструктивных и технологических факторов на напряженно-деформированное состояние (НДС) станций метрополитена колонного типа закрытого и открытого способа работ.

САПР-Метро включает в себя функциональные (проектирующие) и обеспечивающие подсистемы. К функциональным относятся:

- проектирование трассы метрополитена;

- проектирование инженерно-геологических изысканий;

- проектирование конструкций;

- проектирование организации и механизации работ;

- проектирование энергоснабжения;

- проектирование автоматики, телемеханики и связи;

- проектирование теплосантехнических устройств метрополитена;

- расчет стоимостных показателей.

К обеспечивающим относятся подсистемы общего назначения (информационная, программная, организационно-методическая, техническая) и функционально-обеспечивающие: планово-

производственная, труда и зарплаты, финансово-бухгалтерской деятельности, материально-технического снабжения, кадров).

Основные требования, предъявляемые к САПР-Метро:

- «человеко-машинный» принцип;

- принцип системности;

- принцип эволюционности;

- принцип независимости от технических средств;

- принцип модульности.

Внедрение САПР-Метро в полном объеме должно обеспечить следующие технико-экономические показатели:

- снижение трудозатрат в проектировании на 20%;

- сокращение сроков проектирования более чем на 40%;

- повышение качества проектирования;

- снижение сметной стоимости строительства на 20%.

## Модель процесса загрузки подземных конструкций

Универсальная математическая модель реализует следующие возможности:

- расчет конструкций произвольного односвязного и многосвязного очертания на произвольно заданный вид нагружения;

- расчет монолитных и сборных конструкций

(в общую модель включена математическая модель стыка элементов сборной конструкции);

- расчет многослойных конструкций из различных материалов;

- учет следующих видов нелинейности свойств системы «обделка — порода»:

- а) нелинейность зависимости между напряжениями и деформациями материала;

- б) нелинейность деформативных свойств горной породы — изменение значения коэффициента упругого отпора в зависимости от величины контактного давления;

- в) конструктивная нелинейность — изменение типа расчетной схемы в процессе ее нагружения (например, введение пластических шарниров);

- г) физическая нелинейность расчетной схемы — изменение протяженности безотпорного участка подземной конструкции в процессе ее нагружения и изменение физико-механических характеристик расчетных сечений при частичном разрушении материала в них;

- д) геометрическая нелинейность расчетной схемы — изменение координат расчетных сечений на каждом этапе нагружения из-за перемещения центра тяжести неразрушенного материала в сечении при очередных разрушениях в нем, а также из-за общих деформаций конструкций;

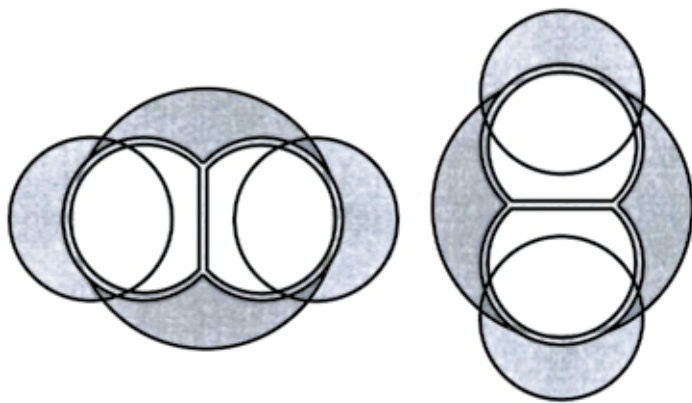
- е) автоматизация расчета до достижения конструкцией одного из предельных состояний;

- ж) получение в ходе расчета полной количественной и качественной информации о процессе разрушения конструкции и о структурных изменениях в ней.

При моделировании осуществляется учет наследственности:

- деформированного состояния контактного слоя между обделкой и породой;

- расчетных сечений и конструкции в целом.



**Рис. 1. Выход зон разработки грунта при проходке тоннелей круглого сечения за пределы зоны двухочковой машины (в сечении): а) при применении двухочковой щитовой машины горизонтальной ориентации; б) то же, вертикальной**

Данная модель была внедрена в проектирование метрополитенов Москвы, Екатеринбурга, Алма-Аты, а также железнодорожных тоннелей Байкало-Амурской магистрали, кавказских горных тоннелей.

Использование этого метода в практике строительства позволяет обеспечить существенную экономию строительных материалов.

В области метростроения достигнуты следующие показатели экономии арматурной стали:

- монолитные конструкции открытого и закрытого способа работ — 30–40%;
- унифицированная семиблочная обделка закрытого способа работ — 18–26%;
- сборная прямоугольная обделка открытого способа работ — до 20%.

Например, при сооружении станции «Алтуфьевская» Серпуховско-Тимирязевской линии Московского метрополитена реализация проекта облегченного армирования, выполненного с использованием указанного нелинейного метода расчета, позволила обеспечить общую экономию арматурной стали весом около 315 т.

### Проектирование в зонах карстово-суффозионной опасности

Развитие карстово-суффозионных процессов существенно осложняет условия эксплуатации тоннелей, вызывая дополнительные нагрузки на несущие конструкции в виде неравномерного горного и гидростатического давления, сосредоточенную фильтрацию подземных вод, нарушение устойчивости окружающего массива.

При необходимости проходки тоннеля непосредственно в закарстованной толще следует ориентировать его трассу в соответствии с параметрами карстовых форм, избегая пересечения крупных пещер, заполненных водой и наносными отложениями, или переносить трассу за пределы карстоопасных участков. В тех случаях, когда невозможно избежать пересечения карстовых полостей, трассу тоннеля надлежит прокладывать по наиболее безопасным участкам или пересекать их по кратчайшим направлениям.

Конструктивные решения подземных сооружений в закарстованных грунтах должны иметь свои особенности, обусловленные характером проявления карстово-суффозионных процессов. В связи с этим предъявляются особые требования по прочности, жесткости и

водонепроницаемости. В большинстве случаев необходимо создание усиленных конструкций, способных выдерживать повышенные нагрузки, возникающие в связи с проявлением карстовых деформаций и обрушений.

При строительстве тоннелей горным способом чаще всего применяют массивные обделки сводчатого очертания из монолитного бетона и железобетона.

Обделки повышенной несущей способности могут быть выполнены из водонепроницаемого бетона и железобетона.

При строительстве тоннелей в закарстованных грунтах щитовым способом целесообразно применять металлические и железобетонные обделки с постоянными связями растяжения, обладающие повышенной несущей способностью и жесткостью.

При строительстве тоннелей открытым способом в зонах карстопроявлений наиболее целесообразны рамные конструкции из монолитного железобетона, а также крупногабаритные цельносекционные обделки полной заводской готовности.

При расположении подземных сооружений в закарстованных грунтах с низкой несущей способностью, когда конструкцию нельзя опереть на естественное основание, производят предварительное искусственное закрепление грунта или устраивают свайные фундаменты.

При строительстве подземных сооружений мелкого заложения, в основании которых залегают закарстованные грунты, наряду с тампонажем карстовых полостей и искусственным закреплением грунтов применяют свайные фундаменты. Их устраивают в заранее раскрытых котлованах в виде буронабивных свай-столбов или корневидных свай, опирающихся на ненарушенные карстами слои грунта.

В ряде случаев целесообразно устройство глубоких траншейных стен из монолитного или сборного железобетона, возводимых по технологии «стена в грунте». При этом стены не только передают нагрузки на нижележащие слои грунта, но и служат в качестве противодиффузионной завесы, предотвращая или ограничивая приток подземных вод к сооружению.

Особого вида подземные конструкции устраивают при пересечении тоннелем крупных карстовых полостей.

В некоторых случаях, помимо мостовых, требуется возведение различных опорных и поддерживающих конструкций: фундаментных блоков и плит, перекрытий, подпорных стенок и контрфорсов и др., которые закрепляют карстовые полости в месте расположения тоннелей.

Расчет конструкций тоннелей в закарстованных грунтах заключается в определении дополнительных внутренних усилий и прогибов, вызванных наличием карстовых полостей в непосредственной близости от подземного сооружения. Методы расчета противокарстовых конструкций должны учитывать механизм появления карстовых деформаций и стохастический характер их основных параметров аналогично тому, как это принято при расчете антисейсмических конструкций.

Наиболее универсальным и эффективным следует считать метод конечных элементов, позволяющий определять напряженно-деформированное состояние

массива закарстованных грунтов до строительства, а также на стадии эксплуатации. При этом имеется возможность оценить прочность и устойчивость грунтового массива и конструкции подземного сооружения с учетом различных противокарстовых мероприятий.

Для обеспечения надежной и безаварийной эксплуатации тоннелей на закарстованных территориях, а также для защиты зданий и инженерных коммуникаций, принимают различные меры, включающие в себя постоянный контроль за развитием карстово-суффозионных процессов и состоянием наземных и подземных сооружений, а также меры, направленные на уменьшение вредного влияния хозяйственной деятельности человека на карстовые процессы.

Контроль за развитием карстово-суффозионных процессов заключается в фиксировании их параметров в массиве горных пород и деформаций земной поверхности, зданий и сооружений, предусматривая:

- устройство глубинных грунтовых марок в покровной толще пород;
- установку площадной и линейной сигнализации;
- создание сети наблюдательных гидрогеологических скважин;
- проведение инструментального контроля за оседаниями земной поверхности;
- автоматический контроль за деформациями конструктивных элементов сооружений с применением сигнальных устройств;
- визуальное наблюдение за состоянием несущих и вспомогательных конструкций;
- установку маяков на трещинах в конструкциях.

На ряде карстоопасных участков железных дорог и автомагистралей эксплуатируется линейная электрорелейная оповестительная сигнализация, автоматически регистрирующая повреждение дорожной конструкции при образовании карстового провала и передающая за прецедующий сигнал на светофоры.

## Проектирование метрополитенов в агрессивных средах

При проектировании рассматривается воздействие агрессивных сред на следующие сооружения, конструкции и устройства метрополитена:

- конструкции подземных сооружений (чугунные, железобетонные тоннельные обделки и внутренние стальные оболочки);
- рельсы и рельсовые скрепления;
- кабели (силовые, связи и сигнально-блокировочные);
- стальные и чугунные трубопроводы.

Рассматриваются следующие виды агрессивного воздействия:

- биологическое;
- тяжелых металлов;
- химическое атмосферное;
- вынос в тоннели нефтепродуктов и промышленных стоков.

Основным показателем экономической эффективности проекта защиты от агрессивного воздействия

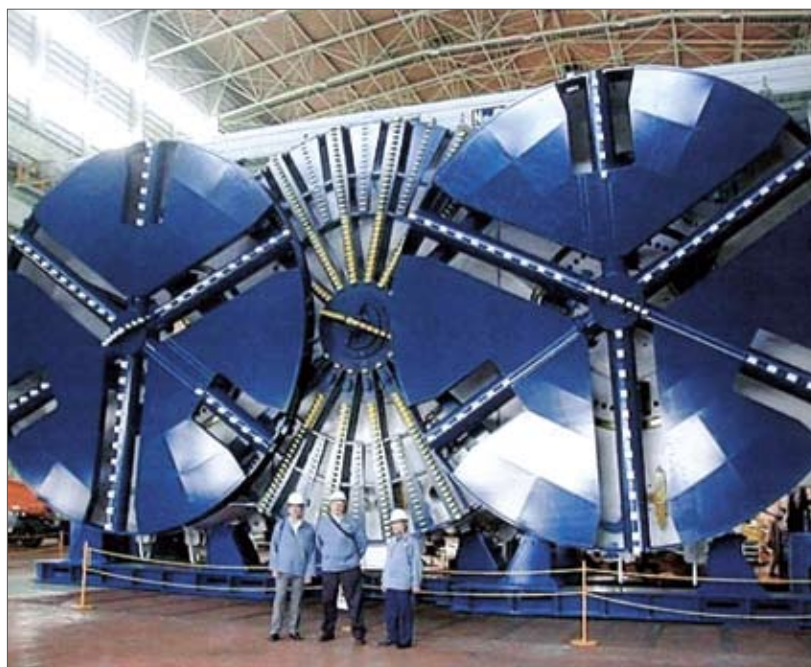


Рис. 2. Двухочковый щит горизонтальной ориентации

является ожидаемый годовой экономический эффект, представляющий собой суммарную экономию всех производственных ресурсов (живого труда, материалов, капитальных вложений), которую получает народное хозяйство в результате повышения надежности и долговечности подземных сооружений.

Проект защиты от влияния агрессивных сред должен разрабатываться, как правило, в составе комплексного проекта строительства или реконструкции линии (участка), а для действующих метрополитенов в случае необходимости — отдельным проектом.

## Инновации в строительстве тоннелей и метрополитенов

В соответствии с Постановлением Правительства №514-ПП от 26 сентября 2012 года, в Москве до конца 2020 года должно быть построено и введено в эксплуатацию около 150 км линий метрополитена, в том числе 67 станций, 15 электродепо и 4 дополнительных выхода на действующих станциях. Для сравнения: ранее даже в самые благоприятные для отечественного метростроения периоды в столице сдавалось в эксплуатацию не более 5 км линий за 5 лет.

Одним из основных факторов, благодаря которым можно резко увеличить темпы, является усовершенствование технологии строительства линий глубокого заложения за счет использования высокопроизводительной автоматизированной техники и инновационных конструкций станционных и перегонных тоннелей.

Такую принципиальную возможность дает совершенно новая для России горнопроходческая техника, изготавливаемая и широко применяемая в Японии. Для осуществления грандиозных планов по строительству Московского метрополитена наибольший интерес представляют двухочковые и многоочковые щитовые машины.

Главным назначением двухочковых щитовых машин является обеспечение возможности сооружения за один



Рис. 3. Опытный образец двухочковой щитовой вертикальной ориентации

проход одного тоннеля площадью сечения, эквивалентной сумме площадей сечения двух отдельных сооружаемых тоннелей, и существенно меньшей площадью по сравнению с одиночным тоннелем (рис. 1).

На рис. 2 и 3 показаны примеры двухочковых машин горизонтальной и вертикальной ориентации, примененных на строительстве японских метрополитенов.

С помощью многоочковых щитовых машин прокладываются тоннельные сооружения, наружная поверхность которых в сечении имеет вид трех и более окружностей, частично перекрывающих друг друга.

На рис. 4 показана трехочковая щитовая машина, примененная на строительстве одной из станций метрополитена в Японии.

### Эксплуатация действующих сооружений метрополитена

Научное обеспечение эксплуатации метрополитена в последние 15–20 лет охватывало в основном вопросы технической безопасности. Это было связано с возросшими объемами строительства новых объектов городской инфраструктуры (подземных и наземных) в зоне расположения действующих сооружений метрополитена.

Основным практическим результатом научно-исследовательских работ в этом направлении стали разработка и согласование в установленном порядке двух документов:

- «Правила использования территорий технических зон метрополитена в городе Москве», утвержденные Москомархитектурой;
- «Методика комплексного обследования состояния строительных конструкций сооружений метрополитена, попадающих в зону влияния строительства городских объектов», согласованная Московским метрополитеном.

В этих документах объединены в единую логическую схему все факторы, влияющие, в конечном счете, на обеспечение эксплуатационной надежности действующих

щих объектов метрополитена. Конечным звеном в этой логической схеме являются понятия «техническая зона» и «охранная зона».

Техническая зона метрополитена для строительства — городская территория, отводимая для последующего строительства участков линии метрополитена, для размещения электродепо и других наземных сооружений при строительстве объектов метрополитена.

Техническая зона метрополитена для эксплуатации — участок городской территории, непосредственно примыкающий к объекту метрополитена и используемый для обеспечения нормального функционирования объекта (входа и выхода пассажиров, подъезда и размещения специализированных машин, оборудования и материалов в период ремонтных работ метрополитена, предотвращение вибродинамического воздействия при строительных и реконструктивных работах в городе).

Охранная зона метрополитена — часть городской территории, расположенная над (под) действующими сооружениями метрополитена, строящимися и проектируемыми линиями метрополитена, а также в непосредственной близости от них. Устанавливается в целях предотвращения воздействия неблагоприятных внешних факторов на объекты метрополитена и объектов метрополитена на прилегающие к ним территории.

Неблагоприятные факторы воздействия — факторы экологического, природно-техногенного, технического характера, в результате воздействия которых возможно возникновение угрозы безопасности и здоровью людей, а также сохранности объектов метрополитена. К неблагоприятным факторам относятся:

- вибродинамические и механические нагрузки при проведении инженерно-геологических, буровых, горнопроходческих и строительных работ;
- химическая и биологическая агрессия, вынос нефтепродуктов и промышленных стоков, агрессия тяжелых металлов, обводненность грунтового массива;
- карстово-суффозионные явления и процессы.

Обеспечение эксплуатационной безопасности (надежности) сооружений метрополитена также тесно связано с наличием или отсутствием строительных дефектов.

### Дефекты и их систематизация

Под дефектом в данном случае подразумевается отклонение качества, форм или фактических размеров элементов и конструкций от требований нормативно-технической или проектной документации при проектировании, изготовлении, транспортировке, монтаже и эксплуатации.

Дефекты подразделяются в зависимости от их значимости.

*Критический дефект* — дефект, наличие которого значительно снижает надежность и долговечность конструктивных элементов или сооружения в целом, ставит под угрозу безопасность движения поездов и прохода пассажиров. Эксплуатация сооружений при наличии такого дефекта практически невозможна.

*Значительный дефект* — дефект, который оказывает существенное влияние на надежность сооружения, но, при выполнении мероприятий неотложного характера,

можно осуществлять его эксплуатацию в период проведения восстановительных работ, обеспечивая при этом безопасность движения и прохода пассажиров.

**Малозначительный дефект** — дефект, который не оказывает существенного влияния на надежность и долговечность сооружений, безопасность движения поездов и прохода пассажиров.

Многолетний опыт эксплуатации метрополитенов позволяет считать, что одной из наиболее значимых причин снижения эксплуатационной надежности и долговечности подземных сооружений является воздействие на них агрессивных сред различного вида и характера. Их источником являются грунтовый массив, грунтовые воды заобделочного пространства и тоннельная атмосфера.

Результатом воздействия агрессивных сред на конструкции сооружений могут стать:

- потеря несущей способности обделки;
- преждевременный выход из строя рельсов, рельсовых скреплений, кабелей и других обустройств;
- ухудшение параметров микроклимата в метрополитене.

Проблема обеспечения эксплуатационной надежности действующих тоннелей метрополитена должна решаться на трех уровнях.

**1-й уровень.** Изучение возможных причин снижения эксплуатационной надежности.

**2-й уровень.** Определение путей повышения эксплуатационной надежности тоннелей метрополитена, находящихся в зоне влияния агрессивной среды или возводимых в текущий период объектов городской инфраструктуры.

**3-й уровень.** Профилактика обеспечения эксплуатационной надежности метрополитена при перспективном планировании строительства объектов городской инфраструктуры в зоне расположения тоннелей.

Исходя из практики эксплуатации сооружений Московского метрополитена в последнее десятилетие, выработана следующая наиболее целесообразная этапность определения фактической надежности тоннельных конструкций:

- установление теоретического запаса прочности конструкции;
- натурное обследование технического состояния тоннельных конструкций и заобделочного пространства;
- определение фактического запаса прочности расчетным путем, на основе результатов натурального обследования конструкций и породного массива.

Сравнение фактического и теоретического запасов прочности конструкции позволяет выработать мероприятия по обеспечению эксплуатационной надежности рассматриваемого тоннеля.

Основными показателями безопасности эксплуатируемых тоннелей действующего метрополитена являются:

- прочность конструкции;
- отсутствие деформаций конструкции;
- надежность и долговечность гидроизоляции сооружений;
- надежность работы систем СЦБ, связи и автоматизации;
- надежность работы систем шахтного водоотлива и тоннельной вентиляции.

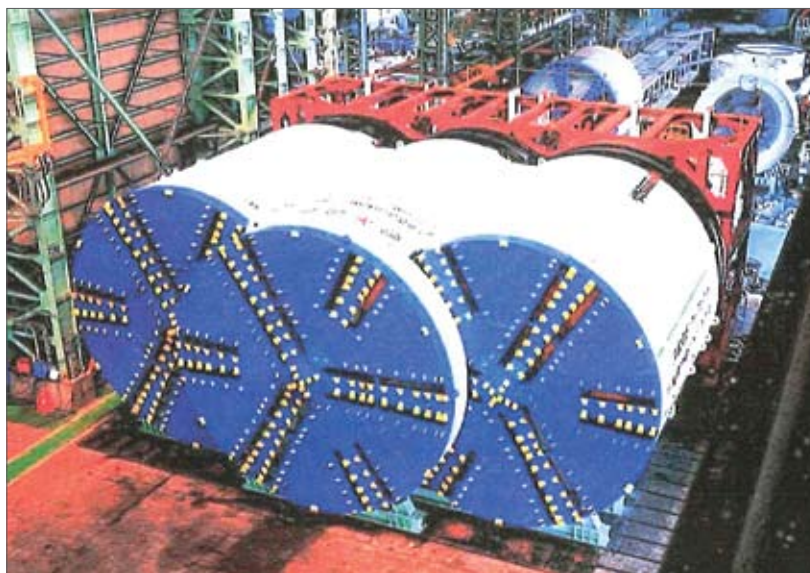


Рис. 4. Трехочковая щитовая машина

При этом особое внимание должно быть обращено на следующие факторы:

- степень возможной негабаритности тоннелей главных путей метрополитена в результате деформаций конструкции;

- изменение профиля и плана путей метрополитена в результате пространственных перемещений участков тоннелей при сооружении новых городских объектов.

Необходимо осуществлять мониторинг технического состояния эксплуатируемых объектов метрополитена в ходе строительства иных объектов, расположенных в зоне его влияния, с принятием оперативных решений по предотвращению нештатных (аварийных и предаварийных) ситуаций.

Расположение городских новостроек в непосредственной близости от действующих сооружений метрополитена привело к интенсификации процессов обследования и мониторинга, а следовательно, к увеличению объема соответствующих бумажных документов. Поэтому в НИЦ ТМ с участием ГУП «Московский метрополитен» в настоящее время проводится работа по созданию соответствующей электронной базы данных (БД) и разработке информационной системы на ее основе.

Содержание БД формально состоит из двух частей: постоянная информация, содержащая данные о форме и материале обделки, о грунтах, о глубине заложения, способе производства работ, о пикетаже и др., и переменная информация, содержащая данные о дефектах или их проявлении, фотографии, схемы расположения дефектов и т. д.

Учитывая сложную технологию наполнения базы данных, были разработаны интерактивная модель схемы метро, алгоритмы и программы ввода и редактирования информации. После запуска программы ввода на экране отображается схема метро и предлагается выбор: ввести (редактировать) данные по отрезкам или дефектам. После ввода нового объекта его расположение добавляется на схему к существующим. В БД вводятся также схемы расположения дефектов.

Из заполненной таким образом базы данных можно получить любую хранящуюся там информацию с помощью запросов на языке SQL. ■