

ЛЕНМЕТРОГИПРОТРАНС – 30 ЛЕТ В ТОННЕЛЬНОЙ АССОЦИАЦИИ РОССИИ



К. П. Безродный, д. т. н., ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»
М. О. Лебедев, к. т. н., ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

Так получилось, что создание Тоннельной ассоциации России совпало с ликвидацией Союза Советских Социалистических Республик (СССР) и правительства СССР, в составе которого было Министерство транспортного строительства. В подчинении этого министерства были все научные, проектные и строительные организа-

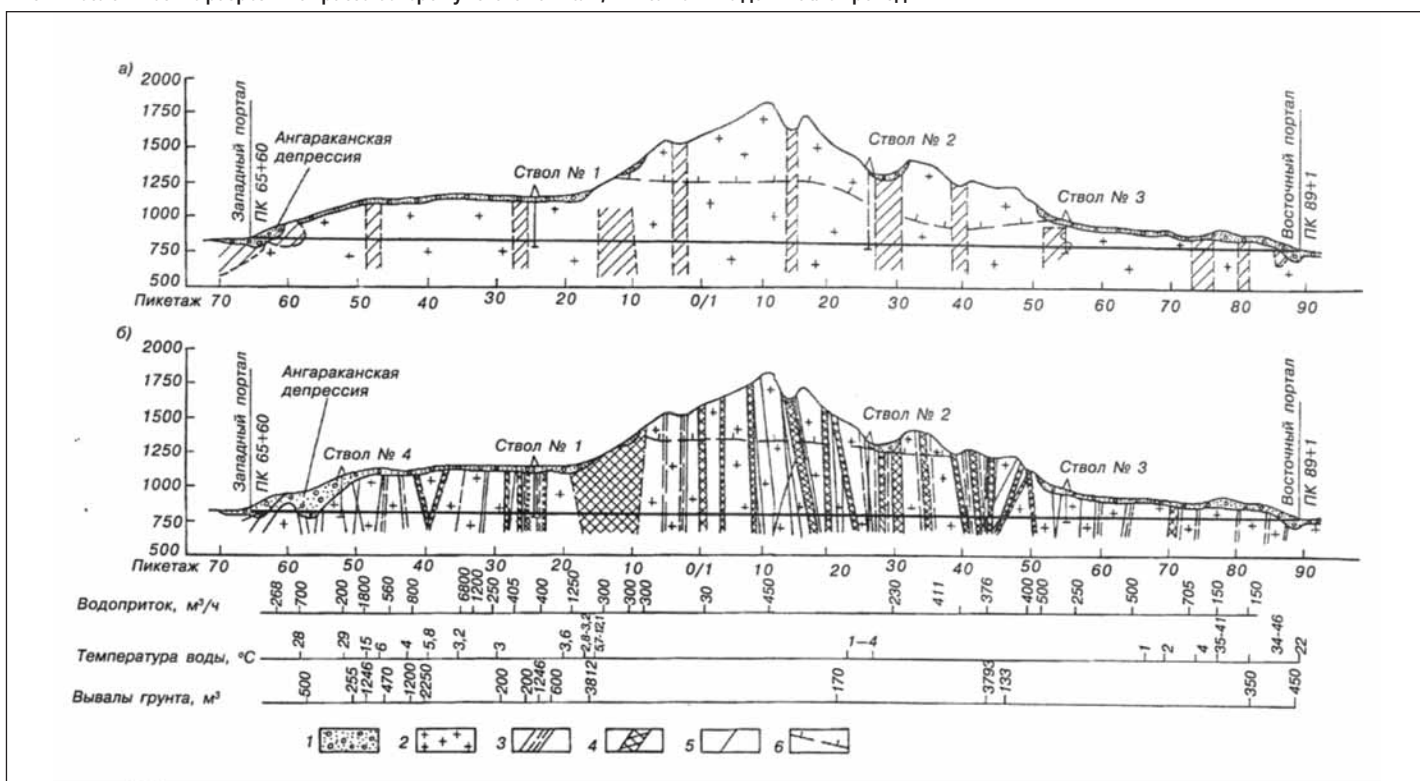
ции, занимающиеся строительством тоннелей и метрополитенов. Такое дальновидное решение, у истоков которого стояли О. Н. Макаров и С. Н. Власов, было поддержано всеми метро- и тоннелестроителями России.

Пожалуй, первым и самым важным объектом Тоннельной ассоциации стали тоннели Байкало-Амурской железнодорожной магис-

трали. Генеральным проектировщиком этих тоннелей был Ленметрогипротранс, а генеральным подрядчиком по строительству – Бамтоннельстрой.

Большая удаленность (несколько сотен километров) от транспортных магистралей, горный рельеф по трассе тоннелей, сложнейшие инженерно-геологические и

Рис. 1. Геологические разрезы по трассе Северомуйского тоннеля, выполненные до и после проходки



гидрогеологические условия не позволяли на стадии изысканий дать полную информацию по условиям сооружения тоннелей (рис. 1). Поэтому было очень важным разработать методы, позволяющие уточнить инженерно-геологические и гидрогеологические условия впереди забоя тоннеля, для выбора оптимальных технологий сооружения тоннелей.

Были разработаны на уровне изобретений два геофизических метода. Один основан на регистрации естественных импульсов электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ). Было получено, что при проходке тоннеля, когда зона концентрации напряжений в массиве (зона опорного давления) попадает в предразломную зону, электромагнитная эмиссия (ЭМИ) увеличивается, затем, при продвижении забоя, когда зона опорного давления попадает в разлом (зона дезинтеграции грунтов) ЭМИ падает (рис. 2) [1]. Второй метод – это сверхширокополосная (СШП) георадиолокация. С помощью этого метода определяли положение, размер тектонических разломов, в частности в 4-й тектонической зоне Северомуйского тоннеля [2].

Конечно, к таким сложным инженерно-геологическим и гидрогеологическим условиям, как на Северомуйском тоннеле, наша тоннелестроительная отрасль была не готова. Не было нормативно-технических документов. Поэтому решения приходилось принимать по ходу возникновения проблемы. Для ускорения принятия решений приказами Министра путей сообщений СССР и Министра транспортного строительства СССР был создан на месте строительства временный научно-технический коллектив (ВНТК). Руководителем ВНТК был начальник Бамтоннельстроя В. А. Бессолов, заместителем по строительству – главный инженер Бамтоннельстроя, по проектированию – начальник Бамтоннельпроекта, по научно-исследовательским работам – начальник филиала (лаборатории) ЦНИИС, заместителем от заказчика – начальник Северобайкальской группы заказчика.

ВНТК было дано право на месте строительства принимать решения по технологии проходки, финансовому обеспечению, разработке необходимой проектной и нормативно-технической документации.

Основные препятствия представляли зоны тектонических разломов, сложенные дезинтегрированными до песка и глины грунтами при гидростатическом давлении до 5 МПа. Причем из 15,3 км длины Северомуйского тоннеля зоны разломов занимали 2,6 км.

Непосредственно на строительстве тоннеля разработкой технологии закрепления грунтов разломов занимались фирмы и организации: «Солетанш» Франция, «Кокен Боринг» Япония, «Спецтампонажгеология» ССР Украина, институт химии высокомолекулярных соединений (ИХВС) АНУССР, «Ленметрогипротранс», ЦНИИС. Солетанш использовал технологию манжетных колонн, гидроразрыв и фильтрационную пропитку, Кокен-Бо-

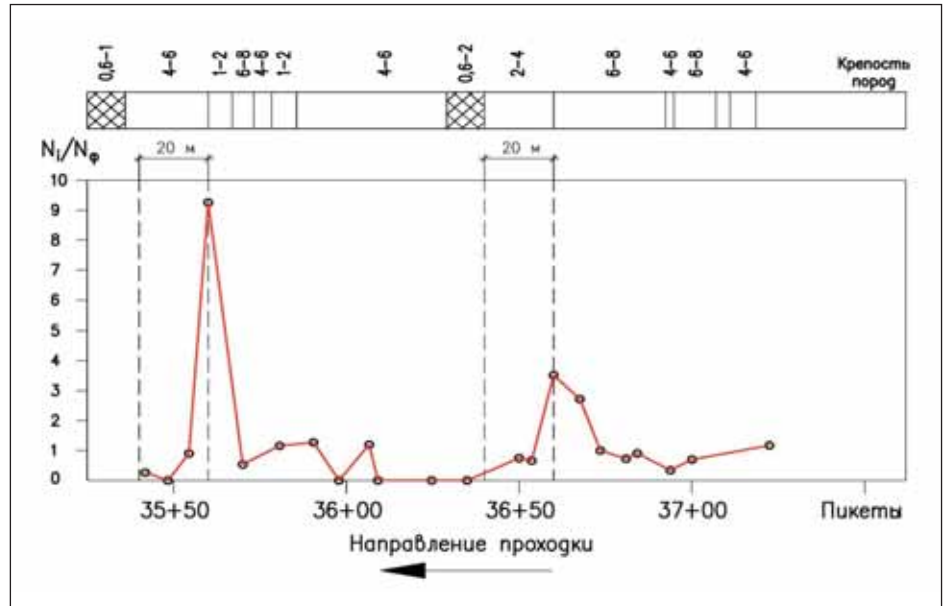


Рис. 2. Опережающая разведка методом регистрации ЕИЭМПЗ в забое ТРДШ Северомуйского тоннеля

ринг – прямое инъецирование наступающими заходками для создания армированного прожилками раствора грунта. В обоих случаях применяли растворы на основе цемента. Спецтампонажгеология с глинистыми растворами для водоподавления в трещиноватых скальных грунтах не смогла решать задачу в дезинтегрированных грунтах разломов. ИХВС АНУССР использовал для закрепления грунтов экзотические и дорогие растворы на основе полиизоционата и олигоэфирокрилата, которые оказались чрезвычайно дороги, экологически опасны и нетехнологичны. Должного успеха не получилось.

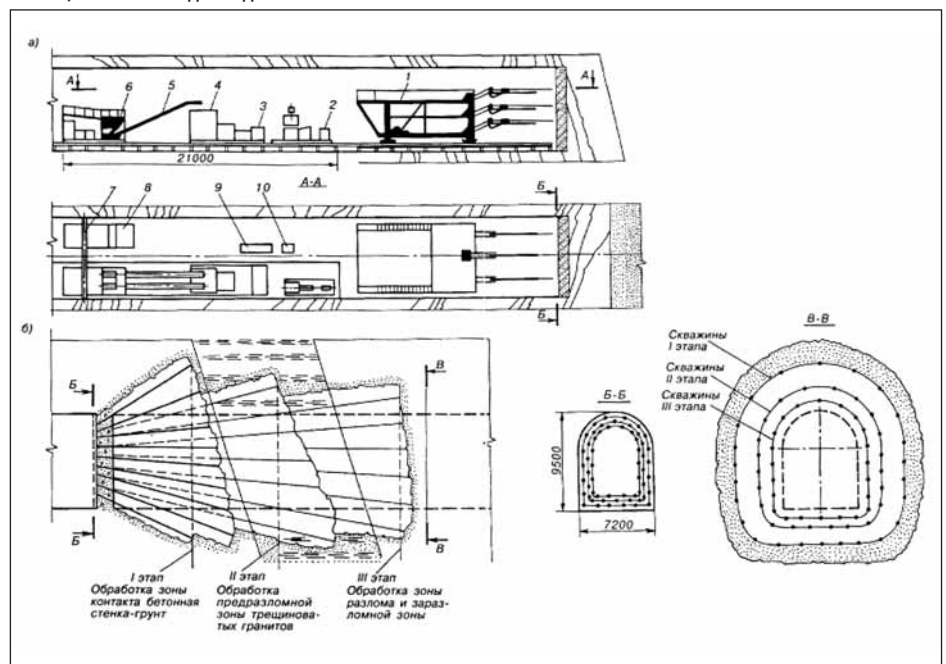
Специалисты Ленметрогипротранса разработали проект замораживания водонасы-

щенных грунтов разлома жидким азотом. Вообще, получилось. Но были проблемы:

- деструктуризация грунтов при замораживании и последующим оттаивании;
- вывод газообразного азота из подземных выработок.

Бамтоннельстрой, лаборатория ЦНИИС и Бамтоннельпроект пошли по другому пути. В результате проведенных исследований и опытных работ было получено, что наибольший эффект при инъекционном закреплении грунтов можно получить путем их консолидационного уплотнения и создания армирующих грунт затвердевших прожилков раствора (рис. 3) [4, 5]. Был разработан цементно-хлоркальциевый рас-

Рис. 3. Технологическая схема № 4 упрочнения грунтов инъекцией твердеющих растворов в тоннеле: а – расположение оборудования; б – расположение скважин; 1 – буровая рама «Фурукава» или «Тамрок»; 2 – насос КМ-9Т или РGW-40TV; 3 – насос НБЗ-120/40, РН-15; 4 – установка приготовления раствора; 5 – шнек; 6 – бункер-накопитель цемента; 7 – тельфер ТЭ 320-521; 8 – МОАЗ 64011-9585; 9 – емкость для жидкого стекла; 10 – емкость для воды



твор, где хлоркальциевая компонента имеет вязкость сравнимую с водой и при инъектировании пропитывает мелкодисперсные составляющие разлома. Давление при инъектировании доходило до 15–20 МПа. После создания впереди забоя вокруг будущего тоннеля зоны закрепленных грунтов по ее внешней границе бурят дренажные скважины для снятия гидростатического давления [4]. Исследования показали, что интегральный модуль деформаций инъекционно закрепленного грунта в 1,5–2,0 раза выше, чем в природном состоянии. Гидростатическое давление на закрепленный грунт с помощью дренажных скважин удавалось снизить до 0,1–0,2 МПа.

Для ускорения инъекционного закрепления разлома были использованы камуфлетные взрывы, с помощью которых в дезинтегрированных водонасыщенных грунтах образовывали горизонтальные цилиндрические полости за контуром будущего тоннеля, которые мгновенно заполняли твердеющим раствором [6].

По результатам теоретических исследований инъекционно закрепленных грунтов был разработан метод расчета косвенно армированных грунтов прожилками раствора с использованием методов механики сплошной среды [7].

По трассе Северомуйского тоннеля со стороны западного портала был встречен мощный грабен (Ангараканская депрессия) длиной по трассе тоннеля 800 м, над шельгой свода 190 м, заполненный четвертичными водонасыщенными отложениями с гидростатическим давлением на уровне тоннеля 1,5 МПа.

После исследований, опытных откачек, был разработан проект комплексного водопонижения (рис. 4) в Ангараканской депрессии для сооружения транспортно дре-

нажной штольни (ТРДШ) и тоннеля [8]. Вдоль трассы тоннеля и штольни были пробурены вертикальные скважины ниже лотка тоннеля и штольни. В них установили насосы глубинного водопонижения с мощными фильтровыми колоннами, которые осуществляли водопонижение с поверхности над тоннелем.

Из ТРДШ была пройдена наклонная штольня в скальных грунтах под тоннель и ТРДШ. Эта штольня имела несколько боковых камер, из которых с помощью двухшпиндельных станков фирмы ТОНЭБОРИНГ (Япония) были пробурены в четвертичных отложениях горизонтальные скважины, оснащенные фильтрами. Вода из этих скважин попадала в водоотводный лоток ТРДШ и уходила на западный портал тоннеля. Такое комплексное водопонижение позволило снизить уровень грунтовых вод ниже лотка тоннеля и успешно осуществить его сооружение.

Достаточно успешно при строительстве тоннелей БАМ был применен разработанный для различной степени дезинтеграции грунтов впереди забоя опережающий забой экран из труб [9].

Большие исследования были проведены по конструкциям крепей и обделок тоннелей.

Во-первых, были уточнены деформативно-прочностные характеристики скальных грунтов разной степени трещиноватости, изучены природные поля напряжений. Отмечено, что в крепких скальных грунтах прочностью на одноосное сжатие 120–160 МПа возводили монолитную бетонную обделку прочностью 30 МПа. Этого требовали нормативные документы. Более того, по датчикам, установленным в обделке во время ее бетонирования в опалубке получали следующую картину. Во время гидротации цемента бетон разогревается до + 50–60 °С. В

это время бетон имеет большую податливость и возникающие температурные напряжения невелики. Затем происходит набор прочности бетона, увеличение модуля деформации и его охлаждение до температуры окружающей среды. Благодаря неровностям грунтового контура после буровывных работ и хорошей адгезии бетона к грунту в обделке возникают растягивающие напряжения. В районах, где существуют значительные градиенты суточных и сезонных температур, напряжения, складываясь с существующими, формируют напряженно-деформированное состояние (НДС) обделки, которое в основном вызвано температурными воздействиями [11]. Такого эффекта не возникает в набрызг-бетонных обделках, которые возводятся послойно, имеют меньшую толщину и соответственно в них возникают гораздо меньшие температурные напряжения.

В 1979 г. на Байкальском тоннеле со стороны западного портала был сооружен 30-метровый опытный участок постоянной обделки в набрызг-бетоне, который без нарушений служит по сегодняшний день. Практически по всей длине ТРДШ Байкальского и Северомуйского тоннеля за исключением зон разломов обделка выполнена в набрызг-бетоне [12]. Эти исследования показали, что напряжения в слаботрещиноватых крепких скальных грунтах, вызванные сооружением тоннеля и ТРДШ, воспринимаются вмещающим массивом, а в обделке действуют напряжения, вызванные температурными градиентами. При уровне действующих напряжений скальный массив работает без нарушения сплошности. Причем в набрызг-бетонных обделках напряжения незначительны, благодаря их малой толщине и послойному нанесению, что приводит к небольшим температурным градиентам по их толщине.

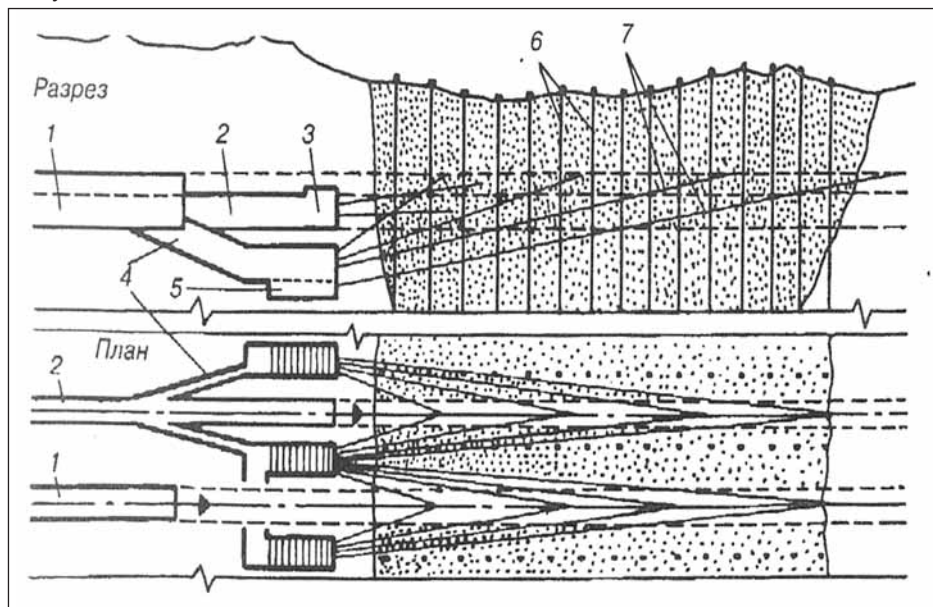
В монолитных бетонных обделках растягивающие напряжения близки к пределу прочности бетона.

Для сооружения тоннелей в сильнотрещиноватых и дезинтегрированных грунтах тектонических разломов была разработана технология проходки с применением арочно-бетонной крепи [13]. Затем, на основании выполненных исследований была разработана конструкция двухслойной обделки [14]. Наружным ее слоем была арочно-бетонная крепь, которая учитывалась при расчете постоянной обделки. Причем конструкция такой обделки такова, что на внутренний слой растягивающие напряжения при землетрясениях не передаются. Такие сейсмостойкие обделки были сооружены на двухпутных Мысовых тоннелях и однопутном – Северомуйском.

При строительстве тоннелей БАМ были встречены и вечномёрзлые грунты, где были разработаны специальные технологии.

Таким образом, сложнейшие условия строительства тоннелей БАМ стали толчком для создания новых технологий и конструк-

Рис. 4. Схема Ангараканской депрессии с системой комплексного водопонижения: 1 – тоннель; 2 – разведочная транспортно-дренажная штольня; 3 – камера для бурения скважин; 4 – выработки нижнего дренажного узла; 5 – зумпф; 6 – скважины водопонижения верхнего узла; 7 – скважины водопонижения нижнего узла



ций, а тоннелестроительная отрасль СССР приобрела новый технический уровень и высококвалифицированных специалистов в тоннелестроении.

Другим очень важным направлением для ТАР, а точнее для Петербургского отделения ассоциации, было проектирование и строительство метрополитена в Санкт-Петербурге.

С начала XXI века был получен ряд следующих научно-технических достижений института.

1. Реализация комплексной программы по разработке и внедрению новых конструктивно-технологических решений с применением набрызг-бетонной крепи и опережающих забой инъекционных анкеров при строительстве подземных выработок Санкт-Петербургского метрополитена.

2. Сохранение исторической части города при строительстве тоннелей метрополитена.

3. Перспективы дальнейшего совершенствования конструкций и технологии строительства тоннелей Петербургского метрополитена.

Инженерно-геологические условия строительства Петербургского метрополитена достаточно разнообразны. С поверхности мощностью до 40 м развиты озерно-ледниковые отложения и две морены, лужская и московская, разделенные толщей межледниковых отложений водно-ледникового генезиса. Вся толща четвертичных отложений водонасыщена, грунты чрезвычайно неустойчивы. Под четвертичными отложениями располагается мощный слой плотных сухих протерозойских глин, который является удобной средой для строительства и эксплуатации подземных выработок метрополитена.

Строительство метрополитена глубокого заложения, которое ведется в Санкт-Петербурге на глубинах 50–70 м, вызывает смещения дневной поверхности земли на большой площади, составляющей несколько гектаров городской территории. Существующие до настоящего времени технологии строительства станционных узлов метрополитена и наклонных эскалаторных тоннелей вызвали значительные сдвиги вышележащей толщи грунта и деформации расположенных на ней зданий и сооружений, приводящие иногда к нарушению их конструкций и к полному выводу сооружений из эксплуатации.

Расселение аварийных зданий и их ремонт требуют значительных материальных затрат и времени на восстановление зданий. Особенно нетерпимо такое положение при строительстве метро в исторической части города, когда мемориальные здания и архитектурные памятники подвергаются полному разрушению. Поэтому чрезвычайно важным является разработка и внедрение технологий по предотвращению недопустимых деформаций существующих зданий и сооружений при строительстве метрополитена и других подзем-

ных сооружений в центральных районах Санкт-Петербурга.

Для минимизации влияния строительства тоннелей метрополитена закрытым способом работ на дневную поверхность, здания и сооружения разработаны новые конструкции, технологии их сооружения и геотехническое сопровождения строительства.

В четвертичных водонасыщенных неустойчивых грунтах:

- комплексная стабилизация грунтов с применением струйной технологии и подмораживания при проходке эскалаторных тоннелей;

- сооружение эскалаторных тоннелей ТПМК с грунтовым пригрузом забоя;

- сооружение перегонных тоннелей ТПМК с гидравлическим пригрузом забоя;

- сооружение двухпутных перегонных тоннелей ТПМК с грунтовым пригрузом забоя.

В плотных глинах:

- разработка и применение обжатых на породу обделок: перегонных тоннелей, односводчатых и колонных станций;

- опережающее забой (косвенное армирование) закрепление грунтов инъекционными фибергласовыми анкерами.

Компенсационное инъецирование в зоны сдвига и разуплотнения грунтов для недопущения превышения разности осадок зданий и сооружений, превышающих нормативные. Инъецирование ведется в зоны сдвига и разуплотнения грунтов под зданиями. Разработано несколько способов ведения этих работ.

Неотъемлемой частью всех технологических процессов строительства тоннелей метрополитена является геотехнический мониторинг.

1. В 2007 г. была создана «Комплексная программа работ по разработке и внедрению новых конструктивно-технологических решений с применением набрызг-бетонной крепи и опережающих забой инъекционных анкеров при строительстве подземных выработок Санкт-Петербургского метрополитена».

Был разработан проект сооружения экспериментальной выработки с постоянной обделкой из набрызг-бетона.

В результате проектирования, строительства и проведенного геотехнического мониторинга приняты территориальные нормы на проектирование и строительство подземных выработок Петербургского метрополитена в кембрийских глинах с постоянной набрызг-бетонной обделкой.

На шахте № 620 был реализован проект строительства руднора и венттоннеля в кембрийских глинах с применением малоосадочной технологии. Впереди забоя в сводовой части сооружали экран из труб длиной 7 м, который омоноличивается инъекционным раствором, и инъекционные фибергласовые анкера длиной 14 м [15]. Проходку осуществляли полностью механизированным способом с жесткой арочно-бе-

тонной крепью. Во время строительства проводили геотехнический мониторинг.

Отсутствие деформаций на дневной поверхности дает основание говорить о реализации малоосадочной технологии строительства. Устойчивость выработки при заданных конструктивно-технологических параметрах была обеспечена.

На основании опытного проектирования, строительства, результатов геотехнического мониторинга разрабатываются территориальные нормы по проектированию и сооружению подземных выработок Петербургского метрополитена в кембрийских глинах с применением опережающих забой экранов из труб и инъекционных анкеров.

Таким образом, работы, намеченные программой, были выполнены.

2. Сохранение исторической части города при строительстве метрополитена.

Опыт строительства метрополитена свидетельствует о том, что наибольшее влияние на величину осадок дневной поверхности при использовании традиционной («классической») технологии, основанной на методе контурного рассольного замораживания, оказывало сооружение эскалаторных тоннелей с креплением сборной обделкой из чугунных тюбингов. Эта технология (замораживание грунта) приводила к деструктуризации грунта, что обычно сказывалось на увеличении осадок при его оттаивании уже после завершения проходки. Во время оттаивания ледопородного цилиндра, сформировавшегося при замораживании, происходили значительные деформации обделки тоннеля и осадки земной поверхности. Максимальные величины деформаций дневной поверхности при строительстве эскалаторных тоннелей составляют 550 мм. Следствием этого являлись значительные повреждения и разрушения существующих зданий и сооружений.

Снижение влияния технологических процессов, сопровождающих строительство метрополитена, на состояние земной поверхности и связанную с этим сохранность зданий и сооружений имеет уникальное культурно-историческое значение. В некоторых случаях отсутствие технологического решения для снижения деформаций дневной поверхности откладывало на десятилетия строительство объектов метрополитена в исторической части Санкт-Петербурга.

Наиболее перспективным направлением решения этих проблем следует считать разработку малоосадочных технологий строительства выработок метрополитенов и внедрение конструктивных параметров их крепления, обеспечивающих минимизацию воздействия процессов строительства на деформации дневной поверхности.

Значительные смещения земной поверхности при использовании рассольного замораживания инициировали поиск и проверку новых технологий закрепления

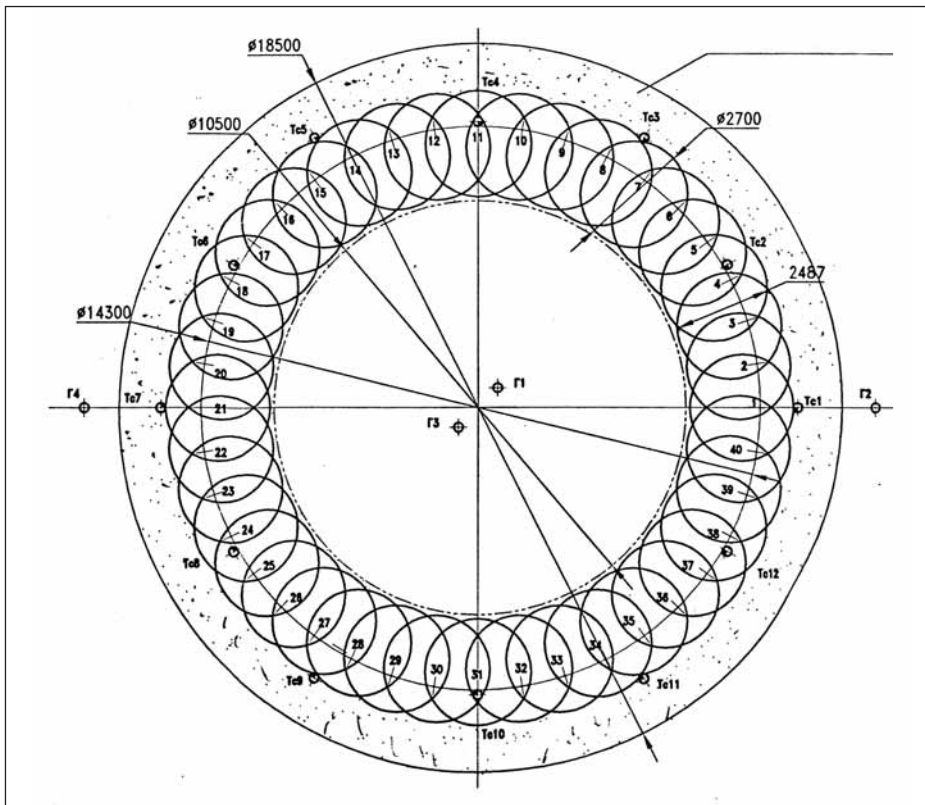


Рис. 5. Закрепление вмещающего тоннель массива: 1-40 – замораживающие скважины; Тс1-Тс2 – наблюдательные термометрические скважины; Г1-Г4 – гидрогеологические скважины

грунтового массива при сооружении эскалаторных тоннелей. Одной из таких технологий является так называемая комбинированная технология, сочетающая

струйную технологию и рассольное замораживание грунта, реализованная при строительстве эскалаторного тоннеля станции «Звенигородская» [16].

Рис. 6. Начало проходки эскалаторного тоннеля станции «Обводный канал»



Закрепление массива jet-сваями осуществлено рядами вертикальных скважин, пробуриваемых вдоль оси наклонного хода. Цементация производилась зонально, обеспечивая создание грунтоцементного ограждения необходимой толщины.

Для обеспечения безопасности проходки, наряду с цементацией было выполнено страховочное контурное замораживание (рис. 5) наклонными скважинами, перекрывающее возможные «окна» в цементном камне.

Замораживание выполнялось из расчета недопущения выхода контура заморозки за пределы закрепленного массива для обеспечения минимальных деформаций в процессе замораживания и последующего оттаивания. Разработка забоя осуществлялась экскаватором и отбойными молотками. Крепление тоннеля выполнялось в два этапа. При проходке возводили временную обделку, представленную стальными кольцами из двутавра с заполнением пространства между ними тяжелым бетоном. После проходки на всю длину, на временную обделку наносили обмазочную гидроизоляцию и возводили постоянную монолитную железобетонную обделку.

Эффективность использованной комбинированной технологии была подтверждена сопоставлением данных исследований деформаций дневной поверхности с «классической» технологией. Данные измерений показали, что при применении комбинированной технологии смещения земной поверхности были в 5 раз меньше.

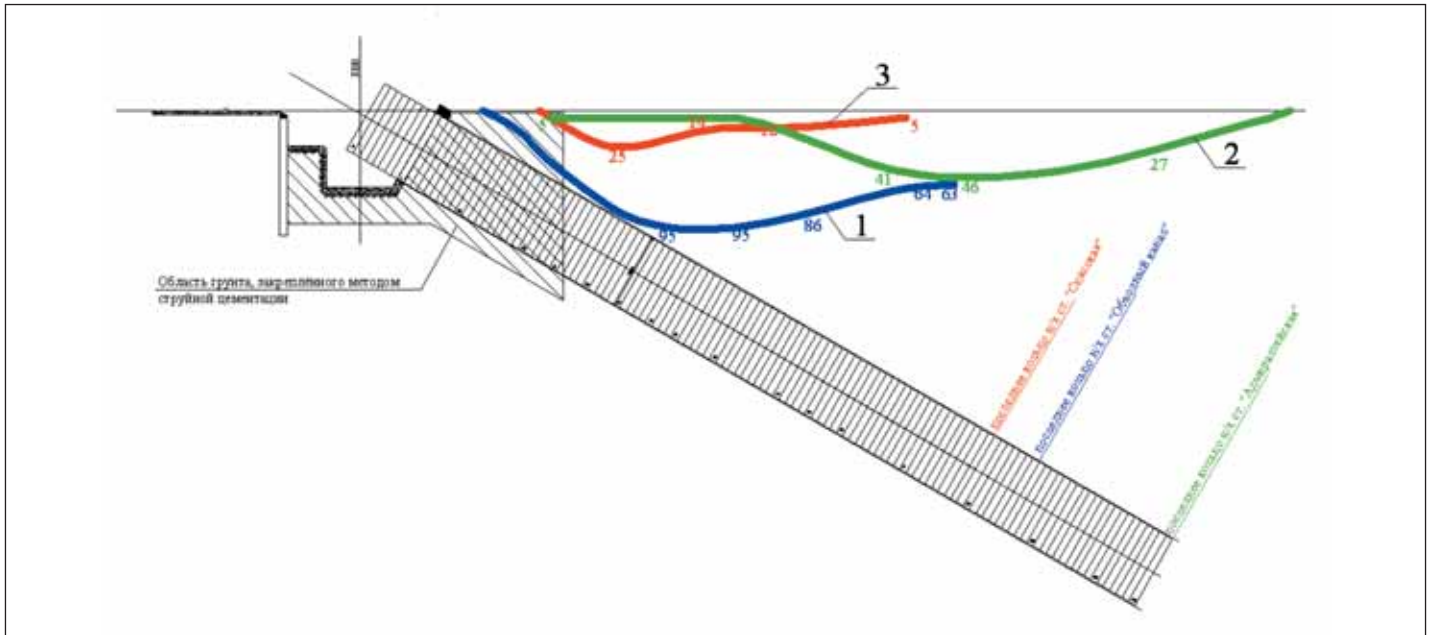


Рис. 7. Деформации дневной поверхности при строительстве эскалаторных тоннелей щитовым способом, мм: 1 – ст. «Обводный канал», 2 – ст. «Адмиралтейская», 3 – ст. «Спасская»

Другое направление снижения осадок дневной поверхности при сооружении эскалаторных тоннелей связано с применением тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК), с системой грунтопригруза, способной поддерживать забой, уравнивая давление грунта и воды, а также воздействовать на грунт посредством нагнетания химических реагентов. ТПМК производства немецкой фирмы «Херренкнехт АГ» были применены для строительства эскалаторных тоннелей станции «Обводный канал», «Адмиралтейская» и «Спасская» (рис. 6).

Эскалаторный тоннель выполнен в сборной железобетонной обделке диаметром 10,4 м, толщина блоков 500 мм. Блочная железобетонная обделка – из водонепроницаемого бетона с резиновым уплотнением стыков. Заобделочное пространство заполняли специальным водонепроницаемым быстротвердеющим раствором, смешивание которого осуществлялось в момент его нагнетания.

Совершенствование технологии сооружения эскалаторных тоннелей с помощью ТПМК позволило добиться значительного снижения величины осадок дневной поверхности с 95 мм на станции «Обводный канал» до 46 мм на станции «Адмиралтейская» и 25 мм на станции «Спасская» (рис. 7).

Результаты выполненных исследований показывают, что даже в крайне неблагоприятных горно-геологических условиях Санкт-Петербурга негативное воздействие на осадки земной поверхности и связанный с этим процесс разрушения зданий, попадающих в зону мульды сдвига, может быть снижено с помощью предлагаемых технологий сооружения и конструкций обделок наклонных эскалаторных тоннелей [17].

Во всех случаях при строительстве эскалаторных тоннелей проводили геотехни-

ческий мониторинг, в состав которого кроме контроля деформаций дневной поверхности входило определение напряженно-деформированного состояния системы «обделка – грунтовый массив». В грунтовом массиве в предварительно пробуренных вертикальных скважинах размещались датчики контроля гидростатического давления и экстензометры для контроля напряженно-деформированного состояния массива от контура тоннеля до дневной поверхности.

На основе результатов мониторинга принимали решения о проведении работ по компенсационному нагнетанию в основание зданий, попавших в зону влияния строительства эскалаторного тоннеля станции «Адмиралтейская».

Использование современных автоматизированных систем геотехнического мониторинга грунтового массива (в комплексе с традиционными методами контроля) при проходке подземных сооружений различного назначения, особенно в условиях городской застройки, является эффективным элементом технологического процесса, позволяющим значительно снизить риски возникновения аварийных ситуаций и повысить эффективность защитных геотехнических мероприятий.

Полученные результаты напряженно-деформированного состояния системы «обделка – грунтовый массив» были сопоставлены с расчетными величинами, вычисленными методами механики сплошной среды. Сопоставление показало, что при применяемых технологиях и конструкциях в данных инженерно-геологических условиях расчеты методами механики сплошной среды отражают реальную работу обделок подземных сооружений с вмещающим массивом. Внедряемые малоосадочные технологии строительства мет-

рополитена позволили на порядок и более снизить осадки дневной поверхности по сравнению с классической технологией строительства эскалаторных тоннелей методом замораживания.

3. Перспективы дальнейшего совершенствования конструкций и технологий строительства тоннелей Петербургского метрополитена.

В 2013 г. была разработана комплексная программа: «Совершенствование технологий сооружения и постоянных конструкций Петербургского метрополитена», в которой определены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы для достижения поставленной цели.

3.1. Станции закрытого типа глубокого заложения в коренных протерозойских и кембрийских глинах.

3.2. Станции пилонного типа глубокого заложения в коренных протерозойских и кембрийских глинах.

3.3. Односводчатые станции.

В ранее разработанную технологию строительства и конструкцию станций вводятся:

- опережающее забой крепление грунтового массива фиброгласовыми инъекционными анкерами;
- механизированная разработка грунта при сооружении верхнего свода.

3.4. Эскалаторные тоннели.

3.4.1. Проходка с помощью ТПМК:

- удешевление конструкции обделки за счет уменьшения армирования;
- исключение компенсационного инъектирования за счет более тщательного заполнения зазора между обделкой и грунтом и более оптимальными режимами грунтопригруза.

3.4.2. Сооружение тоннеля с предварительной комплексной стабилизацией четвертичных отложений.

3.5. Дальнейшая разработка и внедрение малоосадочных технологий.

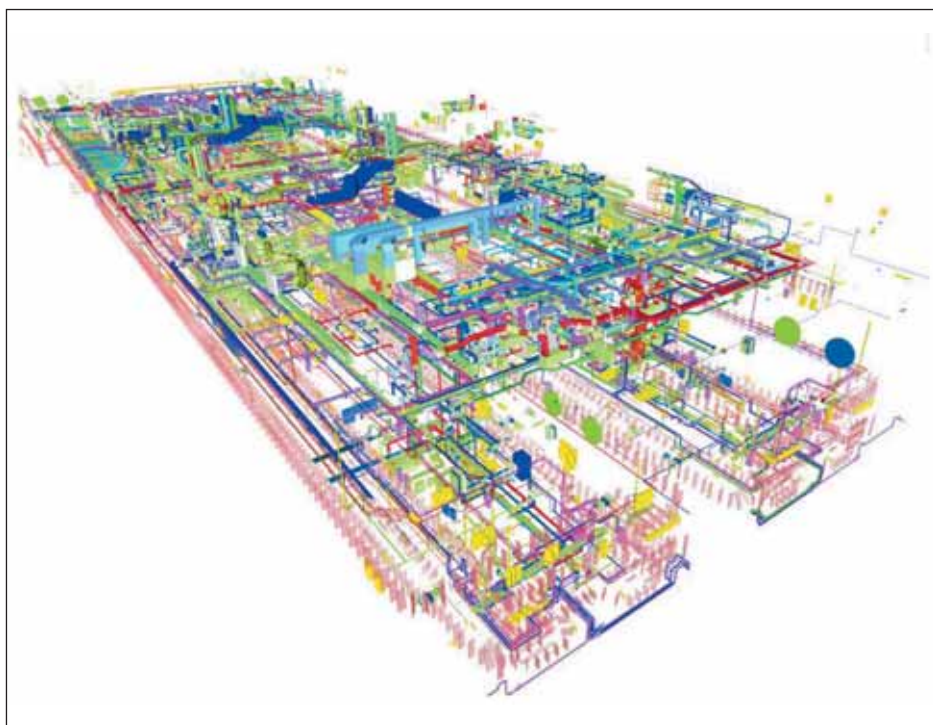


Рис. 8. Инженерные системы станции мелкого заложения

Строительство новых подземных линий метрополитена будет проходить и в местах плотной городской застройки, где сохранение зданий и сооружений, особенно в исторической части города, чрезвычайно важно.

Поэтому необходимо и далее развивать и разрабатывать малоосадочные технологии:

- комплексная стабилизация водонасыщенных четвертичных отложений;
- опережающие забой экраны из труб и фиброгласовые инъекционные анкера при проходке в плотных глинах;
- проходка тоннелей в четвертичных водонасыщенных грунтах с пригрузом забоя с помощью ТПМК;
- компенсационное инъецирование в грунтовый массив под зданиями и сооружениями в места разуплотнений при проходке подземных выработок;
- обжаты на породу обделки.

3.6. Применение новых материалов при создании аналогов армированных бетонных и набрызг-бетонных конструкций.

С целью удешевления конструкций на основе бетона:

- разработка фибробетона и фибронабрызг-бетона армированных синтетическим строительным волокном «BARCHIP»;
- разработка фибробетона и фибронабрызг-бетона армированных базальтовым волокном;
- разработка бетонных конструкций армированных неметаллической композитной арматурой периодического профиля;
- разработка фибробетона армированного стальной арматурой;
- разработка фибробетона армированного неметаллической композитной арматурой.

3.7. Разработка концепции проектов строительства шахтных стволов, в том числе экс-

плуатируемых, на станциях, оснащенных только одним эскалаторным тоннелем.

На сегодняшний день при реконструкции подземного вестибюля и эскалаторного тоннеля станция выходит из эксплуатации, не решен вопрос пользования метрополитеном инвалидами с ограниченными двигательными функциями.

3.8. Проектирование и строительство двухпутных перегонных тоннелей в четвертичных отложениях с помощью ТПМК с пригрузом забоя и боковыми посадочными платформами, станционными узлами.

3.9. Осуществлять научное сопровождение и геотехнический мониторинг при строительстве и эксплуатации постоянных конструкций Петербургского метрополитена.

На двух линиях метрополитена: Фрунзенской и Невско-Василеостровской при строительстве в четвертичных отложениях и твердых глинах разработаны технология сооружения и конструкция обделки для двухпутных перегонных тоннелей при их проходке ТПМК с грунтовым пригрузом забоя. При проходке проводили комплексный геотехнический мониторинг, который позволил откорректировать технологические параметры проходки и изучить напряженно-деформированное состояние системы тоннель – вмещающий массив [18].

Громадный объем работ был выполнен и при строительстве автодорожных и железнодорожных тоннелей. И, прежде всего, это тоннели Туапсе – Адлер, обход г. Сочи и трасса Адлер – Красная Поляна. Для обеспечения безопасности при проходке тоннелей вели горно-экологический мониторинг, который затем переходил и на период эксплуатации [19].

Больше десяти лет институт успешно использует технологию информационного

моделирования для проектирования станций метрополитена, что способствует принятию эффективных проектных решений и значительно повышает качество выпускаемой документации.

Сложнейший комплекс инженерных сетей и оборудования, который объединяет технологически связанные устройства станции метрополитена и его комплексное проектирование, предполагает создание трехмерной модели трассы, конструкций, систем электроснабжения, вентиляции, водоснабжения, систем связи и автоматизации.

Создана следующая схема организации работ: трехмерная трасса создается в программе AutoCAD Civil 3D, конструкции – в программе AutoCAD Architecture, а проектирование вентиляции и санитарно-технических устройств, автоматики, систем связи и электроснабжения осуществляется в программе AutoCAD MEP (рис. 8).

При создании трассы используется пакет программ LMGТ. Трасса, представляющая собой надстройку над Civil3D на основе API компании Autodesk, позволяет автоматизировать и упростить создание документации в соответствии с требованиями российских стандартов. В том числе: пересчет пикетажа трассы и создание неправильных пикетов, ввода длин переходных кривых разбивочной оси, расчет пикетов начала и конца переходных кривых и сохранение данных для использования в других программах, определение возвышения головки рельса и отгона возвышения в кривых, автоматического создания меток по трассе, автоматического расчета ведомости путейских реперов, автоматического создания трассы оси пути и тоннеля, габаритов приближения. Также данная надстройка позволяет выполнить экспорт плана и профиля в 3D-полилинию для дальнейшей работы в конструкторских и инженерных САПР.

За прошедшее время специалистами института были успешно созданы информационные модели станций мелкого и глубокого заложения. Создана уникальная библиотека оборудования (рис. 9) и несущих элементов конструкций (рис. 10).

Анализ и исследование всей модели осуществляется с помощью программы Navisworks Manage. Специализированный набор инструментов, таких как нанесение пометок, добавление комментариев, отслеживание ошибок в случае взаимного пересечения инженерных коммуникаций, проверка на удобство обслуживания оборудования, а также формирование отчетов по результатам проверки, способствует эффективной организации взаимодействия проектировщиков разных специальностей (разделов проектных работ).

На основании графика строительства, выполненного в MS Project, в Navisworks Manage с использованием инструментов Timeliner и Animator создается 4D-модель

сооружения, отображается последовательность и сроки выполнения технологических операций при строительстве, позволяющие выявлять временные несоответствия в проекте и при необходимости отслеживать и вносить изменения в порядок выполнения технологических операций.

Специалисты института принимают активное участие в работе секции «Подземные сооружения» Межведомственной рабочей группы (МРГ) по внедрению технологий информационного моделирования при реализации строительных проектов города Москвы и в рабочей группе № 2 при Тоннельной ассоциации России «Содействие внедрению технологии информационного моделирования при реализации проектов подземного строительства», в рамках которых ведется работа по созданию нормативной и методической базы для применения BIM-технологий на объектах метрополитена.

На всех вышеприведенных объектах строительства было тесное сотрудничество института и Тоннельной ассоциации России. Многие научные и технические проблемы строительства и проектирования обсуждали на конференциях и заседаниях научно-технического экспертно-консультационного совета.

Роль Тоннельной ассоциации России в деле прогресса, сплочения тоннельных знаний и специалистов в области метро- и тоннелестроения велика.

Смеем пожелать больших успехов в полезной и консолидирующей деятельности Тоннельной ассоциации России.

Список литературы

1. Басов А. Д., Безродный К. П. «Обнаружение зон разломов бесконтактным методом». – *Метрострой*. – № 2, 1991 г., с. 24–25.
2. Мацегора А. Г., Безродный К. П., Горин Г. Г., Козик Н. В., Куксин В. А. – «Определение необходимости упрочнения грунтов зон тектонических нарушений». – *Транспортное строительство* – № 5, 1989 г., с. 18–20.
3. Болтинцев В. Б., Ильяхин В. Н., Безродный К. П., Нагорный С. Я., Крикленко К. А., Скакун А. П. – «Геофизические методы для оценки инженерно-геологических условий и устойчивости пород впереди забоя во время сооружения тоннеля». – М., 28-31 октября 2002 г., с. 441–445.
4. Руководство по физико-химическому укреплению грунтов при строительстве Северомуромского железнодорожного тоннеля. – М., ЦНИИС, 1989 г., 143 с.
5. Безродный К. П., Мацегора А. Г., Бессолов В. А., Касапов Р. И. «Технология преодоления зон тектонических разломов с применением инъекционного укрепления грунтов». – *Научно-технический информационный сборник*. – М., ВПТИ Трансстрой, № 22, 1990, с. 3–14.
6. Безродный К. П., Мацегора А. Г., Бессолов В. А., Басов А. Д., Нестеровский А. Л. – «Упрочнение грунтов с использованием энергии взрыва». –

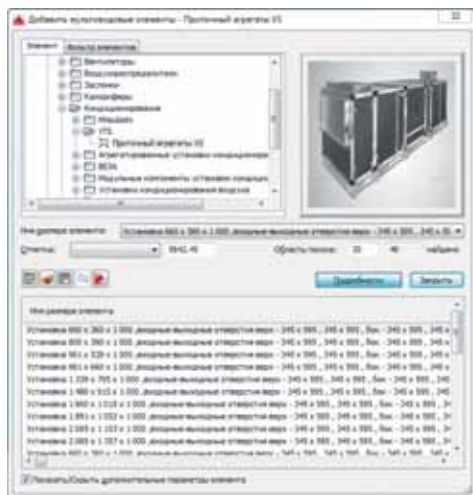


Рис. 9. Пример элементов базы оборудования

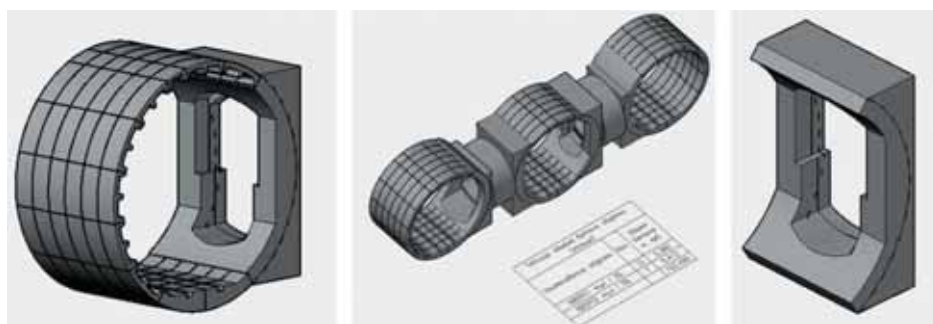
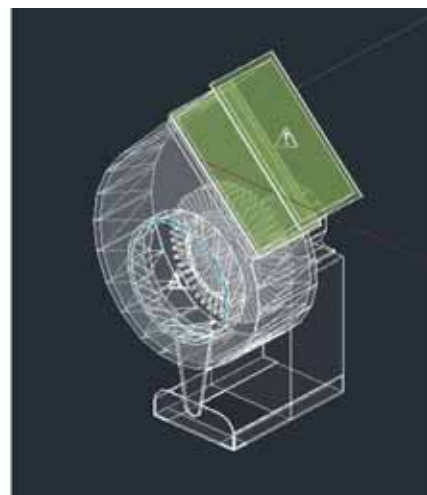


Рис. 10. Пример элементов основных конструкций станции глубокого заложения

Транспортное строительство – № 10, 1988 г., с. 27–29.

7. Мацегора А. Г., Безродный К. П., Саммаль А. С., Фотиева Н. Н. – «Проектирование и технологии инъекционного закрепления грунтов при строительстве транспортных тоннелей». – ОАО «Ленметрогипротранс», М., 1997, 90 с.
8. Мацегора А. Г., Безродный К. П., Бессолов В. А., Грибарь А. В. – «Комплексное водопонижение при преодолении протяженных зон водонасыщенных грунтов». – *Научно-технический информационный сборник*. М., ВПТИ Трансстрой, № 22, 1990, с. 5–20.
9. Рекомендации по применению опережающих экранов из труб при сооружении транспортных тоннелей. ЦНИИС, М., 1988, 47 с.
10. Власов С. Н., Безродный К. П., Сильвестров С. Н., Бессолов В. А. – «Проходка тоннелей большого сечения с применением опережающей крепи». – *Транспортное строительство*, 1985, № 8, с. 22–24.
11. Трунев В. Г., Горбатов В. Г., Безродный К. П. – «Исследование температурных полей системы обделка породы тоннелей БАМа». – *Сб. научных трудов ЦНИИС «Рациональное использование трудовых, материальных и топливно-энергетических ресурсов в транспортном строительстве»*, ЦНИИС, М., 1984, с. 37–41.
12. Рекомендации по применению набрызг-бетона в качестве постоянной обделки тоннелей БАМ. Сильвестров С. Н., Безродный К. П. М., ЦНИИС, 1984, 17 с.
13. Рекомендации по проектированию и строительству тоннелей с применением

афрочно-бетонной крепи, учитываемой в составе постоянной обделки. М., ВНИИТС, 1992, М., 51 с.

14. Бессолов В. А., Безродный К. П. *Строительство тоннелей Байкало-Амурской железнодорожной магистрали*. – *Подземное и шахтное строительство*. – № 3, 1991, с. 17–20.
15. Маслак В. А., Безродный К. П., Лебедев М. О., Марков В. А., Захаров Г. Р., Ледяев А. П., Старков А. Ю. Малоосадочные технологии при строительстве метро в историческом центре Санкт-Петербурга. – *Метро и тоннели* – 2012, № 6.
16. Безродный К. П., Маслак В. А., Лебедев М. О., Старков А. Ю., Морозов А. В., Уханов А. В. Комбинированная технология стабилизации грунтов при сооружении эскалаторных тоннелей станций Петербургского метрополитена. – *Метро и тоннели* – 2000, № 5.
17. Безродный К. П., Лебедев М. О., Марков В. А., Старков А. Ю., Латтев Н. А., Морозов А. В., Уханов А. В. Геотехнический мониторинг сопровождения строительства эскалаторных тоннелей с помощью ТПМК. – *Метро и тоннели* – 2012, № 1.
18. Безродный К. П., Лебедев М. О., Марков В. А., Старков А. Ю. Геотехническое обеспечение при строительстве двухпутного перегонного тоннеля с помощью ТПМК. – *Метро и тоннели* – № 5, 2015 г., с. 16–18.
19. Безродный К. П., Лебедев М. О., Штыров В. Г. Олимпийские транспортные тоннели: горно-экологический мониторинг. – *Подземные горизонты*. – № 4, 2015 г., с. 20–25.