

Наука на службе петербургского метро: разработки кафедры «Тоннели и метрополитены» ПГУПС

Ю. С. ФРОЛОВ, докт. техн. наук, профессор ПГУПС, заслуженный строитель РФ



Современный Санкт-Петербург — самый крупный из северных городов мира с численностью постоянного населения более 4 млн человек. В городе функционируют все виды городского пассажирского транспорта, включая метрополитен. Это значит, что проблемы, связанные с городскими массовыми пассажирскими перевозками, постоянно актуальны и требуют комплексного подхода к их решению.

«**В** наше тяжелое время невозможно и прямо-таки безбожно заставлять бедного и среднего обывателя тратить на одни только передвижения в течении суток столько времени. Поэтому нет никаких сомнений, что в миллионных городах... сама необходимость заставляет приступить к устройству в них таких путей сообщения, которые бы не зависели от все увеличивающегося уличного городского движения и которые бы обладали наибольшей провозоспособностью и скоростью, т. е., иначе говоря, необходимо приступить к устройству метрополитенов». Так писал в 1902 г. один из первых теоретиков отечественного метростроения, инженер путей сообщения П. И. Балинский [1].

Увеличение селитебной территории Санкт-Петербурга в начале нового столетия привело к значительному росту дальности поездок горожан. За годы массового жилищного строительства заметно усилились диспропорции в размещении мест приложения труда и расселении жителей. Сегодня в центре города сосредоточена почти половина (41%) мест приложения труда, а подавляющее большинство (82%) экономически активного населения проживает за его пределами, что вызывает мощные центростремительные пассажирские и транспортные потоки. Сложившийся дисбаланс расселения жителей города и мест приложения труда в централь-

ных, плотно застроенных районах не претерпит существенных изменений в обозримой перспективе. Кроме того, уникальный исторический центр посещают с трудовыми, деловыми и культурно-бытовыми целями более 2 млн человек в день. На наземных магистралях центра ситуация остается стабильно тяжелой, а на всех радиальных магистралях, обеспечивающих связи периферийных районов с центром, она неуклонно ухудшается. В значительной степени пространственное распределение транспортной инфраструктуры города определяют и особенности его планировочной структуры (расчлененность территории дельтой Невы, реками и каналами, глубокими железнодорожными вводами), что затрудняет оптимальную организацию движения транспортных и пассажирских потоков. С особой остротой проблема обозначилась в последнее десятилетие в связи с возрастанием числа автомобилей, исчерпанием пропускной способности уличных магистралей и нехваткой мест для стоянки автомашин. На наиболее проблемных направлениях скорость автомобильного транспорта составляет 6–10 км/ч, а по центральной планировочной зоне 10–15 км/ч. Несмотря на возросший уровень автомобилизации населения 73% спроса на пассажирские перевозки обеспечивает общественный транспорт, оставаясь базовым элементом городского транспортного комплекса. Структур-

ную основу системы городского пассажирского транспорта Петербурга составляет метрополитен — единственный надежно функционирующий вид транспорта общего пользования. Это обусловило существенное увеличение доли метрополитена в структуре перевозок общественным пассажирским транспортом за последние годы (с 34 до 40%). За период 2000–2008 гг. были введены в строй новые станции, протяженность линий метрополитена увеличилась до 113,6 км. Однако плотность транспортной сети метрополитена остается весьма низкой: всего 0,17 км на 1 км² площади города, чего явно недостаточно (для сравнения: плотность транспортной сети линий метрополитена в Москве составляет 0,26 км, в Нью-Йорке — 0,5, в Лондоне — 1,21, в Париже — 2,8 км).

Анализ сложившейся транспортной ситуации и оценка перспектив развития города позволяют прогнозировать дальнейшее ухудшение транспортной ситуации в Санкт-Петербурге. Так, исходя из прогнозируемых тенденций демографического, социально-экономического и градостроительного развития объемы перевозок пассажиров на общественном транспорте в ближайшие годы возрастут примерно на 35% по сравнению с нынешними. Поэтому в 2002 г. правительство города одобрило «Программу развития метрополитена и других видов скоростного внеуличного транспорта Петербурга до 2015 года». Специалистами отрасли отмечалось, что впервые в постсоветские годы осуществлен комплексный подход к перспективам развития городской транспортной инфраструктуры. Вследствие недостаточного финансирования эту программу в 2008 г. пришлось откорректировать на перспективу до 2020 г., однако она при этом стала еще более амбициозной.

В новой программе (проект) обосновано решение об экономической, социальной и экологической целесообразности вложения инвестиций в строительство метрополитена и определены необходимые объемы работ. За 12–15 лет намечается построить и ввести в эксплуатацию 70 км новых линий и 41 новую станцию. Очевидно, что успешная реализация намеченных планов будет зависеть не только от надлежащего финансирования, но и от внедрения прогрессивных конструктивно-технологических решений, обеспечивающих снижение материальных и финансовых затрат, высокие темпы и экологическую безопасность строительства объектов метрополитена.

Как показывает накопленный опыт, поставленные задачи всегда успешно решались в тесном содружестве проектировщиков и строителей с учеными кафедры «Тоннели и метрополитены» Петербургского государственного университета путей сообщения. Многолетняя научно-практическая деятельность коллектива кафедры широка и многообразна и охватывает обширный круг исследований, однако приоритетным всегда было направление, связанное со строительством подземных сооружений Петербургского метрополитена.

Результаты научных исследований, выполненных методами физического и математического моделирования, использованы при внедрении новых конструкций колонных и односводчатых станций [2] на линиях метрополитена в Санкт-Петербурге, в том числе при проектировании и строительстве уникальной двухъярусной объединенной пересадочной станции «Спортивная» (рис. 1, 2).

При непосредственном участии ученых кафедры решались вопросы конструктивно-технологических решений при восстановлении участка первой линии метрополитена в зоне «Размыв».

Наиболее важной научной работой, выполненной за последние годы в направлении совершенствования методов проходки тоннелей Петербургского метрополитена, является комплекс исследований, проведенных совместно с учеными ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс» и специалистами ЗАО СМУ-11. Работа связана с внедрением новой технологии проходки выработки с применением опережающей крепи кровли и лба забоя в протерозойских глинах.

Сравнительно небольшой опыт применения новой технологии проходки и нетрадиционных конструктивных решений крепи в отечественной практике подземного строительства не позволил использовать метод аналогий и повторных решений в конкретных инженерно-геологических условиях. Вопросы, связанные с оценкой несущей способности столь сложной системы крепи с учетом технологии ее возведения и последовательности раскрытия выработки предварительно были решены с помощью физического моделирования методом эквивалентных материалов [3]. В задачу исследований входила качественная и количественная оценка напряженно-деформированного состояния грунтового массива и элементов опережающей крепи кровли и лба забоя, а также оценка устойчивости выработки при заданных конструктивных и технологических параметрах.

При использовании метода удалось отразить на крупномасштабных моделях с максимальным приближением к натуре конструктивные особенности крепи, основные характеристики грунта, воспроизвести особенности технологии работ и тем самым обеспечить подобие модельных и природных механических процессов (рис. 3). Результаты исследований позволили перейти к реализации проекта на опытном участке строящегося метрополитена.

С учетом экспериментального характера проведенных горнопроходческих работ стоимость сооружения подвальной выработки не привела к существенному экономическому эффекту. В то же время применение технологии опережающего крепления выработки позволило минимизировать негативное влияние проходческих работ на сдвигание грунтового массива и свести к минимуму объем ручного труда. Актуальность проведенных на кафедре



Рис. 2. В лаборатории математического моделирования

исследований отмечена в 2008 г. дипломом и почетным знаком Федерального агентства по строительству «За внедрение передовых технологий при освоении подземного пространства».

Однако конечной целью исследований в этой области мы считаем внедрение на линиях Петербургского метрополитена технологии строительства пилонных станций с обделкой из монолитного железобетона (вместо дорогостоящей сборной обделки) и механизированной разработкой грунта. Ведь проходка подавляющего большинства станционных тоннелей Петербургского метрополитена до сих пор осуществляется с разработкой грунта вручную отбойными молотками с выполнением сложных и трудоемких операций по креплению кровли и лба забоя (за 60 лет строительства вручную разработаны миллионы кубометров грунта). Внедрение технологии сооружения станционных конструкций с применением опережающей крепи кровли и лба забоя и обделки из монолитного бетона диктует необходимость предварительной качественной и количественной оценки поведения новой конструкции на различных этапах ее сооружения. Такую ответственную и трудоемкую работу планируется провести на кафедре в ближайшей перспективе. На первом же этапе про-

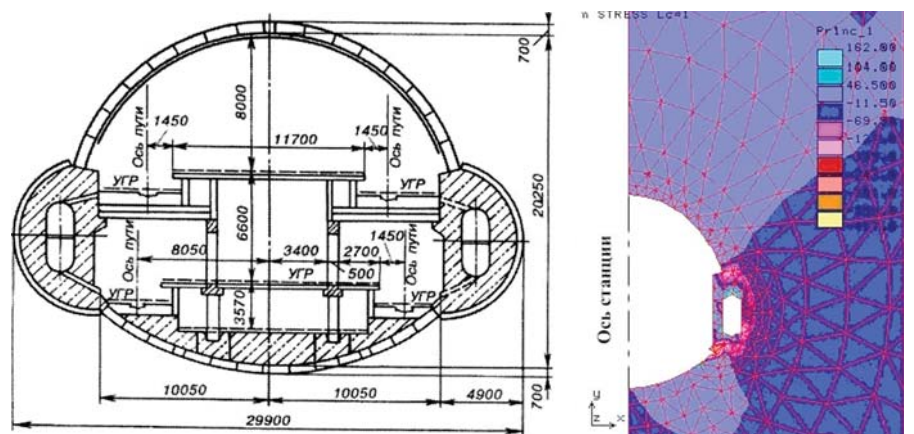


Рис. 1. Конструктивная схема станции «Спортивная». Фрагмент картины распределения напряжений по результатам математического моделирования станции «Спортивная»



Рис. 3. В лаборатории физического моделирования

рабатываются возможные варианты конструктивно-технологических решений пилонной станции из монолитного железобетона, один из которых заимствован из арсенала австрийских специалистов (рис. 4).

Особенность представленной на рисунке пилонной станции состоит в отличной от традиционной последовательности проходки тоннелей. Вначале проходят два «пилонных» тоннеля, в которых бетонированы бетонные стены с проходами. Эти бетонные стены-пилоны служат опорами при сооружении сводов боковых и среднего тоннелей станции. Таким образом,

исключается трудоемкий процесс устройства проходов между станционными тоннелями.

При внедрении новой конструкции станции неизбежен большой объем работ, связанных с устройством первичной обделки из набрызгбетона, которая выполняет двойную функцию: временной крепи (для обеспечения устойчивости выработок во время разработки грунта) и первичного слоя постоянной обделки. Для широкого применения набрызгбетона на объектах метростроя имеются определенные предпосылки. Так, ранее (1975–1980 гг.) в результате проведенных на кафедре лаборатор-

ных и расчетно-теоретических исследований была обоснована возможность и целесообразность применения набрызгбетона для закрепления выработок в слабых грунтах [4]. Это было подтверждено натурными исследованиями статической работы набрызгбетонных обделок в протерозойских глинах, которые выполнялись в 1976 г. на опытных участках вспомогательных выработок диаметром 3,6; 4,3 и 6,0 м. В мае 1985 г. комиссия, образованная указом Министерства транспортного строительства № БВ-618 от 19 апреля 1985 г., отметила, что конструкция постоянной обделки из набрызгбетона рекомендуется к дальнейшему внедрению. Однако работы по внедрению были приостановлены и возобновлены только в 2007 г. при сооружении эвакуационной сбойки [5]. Будет ли внедрен в широком масштабе набрызгбетон на строительстве нашего метро, зависит от руководителей организаций, призванных решать вопросы модернизации отрасли.

В связи с предусмотренным в Программе большим объемом работ по развитию линий Петербургского метрополитена представляется целесообразным рассмотреть их трассирование в периферийных районах на мелком заложении. В сети отечественных и зарубежных метрополитенов отмечается тенденция к росту протяженности линий мелкого заложения, что обусловлено их преимуществами в темпах строительства, в строительной стоимости и эксплуатационных расходах по сравнению с линиями глубокого заложения. Многолетний опыт эксплуатации линий метрополитена мелкого заложения свидетельствует, что они удобнее для пассажиров. Отметим, что сооружение станционного комплекса открытым способом в углубленных котлованах дает возможность эффективно использовать надтоннельное пространство: располагать под землей торговые залы, автостоянки, складские помещения.

Существующие в настоящее время технологические решения и технические возможности позволяют вести строительство тоннелей на мелко заложениях в сложных инженерно-геологических и гидрологических условиях Петербурга. Следует отметить запоздалое, но верное решение проектировщиков о продлении 5-й линии от станции «Международная» на мелком заложении.

На основании анализа многочисленных проектных решений подземных сооружений метрополитена на линиях

мелкого заложения (осуществленных и неосуществленных), изучения специальной литературы, с учетом опыта автора в вопросах проектирования и строительства, были выявлены недостатки, присущие традиционно принятым схемам. В первую очередь отметим, что высокая производительность труда на строительстве линии достигается только по отдельным видам работ, главным образом при проходке перегонных тоннелей. В целом же на пусковом участке строящейся линии значения этого показателя остаются низкими. Темпы строительства сдерживают работы на станционных комплексах: отсутствие задела работ на новом объекте к моменту их завершения на предыдущем. Трудно организовать такое непрерывное и равномерное строительное производство, где оперативно решался бы вопрос о соотношении подготовки работы на одних участках, ее развороте на других и завершении на третьих. Трудоемки и малопродуктивны работы, связанные с креплением котлованов. Непроизводительны затраты времени на периодический монтаж и демонтаж щитовых комплексов, что не только приводит к простое дорогостоящего оборудования, но и негативно сказывается на темпах сооружения перегонных тоннелей. К недостаткам традиционной схемы организации строительного процесса, при котором все станционные комплексы возводятся одновременно, следует отнести и характерную для экстенсивной технологии потребность в значительных единовременных материальных и людских ресурсах, большом количестве машин, механизмов и оборудования. К сказанному следует добавить, что котлованы на трассе строящегося участка линии занимают тысячи квадратных метров городской площади. Одновременное сооружение всех станций в больших котлованах существенно осложняет работу наземного транспорта, так как сразу и, как правило, надолго перекрываются узлы важнейших магистралей города.

Таким образом, весьма актуальными становятся задачи строительства метрополитена на линиях мелкого заложения по наиболее прогрессивным проектам. Это послужило поводом пересмотреть организационно-технологические и конструктивные решения, взяв за основу поточный метод организации работ на всем пусковом участке строящейся линии с непрерывной (сквозной) проходкой перегонных тоннелей и последовательным сооружением каж-

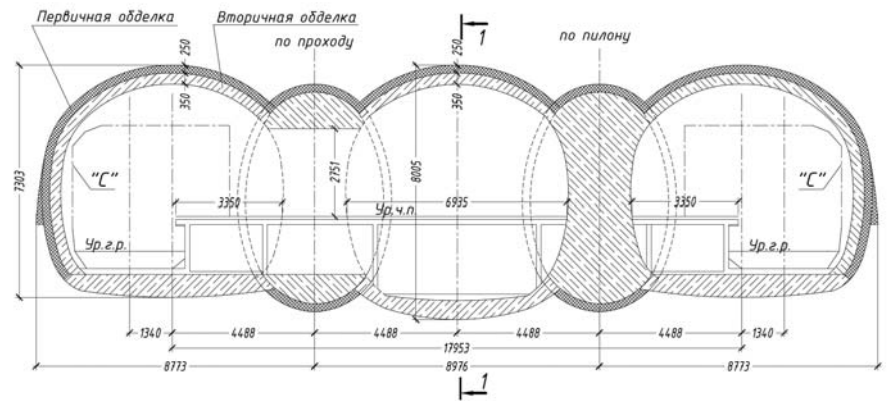


Рис. 4. Конструктивная схема пилонной станции с двухслойной обделкой: первичной из набрызгбетона с арматурными арками, вторичной из монолитного железобетона

дого станционного комплекса по мере проходки через него проходческих щитов. Более подробно суть концепции сквозной проходки при строительстве линий метрополитена мелкого заложения изложена в монографии [6].

При методе сквозной проходки особое значение приобретает требование соответствия конструктивного решения технологическим приемам сооружения станционного комплекса. На кафедре «Тоннели и метрополитены» Петербургского университета путей сообщения были разработаны и научно обоснованы принципиально новые конструктивные решения колонной и одноводчатой станций и соответствующие способы их сооружения, которые отвечали бы поставленным требованиям. На основе новой концепции Ленметрогипротранс разработал проект сооружения пускового участка линии метро, включающий два станционных комплекса полузакрытого способа работ: колонного типа и одноводчатый.

Единый технологический процесс, связывающий работы на перегонах и станционных комплексах, позволит повысить темпы строительства, увеличить производительность труда, сократить потребность в единовременных материальных и людских ресурсах. Щитовая проходка перегонных тоннелей и сооружение станционных комп-

лексов полузакрытым способом обеспечивают щадящий режим строительства метро в плотно застроенных городских кварталах вследствие уменьшения площади котлована, сокращения времени от его раскрытия до засыпки конструкций и последовательного выполнения этих работ на станциях пускового участка.

Большую научно-исследовательскую работу по исследованию статической работы обделки тоннелей мелкого заложения с учетом нагрузки от сооружений на поверхности земли кафедра выполнила в рамках проекта, поддержанного грантом ИНТАС, совместно с Тульским государственным университетом, Московским институтом «Гидроспецпроект», Чешским техническим университетом в Остраве и университетом в Лидсе (Англия).

Новаторские идеи строительства метрополитена на линиях мелкого заложения методом сквозной проходки, подтвержденные как изобретение в 1989 г., признаны специалистами новым прогрессивным направлением в отрасли и рекомендованы к внедрению на объектах метростроения. Однако в силу различных обстоятельств до их реализации дело не дошло.

В последнее десятилетие выполнен большой объем работ по обследованию и мониторингу подземных сооружений Петербургского метрополите-



Рис. 5–6. Оценка качества ограждения котлована из грунто-цементных свай и состояния грунтового массива за обделкой тоннеля с помощью георадара

на. Методами математического моделирования проведен анализ напряженно-деформированного состояния действующих тоннелей и других объектов метрополитена, разработаны рекомендации по их капитальному ремонту и реконструкции. Сотрудниками кафедры обследованы станции «Пионерская», «Удельная», «Площадь Мужества», «Спортивная», «Автово», выполнен ряд проектов по усилению и реконструкции отдельных узлов и элементов станций «Пионерская», «Ленинский проспект», «Гражданский проспект».

В 2008 г. на кафедре создана научно-аналитическая группа по развитию городского транспорта. Важное направление работы группы — исследование влияния наземного строительства на действующие сооружения метрополитена и иные подземные транспортные коммуникации. Эти вопросы становятся все более актуальными по мере уменьшения свободной площади под городскую деловую, коммерческую и жилищную застройку, а также в связи с рассмотрением возможности размещения зданий в охранной зоне метрополитена. В последние годы группой были выполнены работы, задачей которых было установить возможность строительства вблизи станций или над ними крупных наземных объектов и оценить степень их влияния на эксплуатационную надежность сооружений мет-

рополитена. Были обследованы конструкции станционных комплексов и дана оценка их технического состояния в зоне влияния строительства торгового комплекса «Сенная» и торгово-развлекательного комплекса «Пик» (станция «Сенная площадь»), торгово-делового центра «Василеостровский» (станция «Василеостровская»), торгового центра «Французский бульвар» (станция «Ленинский проспект»), жилищно-культурно-бытового комплекса в районе станции «Проспект Просвещения» и др.

Одним из развивающихся направлений работы является разработка методики и проведение мониторинга при строительстве городских объектов с устройством глубоких котлованов, в том числе при строительстве станций открытым способом.

О высоком профессиональном уровне сотрудников кафедры свидетельствует их востребованность при решении особо важных вопросов, касающихся эксплуатационной надежности подземных сооружений метрополитена. Сотрудники кафедры неоднократно входили в состав экспертной комиссии Госстроя России, постоянно участвуют в совещаниях, организованных агентством «Росжелдор» по проблемам развития метрополитенов в городах России, привлекаются к работе технических советов профильных организаций и соответствующих комитетов правительства Санкт-Петербурга



Рис. 8. Оценка степени коррозионного износа чугунной обделки вентиляционной шахты с помощью ультразвукового толщиномера А1208

при рассмотрении проблемных ситуаций, возникающих на строительстве метрополитена, входят в научно-технический экспертно-консультационный совет Петербургского регионального отделения Тоннельной ассоциации России, а также в состав исполнительной дирекции некоммерческого партнерства «Объединение подземных строителей».

Основные результаты исследований, проведенных на кафедре с целью внедрения новых конструктивно-технологических решений в Петербургском метрополитене и обеспечения эксплуатационной надежности его подземных сооружений, изложены в монографиях, учебниках, отраслевых справочниках, нормативных документах и в многочисленных публикациях в периодической печати. Материалы исследований докладывались на международных научных конференциях и конгрессах в России, США, Англии, Германии, Бразилии, Индии, Нидерландах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Метрополитен северной столицы. — СПб.: Лики России, 1995.
2. Голицынский Д. М., Коньков А. Н., Фролов Ю. С. Двухъярусная объединенная пересадочная станция метрополитена глубокого заложения. — М.: ТИМР, 1997.
3. Фролов Ю. С., Ларнонов А. А. Устойчивость выработки с опережающей крепью кровли и лба забоя в протерозойских глинах // Метро и тоннели. — 2008. — № 2. — С. 24–26.
4. Голицынский Д. М., Маренный Я. И. Набрызгбетон в транспортном строительстве. — М: Транспорт, 1993.
5. Безродный К. П., Крюковский Ю. А., Голицынский Д. М. и др. Новая конструкция набрызгбетонной обделки // Метро и тоннели. — 2009. — № 1. — С. 24–26.
6. Фролов Ю. С., Крук Ю. Е. Метрополитены на линиях мелкого заложения: Новая концепция строительства. — М.: ТИМР, 1994.



Рис. 7. Обследование конструкций подвесного потолка на станции «Автово»