ЖУРНАЛ ТОННЕЛЬНОЙ АССОЦИАЦИИ РОССИИ

ISSN 1726-6165

Метро и тоннели

№4
ноябрь 2026



Члены Тоннельной ассоциации России поздравляют коллектив ЛЕНМЕТРОГИПРОТРАНСа со славным юбилеем!

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ИЗДАНИЕ

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ

АКОНИТ

НАДЕЖНЫЕ РЕШЕНИЯ · ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

tpmk@npoakonit.ru
+7 901 501 37 71
npoakonit.ru

Мы поставляем ТПМК и периферийное оборудование для увеличения скорости строительства тоннелей











Оборудование для подземных видов работ:
г. Москва, ул. Тараса Шевченко, 23А, 6 этаж

Метро и тоннели

Журнал
Тоннельной ассоциации России, входит в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Председатель редакционной коллегии
К. Н. Матвеев, председатель правления ТАР

Зам. председателя редакционной коллегии
И. Я. Дорман, доктор техн. наук

Ответственный секретарь
С. В. Мазеин, доктор техн. наук, зам. руководителя Исполнительной дирекции

Редакционная коллегия
С. В. Анциферов, доктор техн. наук
М. Ю. Беленький
В. В. Внутских
С. А. Жуков
В. Н. Захаров, академик РАН
В. Н. Кавказский, канд. техн. наук
Д. С. Конюхов, доктор техн. наук
М. О. Лебедев, канд. техн. наук
И. В. Маковский, канд. техн. наук
В. Е. Меркин, доктор техн. наук
М. Х. Миралимов, доктор техн. наук
А. Н. Панкратенко, доктор техн. наук
А. А. Пискунов, доктор техн. наук
М. М. Рахимов, канд. техн. наук
А. Ю. Старков
Д. Ю. Чунюк, канд. техн. наук
Т. В. Шепитько, доктор техн. наук
Ш. К. Эфендиев

Тоннельная ассоциация России
тел.: (495) 608-8032, 608-8172
факс: (495) 607-3276
www.rus-tar.ru
e-mail: info@rus-tar.ru

Предпечатная подготовка
ИП Власов Н. О.
e-mail: metrotunnels@gmail.com
Журнал зарегистрирован Минпечати РФ ПИ №77-5707

Перепечатка текста и фотоматериалов журнала только с письменного разрешения Тоннельной ассоциации России

№ 4, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

К 80-летию Ленметрогипротранса
Поздравления 2
Ленметрогипротрансу – 80 лет 3
М. О. Лебедев

Строительство
Отечественное метростроение — база развития инженерной науки и научных школ подземного строительства 6

Нормативные документы
О нормировании научно-технического сопровождения строительства подземных сооружений транспортного назначения 14
В. Е. Русанов, В. Е. Меркин, К. О. Пудов, А. Б. Лебедьков, И. Я. Дорман, Д. С. Конюхов

Зарубежный опыт
Защита обделки железнодорожных тоннелей от водопроявлений и отслоений напылением полимочевины: опыт Японии 21
В. В. Космин

Проектирование
Учет влияния радиальных стыков сегментов при сейсмическом воздействии: комплексный анализ и численное моделирование 23
М. А. Маринченко

Инженерная геология
Изучение инженерно-геологических условий строительства тоннелей в г. Челябинске, сооружаемых щитовым способом 27
В. Г. Штыров

Системный подход к оценке рисков инженерно-геологических условий для подземного строительства Санкт-Петербурга 31
Е. А. Ломакин, А. Е. Журавлев

Исследования
Обзор научно-исследовательских статей, опубликованных в журнале «Метрострой» и «Метро» в XX веке (I часть) 33

Конференции
VII Международная научно-техническая конференция «Проектирование, строительство и эксплуатация мостов, тоннелей и метрополитенов» — чтения, посвященные памяти Лавра Дмитриевича Проскурякова 40

Исторический дайджест публикаций
Творческое наследие доктора технических наук К. П. Безродного в журнале «Метро и тоннели» 45
Творческое наследие профессора Ю. С. Фролова в журнале «Метро и тоннели» 49

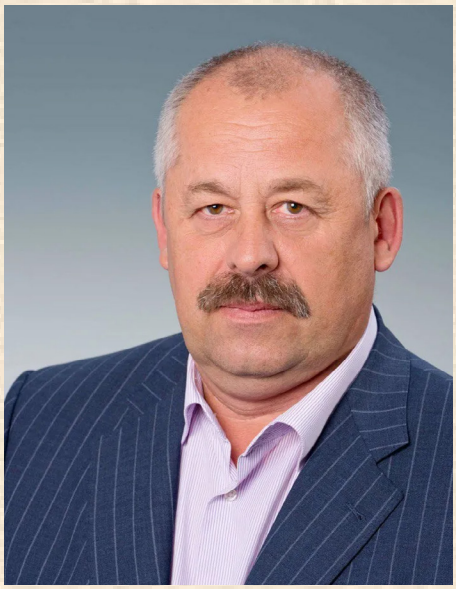
О тоннелях и тоннельщиках
Строители тоннелей 52
Г. Казакевич



ФОТО НА ОБЛОЖКЕ

Сбойка 3-го тоннеля Автодор на Красную Поляну (проект ЛМГТ)

Коллективу АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»





Дорогие коллеги и друзья!

Тоннельная ассоциация России и редакционная коллегия журнала «Метро и тоннели» поздравляют ваш славный коллектив со знаменательной датой – 80-летием деятельности в области проектирования подземных сооружений.

История вашего научно-исследовательского и проектно-изыскательского института неразрывно связана с развитием транспортной инфраструктуры Северной столицы и других регионов нашей страны. В вашем послужном списке линии подземок в Москве, Казани, Новосибирске, Самаре, Челябинске, а также проектирование зарубежных метрополитенов в Гаване (Куба), Будапеште (Венгрия), Калькутте (Индия), Хельсинки (Финляндия).

К выдающимся достижениям коллектива относятся уникальные тоннели на трассе Байкало-Амурской магистрали, построенные по вашим проектам и не имеющие аналогов по сложности строительства в суровых климатических и сейсмических условиях.

Благодаря вам в кратчайшие сроки был спроектирован и построен комплекс автомобильных и железнодорожных тоннелей в районе г. Сочи для проведения на высочайшем уровне зимних Олимпийских игр 2014 года.

Ваши разработки обогатили отечественное метростроение инновационными техническими решениями. Среди них – построенные на глубоком заложении тоннели со сборными железобетонными обделками, обжатыми в породу, и односводчатые станции, новые эффективные способы укрепления грунтов, технологии проходки двухпутных тоннелей метрополитена и наклонных ходов эскалаторных тоннелей с применением ТПМК. Это лишь небольшой перечень достижений, которых добился ваш коллектив за последние годы.

Еще одна важная сторона вашей деятельности – активное участие в работе Тоннельной ассоциации России и журнале «Метро и тоннели». Коллектив Ленметрогипротранса одним из первых поддержал в 1990 г. создание Тоннельной ассоциации России. Многолетние творческие контакты и сотрудничество с вами вызывают у нас чувство глубокого уважения и искреннего удовлетворения.

Желаем вашему коллективу дальнейших творческих успехов, новых профессиональных достижений и плодотворной работы на благо нашей Родины!

Председатель правления Тоннельной ассоциации России
Председатель редакционной коллегии журнала «Метро и тоннели»
К. Н. Матвеев

Руководитель Исполнительной дирекции Тоннельной ассоциации России
А. Б. Лебедьков



Уважаемые коллеги!

От имени коллектива ОАО «Минскметропроект» поздравляю вас с 80-летием АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»!

За 80 лет Ленметрогипротранс стал одним из ведущих проектных институтов Российской Федерации в области проектирования метрополитенов и транспортных тоннелей. Профессиональные успехи АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» – результат высокой ответственности, многолетнего труда и преданности своему делу специалистов и руководителей института. ОАО «Минскметропроект» гордится тем, что многие годы нас связывает плодотворное творческое сотрудничество. Мы высоко ценим наши профессиональные отношения и уверены в их дальнейшем развитии.

Коллеги, от всей души желаем вам крепкого здоровья, новых творческих и профессиональных успехов, благополучия и дальнейших достижений! Пусть богатый опыт и традиции Ленметрогипротранса и впредь служат основой для успешной реализации самых масштабных и значимых проектов.

Директор ОАО «Минскметропроект»
М. В. Рудько

ЛЕНМЕТРОГИПРОТРАНСУ – 80 ЛЕТ



М. О. Лебедев,
АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

Как быстро бежит время! Круглые даты института следуют одна за другой. Н. И. Кулагин, генеральный директор института с 1981 по 2010 г., говорил: «А годы летят, наши годы, как птицы, летят… И некогда нам обернуться назад!». А обернуться есть на что – за 80 лет накоплено поистине впечатляющее наследие.

За прошедшие восемь десятилетий коллектив разработал проектную документацию для всех введенных в эксплуатацию станций Ленинградского – Санкт-Петербургского метрополитена (77 станций), а также для метрополитенов Новосибирска, Самары, Челябинска и Казани.

Специалисты института разработали генеральные схемы развития метрополитенов в городах СССР: Одессе, Перми, Челябинске, Донецке и Ленинграде.

Кроме того, была разработана проектная и рабочая документация для участков Московского метрополитена: пяти станций Калининско-Солнцевской линии, четырех станций Кожуховской линии, четырех станций Большой кольцевой линии.

По проектам Ленметрогипротранса построены и строятся железно- и автодорожные тоннели общей протяженностью около 180 км. Это железнодорожные тоннели на линиях Абакан – Тайшет, на Южном Урале, Дальнем Востоке, Северном Кавказе, Сибири. Десять тоннелей Байкало-Амурской магистрали, в том числе уникальный Северомуйский длиной 15,3 км, самый длинный на территории бывшего СССР.

На сегодняшний день строительство любых зданий и сооружений, в том числе подземных, невозможно даже с, казалось бы, минимальными отступлениями от решений, предусмотренных проектной документацией, поскольку в соответствии с федеральными законами Российской Федерации такие отступления запрещены.

Если обратиться к опыту строительства тоннелей на БАМе, то для оперативного принятия решений по применяемым технологиям строительства приказами министров транспортного строительства СССР и путей сообщения СССР был организован Временный научно-технический коллектив. Для решения сложнейших задач к работе привлекался ряд ведущих научно-исследовательских организаций СССР. Ими разрабатывались новые технологии, нормативные документы, технологические карты и руководство по ведению работ, которые непосредственно после разработки принимались к реализации на производстве.

Кроме транспортных тоннелей, были запроектированы и сооружены по нашим проектам технологические железнодорожные тоннели на Кольском полуострове для вывоза добываемого «камня плодородия» – апатита, а также тоннель на полиметаллическом руднике вблизи г. Алмалык в 50 км от Ташкента.

Среди автодорожных тоннелей, институтом спроектированы тоннели под площадью Победы и под Морским каналом в Санкт-Петербурге, Мацестинский и четыре тоннеля на обходе г. Сочи, Краснополянский на дороге Адлер – Красная Поляна. Институтом разрабатывалась документация Рокского автодорожного тоннеля (первая стадия проектирования) под Главным Кавказским хребтом и тоннеля обхода поселка Мизур в Северной Осетии. Нашим коллективом выполнена проектная документация наклонных галерей для разгрузки руды в Североуральском руднике, в Хибинах, в Мурманске.

Сделано немало проектов и тоннелей нетранспортного назначения. Это коллекторы большого сечения в Ленинграде – Санкт-Петербурге, два тоннеля под р. Невой для укладки трубопроводов Балтийской трубопроводной системы, гидротехнические тоннели Большого Ставропольского канала, на Коршуновском горно-обогатительном комбинате в Киргизии.

Разработаны проекты для возведения объектов науки: подземная лаборатория географических систем в Гатчине под Петербургом и помехозащищенная от космического фона лаборатория института метрологии (г. Ломоносов). На Северном Кавказе с 1970-х гг. работает Нейтринная станция ФиАН СССР для изучения фундаментальной наукой космических частиц.

Коллектив Ленметрогипротранса участвовал в проектировании девяти железнодорожных тоннелей в Сирии, четырёх в Алжире, в обследовании 42 тоннелей транспортной железнодорожной магистрали в Корейской Народной Республике, оказывал помощь в прокладке метрополитенов в Калькутте (Индия), Алжире (Алжирская Республика). Для Будапешта (Венгрия) и Гаваны (Куба) были разработаны технико-экономические обоснования строительства метрополитена, оказывалась консультативная помощь при преодолении сложного участка на строительстве метро в Хельсинки (Финляндия).

Учитывая накопленный опыт и с целью проведения единой технической политики в проектировании горных транспортных тоннелей, решением Госстроя СССР в 1983 г. институт был определен головным в этой области.

С первых лет своей профессиональной деятельности усилия института были направлены на совершенствование конструктивных и технологических решений буквально на каждом объекте проектирования. К заслугам наших проектировщиков можно отнести:

- документацию для построенного методом погружных секций Канонерского тоннеля под Морским каналом в Ленинграде (совместно с СКТБ Главмостостроя – ныне ЗАО «Институт Гипростроймост – Санкт-Петербург»);
- новые конструкции станций метрополитена: колонные, односводчатые с разжатием обделки на породу; без боковых посадочных платформ; двухэтажный пересадочный узел на две линии станции «Спортивная»;
- после ознакомительной поездки главного инженера института В. И. Медейко в Лондон в 1958 г., последовало внедрение в Ленинградское метростроение тоннельных железобетонных обделок, обжатых в породу на станциях и перегонах;
- проекты первых отечественных механизированных щитов и механизмов за ними, позволивших достичь мировых рекордов проходки – до 1250 м в месяц;
- проекты механизированного щита диаметром 4,03 м и оборудования за ним для строительства в Ленинграде коллекторных тоннелей, а также для шахтных комплексов с клетевыми или скипоклетевыми подъемами;
- внедрение на Ленинградском метрополитене впервые в мире автоматического вождения поездов и автоматизация всех технологических процессов;

• разработку и внедрение технологии низкотемпературного замораживания водоносных неустойчивых грунтов жидким и газообразным азотом и многое другое.

С завершением сложнейшего периода 1990-х годов и развитием современных мировых технологий и конструктивных решений в строительстве подземных сооружений Ленметрогипротранс приступил к разработке проектных решений, отвечающих требованиям XXI века. Среди них:

• внедрение опережающих крепей в рамках разработки малоосадочных технологий строительства;

• проходка железнодорожных и автодорожных тоннелей с временными крепями из набрызг-бетонных конструкций взамен тяжелых аркобетонных крепей;

• комбинированная технология закрепления четвертичных отложений при строительстве эскалаторных тоннелей;

• строительство станций и вестибюлей под защитой ограждающих конструкций «стена в грунте» для условий Санкт-Петербурга, где толща совершенно неустойчивых грунтов достигает 40 м;

• строительство эскалаторных тоннелей при помощи тоннелепроходческого комплекса (ТПМК) с активным пригрузом забоя в условиях плотной городской застройки;

• строительство перегонных тоннелей метрополитенов в двухпутном исполнении;

• разработка проектных решений с применением ТПМК для строительства транспортных тоннелей протяженностью более 5 км.

Первый ТПМК с активным пригрузом забоя (с гидропригрузом) в Санкт-Петербургском метрополитене был применен при решении проблемы восстановления движения на Кировско-Выборгской линии между станциями «Лесная» и «Площадь Мужества» в зоне так называемого «Размыва». После закрытия движения поездов на этом участке в декабре 1995 г. и их затоплении из-за аварийной ситуации, проходку новых тоннелей выполнили в 2003 г.

В качестве примера можно упомянуть строительство второго выхода со станции «Спортивная» Санкт-Петербургского метрополитена, которое было осложнено расположением строительных площадок в исторической части города – на Васильевском острове рядом с Тучковым мостом. С одной стороны расположены здания XIX века, а с другой – река Нева (рис. 1).

Строительство вестибюля осуществлялось в котловане под защитой «стены в грунте». Для защиты существующих зданий и сооружений использовался металлический шпунт и закрепление грунтов по технологии Jet-свай. Со дна котлована выполнена проходка эскалаторного тоннеля с возведением временной крепи, состоящей из стальных арок и набрызг-бетона. А после проходки на всю длину, возведена монолитная железобетонная обделка.



Рис. 1. Расположение строительной площадки относительно окружающей инфраструктуры

Запроектированный комплекс линии глубокого заложения состоит из системы переходных коридоров разного диаметра, связывающих нижний зал станции «Спортивная» с эскалаторным тоннелем второго выхода и подземным вестибюлем. В системе переходных коридоров под рекой Невой установлены траволаторы.

Неотъемлемой частью строительства был горно-экологический мониторинг. После проходки подземных сооружений по рассмотренной технологии деформации поверхности составили 15–20 мм.

Полученные результаты позволяют с уверенностью говорить о том, что даже в крайне неблагоприятных горно-геологических условиях Санкт-Петербурга осадки земной поверхности и нарушения зданий, попадающих в зону мульды сдвижения, могут быть минимизированы с помощью современных технологий строительства и крепления подземных сооружений.

Для обеспечения проведения чемпионата мира по футболу 2018 г. вместе с возведением нового стадиона в Санкт-Петербурге была построена станция метрополитена «Зенит» («Новокрестовская»). Большие опасения вызывало расположение станционного комплекса на намывной территории у Финского залива. Строительство станции мелкого заложения проходило в сложных инженерно-геологических условиях в толще совершенно неустойчивых четвертичных отложений и наличия намывного слоя мощностью 4–5 м.

Параллельно с возведением «стены в грунте» толщиной 1000 мм на глубину 32 м и размерами в плане 195×39,5 м, в основании будущего станционного комплекса по всей площади проводились работы по Jet-цементации грунтового массива с созданием грунтоцементной плиты на глубине 20–22 м от дневной поверхности. В дальнейшем выполнялась поэтапная разработка котлована с возведением постоянных несущих конструкций по технологии «Top-Down».

Особенностью станции «Зенит» (рис. 2) в первую очередь является ее пропускная способность: на вход или выход станция может пропускать до 32 тыс. человек в час. При этом единовременная загрузка встречных потоков – до 48 тыс. человек в час.

Ещё одной особенностью данной станции стало то, что её строительство началось до проходки перегонных тоннелей. Перегонные тоннели были сооружены по новой технологии – с применением ТПМК с грунтопригрузом диаметром 10,5 м, предусматривающего размещение двух путей для движения подвижного состава в одном сечении. Проходка тоннеля осуществлялась после разработки котлована на всю глубину и устройства специального «ложа», по которому щит протаскивался после выхода через торцевую стену.

Впоследствии данная технология была использована при строительстве Московского метрополитена. В 2020 г. группа московских специалистов была удостоена премии Правительства Российской Федерации за разработку проекта, в состав которого входило сооружение двухпутного перегонного тоннеля.

Будучи комплексным институтом и выполняя все разделы проектов метрополитенов и тоннелей – от изысканий до архитектуры, по мере роста объемов работ и расширения географии строящихся объектов институт в разные годы создал свои филиалы, впоследствии ставшие самостоятельными организациями: Бамтоннельпроект (Северобайкальск), Новосибметропроект (Новосибирск), Комплексный отдел метро в Челябинске.

Потребность удовлетворять возросшие пожелания заказчиков привела к открытию в институте научно-исследовательского отдела, силами которого ведутся работы по геотех-

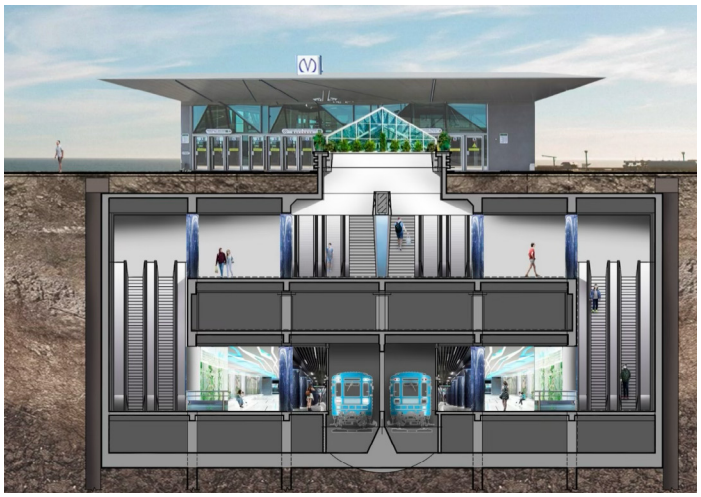


Рис. 2. Станция «Зенит» Санкт-Петербургского метрополитена



Рис. 3. Размещение станционного комплекса в сечении тоннеля

ническому мониторингу грунтового массива и тоннельных конструкций как в период строительства, так и при эксплуатации. Разрабатываются проекты закрепления грунтов, компенсационного нагнетания, научно-технического сопровождения при проектировании и строительстве. Проводится обследование действующих или недостроенных подземных сооружений с внесением предложений по ремонту и достройке. Выполняются разделы инженерно-геологических изысканий.

Совместные работы со многими научно-исследовательскими институтами и профильными кафедрами высших учебных заведений позволяют Ленметрогипротрансу квалифицированно решать поставленные задачи и возникающие проблемы. Участвуя в качестве члена Тоннельной ассоциации России в ее деятельности, а также других ассоциаций (организаций), объединяющих проектные, строительные и эксплуатирующие предприятия, институт выступал с докладами в России и за рубежом, пропагандируя достижения отечественной науки и техники, в частности, ее ленинградской школы.

Сотрудники института получили множество патентов на изобретения, а за выполненные разработки были удостоены многочисленных ведомственных и государственных наград. Можно отдельно рассказывать о достижениях каждого из них и их вкладе в развитие и укрепление авторитета Ленметрогипротранса. Но правильнее сказать, что вклад каждого специалиста, работавшего и работающего в институте, нашёл отражение в его трудах и стал частью истории Ленметрогипротранса.

Самое ценное достояние любого предприятия – это люди. За свою историю институт воспитал и подготовил множество высококвалифицированных специалистов, которые продолжили профессиональную деятельность не только в стенах Ленметрогипротранса, но и в научных учреждениях, вузах и строительных организациях.

Организация в 2024–2025 гг. в Санкт-Петербурге новых проектных подразделений – обособленного подразделения «Мосинжпроект» и ООО «Метропроект» – стала возможна во многом благодаря переходу в них специалистов Ленметрогипротранса. Заслуженно в 2005 г. АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» было удостоено престижной награды «Лучшая организация по подготовке кадров» по итогам отраслевого конкурса «Автомобильные дороги СНГ». Итоги конкурса были подведены в торжественной обстановке на заседании Межправительственного совета дорожников в г. Самаре.

Победа в конкурсе «Автомобильные дороги СНГ» стала не только признанием профессиональных заслуг института, но и подтверждением его соответствия стратегическим задачам отрасли – укреплению профессиональных связей, развитию инновационного потенциала и повышению престижа профессии.

Приятно отмечать в дни юбилея успехи, награды и общественное признание. За всеми победами стоит огромный труд коллектива – со всеми сложностями, «штурмами» перед вводом объектов в эксплуатацию, горечью от допущенных ошибок, случавшихся порой на стройках аварий, их ликвидацией и преодолением последствий. Но всё это закаляло коллектив, заставляло мобилизовать все творческие и физические ресурсы, извлекать уроки и двигаться дальше, смотреть в будущее нашей транспортной и тоннельной отрасли. И мечтать! А это значит – разрабатывать проекты будущих строек. Таких, как Архотский двухпутный железнодорожный тоннель длиной 22,4 км (проект 1985 г., строительство которого было начато, но, к сожалению, прекращено); железнодорожный тоннель под Татарским проливом на о. Сахалин длиной 8,8 км (ТЭО 2002 г.); двухпутный железнодорожный тоннель под Беринговым проливом длиной 113 км от Чукотки до Аляски, – концепцию его строительства институт совместно с другими коллективами разработал в 1999 г. И совсем близкая и реальная в воплощении мечта – соорудить автодорожные тоннели под рекой Невой в нашем родном Санкт-Петербурге, внедрить в отечественное метростроение тоннели большого диаметра (13 м), позволяющие размещать в одном сечении станционные комплексы (рис. 3), а также построить автодорожные тоннели на Северном Кавказе, проектированием которых институт занимается с 2000-х годов.

Закончить статью хочется снова словами Н. И. Кулагина: «Экономия на проектировании зачастую приводит к потерям при строительстве, поэтому дешевое проектирование должно уходить в прошлое». Это было сказано в то время, когда стоимость проектных работ составляла 3–4 % от стоимости СМР по результатам проектирования. Аналогичные работы в Европе, за «океаном», составляют от 5 %. Фактическая стоимость проектных работ по тоннелю на обходе г. Адлер составила менее 1 % от стоимости СМР, что оказалось ниже рентабельности выполненных работ.

К словам Н. И. Кулагина нужно добавить «при строительстве и эксплуатации». Как пример, экономия на инженерных системах приводит к кратным затратам на их восстановление при эксплуатации. Это не экономия, заложенная проектировщиком, а «навязывание» нужных проектных решений. И таких примеров масса. Особенно этим грешат контракты, в которых одним лотом закладываются и проектные работы и СМР.

Я поздравляю всех своих коллег по институту – наших ветеранов, находящихся на заслуженном отдыхе, и тех, кто сегодня продолжает трудиться – с этим замечательным праздником! Желаю всем крепкого здоровья, благополучия, а работающим – новых успехов и ярких профессиональных достижений на благо нашей транспортной и тоннельной отрасли.

ОТЕЧЕСТВЕННОЕ МЕТРОСТРОЕНИЕ – БАЗА РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ НАУКИ И НАУЧНЫХ ШКОЛ ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

В год знаменательного юбилея – девяностопятилетия начала строительства Московского метрополитена – редакция журнала «Метро и тоннели» сочла необходимым и своевременным опубликовать настоящую статью, в которой подчеркивается, что сегодня высочайший уровень отечественного метро- и тоннелестроения был бы невозможен без совместной творческой работы проектировщиков и ученых со строителями.

В статье рассмотрено влияние отечественного метростроения на развитие инженерной науки о подземных сооружениях. Показано, что метростроение выступало не только областью применения ранее сформированных знаний механики грунтов, горного дела и тоннелестроения, но и источником новых исследовательских задач, возникавших при сооружении подземных объектов в сложных инженерно-геологических и градостроительных условиях. На примерах Московского и Ленинградского метрополитенов прослежена последовательность перехода от производственной проблемы и натурного эксперимента к расчётному методу, научному обобщению, нормативному закреплению и формированию научной школы. Особое внимание уделено разработанному Метропроектом методу расчёта тоннельной обделки как «кольца в упругой среде», его развитию от аналитических схем 1930-х годов до вычислительной реализации и современных модификаций. Рассмотрены также развитие искусственного замораживания грунтов, исследования деформаций земной поверхности в связи со строительством и эксплуатацией метро, система научного сопровождения Мосметростроя и современная интеграция численного моделирования, мониторинга и научно-технического сопровождения строительства. Показана трансформация апробированных научно-технических результатов в технические условия, СНиП, своды правил и национальные стандарты. Отдельно рассмотрено развитие верхнего строения пути и виброзащитных подрельсовых оснований как пример перехода от эксплуатационной проблемы к натурным исследованиям, конструктивным решениям и нормативному закреплению.

Метрополитен занимает особое место среди подземных транспортных сооружений. Его строительство ведётся в сформировавшейся городской среде, где геологическая неоднородность массива сочетается с плотной застройкой, инженерными коммуникациями, транспортными магистралями и действующими подземными сооружениями. Поэтому техническое решение определяется не только фактором прочности или устойчивости, но и взаимодействием геологических, геотехнических, конструктивных, технологических и градостроительных условий.

В статье понятие отечественного метростроения выступает в широком историческом смысле, как современный этап российской научно-технической традиции, сложившейся преимущественно в советский период. Тоннельная наука существовала до начала строительства Московского метрополитена: специализированные курсы по тоннелям преподавались ранее, а в 1930 г. была создана кафедра «Тоннели» Ленинградского института инженеров путей сообщения [1]. Поэтому вопрос состоит не в том, породило ли метро отечественную науку подземного строительства, а в том, каким образом крупномасштабное метростроение изменило темп, содержание и организацию её развития.

Критерием такого воздействия следует считать не сам факт применения новой машины или технологии, а получение научно обобщаемого результата: выявленной закономерности, экспериментально подтверждённой зависимости, расчётной схемы, метода прогноза, способа контроля, нормативного положения либо устойчивого исследовательского направления. С этой позиции метрополитен выступает одновременно как потребителем научного знания и крупномасштабным натурным полигоном, так и источником новых задач.

Московский метрополитен 1930-х годов: от освоения зарубежного опыта к собственным исследованиям

Строительство первой очереди Московского метрополитена стало периодом перехода от изучения накопленного мирового опыта к формированию собственной системы технических решений. В ретроспективных материалах 1935 г. конец 1931 и 1932 гг. характеризовался как этап поиска способов строительства: изучалась геология Москвы, проводились советские и зарубежные экспертизы, а для проверки решений в натурных условиях был создан опытный тоннельный участок [1]. Проектировщики анализировали опыт Берлина, Парижа и Лондона, однако рекомендации разных школ существенно расходились и не могли быть непосредственно перенесены на сочетание московских гидрогеологических и градостроительных условий.

Особенно важен опыт участка на Русаковской улице в столице. При проходке закрытым способом возникли осадки поверхности; повреждение водопроводной магистрали привело к затоплению выработок, а расположенное рядом кирпичное здание получило деформации. Этот эпизод имел значение не только как строительная неудача. Он показал ограниченность строительства тоннелей мелкого заложения закрытым способом в условиях Москвы и заставил пересмотреть первоначальные проектные представления.



Рис. 1. Вениамин Львович Маковский



Рис. 2. Николай Григорьевич Трупак

Последующее экспертное рассмотрение привело к принятию принципа дифференцированного назначения глубины и способа сооружения по участкам трассы [1, 2]. Здесь впервые особенно отчётливо проявилась обратная связь между натурным результатом, инженерно-геологической интерпретацией и проектным решением.

В развитии теории и практики отечественного метростроения характерна роль Вениамина Львовича Маковского (рис. 1). В 1931 г. он приступил к проектированию опытного тоннельного участка в коллективе, почти не имевшем специалистов-метростроителей; позднее под его руководством разрабатывались проекты проходки и крепления, и уже в 1935 г. подготовлена и опубликована его монография «Сооружение тоннелей метрополитенов» [3], а в 1958 г. он в соавторстве со своими аспирантами опубликовал результаты выполненных в ЦНИИСе при техническом содействии Московского метростроя результаты экспериментально-теоретические исследования по щитовой проходке тоннелей в водонасыщенных неустойчивых грунтах с пригрузом забоя сжатым воздухом в герметично закрытой призабойной камере [4]. Параллельное ведение проектирования и строительства первой очереди вынуждало быстро сопоставлять расчётные предпосылки с поведением реальных выработок и конструкций.

Та же логика проявилась при освоении щитовой проходки. Испытание первых щитов на первой очереди показало техническую и экономическую целесообразность разработки забоя на полное сечение и монтажа сборной обделки, после чего щитовой способ стал основным направлением механизации последующих очередей строительства [2]. Первая очередь строительства Московского метрополитена одновременно стала полигоном для отработки методов искусственного водопонижения, силикатизации, работ под сжатым воздухом и искусственного замораживания грунтов. Научное значение этого этапа состояло не в изобретении перечисленных способов, многие из которых имели предшествующую мировую практику, а в их адаптации, сравнительной проверке и последующем научном обобщении

Стройка как научная лаборатория

Специальные способы строительства и искусственное замораживание грунтов.

Особенно отчётливо переход от производственного опыта к самостоятельным научным разработкам проявился в применении метода искусственного замораживания грунтов. При строительстве первой очереди Московского метрополитена требовалось сооружать шахтные стволы и наклонные эскалаторные тоннели в водонасыщенных неустойчивых грунтах непосредственно под городской застройкой. Для проверки технологии замораживания в московских условиях её предварительно применили при проходке шахтного ствола, после чего метод был успешно реализован при сооружении наклонных ходов станций. В ходе работ отрабатывались технология бурения наклонных скважин, их расположение, типы замораживающих труб, параметры холодильного оборудования и продолжительность формирования ледогрунтового ограждения [1].

Практика одновременно выявляла критические условия применимости метода. В [1] описан случай преждевременного начала разработки до полного смыкания ледогрунтового контура, вызвавший поступление воды и необходимость продолжения замораживания. Такой опыт фактически представлял натурный эксперимент: требовалось установить зависимость устойчивости ограждения от температурного поля, гидрогеологических условий, расстояния между скважинами, продолжительности процесса и достигнутой толщины массива.

Основоположник теории метода замораживания грунтов при строительстве подземных сооружений Н. Г. Трупак (рис. 2) в своих работах систематизировал этот опыт и перевёл задачу в расчётную постановку. В его трудах рассматриваются скорость образования ледогрунтового массива, оптимальное расположение скважин, прочность замороженного грунта, расчёт цилиндрических ограждений и водонепроницаемых перемычек [5]. Тем самым практический приём превратился в расчётно-обоснованную технологию управления свойствами грунтового массива. Позднее сформированная в этой области система знаний получила широкое применение при строительстве шахт, тоннелей и иных подземных сооружений.

Большой вклад в теорию и практику развития искусственных методов стабилизации неустойчивых грунтов внесли также исследования Я. А. Дормана [6] (рис. 3), в разное время возглавлявшего производственные и научные коллективы, работавшие по этой тематике.

Деформации земной поверхности: от наблюдений к прогнозу

Отдельное важное направление развития строительной науки связано со строительством Ленинградского метрополитена. Здесь глубокое заложение тоннелей в кембрийских глинах уменьшало ряд рисков, характерных для слабых водонасыщенных четвертичных грунтов, но не устраняло изменения напряжённо-деформированного состояния массива и вызываемых проходкой осадок поверхности.

Научная школа ЛИИЖТа (ныне ПГУПС) использовала сочетание натурных наблюдений, физического моделирования и теоретического анализа. Профессор Ю. А. Лиманов выполнил цикл исследований осадок земной поверхности при сооружении тоннелей, включая моделирование на эквивалентных материалах. Итогом стала его монография «Осадки земной поверхности при сооружении тоннелей в кембрийских глинах» [7] и соответствующее диссертационное направление [8].

Принципиальный результат состоял в переходе от фиксации отдельных деформаций к исследованию закономерностей формирования мульды оседания и связи её параметров с условиями проходки. Для практики это означало возможность прогнозировать воздействие тоннелестроения, выбирать технологические меры и обосновывать защиту существующей застройки. Работы Ю. А. Лиманова (рис. 4) до сих пор используются при узаконивании соответствующих современных численных моделей.

Расчётный метод Метропроекта: «кольцо в упругой среде» и его развитие

Особое место в истории отечественной инженерной науки занимает расчётный метод Метропроекта. Его появление было связано с задачами строительства второй очереди Московского метрополитена. Наблюдения за работой сборных обделок показали, что окружающий грунт выступает не только источником внешней нагрузки: при деформации кольца он оказывает сопротивление и становится элементом общей



Рис. 3. Студенты-горняки из Ташкента на учебе (практика) в МГИ, Москва, 1931 г. (первый слева внизу – Яков Дорман)



Рис. 4. Юрий Андреевич Лиманов

механической системы. Комиссия по рассмотрению технического проекта второй очереди поставила задачу разработать метод расчёта, учитывающий упругий отпор грунта и позволяющий проектировать более экономичные индустриальные обделки [2].

В отделе типового проектирования Метропроекта Б. Ф. Матэри, Б. П. Бодров, С. Г. Поярков и Л. И. Горелик разработали метод, вошедший в литературу как расчёт «кольца в упругой среде», или метод Метропроекта [9, 10]. Его принципиальное отличие от предшествующих схем состояло в явном учёте совместной работы обделки и окружающего массива. В классической постановке обделка заменялась стержневой системой – многоугольником, аппроксимирующим криволинейную ось; изменение жёсткости задавалось ступенчато, распределённые нагрузки приводились к узловым, а влияние грунта моделировалось упругими опорами. При этом отпор учитывался на тех участках контура, где деформация обделки направлена в массив, что соответствовало физическому смыслу односторонней реакции грунта [11, 12].

Достоинство метода состояло в универсальности инженерной схемы. Он позволял рассчитывать обделки различного очертания и жёсткости при неодинаковых схемах загружения и изменяющемся коэффициенте отпора. Метод Метропроекта применялся к круговым перегонным и станционным тоннелям, а также к конструкциям более сложного профиля; например, станции «Маяковская» в Москве [2]. Разработки Метропроекта сопровождались исследованиями той же проблемы методами строительной механики, тригонометрических рядов и дифференциальных уравнений. Тем самым возникла не единичная формула, а целое направление исследования взаимодействия «обделка – грунтовый массив».

Дальнейшая история метода Метропроекта особенно показательна. В учебной литературе 1960-х годов уже употреблялось обозначение «метод Метропроекта» (позднее – «метод Метрогипротранса»), что отражало его развитие проектной школой [11]. В учебнике В. П. Волкова [12] метод характеризовался как универсальный приближённый способ расчёта кольцевых обделок в упругой среде. В 1988 г. было вышло в свет специальное пособие Ю. Н. Айвазова и А. И. Горленко по расчёту тоннельных обделок методом Метропроекта с использованием ЕС ЭВМ [13]. Таким образом, расчётная идея 1930-х годов прошла этапы аналитического расчёта вручную, таблично-алгоритмического представления и компьютерной реализации.

Появление метода конечных элементов не исключило эту схему из инженерной практики. СТО НОСТРОЙ 2.27.128-2013 [14] характеризует метод Метропроекта как плоскую модель заданных нагрузок, в которой влияние массива задаётся упругим отпором. Такая схема, как правило, даёт повышенный запас по усилиям. Современные исследования сегментных обделок продолжают использовать классический метод как одну из базовых моделей и развивают его модификации, заменяя идеализированный шарнир стыка связью конечной жёсткости [15]. История метода Метропроекта охватывает почти девять десятилетий и наглядно показывает механизм превращения конкретной проектной задачи Московского метро в устойчивый элемент общей механики подземных сооружений.

Тоннельная конструкция как элемент системы «обделка – массив»

Метод Метропроекта стал одной из исходных ступеней более широкой эволюции представлений о работе тоннельных кон-

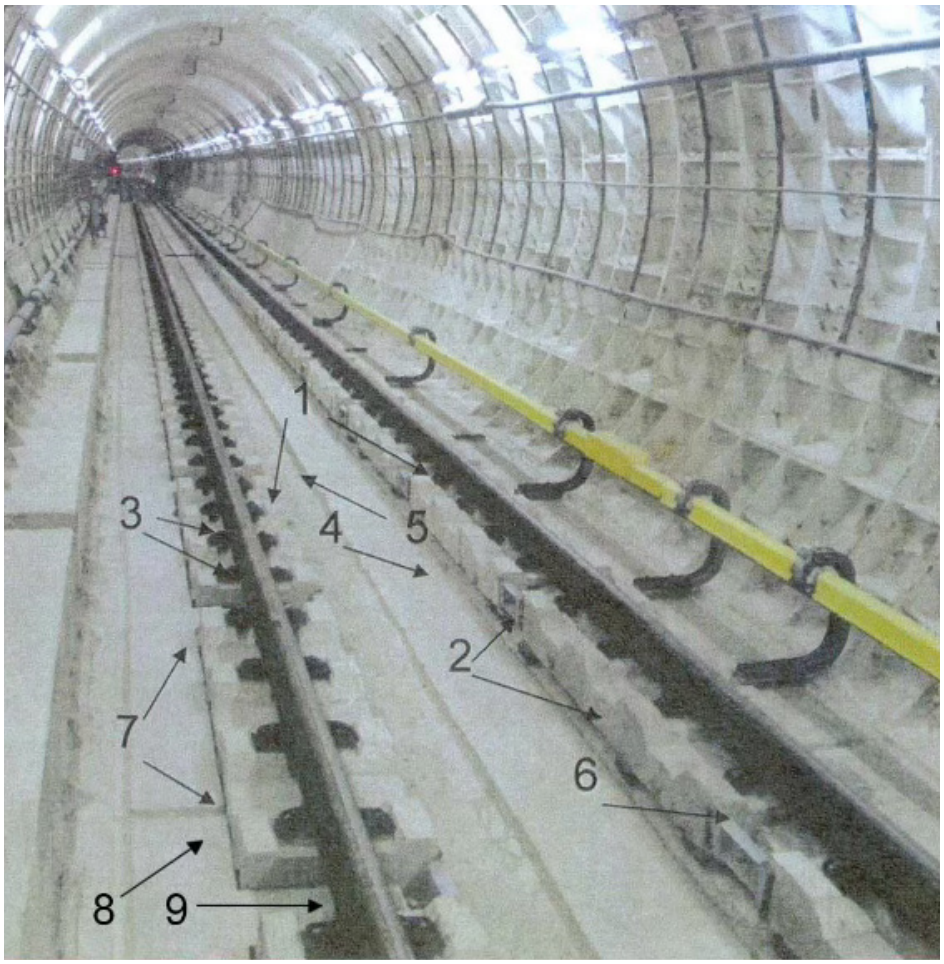


Рис. 5. Виброзащитный путь с лежневым железобетонным подрельсовым основанием на перегоне от станции «Шипиловская» до станции «Зябликово» Московского метрополитена: 1 – железобетонные лежни; 2 – амортизирующие подлежневые прокладки; 3 – рельсовое скрепление ЖБР; 4 – пешеходная дорожка; 5 – водоотводный лоток; 6 – боковая прижимная накладка; 7 – боковая амортизирующая прокладка; 8 – боковой упор; 9 – продольный упор [18]

струкций. По мере накопления натурных данных расчётная постановка переходила от заданных внешних нагрузок к анализу совместной работы обделки и массива, учёту последовательности разработки выработки, монтажа обделки, качества контакта «обделка – грунт» и истории нагружения.

В книге В. А. Гарбера [16] прослеживается переход в самой постановке задачи: технология сооружения рассматривается как фактор формирования расчётной системы, а состояние обделки – как результат взаимодействия конструкции, массива и последовательности производства работ. Эта концепция непосредственно связывает расчётную школу Метропроекта с современной геомеханикой подземных сооружений.

Верхнее строение пути: от типовой конструкции к виброзащитным системам

Развитие верхнего строения пути метрополитена представляет ещё одну линию превращения эксплуатационной проблемы в самостоятельное научно-техническое направление. Для отечественных метрополитенов длительное время базовой была безбалластная конструкция с деревянными шпалами, замоноличенными в путевой бетон, и раздельным скреплением типа «Метро». По мере ужесточения требований к защите тоннельной обделки и городской застройки от динамического воздействия предметом исследований стали не только прочность и стабильность колеи, но и передача колебаний через систему «рельс – скрепление – подрельсовое основание – путевой бетон – обделка – грунтовый массив». Тем самым подрельсовое основание стало рассматриваться как управляемый элемент виброзащиты.

Натурные сравнительные исследования позволили количественно оценить эффективность различных конструктивных схем. А. Л. Исаков и Ю. П. Смолин сопоставили виброколебания путевого бетона при типовой конструкции с деревянными шпалами, железобетонном лежневом основании без специальных виброизолирующих элементов и лежневом основании с резиновыми прокладками. По данным авторов, применение лежневого основания без виброзащиты снижало общий уровень вибрации путевого бетона примерно в три раза по отношению к типовой конструкции, а при использовании виброзащитных прокладок – более чем в пять раз; одновременно была показана зависимость эффекта от частотного диапазона [17]. В этом случае научным результатом стала уже не новая деталь пути сама по себе, а экспериментально установленная связь конструкции подрельсового основания с параметрами вибрационного воздействия.

Одним из наиболее последовательных отечественных решений стала разработанная во ВНИИЖТ под руководством проф. Н. Д. Кравченко конструкция виброзащитного пути с продольно ориентированными железобетонными балками-лежнями. Лежни опираются на амортизирующие прокладки и не имеют жёсткой связи с путевым бетоном; система боковых и продольных упоров обеспечивает устойчивость геометрии пути при сохранении его упругой работы (рис. 5). По данным разработчиков, такая схема снижает динамическое воздействие на тоннельную обделку, увеличивает долговечность подрельсового основания и уменьшает трудоёмкость содержания [18]. Внедрение лежневых конструкций в Московском и других метрополитенах показало характерную для отрасли последовательность: расчётная идея → стендовые и натурные испытания → опытный участок → эксплуатационная оценка → тиражирование решения.

Дальнейшее развитие виброзащитного пути связано с конструкциями типа «масса – пружина», с размещением упругих элементов максимально близко к источнику динамического воздействия и с плитными подрельсовыми основаниями. В отечественной патентной практике также предложены варианты, в которых железобетонные плиты объединяются в протяжённые пакеты и опираются на пневмоупругие элементы; примером является устройство верхнего строения пути метрополитена «Бикбау» [19]. Независимо от конкретной схемы направление исследований сместилось к подбору жёсткости, массы и демпфирования всей системы пути и оценке её частотного отклика.

Результаты этого развития получили нормативное закрепление. СП 120.13330.2022 относит к верхнему строению пути рельсы, рельсовые скрепления, стрелочные переводы, подрельсовое основание и путевой бетонный или балластный слой; для защиты наземных и подземных объектов от шума и вибрации предусматривается применение виброзащитных конструкций пути на защищаемом участке и подходах к нему [20]. Таким образом, эволюция верхнего строения пути воспроизводит общий механизм развития метростроительной науки: эксплуатационная



Рис. 6. Экспериментальные геофизические исследования на полномасштабной модели тоннельной обделки

проблема → натурное измерение → экспериментально обоснованная конструкция → внедрение → нормативное требование.

Метростроение как фактор институционализации инженерной науки

Воздействие метростроения на науку не ограничивалось отдельными теориями и методами. Масштаб программы потребовал устойчивой инфраструктуры производства, проверки и передачи знания. В 1933 г. по инициативе Метростроя в МИИТе была организована специализированная кафедра, готовившая инженеров для нового вида строительства; первый профильный выпуск состоялся в 1937 г. [21]. Ленинградская школа имела более раннее происхождение, но строительство Московского, а затем Ленинградского метрополитена обеспечило ей новые объекты исследования и постоянную связь с производством [8].

Аналогичный процесс происходил в проектной и отраслевой науке. Техническое подразделение Метростроя стало основой Метропроекта, а затем Метрогипротранса [22]. Уже во время строительства первой очереди, в 1933 г., был создан научно-исследовательский сектор Метростроя, концентрировавший экспериментальные исследования; в дальнейшем специализированное тоннельно-метростроевское направление развивалось в ЦНИИСе [2, 23]. Возникла организационная цепочка, в которой проектная организация, строительная площадка, научно-исследовательский институт и высшая школа работали над решением одних и тех же технических проблем.

В практике использовались испытания на моделях и в натуральную величину на специализированных стендах, выполняли измерения нагрузок на обделки, проводили статические испытания конструкций станций, вели инструментальный контроль напряжённо-деформированного состояния [24]. Полученные данные применяли для уточнения расчётных нагрузок, конструктивных решений и нормативных требований. Это принципиально важный переход: натурное измерение становилось не эпизодической проверкой, а частью воспроизводимого научно-производственного процесса.

Превращение научных результатов в нормативные документы

Для инженерной науки нормативное закрепление результата является принципиально важной стадией ее жизненного цикла. Пока новая расчётная схема, способ производства работ или метод контроля применяются только на отдельных объектах, они остаются локальным опытом. Норма превращает проверенное решение в воспроизводимое правило, устанавливает область его применения, требования к исходным данным, расчёту и контролю и тем самым обеспечивает передачу знания между проектными и строительными организациями. В отечественном метростроении этот механизм сформировался очень рано и развивался параллельно с накоплением натурных и экспериментальных данных.

Одним из первых результатов такого перехода стали «Основные технические условия на проектирование и сооружение Московского метрополитена», подготовленные Метростроем и Метропроектом и изданные в 1939 г. как сборник Бюро типового проектирования [25]. Документ охватывал трассу, станции, конструкции сооружений, санитарно-технические устройства, путь, электроснабжение, связь, эскалаторы и производство тоннельных работ. Это ещё не были общегосударственные строительные нормы, однако они уже представляли собой нормативное обобщение опыта первых очередей строительства Московского метрополитена: решения, прошедшие проектную и натурную проверку, переводились из практики отдельных участков в единые требования системы Метростроя.

По мере распространения метростроения за пределы Москвы внутриотраслевых документов стало недостаточно, и накопленный опыт последовательно переводился на уровень общесоюзного нормирования. СНиП II-Д.3-62 «Метрополитены. Нормы проектирования» заменил действовавшие ранее положения главы СНиП II-Д.9 и «Технические условия проектирования метрополитенов» издания 1954 г. Затем последовали СНиП II-Д.3-68 и СНиП II-40-80 «Метрополитены». СНиП II-40-80 разрабатывался при непосредственном участии ЦНИИС Минтрансстроя СССР и Метрогипротранса, то есть тех же научных и проектных организаций, которые выполняли исследования, расчёты и научное сопровождение строительства. Нормативный документ включал требования к строительным конструкциям, постоянным и временным нагрузкам, основным расчётным положениям, гидроизоляции и другим вопросам, в которых многолетние результаты проектной и экспериментальной работы получили форму правил, обязательных для массового проектирования.

При этом переход от исследования к СНиП не был одномоментным. Между научным результатом и общей нормой существовал слой отраслевых руководств, инструкций и методических рекомендаций, позволявших апробировать более детальные

методы. Характерный пример – подготовленные ЦНИИС «Методические рекомендации по проектированию свайной крепи котлованов метрополитенов» 1986 г. [26] в развитие СНиП II-40-80 и СНиП III-44-77 содержали не только конструктивные требования, но и методику расчёта и предложения по её совершенствованию. Такая двухуровневая система – общая норма и развивающий её научно-методический документ – обеспечивала возможность внедрять новые результаты без преждевременного превращения каждой частной разработки в жёсткое нормативное предписание.

Преемственность сохранилась и в российский период. СНиП 32-02-2003 «Метрополитены» разрабатывался Метрогипротрансом, Тоннельной ассоциацией России, НИЦ «Тоннели и метрополитены» ЦНИИС, Мосметростроем и другими профильными организациями. Актуализация документа в СП 120.13330.2012 также выполнялась коллективом, объединявшим проектировщиков, научные организации и строителей. Особенно показательно, что Изменением № 3 к этому своду правил в 2019 г. было введено требование осуществлять научно-техническое сопровождение в процессе изысканий, проектирования и строительства объектов метрополитена. Тем самым практика, описанная в 2001 г. [24] как сложившаяся система научного сопровождения Мосметростроя, получила нормативный статус.

В действующем СП 120.13330.2022 «Метрополитены» эта линия развита ещё последовательнее: научно-техническому сопровождению строительства посвящён самостоятельный подраздел 5.18.7, а его цель сформулирована как обеспечение безопасности людей и природно-технической геосистемы, качества работ, надёжности объекта на основе результатов инженерных изысканий, научного прогнозирования и анализа данных мониторинга. Нормативно закрепляется уже не отдельный расчётный приём, а сам исследовательский цикл, включающий прогноз, инструментальные наблюдения, анализ фактического поведения сооружения и корректировку технических решений. Это означает переход от нормирования результатов науки к нормированию механизма получения и проверки нового инженерного знания.

Современный этап демонстрирует и обратный межотраслевой перенос. ГОСТ Р 71733-2024, устанавливающий контроль качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве подземных объектов, включая тоннельные обделки (рис. 6): в число его разработчиков вошли Мосинжпроект, НИЦ «Строительство», МГУ им. М. В. Ломоносова и НИТУ МИСИС. Методы инструментального контроля, ранее применявшиеся прежде всего как элемент научных исследований и сопровождения сложных объектов, тем самым становятся стандартизированной технологией контроля качества.

Нормативная история метростроения имеет не линейный, а циклический характер. Результаты эксперимента и мониторинга переходят в рекомендации и технические условия, затем – в СНиП, СП и ГОСТ; новые объекты выявляют ограничения принятой модели и создают материал для очередного пересмотра норм. Нормирование в этой системе выступает не конечной фиксацией однажды полученного знания, а механизмом его отбора, тиражирования и последующего обновления и уточнения.

От метро к общей науке подземного строительства

Научный эффект метростроения оказался шире самой отрасли. Специальные способы закрепления и замораживания грунтов получили применение при строительстве шахт и других подземных объектов; методы расчёта взаимодействия обделки и массива – в железнодорожных, автомобильных и гидротехнических тоннелях; исследования деформаций – при оценке влияния подземного строительства на здания и сооружения.

Указанная передача происходила не только через публикации, но и через организации и их специалистов. Ленметрогипротранс, первоначально ориентированный на Ленинградский метрополитен, впоследствии участвовал в проектировании автомобильных, железнодорожных и других тоннелей. Мосметрострой постоянно расширял области исследований от метро к городским автотранспортным тоннелям и крупным транспортным развязкам: методы обследования, мониторинга, расчёта и технологического сопровождения переносились на новые типы подземных сооружений [24].

Мосметрострой обеспечивал высокую концентрацию сложных задач и возможность многократной проверки решений на серийно возводимых объектах. Поэтому сформированные здесь методы постепенно становились частью общей науки подземного строительства. Особенно наглядно это проявилось в расчётах совместной работы системы «обделка – массив», в специальных способах и в подходах к натурному контролю, которые перестали быть специфическими исключительно для метро.

Современный этап: от натурного опыта к цифровой геотехнике

Современное метростроение сохраняет историческую функцию генератора научных задач, однако изменяется способ получения и использования знания. Если для 1930–1950-х годов характерна последовательность «строительство – наблюдение – последующее обобщение», то сегодня расчёт, мониторинг и корректировка технологических параметров могут выполняться в рамках одного информационного цикла.

При механизированной проходке тоннелепроходческим механизированным комплексом (ТПМК) с активным пригрузом забоя исследовательской задачей становится определение давления, достаточного для сохранения устойчивости забоя и ограничения потерь грунта, но не вызывающего нежелательные деформации поверхности. А. Г. Протосеня и До Нгок Тхай на основе пространственного конечно-элементного моделирования исследовали связь величины пригруза, свойств массива и осадок поверхности [28]. Здесь, а также в соответствующих разделах СТО НОСТРОЙ [29], технологический параметр проходческого комплекса становится одновременно параметром геомеханической модели.

Параллельно развивается обратный информационный поток – от сооружения к расчётной модели. Автоматизированный деформационный мониторинг позволяет получать временны́е ряды перемещений обделки и контролировать развитие деформационных процессов. В работах ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации», НИИОСП им. Герсеванова, ООО «Монитрон» и др. [30], в исследованиях С. В. Баловцева и Р. В. Шевчука [31] мониторинг рассматривается не только как фиксация состояния, но и как информационная основа прогноза. Современные численные модели, в свою очередь, дают возможность учитывать пространственную стадийность проходки, неоднородность массива, контактные условия и нелинейность материалов.

При этом современное научно-техническое сопровождение имеет прямую историческую преемственность с практикой. При строительстве сложных станционных сооружений применялась последовательность «предварительный расчёт и модельное исследование – инструментальные измерения в процессе возведения – оценка фактической работы конструкции – корректировка рекомендаций» [27]. Отличие современного этапа состоит прежде всего в плотности данных, скорости их обработки и в возможности оперативно сопоставлять измерения с трёхмерной расчётной моделью.

В результате формируется замкнутый цикл: прогноз → строительство → измерение → сопоставление расчёта с натурными данными → уточнение модели и техноло-

Таблица

Влияние задач метростроения на формирование научных направлений

Объект, период	Инженерная проблема	Научное направление	Основной результат	Исследователи/ организации	Дальнейшее применение
Москва, 1931–1932 гг.	Выбор глубины и способа строительства в сложной городской геологии	Инженерная геология и технология тоннелестроения	Натурная проверка решений; дифференцированный выбор глубины и технологии	Метрострой, Метропроект	Последующие линии метрополитена
Москва, 1930-е гг.	Расчёт экономичных тоннельных обделок с учётом влияния грунта	Механика системы «обделка – массив»	Метод Метропроекта – «кольцо в упругой среде»	Б. Ф. Матэри, Б. П. Бодров, С. Г. Поярков, Л. И. Горелик	Транспортные тоннели; учебные и нормативные расчётные схемы
Москва, 1930–1970-е гг.	Проходка в водонасыщенных неустойчивых грунтах	Искусственное замораживание грунтов	Расчёт и управление формированием льдогрунтового ограждения	Н. Г. Трупак и др.	Шахты, тоннели, специальные подземные сооружения
Ленинград, 1950-е гг.	Осадки при проходке в кембрийских глинах	Геомеханика деформационных процессов	Закономерности и методы прогнозирования осадок	Ю. А. Лиманов, ЛИИЖТ	Защита городской застройки; геотехнический прогноз
СССР, вторая половина XX в.	Проверка фактической работы обделок и станционных конструкций	Натурные исследования и научное сопровождение	Измерение нагрузок и напряженно-деформированного состояния, уточнение расчётных и нормативных параметров	ЦНИИС, Мосметрострой	Нормирование; новые типы тоннелей и транспортных сооружений
Современный этап	Управление влиянием механизированной проходки и сложного городского строительства	Численное моделирование, мониторинг, научно-техническое сопровождение	Замкнутый цикл «модель – измерение – корректировка»	Профильные НИИ, проектные и строительные организации	Цифровое управление геотехническим риском

гических параметров → новый прогноз. Научно-техническое сопровождение в такой системе является не дополнительной экспертизой готового решения, а организационной формой постоянного взаимодействия проектирования, строительства и исследования. Историческая модель «стройка как лаборатория» тем самым не исчезла, а получила цифровое продолжение.

Заключение

История отечественного метростроения показывает, что его влияние на инженерную науку определялось не суммой отдельных технических новшеств, а устойчивым механизмом производства и проверки знания. Первая очередь Московского метро продемонстрировала необходимость связывать способ строительства с конкретными инженерно-геологическими и градостроительными условиями и превратила опытные участки в инструмент выбора проектных решений (табл.).

Метростроение создавало крупномасштабную натурную экспериментальную базу. Исследования замораживания грунтов, осадок земной поверхности и нагрузок на обделки позволяли переходить от наблюдения к выявлению закономерностей и расчётному прогнозу. Особенно показателен метод Метропроекта: задача экономичного проектирования обделок на объектах второй очереди Московского метрополитена привела к модели «кольцо в упругой среде», которая получила развитие в проектной и учебной литературе, была алгоритмизирована для ЭВМ и до настоящего времени сохраняется как одна из базовых инженерных моделей и точек отсчёта для современных модификаций.

Одновременно метростроение способствовало институционализации знания: развитию специализированных кафедр, проектных институтов, научно-исследовательских подразделений и системы научного сопровождения. Натурные результаты переходили в расчётные методики, нормы, в монографии и образовательные программы, а затем распространялись на другие виды тоннелей и подземных сооружений.

Самостоятельным механизмом влияния науки на отрасль стало нормативное закрепление проверенных результатов. От технических условий Метростроя и Метропроекта 1930-х годов через специализированные

главы СНиП к современным сводам правил прослеживается переход от локального опыта к единым требованиям проектирования и строительства. Показательно, что в действующей нормативной системе закреплены уже не только расчётные и конструктивные решения, но и само научно-техническое сопровождение, включая прогнозирование, мониторинг и анализ фактической работы объекта.

На современном этапе эта историческая схема реализуется в более быстром информационном контуре: численное моделирование, автоматизированный мониторинг и научно-техническое сопровождение объединяют прогноз и натурную проверку практически в реальном времени.

Редакция журнала «Метро и тоннели» выражает уверенность в том, что, несмотря на изменения в управлении современным метростроением, связь между наукой и производством сохранится, и прошедший успешный опыт будет совершенствоваться в новых формах.

Ключевые слова

Метростроение; тоннелестроение; геотехника; метод Метропроекта; тоннельная обделка; нормативное регулирование; геотехнический мониторинг; научно-техническое сопровождение; верхнее строение пути; виброзащита.

Список литературы

1. Как мы строили метро. М., Изд. «История фабрик и заводов», 1935. 701 с.
2. Пикуль В. С. Научный фундамент отечественного метростроения // Мы строим метро / под ред. П. А. Васюкова. М.: Московский рабочий, 1983. С. 123–130.
3. Маковский В. Л. Сооружение тоннелей метрополитенов. Т. 1. Европейская тоннельная техника. М.: Строительство Москвы, 1935. 425 с.
4. Маковский В. Л., Межнев П. И., Демешко Е. А. Исследование некоторых вопросов герметичной щитовой проходки тоннелей в неустойчивой водоносной среде под большим гидростатическим давлением. М., 1958. – 64 с. (Сообщение / Минтрансстрой СССР. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т трансп. строительства. Лаборатория сооружения тоннелей; № 134).
5. Трупак Н. Г. Замораживание грунтов в подземном строительстве. М.: Недра, 1974. 280 с.
6. Дорман Я. А. Искусственное замораживание грунтов при строительстве метрополитенов. – Москва: Транспорт, 1971. – 271 с.
7. Лиманов Ю. А. Осадки земной поверхности при сооружении тоннелей в кембрийских глинах. Л.: ЛИИЖТ, 1957. 238 с.
8. История кафедры «Тоннели и метрополитены» // Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I: официальный сайт. – URL: https://www.pgups.ru/struct/kafedra_tonneli_i_metropoliteny/t-istoriya-kafedry? (дата обращения: 25.08.2026).
9. Бодров Б. П., Матэри Б. Ф. Кольцо в упругой среде. М.: Метропроект, Отдел типового проектирования, 1936. Бюл. № 24.
10. Бодров Б. П., Матэри Б. Ф. Кольцо в упругой среде (Методы расчёта и примеры): руководство для проектирования и производства работ в пределах системы Метростроя / предисл. проф. д-ра инж. П. Л. Пастернака. — Москва: Метропроект, Отдел типового проектирования, 1936. – (Бюллетень № 24). С. 17–23.
11. Бугаева О. Е. Проектирование обделок транспортных тоннелей. Л.: Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта, 1963. 100 с.
12. Волков В. П. Тоннели. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1970. 408 с.
13. Айвазов Ю. Н., Горленко А. И. Расчет тоннельных обделок методом Метропроекта с использованием ЕС ЭВМ: учеб. пособие. Киев: УМКВО, 1988. 127 с.
14. СТО НОСТРОЙ 2.27.128-2013. Освоение подземного пространства. Строительство подземных сооружений горным способом с применением обделок из набрызг-бетона. Правила производства работ, контроль выполнения и требования к результатам работ.
15. Нгуен Тай Тиен, Карасев М. А., До Нгок Ань. Влияние стыков на поведение сегментной обделки тоннеля квази-прямоугольного очертания // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 7. С. 55–72.
16. Гарбер В. А. Тоннели: научные основы проектирования тоннельных конструкций с учетом технологии их сооружения. Т. 1–2. М.: НИЦ «Тоннели и метрополитены» ЦНИИС, 1996.
17. Исаков А. Л., Смолин Ю. П. Сравнительная оценка уровня виброколебаний путевого бетона в метро с различными типами подрельсовых оснований // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4 (43). – С. 40–44.
18. Кравченко Н. Д., Кравченко Г. М. Путь с лежнями для тоннелей метрополитенов // Мир транспорта. – 2016. – Т. 14, № 4. — С. 42–51.
19. Устройство верхнего строения пути метрополитена «Бикбау»: пат. RU 2535806 C2, МПК E01B 3/40 / Бикбау М. Я., Бикбау У. М.; патентообладатель ЗАО «ИМЭТСТРОЙ», Бикбау М. Я., Бикбау У. М. – № 2013111652/11; заявл. 18.03.2013; опубл. 20.12.2014, Бюл. № 35.
20. СП 120.13330.2022. Метрополитены. СНиП 32-02-2003.
21. История кафедры «Транспортные тоннели и метрополитены» // Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)). – URL: https://rut-miit.ru/depts/23885 (дата обращения: 25.08.2026).
22. Метрогипротранс – задаём стандарты с 1933 года. История института // АО «Метрогипротранс». https://metrogiprotrans.ru (дата обращения: 25.08.2026).
23. Научно-исследовательский центр «Тоннели и метрополитены»; история института // АО «ЦНИИТС». — URL: https://tsniis.com/nic/nic-tm/
24. Меркин В. Е., Виноградов Б. Н. Научное сопровождение работ Мосметростроя // Метро и тоннели. 2001. Специальный выпуск «Мосметрострою 70 лет». С. 16–18.
25. Метрострой, Метропроект. Основные технические условия на проектирование и сооружение Московского метрополитена: руководство для проектирования и производства работ в пределах системы Метростроя. Сб. № 65. М.: Бюро типового проектирования, 1939. 107 с.
26. Методические рекомендации по проектированию свайной крепи котлованов метрополитенов. М.: ЦНИИС Минтрансстроя СССР, 1986. 87 с.
27. Бычков Н. Н., Дорман И. Я., С. Г. Елгаев и др. Научно-техническое сопровождение проектирования и строительства подземных сооружений, как фактор обеспечения единой научно-технической политики//// Метро и тоннели. 2015. № 1. с. 18–20.
28. Протосеня А. Г., До Нгок Тхай. Прогноз осадок земной поверхности при строительстве метрополитена проходческими комплексами с пригрузом забоя // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2016. № 1. С. 31–34.
29. СТО НОСТРОЙ 2.27.19-2011Сооружение тоннелей ТПМК с использованием высокоточной обделки.
30. Технические рекомендации по автоматизированному геотехническому мониторингу зданий и сооружений при освоении подземного пространства в городе Москве: утв. и введ. в действие зам. Мэра Москвы по вопросам градостроит. политики и строительства 29.07.2019 / ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации». – Москва: ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации», 2019. – [Электронный ресурс]. – URL: https://rus-tar.ru/sto-stu/tehnicheskie-rekomendatsii-po-avtomatizirovannomu-geotehnicheskomu-monitoringu-zdaniy-i-sooruzheniy-pri-osvoenii-podzemnogo-prostranstva-v-gorode-moskve/ (дата обращения: 25.08.2026).
31. Баловцев С. В., Шевчук Р. В. Автоматизированный деформационный мониторинг состояния тоннелей метрополитенов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 5. С. 23–28.

О НОРМИРОВАНИИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ТРАНСПОРТНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. Е. Русанов, к. т. н., доцент, генеральный директор ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации»
В. Е. Меркин, д. т. н., профессор, научный руководитель ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации»
К. О. Пудов, заместитель главного инженера ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации»
А. Б. Лебедьков, руководитель Исполнительной дирекции Тоннельной ассоциации России
И. Я. Дорман, д. т. н., профессор, главный научный сотрудник Тоннельной ассоциации России
Д. С. Конюхов, д. т. н., доцент, руководитель отдела научно-технического сопровождения строительства, АО «Мосинжпроект»

В статье обосновывается необходимость осуществления на постоянной основе научно-технического сопровождения (НТС) строительства подземных сооружений транспортного назначения (ПСТН) на различных стадиях их жизненного цикла – при проведении изысканий, проектировании, строительстве и эксплуатации – путём разработки и утверждения соответствующего нормативного документа.

Учитывая, что транспортные тоннели и метрополитены являются стратегически важными объектами и сооружаются за счёт бюджетного финансирования, НТС следует рассматривать не как факультативную услугу или экспертную процедуру, а как необходимый инструмент обеспечения надёжности и безопасности подземных сооружений. В связи с этим финансирование и ценообразование работ по НТС должны быть встроены в общую систему подготовки и реализации государственных проектов.

В последние годы в России наблюдается бум строительства транспортных тоннелей и метрополитена. В ряде мегаполисов страны стал активно развиваться легкорельсовый транспорт (ЛРТ), сочетающий черты метрополитена и скоростного трамвая на обособленном пути. Реализация таких объектов, как правило, ведется в сложных инженерно-геологических условиях и в плотной городской застройке, что требует принятия оптимальных технических решений не только на стадии проектирования, но и непосредственно в ходе строительства и эксплуатации, во многих случаях – оперативно [1].

Именно поэтому научно-техническое сопровождение строительства и эксплуатации подземных сооружений транспортного назначения, реализуемое на различных стадиях жизненного цикла объекта, следует рассматривать не как факультативную услугу или вспомогательную экспертную процедуру, а как необходимый инструмент обеспечения надежности, безопасности и реализуемости сложных проектов строительства ПСТН. В месте с тем положения СП 539.1325 800.2024 [2] (далее – СП 539), регулирующие НТС, не распространяются на подземное строительство.

На практике это приводит к тому, что для каждого объекта ПСТН приходится специально определять состав НТС на различных стадиях жизненного цикла, его место в общей структуре проекта, а также порядок финансирования и учета затрат в сметной документации.

Цель настоящей статьи состоит в том, чтобы на основе обобщения опыта последних лет показать, как НТС реально осуществляется применительно к ПСТН, а также сформулировать ряд предложений по дополнению действующих нормативных документов в целях расширения области их применения на подземные объекты транспортной инфраструктуры.

НТС как стадийная система жизненного цикла объекта

Научно-техническое сопровождение ПСТН целесообразно рассматривать как последовательную систему инженерного сопровождения объекта на разных стадиях его жизненного цикла. Такой подход позволяет уйти от восприятия НТС как разового заключения или внешней экспертной проверки и рассматривать его как инструмент последовательного снижения неопределенности, управления рисками и уточнения принятых решений.

В практическом плане можно выделить пять стадий НТС:

- научно-техническое сопровождение инженерных изысканий (НТСИ);
- научно-техническое сопровождение проектирования (НТСП);
- научно-техническое сопровождение строительства (НТСС);
- научно-техническое сопровождение эксплуатации (НТСЭ);
- научно-техническое сопровождение консервации или ликвидации подземного объекта (НТСЛ).

Последняя стадия в настоящее время востребована сравнительно редко и поэтому далее рассматривается кратко.

НТСИ связано с оценкой полноты и качества инженерных изысканий, выявлением геологических и гидрогеологических рисков, проверкой достаточности исходных данных для расчетов и прогнозирования, изучением предыдущего использования территории, выявлением потенциально опасных зон будущего подземного строительства. По существу, именно на этой стадии формируется инженерная основа будущего проекта.

НТСП относится к стадии разработки и проверки проектных решений, выполнения альтернативных и поверочных расчетов, анализа реализуемости проекта, оценки влияния нового строительства на окружающую природную и городскую среду, а также выбора защитных и/или компенсационных мероприятий. Еще одной функцией НСТП становится обоснование применения новых технологий, материалов и конструкций. На этой стадии НТС играет роль не только независимой расчетной проверки, но и инструмента инженерной верификации проекта в целом, а также обеспечивает разработку технологических решений, обеспечивающих безопасность ведения строительных работ.

НТСС, выполняемое при реализации про-

Таблица 1

Результаты анализа опыта НТСИ

Блок НТСИ	Что анализируется	Что чаще всего оказывается критичным	К чему должен приводить результат НТСИ
Полнота инженерных изысканий	Состав, объем и репрезентативность ИГИ, охват зоны влияния, достаточность данных для расчета	Неполное описание разреза, недостаточная детализация локальных неоднородностей, слабое раскрытие условий в зоне влияния	Вывод о достаточности ИГИ либо постановка задачи на доизучение участка
Инженерно-геологическая модель	Стратиграфия, ИГЭ, изменчивость свойств грунтов, наличие техногенных и специфических грунтов	Неоднородность массива, слабые прослои, насыпные и техногенные грунты, просадочные и набухающие грунты	Формирование модели, пригодной для расчетов и для прогноза поведения основания и массива
Гидрогеологические условия	Уровень и режим подземных вод, сезонные колебания, техногенное обводнение, фильтрационные особенности	Недоучет колебаний УГВ, локальное обводнение, барражный эффект, влияние утечек коммуникаций	Уточнение расчетного УГВ и постановка специальных требований к прогнозу, ограждениям и защите
Геологические и инженерно-геологические процессы	Подтопление, суффозия, карстово-суффозионная опасность, морозное пучение, выветривание, трещиноватость	Процессы, способные изменить расчетную схему или технологию строительства	Выявление ограничений и условий, которые должны учитываться в НТСП и НТСС
Анализ предыдущего использования территории	Наличие засыпанных русел рек, захороненных строительных конструкций, техногенных аномалий свойств грунтов, возможных последствий ведения военных действий	Локальные изменения геологических или гидрогеологических условий, посторонние включения в зоне размещения сооружений	Выявление возможных опасных зон для ведения строительных работ, предотвращение аварий и инцидентов
Пригодность исходной базы для проекта	Возможность построения расчетной модели системы «сооружение – грунтовый массив», надежность исходных предпосылок	Расхождение между «формально достаточными» данными и реально необходимой инженерной глубиной проработки	Переход от «отчета по изысканиям» к инженерной обоснованной исходной базе проекта

екта, приобретает особое значение в условиях сложной геологии и наличия рядом расположенных сооружений городской инфраструктуры. Его задачи включают анализ результатов мониторингов, сопоставление фактических деформаций и дефектов с прогнозом, инженерную интерпретацию результатов наблюдений, оценку пригодности фактически выполненных конструкций, анализ отклонений от проектных решений и выработку оперативных корректирующих мер, а также мероприятия по интерактивному управления технологическими параметрами строительства в особо опасных зонах. Именно на этой стадии становится особенно заметно, что НТС – это не только контроль, но и инструмент управления строительным процессом.

НТСЭ, необходимое для решения задач на стадии эксплуатации объекта, на ранних этапах связано с устранением дефектов, допущенных при строительстве, а в дальнейшем – с обеспечением его безопасности при новом строительстве в зоне влияния, изменении инженерно-геологических и гидрогеологических условий, выполнении капитальных ремонтов, реконструкции или перепрофилировании сооружения. В задачи НТСЭ входят: подбор и обоснование необходимых и достаточных технических решений по ремонту, анализ результатов мониторинга и контроля технического состояния не только эксплуатируемых ПСТН, но и объектов городской инфраструктуры, находящихся в зоне их влияния, а также выполнение поверочных расчетов с учетом фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) сооружений, накопленных за годы эксплуатации деформаций и дефектов. Обеспечивая безопасность сформировавшейся природно-технической геосистемы, НТСЭ предполагает также разработку и сопровождение реализации соответствующих защитных мероприятий. На этой стадии НТС становится одним из основных средств обеспечения безопасной эксплуатации ПСТН.

Стадия НТСЛ характеризуется специфическими задачами обеспечения сохранности сложившейся природно-технической геосистемы при консервации или ликвидации подземных сооружений. В их состав входят оценка технического состояния как ликвидируемых, так и сохраняемых подземных сооружений и других объектов городской инфраструктуры, обоснование безопасности принятых технических решений, анализ результатов мониторинга, а также сопровождение строительных работ. На этой стадии в состав НТС в определенной мере вновь входят функции НТСИ, НТСП и НТСС.

Такое деление представляется особенно важным применительно к подземным объектам транспортной инфраструктуры, поскольку в данном случае стадийная логика сопровождения должна быть непрерывной. Если НТС подключается лишь на одной из поздних стадий, например уже после получения замечаний государственной экспертизы или после появления отклонений в ходе

строительства, это существенно снижает его эффективность.

Что показывает практика НТСИ

Обобщение практики НТСИ показывает, что ключевая проблема на стадии инженерных изысканий чаще состоит не в полном отсутствии данных, а в недостаточной полноте и инженерной интерпретации исходной информации применительно к задачам конкретного проекта.

Задача НТСИ состоит не просто в том, чтобы подтвердить достаточность изысканий, а в том, чтобы выявить факторы, способные изменить расчетную схему, прогноз влияния и технологию строительства на последующих стадиях. Иными словами, НТСИ должно обеспечивать переход от формального «отчета по изысканиям» к инженерной обоснованной исходной базе проекта (табл. 1).

Что показывает практика НТСП

Опыт НТСП показывает, что для объектов метро и ЛРТ проектные решения по ограждениям котлованов, распорным системам, тоннельным обделкам, фундаментам, временным и постоянным конструкциям, а также по защитным мероприятиям нуждаются в независимой альтернативной проверке значительно чаще, чем это иногда предполагается в формально «нормальной» схеме проектирования.

На практике расчетная часть НТСП охватывает несколько взаимосвязанных задач:

- проверка самой расчетной модели: расчетных схем, граничных условий, стадийности строительства, сочетаний нагрузок и воздействий;
- проверка несущих конструкций, в том числе постоянных и временных, на различных стадиях производства работ;
- оценка влияния проектируемого строительства на существующие здания, сооружения, инженерные сети, пути и элементы действующей транспортной инфраструктуры;
- сравнение основных и альтернативных технических решений, включая защитные и компенсационные мероприятия, не только с позиций расчетной надежности, но и технологической реализуемости.

В ряде случаев результаты НТСП приводят не просто к подтверждению проектных решений, а к корректировке конструктивной схемы, выбору иного варианта защитных мероприятий или уточнению последовательности производства работ.

Еще одна составная часть НТСП – обоснование принятых технических решений. Переход к параметрической системе нормирования подразумевает снижение зависимости от предписывающих требований строительных норм, усиление роли модельных критериев и обеспечение гибкости и адаптивности инженерных решений. Эта функция возлагается на НТСП, что фактически меняет ролевую модель НТСП – из метода экспертизы и контроля оно становится основным методом обеспечения безопасности проектируемого объекта. Основным методом реализации этой функции является научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР).

На стадии НТСП вырабатываются и обосновываются методы строительства в особо опасных зонах, предусматривающие как при-

Таблица 2

Результаты анализа опыта НТСП

Блок НТСП	Что проверяется и разрабатывается	Что чаще всего требует уточнения	К чему должен приводить результат НТСП
Расчетная модель	Расчетные схемы, граничные условия, стадийность, сочетания нагрузок и воздействий	Чувствительность модели к фактическим инженерно-геологическим условиям, уровню подземных вод, последовательности СМР	Подтверждение корректности модели или необходимость ее уточнения
Несущие конструкции	Ограждения котлованов, распорные системы, обделки тоннелей, фундаменты, временные конструкции	Запасы несущей способности, деформативность, работа стыков и узлов, особенности монтажной стадии	Подтверждение надежности решений или корректировка конструктивной схемы
Влияние на существующие объекты	Здания, сооружения, инженерные сети, пути, действующая транспортная инфраструктура	Величины осадок, разности осадок, зоны влияния, чувствительность существующих объектов	Определение допустимости влияния и необходимости защитных мероприятий
Вариантность решений	Основные и альтернативные технические решения	Эффективность защитных и компенсационных мероприятий, технологическая реализуемость, трудоемкость	Выбор наиболее обоснованного варианта
Обоснование принятых технических решений	Выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, обосновывающих принятые в проекте технические решения	Возможность применения новых материалов, конструкций, технологий, нестандартных решений	Обоснование безопасности проекта
Методы строительства в особо опасных зонах	Разработка технологических регламентов на проходку, расчет диаграммы пригруза забоя, разработка мероприятий по интерактивному управлению строительством	Необходимость и достаточность принятых технических решений	
Проектная реализуемость	Соответствие решений фактическим условиям строительства	Возможность выполнения работ в стесненной застройке, в технической зоне метрополитена, при сложной геологии	Формирование инженерной базы для устойчивой реализации проекта

менение специальных методов строительства, так и разработку мероприятий по интерактивному управлению технологическими параметрами [2, 3] (табл. 2).

Что показывает практика НТСС

На стадии строительства практическая ценность НТС проявляется наиболее наглядно. Очевидно, что мониторинг сам по себе не решает задачу, если не сопровождается инженерной интерпретацией его результатов и готовностью к принятию корректирующих решений.

Обобщение практики НТСС при подземном строительстве показывает, что ключевыми функциями сопровождения на этой стадии являются обратный анализ и управление (табл. 3). На основании этого анализа корректируются технические и технологические мероприятия, принимаются компенсирующие решения, обосновывается безопасность эксплуатации конструкций, построенных с отступлением от проекта. Важную роль приобретают неразрушающие геофизические методы контроля, позволяющие оперативно и с достаточной точностью оценивать состояние возводимых конструкций и грунтового массива.

Наиболее типичными задачами НТСС являются:

- анализ результатов мониторинга (геодезического, автоматизированного, визуального и инструментального);
- оценка пригодности фактически выполненных конструкций к дальнейшему производству работ;
- работа со сверхнормативными отклонениями свай, арматурных каркасов, распорных систем, защитного слоя, прочности бетона, уступов и раскрытия стыков между блоками обделки;
- выработка корректирующих инженерных решений;
- участие в организации управления ситуацией при нештатных событиях.

Особенность НТСС в подземном транспортном строительстве состоит в том, что состав и объем работ на этой стадии далеко не всегда можно предсказать заранее, как, например, появление дефектов в несущей конструкции (рис. 1).

Учитывая, что здесь отклонения могут затрагивать не только строящийся объект, но и другие действующие сооружения, НТСС для ПСТН должно быть не разовой процедурой, а непрерывным инженерным процессом, встроенным в логику строительства, обеспечивая не накопление данных как таковых, а их превращение в инженерные решения, позволяющие безопасно продолжать строительство.

Что показывает практика НТСЭ

Практика НТСЭ (см., например, [4]) показывает, что эксплуатацию подземных сооружений можно систематизировать следующим образом (с момента завершения строительства):

- 3–5 лет – устранение дефектов, допущенных при строительстве;

Таблица 3

Результаты анализа опыта НТСС

Блок НТСС	Что анализируется	Что чаще всего выявляется на практике	К чему должен приводить результат НТСС
Мониторинг и наблюдения	Геодезический, автоматизированный, визуальный, инструментальный мониторинг	Расхождение между фактическими и прогнозными деформациями, локальные аномалии, неравномерность развития осадок	Переход от набора измерений к инженерной интерпретации фактической ситуации
Сопоставление факта с прогнозом	Расчетные осадки, перемещения, усилия, допустимые значения, динамика изменений	Превышение прогнозных значений, изменение тенденций, проявление ранее недоучтенных факторов	Уточнение расчетной модели и оценка реального уровня риска
Отклонения и дефекты фактически выполненных конструкций	Отклонения свай, каркасов, распорных систем, защитного слоя, прочности бетона, стыков, обделки	Несоответствие проекту, технологические дефекты, локальные повреждения, отклонения геометрии	Оценка пригодности конструкций к дальнейшему производству работ и необходимости корректирующих мер
Корректирующие инженерные решения	Изменение технологии, усиление, дополнительные защитные меры, корректировка последовательности работ	Необходимость компенсационных мероприятий, усиления основания, изменения режима проходки, уточнения схемы раскрепления	Снижение риска и обеспечение возможности безопасного продолжения строительства
Интерактивное управление технологическими параметрами строительства	Влияние фактических параметров строительных и проходческих работ НДС грунтового массива, существующих зданий и сооружений, возводимых конструкций	Несоответствие расчетных значений деформаций фактическим, фактических локальных свойств грунтов результатам изысканий, нарушение технологии ведения работ	Безопасное ведение строительства в опасных зонах
Организация управления ситуацией	Регламенты реагирования, взаимодействие заказчика, подрядчика, проектировщика, службы эксплуатации	Необходимость быстрого принятия решений при отклонениях и нештатных ситуациях	Превращение НТСС в инструмент инженерного управления, а не фиксации последствий



Рис. 1. Непробетонированный участок «стены в грунте» (а), повлёкший дополнительные деформации (изгиб) и слом конструкции (б)

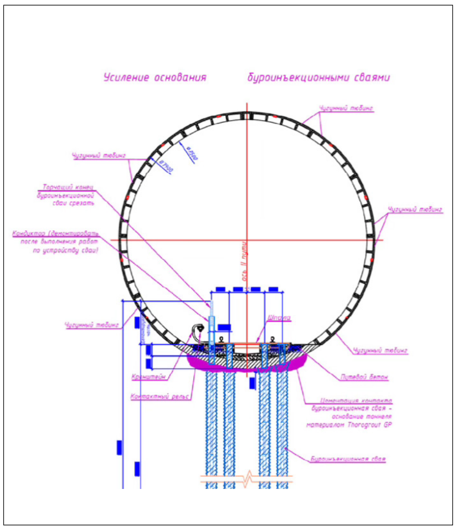


Рис. 2. Усиление основания тоннеля сваями в связи с разжижением грунтов основания динамическими нагрузками и разуплотнения грунта



Рис. 3. Повреждение чугунной обделки вследствие суффозионного выноса грунта через стыки тюбингов

- 5–10 лет – серьезных повреждений конструкций и эксплуатационного оборудования не наблюдается;
- 15–25 лет – дефекты, вызванные резкими колебаниями температуры воздуха, агрессивными водами, обледенениями, деформациями вмещающего массива;
- 50–70 лет – повреждения, являющиеся следствием неудачного проектирования и строительства, старение материалов, конструкций, изменение свойств вмещающего грунтового массива.

При столь длительных сроках эксплуатации неизбежно наступает моральное устаревание сооружений, сопровождающееся заменой эксплуатационного оборудования и пути, а также изменением объемно-планировочных и конструктивных решений. Одновременно изменяется НДС грунтового массива и обделки тоннельных сооружений, гидрогеологические условия территории, химический состав подземных вод и другие факторы эксплуатационной среды. Это, в свою очередь, сопровождается развитием карстово-суффозионных процессов, повреждениями несущих конструкций, протечками, химической коррозией бетона и арматуры.

Реакцией на эти деструктивные изменения должны быть мероприятия, обеспечивающие безостановочную и безопасную эксплуатацию подземных магистралей, в частности усиление оснований сооружений (рис. 2), ликвидация трещин в обделке (рис. 3), а также иные технические решения, направленные на восстановление и поддержание эксплуатационной надежности сооружений.

Состав основных работ по НТСЭ представлен в табл. 4.

Таблица 4

Результаты анализа опыта НТСЭ

Блок НТСЭ	Что проверяется и разрабатывается	Что чаще всего выявляется на практике	К чему должен приводить результат НТСЭ
Ремонт действующих сооружений	Достаточность результатов обследования, соответствие фактического состояния конструкций проекту, принятых материалов и технологий ремонта выявленным дефектам и повреждениям	Ошибки при проектировании и строительстве, неверно принятые решения по ремонту	Обеспечение достаточности ремонтных мероприятий на межремонтный период
Реконструкция действующих сооружений	См. табл. 1–3		
Новое строительство	Результаты обследования технического состояния действующих сооружений, соответствие фактического состояния конструкций проекту, разработка и обоснование мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации транспортных сооружений при новом строительстве	Величины осадок, разности осадок, зоны влияния, чувствительность эксплуатируемых объектов	Определение допустимости влияния и необходимости защитных мероприятий

Таблица 5

Состав работ НТСЛ

Блок НТСЛ	Что проверяется	Функции НТСЛ	К чему должен приводить результат НТСЛ
Проект консервации или ликвидации	Достаточность результатов обследования, соответствие фактического состояния конструкций проекту, принятых материалов и технологий техническому состоянию объекта, гидрогеологическим условиям	Выполнение научно-исследовательских и опытно конструкторских работ, обосновывающих принятые технические решения	Обеспечение неизменности НДС грунтового массива
Мониторинг	Анализ результатов мониторингов	Оперативная корректировка принятых проектных решений	Обеспечение сохранности существующей застройки

Опыт НТС консервации и ликвидации (НТСЛ)

Практический опыт НТСЛ в настоящее время в основном ограничивается анализом результатов мониторинга нескольких законсервированных объектов метрополитена, вмещающего их грунтового массива и окружающей застройки. Однако сама консервация и ликвидация подземных транспортных объектов представляет собой сложную инженерную задачу, сопряженную с потенциальной опасностью для сложившейся природно-технической геосистемы (табл. 5).

Практика последних лет позволяет рассматривать НТСЛ не как абстрактную концепцию, а как реально работающий инструмент на объектах различного типа.

Одним из важных направлений этой стадии НТС являются работы в технических зонах действующего метрополитена. Такие объекты особенно чувствительны, поскольку новое строительство осуществляется в непосредственной близости от действующих тоннелей, станций, вестибюлей, эскалаторных тоннелей и других сооружений. В подобных условиях НТСЛ охватывает обследование существующих конструкций, анализ мониторинга, сопоставление фактических деформаций с прогнозом, выполнение дополнительных изысканий и расчетов, а также подготовку регламентов и рекомендаций по корректировке технологии производства работ.

Практические проблемы организации НТС

На практике НТС далеко не всегда организуется как последовательная стадийная система. В ряде случаев специализированные организации по НТС привлекаются уже после получения замечаний государственной экспертизы, когда необходимость дополнительных расчетов, оценок влияния или специальных обоснований формулируется органами государственной или ведомственной экспертизы. Такой подход понятен с организационной точки зрения и нередко позволяет решить конкретную задачу в ограниченные сроки, однако его следует рассматривать скорее как реактивный.

В других случаях НТС предусматривается уже на стадии проектно-изыскательских работ. В этом случае возникает необходимость разработки программ НТСИ, НТСП и НТСС [5]. Поэтому НТС должно организовываться как можно раньше, начиная со стадии инженерных изысканий. Именно на ранних стадиях закладывается качество исходной инженерно-геологической, расчетной и прогнозной базы проекта. Если же НТС подключается только на этапе устранения замечаний экспертизы или уже в условиях появления отклонений на стройке, то возможности по снижению рисков и по выбору оптимальных решений неизбежно сужаются.

Одновременно важно понимать, что ситуация не является односторонней. Во многих случаях заказчики и застройщики заинтересованы в привлечении квалифицированных специализированных организаций для осуществления НТС, поскольку это позволяет повысить качество инженерных решений, снизить технические риски и обеспечить более обоснованное распределение профессиональной ответственности за результат. Следовательно, проблема заключается не в отсутствии интереса к НТС как таковому, а в недостаточной сформированности организационного и нормативного механизма его включения в общую структуру проекта.

Почему СП 539 недостаточен для подземного строительства

Принятие СП 539 стало важным шагом вперед, поскольку впервые на уровне общего свода правил была закреплена система научно-технического сопровождения инженерных изысканий, проектирования и строительства [6]. Этот документ, в его современном виде, безусловно, полезен как рамочный и систематизирующий, но применительно к строительству и эксплуатации ПСТН его возможностей недостаточно, так как, задавая универсальную логику НТС, он не содержит специальной методической структуры применительно к ПСТН. Между тем именно эти объекты требуют большей степени детализации, в том числе по стадийности расчетов, учету технологии строительства и особенностям влияния на существующую инфраструктуру.

Нормативный документ для таких объектов должен:

- содержать специальные требования к пространственным и стадийным геотехническим моделям, которые для тоннелей, метрополитенов, станционных котлованов и притоннельных сооружений часто являются принципиально необходимыми;
- раскрывать критерии допустимости влияния на действующие подземные сооружения (например, применительно к метро вопросы дополнительных деформаций пути, эскалаторных тоннелей, вестибюлей, действующих тоннелей и иных чувствительных элементов транспортной инфраструктуры требуют более конкретной нормативной регламентации);
- доводить до специального уровня процедуры реагирования на отклонения в ходе НТСС, что во многом определяет практическую ценность сопровождения на стадии строительства;
- содержать специальную типологию подземных транспортных объектов и геотехнологий, от которой должен зависеть состав НТС. Для метро и метротрама это особенно важно, поскольку состав сопровождения при щитовой проходке, устройстве станционных котлованов, работах в технической зоне метро, использовании специальных тех-

нологий закрепления и замораживания грунтов объективно различается.

Поэтому оценивая СП 539 как своевременный и, безусловно, необходимый базовый документ, обеспечивающий систематизацию НТС, считаем целесообразным внести в него изменения, распространяющие его действие на объекты метро и тоннелестроения, прежде всего транспортного назначения, а также дополнить его специальными положениями, учитывающими специфику таких объектов.

Вопросы финансирования и ценообразования по НТС

Одними из наиболее проблемных и в то же время недостаточно обсуждаемых вопросов остаются финансирование и ценообразование по НТС.

Следует подчеркнуть, что эта проблема касается не только объектов, реализуемых за счет бюджетных средств, но и частного строительства в зонах влияния ответственных сооружений. В первом случае НТС должно быть встроено в общую систему подготовки и реализации государственного или муниципального проекта. Во втором – речь идет о коммерческих застройщиках, ведущих строительство в зонах влияния объектов метро, тоннелей, коллекторов, путей и элементов иной инфраструктуры. Такие застройщики также обязаны проходить государственную экспертизу и выполнять требования по оценке влияния нового строительства и по ведению НТС. Следовательно, проблема носит общий практический характер.

Как было сказано выше, во многих случаях заказчики и застройщики заинтересованы в привлечении квалифицированных организаций по НТС, однако развитию такой практики препятствует недостаточное законодательно-нормативное урегулирование финансово-экономического механизма.

В настоящее время работы по НТС инженерных изысканий и проектирования оцениваются преимущественно по трудозатратному принципу, что не отражает в должной мере инженерную сложность, риск-ориентированный характер работ, необходимость применения специализированных расчетных моделей и значение НТС для надежности и безопасности объекта. Особенно это относится к сложным объектам метро, тоннелей и ЛРТ.

Еще более сложной является ситуация с НТСС, НТСЭ и НТСЛ. Потребность в отдельных работах на стадии строительства или эксплуатации, их объем, состав и срочность нередко уточняются уже по результатам обследования или мониторинга, при выявлении отклонений или при изменении фактических условий строительства. Это означает, что объем работ по НТСС, НТСЭ и НТСЛ не всегда можно полностью и однозначно определить заранее. Соответственно, возникает необходимость не только учитывать такие работы в общей структуре проекта, но и формировать механизм резервирования средств на их выполнение.

Именно поэтому необходимо выработать и нормативно закрепить механизм ценообразования по НТС, включая порядок учета затрат на НТС в сметной документации и резервирования средств, потребность в котором может уточняться непосредственно в ходе строительства или эксплуатации подземных объектов.

Предложения по развитию нормативного регулирования

Обобщение практики позволяет сформулировать ряд предложений по дальнейшему развитию нормативного регулирования НТС применительно к объектам подземного транспортного строительства.

Прежде всего, представляется целесообразным внести изменения в действующий Свод Правил СП 539, обеспечивающие его применение к подземным сооружениям, тоннелям, прежде всего транспортного назначения. При этом СП 539 должен быть дополнен специальными положениями, учитывающими специфику инженерно-геологических условий, стадийность строительства, особенности расчетных моделей, влияние на существующую инфраструктуру и задачи сопровождения на всех стадиях жизненного цикла объекта.

Необходимо также:

- закрепить стадийную структуру НТСИ, НТСП, НТСС, НТСЭ и НТСЛ как последовательную систему инженерного сопровождения жизненного цикла объекта;
- установить конкретные требования к программам НТСС и к порядку анализа результатов мониторинга, включая порядок инженерной интерпретации фактических данных и выработки решений при отклонениях;
- уточнить критерии допустимых дополнительных деформаций для путей, станций, эскалаторных тоннелей, вестибюлей и иных чувствительных сооружений, находящихся в зоне влияния нового строительства;
- нормативно закрепить порядок корректировки проектно-технологических решений по данным фактических наблюдений, поскольку именно эта функция сегодня становится одной из ключевых в реальной практике НТСС.

И, наконец, необходимо выработать и закрепить механизм ценообразования по НТС, включая учет затрат в сметной документации и резервирование средств на НТСС.

Ключевые слова

Научно-техническое сопровождение (НТСИ, НТСП, НТСС, НТСЭ, НТСЛ), подземные сооружения транспортного назначения (ПСТН), тоннелестроение, метрополитен, легкорельсовый транспорт (ЛРТ), геотехнический прогноз, мониторинг, нормативное регулирование, государственная экспертиза.

Список литературы

1. Бычков Н. Н., Дорман И. Я., Елгаев С. Г. и др. Научно-техническое сопровождение проектирования и строительства подземных сооружений, как фактор обеспечения единой научно-технической политики // Метро и тоннели. –2015. –№ 1. – с. 18–19.
2. Конюхов Д. С. Интерактивное управление технологическими параметрами проходки двухпутного перегонного тоннеля метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5. – С. 84–94. DOI: 10.25018/0236_1493_ 2022_5_0_84.
3. Kivluk V. P., Timerbulatov R. A., Konyukhov D. S. at al. Technological safety of underground construction in the conditions of dense urban development // Tunnelling into a Sustainable Future – Methods and Technologies- Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC 2025. Edited by Fredrik Johansson, Anders Ansell, Daniel Johansson, Johan Funehag and Jenny Norrman. Conference paper. P.p. 658-664. DOI: 10.1201/9781003559047.
4. Власов С. Н., Маковский Л. В., Меркин В. Е. Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов. – М.: ТИМР, 2000. 197 с.
5. Борисевич Е. Н., Данелия И. Н., Конюхов Д. С., Крымов Б. А. Научно-техническое сопровождение проектирования реконструкции инженерных коллекторов в Норильске // Инженерные системы и сооружения. Выпуск № 3 (53), 2023, с. 25–34.
6. Лапидус А. А., Топчий Д. В., Шевченко И. С. Концепция разработки модели программы по научно-техническому сопровождению жизненного цикла уникальных зданий с большим заглублением // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 3. С. 298–313. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.298-313.

Для связи с авторами

Русанов Владимир Евгеньевич
vlrusanov@mail.ru
Меркин Валерий Евсеевич
merkinve@nizta.ru
Лебедьков Александр Борисович
info@rus-tar.ru
Дорман Игорь Яковлевич
info@rus-tar.ru
Конюхов Дмитрий Сергеевич
gidrotehnik@inbox.ru

ЗАЩИТА ОБДЕЛКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЕЙ ОТ ВОДОПРОЯВЛЕНИЙ И ОТСЛОЕНИЙ НАПЫЛЕНИЕМ ПОЛИМОЧЕВИНЫ: ОПЫТ ЯПОНИИ

Водопроявления и отслоения (шелушения) бетонной обделки железнодорожных тоннелей представляют серьёзную угрозу безопасности движения. Одним из эффективных методов борьбы является напыление полимочевины. Лабораторные испытания и полевые наблюдения в заброшенном тоннеле и опыт применения в действующих тоннелях с водопроявлениями и неровностями поверхности обделки показали, что решающее значение для долговременной адгезии напыляемого материала имеет тщательная подготовка поверхности: устранение влаги перед нанесением грунтовки, применение водоотводящих трубок при точечных протечках, а также обеспечение проектной толщины напыления на участках с неровностями. Выявлены условия и схема принятия решений, позволяющие расширить область применения метода на тоннели со сложными эксплуатационными условиями.

При длительной эксплуатации железнодорожных тоннелей бетонная обделка подвергается воздействию неблагоприятных факторов (увлажнение, перепады температур, динамические нагрузки). В результате появляются отслоения защитного слоя, обнажается крупный заполнитель. Это напрямую влияет на безопасность движения поездов. Для предотвращения таких повреждений разработаны различные методы, среди которых всё большее распространение получает технология напыления полимочевины.

Метод заключается в нанесении на подготовленную поверхность обделки двухкомпонентной полимочевинной композиции, образующей эластичное, прочное и водостойкое покрытие. Предварительные исследования показали его высокую эффективность. Однако область применения этого метода действующими в Японии нормативами допускается только при отсутствии водопроявлений в рабочей зоне и при неровностях поверхности не более 10 мм. Такие жёсткие рамки препятствуют применению указанной технологии в большинстве реальных тоннелей, где протечки и неровности являются обычным явлением.

По результатам проведенных испытаний и реального опыта применения в действующих тоннелях в Японии разработаны практические рекомендации, позволяющие существенно расширить область применения рассматриваемого метода.

Лабораторные испытания образцов бетона без водонасыщения, с водонасыщением перед грунтовкой, с водонасыщением перед напылением полимочевины показали, что наличие влаги на поверхности перед нанесением грунтовки критически снижает прочность сцепления.

Водонасыщение перед нанесением грунтовки приводит к снижению прочности сцепления, определяемой как методом отрыва, так и методом отслаивания. При этом испытания на отслаивание показали более выраженное снижение, что указывает на его бóльшую чувствительность к влажностному фактору.

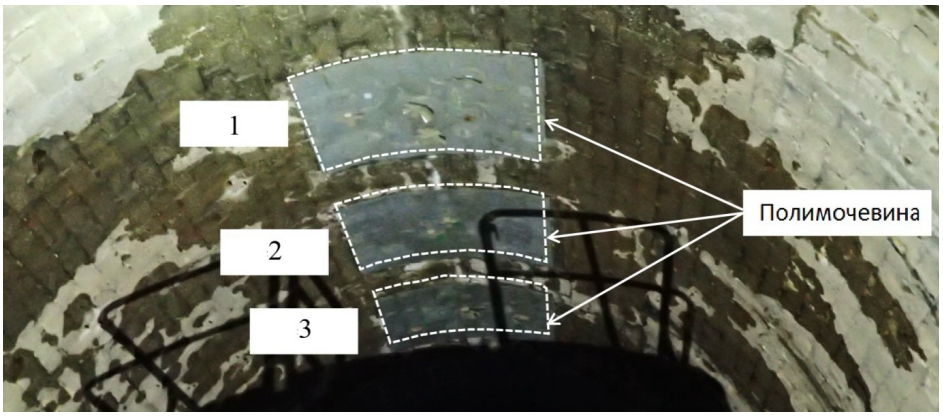


Рис. 1. Состояние обделки на момент испытаний: 1 – без водонасыщения; 2 – с водонасыщением перед грунтовкой; 3 –с водонасыщением перед напылением полимочевины

Анализ характера разрушения выявил принципиальные различия в разных случаях увлажнения.

При отсутствии влаги на поверхности грунтовка глубоко проникает в бетон, повышая его прочность, и разрушение в испытании на отрыв происходит по бетону на значительной глубине, а в испытании на отслаивание – по границе «грунтовка – полимочевина». При наличии влаги проникновение грунтовки затрудняется, образуется плохо отверждённый слой, и разрушение в обоих видах испытаний смещается на границу «бетон – грунтовка», причем глубина разрушения бетона в испытании на отрыв уменьшается.

В итоге установлено, что влажность поверхности обделки перед нанесением грунтовки выступает определяющим фактором. Для обеспечения требуемой адгезии (среднее значение – не менее 1,5 Н/мм^2 по методу отрыва) необходимо полностью устранить водопроявления и осушить поверхность (снизить влажность менее 8 %).

Для оценки влияния воды, поступающей со стороны обделки после нанесения покрытия, японскими исследователями проведены испытания в заброшенном тоннеле, где полимочевина была напылена в 2016 г. Испытания выполнялись через семь лет эксплуатации на участках, где до напыления были незначительные протечки и на сухих участках (контроль). Водопроявления сохранялись и в момент испытаний (рис. 1).

Результаты испытаний на отрыв показали, что во всех случаях прочность сцепления превышала нормативное значение 1,5 Н/мм^2 (средние значения от 2,6 до 4,4 Н/мм^2).

Несмотря на некоторый разброс, связанный с неоднородностью бетона, снижение адгезии со временем не наблюдалось. Более половины разрушений при испытании происходило по клеевому слою между насадкой и покрытием из-за высокой влажности в день испытаний, что позволяет предполагать, что фактическая прочность сцепления полимочевины даже выше зафиксированной.

Испытания на отслаивание также подтвердили стабильность адгезии: значения превышали норматив производителя (1,0 Н/мм^2) независимо от наличия протечек.

Важно, что даже через семь лет разрушения по границе «бетон – грунтовка», которые были характерны для лабораторных образцов с влажной поверхностью, отсутствовали во всех случаях. Это доказывает, что тщательная сушка перед нанесением грунтовки обеспечивает долговременную стойкость, даже если впоследствии вода поступает из-за обделки.

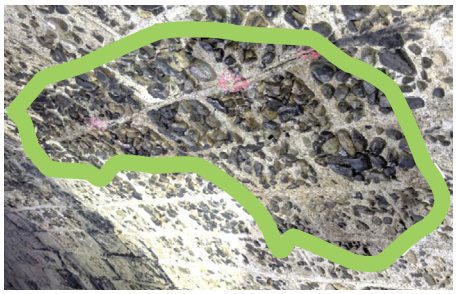


Рис. 2. Пример водопроявлений

На основе полученных данных метод был опробован в действующем тоннеле возрастом 96 лет с обделкой из бетонных блоков. Площадь обработки сводовой части составила 142 м². При предварительном обследовании выявлено 104 точки водопроявлений различного характера (рис. 2).

Исследования показали, что эффективность водоотводящих трубок в обделке тоннеля зависит от их расположения: на сводовой части (кроме замка) они обеспечивали полное осушение поверхности, а в замковой части из-за пологого уклона за обделкой наблюдалось некоторое увлажнение, но оно локализовалось в пределах нанесенного раствора и не распространялось на рабочую зону. После нанесения грунтовки и напыления полимочевины поверхность оставалась сухой, а прочность сцепления, проверенная на контрольных участках, составила в среднем 1,7 Н/мм² (минимальное значение 1,2 Н/мм²), что соответствует установленным требованиям.

По результатам исследований рекомендуется уже на стадии предварительного обследования выбирать соответствующие эффективные меры: при малом расходе воды достаточна временная остановка воды раствором, при значительном поступлении воды обязательна установка водоотводящих трубок. Это существенно расширяет область применения метода на тоннели с активными водопроявлениями.

Для оценки влияния неровностей были проведены лабораторные испытания на выталкивание фрагментов бетона с использованием образцов с гладкой поверхностью, с мелкими неровностями (глубина 1–2 мм) и с крупными неровностями (5–8 мм). Неровности в исследовании создавали искусственно.

Результаты показали, что наличие мелких неровностей увеличивает максимальную нагрузку по сравнению с гладкой поверхностью вследствие увеличения площади сцепления и в результате механического зацепления. При крупных неровностях максимальная нагрузка снижалась, однако все образцы удовлетворяли требованиям (нагрузка более 1,5 кН при перемещении 10 мм). Снижение прочности при крупных неровностях объясняется неравномерностью толщины напыления: в углублениях слой может быть тоньше, что создаёт локальные ослабленные зоны.

Таким образом, для обеспечения надежности на неровных поверхностях необходимо гарантировать проектную толщину напыления, в том числе посредством нанесения более толстого слоя или дополнительного напыления в местах углублений.

Практическая реализация метода выполнена в тоннеле возрастом 87 лет с обделкой из монолитного неармированного бетона. Участок стены площадью 15 м² имел обнажённый крупный заполнитель и неровности глубиной 10–20 мм в продольном направлении. Водопроявления отсутствовали.

Поскольку глубина неровностей превышала допускаемые 10 мм, а ожидаемая зона отслоения была локальной (размером с крупный заполнитель), было принято решение о применении метода с усиленной подготовкой. Слабые участки удалили механически, грунтовку наносили с повышенным расходом (в 2,1 раза выше стандартного) для полного покрытия всех неровностей, а полимочевину напыляли более толстым слоем (расход в 1,9 раза выше нормы).

Контрольные испытания на отрыв дали среднюю прочность 1,9 Н/мм² при минимальной 1,2 Н/мм², что соответствует нормативным требованиям, действующим в стране. Покрытие прочно связало обнаженные зёрна заполнителя, предотвратив их возможное выпадение. На основе этого опыта сформулированы дополнительные условия применимости для случаев, когда ожидаемая масса отслоения небольшая (соизмерима с отдельными зёрнами заполнителя) и отсутствуют арматурные элементы, способствующие развитию отслоений. При соблюдении этих условий допустимо применение метода даже при неровностях более 10 мм.

В итоге экспериментально доказано, что влага на поверхности препятствует проникновению грунтовки в бетон, ведет к снижению адгезии и изменению характера разрушения. Однако если обеспечить сухость поверхности на этапе грунтования (посредством остановки притока воды, сушки нагревателями или установкой водоотводящих трубок), последующее поступление воды из-за обделки уже не оказывает негативного влияния даже через семь лет. Это важнейший практический вывод: ключевым является подготовительный этап, а не полное устранение протечек на весь срок службы.

Вопреки ранее существовавшим опасениям, небольшие неровности (до 5–8 мм) не только не снижают, но даже повышают несущую способность посредством увеличения площади контакта и механического зацепления. При более глубоких неровностях (10–20 мм) надежность обеспечивается увеличением толщины напыления и тщательным нанесением грунтовки. Предложенные в работе условия (малая масса ожидаемого отслоения, удаление слабых участков, отсутствие корродирующих включений) позволяют применять описанный метод на таких поверхностях.

На основании выполненных лабораторных и натурных исследований, а также опыта применения метода напыления полимочевины в действующих железнодорожных тоннелях с водопроявлениями и неровностями поверхности установлено следующее.

1. Высокая влажность поверхности обделки в момент нанесения грунтовки является критическим фактором, снижающим прочность сцепления. Обязательными условиями являются устранение водопроявлений и сушка поверхности (влажность не более 8 %).
2. При соблюдении указанного в п. 1 требования последующее поступление воды из-за обделки не приводит к снижению адгезии в долгосрочной перспективе (подтверждено семилетними испытаниями).
3. Для тоннелей с множественными водопроявлениями эффективным решением является установка водоотводящих трубок, обеспечивающих сухость рабочей зоны.
4. Неровности поверхности глубиной до 8 мм не ухудшают, а при определенных условиях даже улучшают сцепление покрытия. При глубине неровностей до 20 мм метод применим при условии увеличения толщины напыления, тщательной подготовки поверхности и выполнении дополнительных критериев (малая масса ожидаемого отслоения, отсутствие арматуры, удаление слабых участков).

В целом полученные результаты позволяют существенно расширить область применения метода напыления полимочевины, включив в нее тоннели с активными водопроявлениями и неровностями поверхности, ранее считавшиеся непригодными для применения рассмотренной технологии.

Ключевые слова

Железнодорожный тоннель, обделка, отслоения, полимочевина, напыление, прочность сцепления, водопроявления, неровности поверхности, адгезия.

Источник: Kazuhide YASHIRO, Atsuya OE, Keisuke SHIMAMOTO, Tomoya USHIDA, Masayuki SUZUKI. Applicable Conditions for Polyurea Resin Spraying Method for Water Leakage and Uneven Tunnel Lining Surfaces // Quarterly Report of RTRI, 2026, Vol. 67, No 1, pp. 24–31. https://doi.org/10.2219/rtriqr.67.1_24 https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtriqr/67/1/67_rtriqr.67.1_24/_article/-char/en.

Переводчик и составитель В. В. Космин, Российская академия транспорта

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ РАДИАЛЬНЫХ СТЫКОВ СЕГМЕНТОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

ACCOUNTING FOR THE INFLUENCE OF RADIAL JOINTS OF SEGMENTS UNDER SEISMIC ACTION: COMPREHENSIVE ANALYSIS AND NUMERICAL MODELING

М. А. Маринченко, инженер I категории Архитектурно-строительного отдела, АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»
M. A. Marinchenko, Lenmetrogiprotrans Scientific Research Design and Survey Institute

В статье рассмотрено влияние радиальных стыков на работу сборной железобетонной обделки тоннелей при сейсмических воздействиях. Выполнено исследование влияния учета радиальных стыков в сборном кольце в модели сплошной среды. Показано, что учет податливости стыков и вертикальной компоненты сейсмического воздействия существенно влияет на деформативность кольца, распределение усилий и напряженное состояние болтовых соединений. Проанализированы механизмы раскрытия стыков, декомпрессии уплотнительных прокладок и снижения несущей способности соединений при циклическом нагружении. Особое внимание уделено критериям предельных состояний: показано, что для сборных обделок определяющими являются не предельные деформации арматуры, а раскрытие швов, локальное повреждение бетона и потеря герметичности. На основании анализа реакций в контактных элементах обоснована необходимость применения расчетных схем, учитывающих дискретность обделки и динамический характер сейсмического воздействия.

The article discusses the influence of radial joints on the performance of precast reinforced concrete tunnel linings under seismic loads. The study examines the impact of accounting for radial joints in a precast ring using a continuous medium model. It is shown that accounting for the flexibility of joints and the vertical component of seismic loads significantly affects the deformability of the ring, the distribution of forces, and the stress state of the bolt connections. The mechanisms of joint opening, decompression of sealing gaskets, and reduction of the bearing capacity of connections under cyclic loading are analyzed. Special attention is given to the criteria for limiting states, and it is demonstrated that for precast linings, the critical factors are not the ultimate deformations of the reinforcement, but rather the opening of joints, local damage to concrete, and loss of tightness. Based on the analysis of reactions in the contact elements, the need for using computational models that take into account the discreteness of the lining and the dynamic nature of seismic loads is justified.

Непрерывное развитие подземной транспортной инфраструктуры сопровождается не только увеличением объемов тоннельного строительства, но и освоением территорий со сложными инженерно-геологическими, гидрогеологическими и сейсмическими условиями. В таких районах особенно широко применяются сборные железобетонные обделки, монтируемые из отдельных сегментов при щитовой проходке. Характерным примером подобных объектов является тоннельный комплекс автомобильной дороги «Обход Адлер», строительство которого осуществляется в сложных природно-геологических условиях района с высокой сейсмической активностью. Для таких конструкций определяющим является не только напряженно-деформированное состояние самих сегментов, но и работа радиальных стыков, через которые передаются кольцевые усилия, изгибающие моменты и сдвигающие воздействия. В отличие от сплошной обделки, сегментное кольцо работает как дискретная система, в которой суммарная жесткость формируется сочетанием жесткости железобетонных элементов, контактного взаимодействия по швам и условий опирания на грунтовый массив [1–4].

При расчетах тоннельных обделок в сейсмических районах на практике по-прежнему широко применяются упрощенные подходы, основанные на представлении кольца как эквивалентной сплошной системы со сниженной изгибной жесткостью. Такие схемы удобны на стадии предварительных оценок, однако они не позволяют в явном виде проследить перераспределение усилий между сегментами и стыками, а также установить моменты декомпрессии отдельных швов. Между тем именно локальное изменение контактных реакций, раскрытие стыков и связанное с этим падение вращательной жесткости во многом определяют эксплуатационную надежность сборной обделки при динамических воздействиях [2, 3, 5].

Актуальность задачи определяется тем, что сейсмический отклик кольца формируется за счет совместной работы системы «грунтовый массив – обделка», а характер деформирования зависит не только от интенсивности воздействия, но и от конструктивной схемы кольца, числа стыков, их податливости и расположения по контуру. Для инженерной практики наибольший интерес представляет возможность получить расчетные зависимости, позволяющие оценить изменение нормальных контактных реакций, изгибающих моментов, продольных и поперечных сил, а также овализацию кольца при нарастании расчетного воздействия. В данной статье рассматривается именно такая постановка задачи, ориентированная на анализ работы сегментной железобетонной обделки в двумерной расчетной схеме [4–7].

Таблица

Физико-механические характеристики элементов

Характеристики	Грунт	Бетон В45	Арматура	Стык сегментов	Контакт крепь – массив
Плотность ρ, кН/м^3	22,5	25	69	-	-
Модуль деформации E, МПа	100	36 000	206 000	36 000	19800*
Коэффициент Пуассона ν	0,30	0,20	0,20	–	–
Коэффициент температурного расширения α, 1/°C	$1\cdot10^{-5}$	$1\cdot10^{-5}$	$1\cdot10^{-5}$	–	–
σ_0^+, МПа	–	1,5	499	–	–
σ^+, МПа	–	1,5	499	–	–
ε^+	–	0,00031	0,025	–	–
σ_0^-, МПа	–	−25	−499	–	–
σ^-, МПа	–	−25	−499	–	–
ε^-	–	−0,0035	−0,025	–	–
Нормальная жесткость, МН/м	–	–	–	10800	10000
Касательная жесткость, МН/м	–	–	–	3240	3000
Поворотная жесткость, МН·м	–	–	–	20	–
Предельное значение сжатия/растяжения, МН	–	–	–	400/0,001	−/0
Предельное значение сдвига, МН	–	–	–	0,15	–
Предельное значение поворота, МН·м	–	–	–	0,3	0

Примечание.

* - модуль упругости для бетона В 7,5, характерный для тампонажа

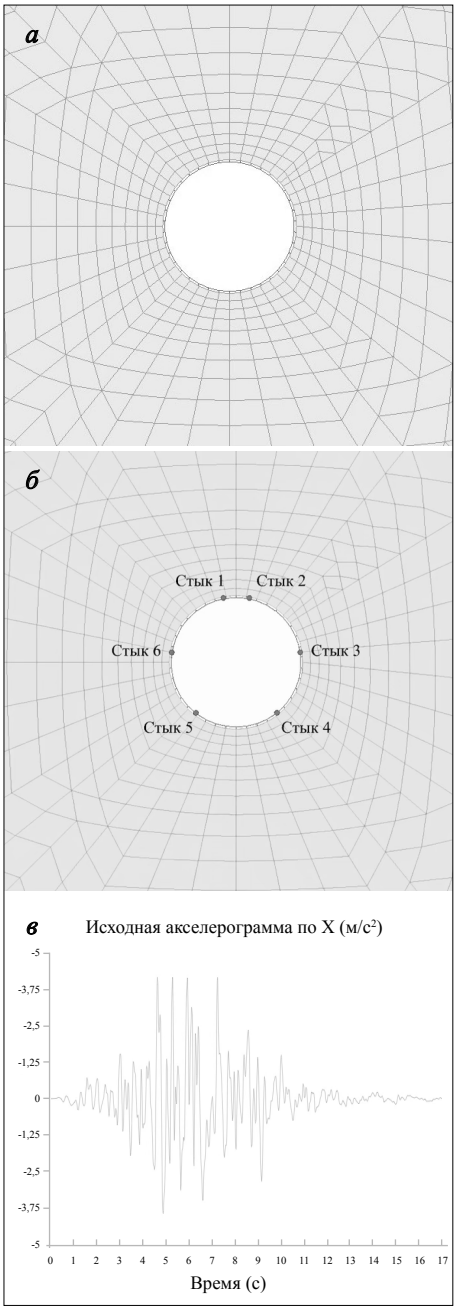


Рис. 1. Общий вид расчетных схем с жестким кольцом (а) и с учетом стыков (б), с графиком акселерограммы для сейсмического воздействия (в)

Постановка задачи и принципиальная расчетная схема

Для анализа поведения кольцевых обделок в сейсмоопасных районах были смоделированы две расчетные задачи. В одной модели кольцо из сборных сегментов рассматривалось как сплошное сечение с нелинейными характеристиками бетона и арматуры, а другая модель с теми же нелинейными свойствами железобетонной обделки содержала элементы, описывающие жесткость радиальных стыков согласно модели Янссена [2]. Данная модель официально закреплена в качестве учета податливости радиальных стыков в руководстве

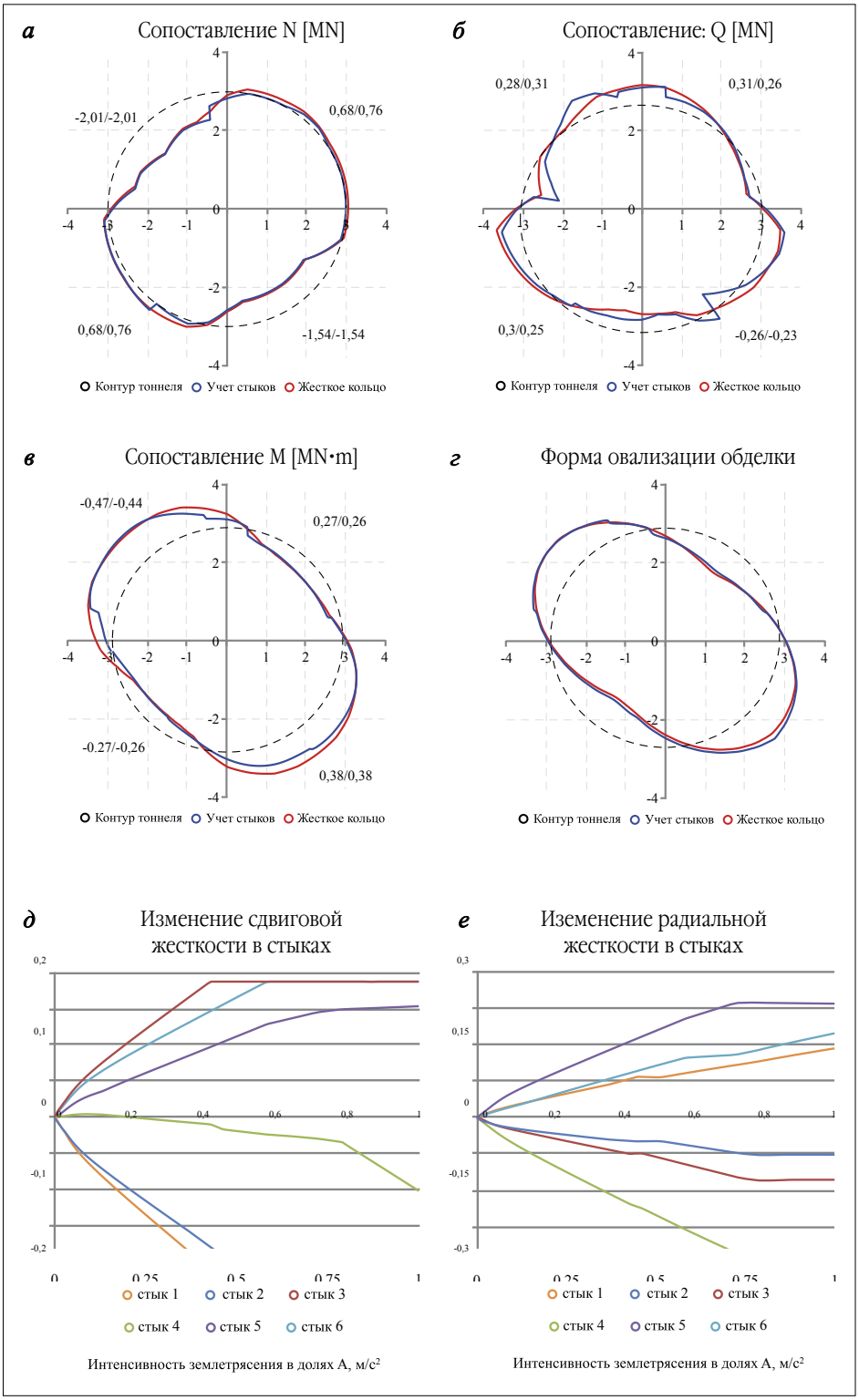


Рис. 2. Графики изменения внутренних усилий N, Q, M (а, б, в); перемещений обделки по контуру (г); изменение сдвиговой и поворотной жесткости (д, е). Нумерация стыков соответствует нумерации на рис. 1

ITA-AITES WG2 (2019) [7]. Характеристики элементов и значения радиальной жесткости стыков приведены в табл.

На рис. 1 отображены схемы сплошного (а) и сегментного кольца с учетом радиальных стыков с заданной жесткостью. Также показана однокомпонентная акселерограмма ускорений, которая непосредственно прикладывалась к расчетной схеме, накладывая на нее закон перемещений всей модели по линейно-спектральному методу через спектр ускорений по расчетному подходу Pushover. Значение данной акселерограммы эквивалентно 9 баллам сейсмического воздействия. Методика наложения перемещений схемы навязывалась путем повышения коэффициента до момента разрушения элементов крепи. Граничные условия для модели заданы жестким защемлением в основании и запретом перемещения по вертикали в верхней границе моделей.

Взаимодействие внешнего контакта контура крепи с массивом задавалось с помощью элемента односторонней связи, учитывающего эффект отлипания крепи от массива [1]. Задавались предельные значения нормальной силы элемента при сжатии и касательной силы при сдвиге с понижающим коэффициентом трения. Значения характеристик материалов приведены в табл.

В качестве контролируемых параметров приняты нормальные и поворотные контактные реакции в стыках, продольные силы N, изгибающие моменты M, поперечные силы Q и перемещения характерных точек кольца. Анализ выполняется для нескольких уровней воздействия, что позволяет проследить не только максимальные значения усилий, но и саму эволюцию напряженно-деформированного состояния. На рис. 1 приведена принципиальная расчетная схема, отражающая геометрию кольца, условия взаимодействия с грунтом и расположение характерных зон контроля.

Методика численного моделирования

Численное моделирование выполнено методом конечных элементов в плоской постановке. Грунтовый массив и обделка рассматривались как совместно работающая система, в которой деформации массива вызывают изменение формы кольца и соответствующее перераспределение усилий в сегментах и стыках. Принятая схема ориентирована не на локальную детализацию каждого конструктивного элемента, а на получение инженерных значимых зависимостей между уровнем воздействия и откликом обделки в характерных сечениях.

Особое внимание уделено корректному описанию работы радиальных стыков. В рамках расчетной модели они учитываются не как идеальные шарниры и не как абсолютно жесткие соединения, а как элементы с конечной податливостью. Такой подход соответствует современным представлениям о механике сегментных колец, согласно которым глобальная деформативность обделки в значительной степени определяется именно вращательной жесткостью стыков [2, 5, 6].

Для анализов результатов расчетов определялась общая критическая величина составляющей сейсмической нагрузки на схемы. Далее строились эпюры нормальных сил, изгибающих моментов и перерезывающих сил и сопоставлялись между собой, вдобавок оценивались формы овализации колец и их сопоставление. После обработки результатов выводился критерий, определяющий критический параметр для каждого типа кольца.

Анализ результатов исследований

Полученные результаты показывают, что уже на начальных уровнях воздействия напряженно-деформированное состояние сборной обделки теряет исходную симметрию, характерную для статического обжатия кольца. При нарастании воздействия в одних стыках наблюдается увеличение нормальных контактных реакций, тогда как в других происходит их снижение, вплоть до перехода в состояние частичной декомпрессии.

Такое перераспределение связано с изменением формы кольца и развитием овальности поперечного сечения. В результате наиболее нагруженные зоны смещаются со «средних» участков сегментов в область примыкания к стыкам, а работа кольца приобретает ярко выраженный неравномерный характер.

Анализ эпюр внутренних усилий показывает, что продольная сила N изменяется по контуру сравнительно плавно и в большей степени отражает общий уровень обжатия кольца грунтовым массивом при сейсмическом воздействии. В отличие от нее изгибающий момент M и поперечная сила Q существенно чувствительнее к локальной податливости стыков. По мере снижения жесткости отдельных швов максимумы моментов смещаются на соседние участки сегментов, формируя характерную «ломаную» картину распределения. С инженерной точки зрения это означает, что оценка прочности только по усредненному эквивалентному кольцу может приводить к недоучету локальных концентраций напряжений и, как следствие, к ошибочной интерпретации наиболее опасных зон [2, 3, 5].

Отдельного внимания заслуживает изменение контактных реакций в радиальных стыках. При возрастании воздействия часть швов продолжает работать в режиме устойчивого обжатия, тогда как для стыков, расположенных в лотковой зоне контура (стыки № 3, 4, 5), характерно снижение реакций и потеря части площади контакта (стыки № 1, 2, 3 и 6).

Для сборной обделки это принципиально важно, поскольку именно в этот момент возрастает вероятность раскрытия шва, локального смятия бетона у кромок и ухудшения условий работы уплотняющих элементов. Следовательно, при интерпретации результатов расчета необходимо контролировать не только усилия в сегментах, но и изменение реакций в стыках как самостоятельный критерий работоспособности конструкции [1, 5, 7].

Выполненный анализ подтверждает, что в 2D-постановке можно выявить основные закономерности деформирования кольца и получить наглядные зависимости для инженерной оценки. Наиболее информативными оказались графики изменения N, M, Q и контактных реакций по контуру, а также кривые перемещений характерных точек кольца.

Таким образом, для сборной тоннельной обделки в условиях сейсмического воздействия определяющим является не столько абсолютный уровень усилий в отдельном сегменте, сколько совокупность признаков, характеризующих работу кольца как дискретной системы. К таким признакам относятся изменение овализации, смещение максимумов изгибающих моментов, снижение нормального обжатия в радиальных стыках и нарастание неравномерности эпюр усилий. С практической точки зрения это означает необходимость ориентироваться не только на традиционные критерии прочности железобетона, но и на параметры, непосредственно связанные с работой швов и сохранением целостности стыковых зон. Результаты обработанных расчетов приведены на рис. 2.

Выводы

1. Для оценки напряженно-деформированного состояния сборной железобетонной обделки в условиях сейсмического воздействия принципиальное значение имеет учет жесткости радиальных стыков в нелинейной постановке, так как в рассмотренных расчетах потеря устойчивости крепи из-за разрушения связей достигается раньше, чем разрушается основной материал крепи. Для железобетонных сегментов коэффициент интенсивности сейсмического воздействия составил 0,86, тогда как разрушение радиальных связей наблюдалось при коэффициенте 0,79. Тем самым кольцо потеряло устойчивость от разрушения связей в стыках, а не от полного разрушения материала блочной обделки.
2. Выполненное численное моделирование в 2D-постановке показало, что при возрастании сдвигового сейсмического воздействия работа кольца становится существенно несимметричной: часть стыков переходит в режим повышенного обжатия, тогда как в других стыках происходит снижение контактных реакций, что приводит к раскрытию швов.
3. Наиболее чувствительными к изменению податливости стыков расчетными параметрами являются изгибающий момент, поперечная сила и нормальные контактные реакции. Поэтому при анализе результатов целесообразно рассматривать не только экстремальные значения усилий, но и форму их распределения по контуру кольца.
4. Полученные зависимости подтверждают, что для инженерной оценки сейсмостойкости сборной обделки необходимо контролировать совместно деформации кольца, усилия в сегментах и реакции в стыках. Такой подход позволяет перейти от усредненной оценки эквивалентной жесткости к более корректному описанию реальной работы сегментной системы.

Ключевые слова

Радиальный стык, сейсмическое воздействие, сборная обделка, жесткость, кривая момент-поворот, критерий разрушения, уплотнительная прокладка.

Radial joint, seismic action, segmental lining, stiffness, moment-rotation curve, failure criterion, sealing gasket.

Список литературы

1. Безродный К. П., Лебедев М. О. О нагрузках от горного давления на обделки тоннелей закрытого способа работ // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 649–653. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.649.
2. Карасев М. А., Нгуен Т. Т. Метод прогноза напряженного состояния обделки подземных сооружений квазипрямоугольной и арочной форм // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 807-821. DOI: 10.31897/PMI.2022.17.
3. Господариков А. П., Нгуен Чи Тхань. О некоторых подходах определения напряженного состояния обделок тоннелей метрополитена Ханоя с учетом влияния сейсмических волн землетрясений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 6. С. 244–252.
4. Гуськов, И. А. Численное исследование сейсмостойкости сборных тоннельных обделок кругового очертания / И. А. Гуськов, Е. А. Пестрякова // Транспортные сооружения. – 2023. – Т 10. – № 2. – URL: https://t-s.today/PDF/02SATS223.pdf. – DOI: 10.15862/02SATS223. (дата обращения: 26.04.2026).
5. Do, ngoc. (2013). 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior. Tunnelling and Underground Space Technology. https://doi.org/10.1016/J.TUST.2013.03.008.
6. Tabchai, C. A modelling approach for joint rotations of segmental concrete tunnel linings. https://doi.org/10.1016/J.TUST.2017.04.019.
7. ITA Working Group 2. Guidelines for the Design of Segmental Tunnel Linings. ITA Report No. 22. Geneva: ITA-AITES, 2019. 60 p.

Для связи с автором

Маринченко Михаил Александрович
mmarinchenko@lmgt.ru

ИЗУЧЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА ТОННЕЛЕЙ В Г. ЧЕЛЯБИНСКЕ, СООРУЖАЕМЫХ ЩИТОВЫМ СПОСОБОМ

В. Г. Штыров, к. г.-м. н., начальник отдела инженерной геологии, АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

Статья посвящена изучению и анализу геологического строения массива горных пород для оценки инженерно-геологических условий строительства тоннелей в г. Челябинске, сооружаемых щитовым способом (ТПМК). Рассмотрено геологическое строение территории проектирования, сейсмичность, инженерно-геологические условия строительства и условия проходки тоннелей. Приведены особенности и результаты геофизических исследований при решении задач, связанных с получением качественных характеристик горного массива, а также уточнением положения и параметров тектонических нарушений.

Геологический фактор, включающий в себя комплекс инженерно-геологических, гидрогеологических, сейсмических, геоморфологических и тектонических данных, является, как правило, наиболее обширной и важной частью проблемных вопросов инженерно- геологических изысканий. Он определяет условия проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений, а также влияет на безопасность и долговечность тоннельных объектов.

Тоннели относятся к категории уникальных сооружений. Это технически сложный и дорогостоящий элемент строительной отрасли экономики страны. В этой связи в современных условиях придается исключительно большое значение использованию в подземном строительстве наиболее совершенных, научно обоснованных и экономичных технических решений в сфере конструкций, технологий производства работ, комплексной механизации и автоматизации строительства.

Инженерно-геологические изыскания для проектирования и строительства подземных сооружений требуют, как правило, нестандартного и индивидуального подхода, который должен учитывать как особенности самого объекта, так и перечень и сложность вопросов, на которые необходимо ответить по результатам изыскательских работ.

Данные о свойствах горных пород, выявление потенциально опасных геологических процессов, как природных, так и вызванных техногенным влиянием человека на подземное пространство, определяют индивидуальный подход к каждому проекту.

Анализ результатов инженерно-геологических изысканий в процессе строительства и эксплуатации подземных сооружений, выполняемый АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» на протяжении нескольких десятилетий, позволяет выделить следующие особенности, требующие обязательной оценки:

- состояние массива горных пород, вмещающих подземное сооружение и являющихся основанием для размещения строительных площадок;
- свойства горных пород с учетом их физического и напряженного состояния (естественного и при взаимодействии с горными работами и сооружениями);
- гидрогеологические условия и степень обводненности горных выработок;
- прогноз возникновения и развития горно-геологических явлений с учетом способов проходки, влияния подземных вод и т. д.

В 2026 г. институт после многих лет вернулся к проектированию метротрамвая в г. Челябинске, геологический отдел приступил к изучению и анализу инженерно-геологических условий территории города по объекту «Корректировка обоснования инвестиций «Строительство трамвайной линии по улице Дзержинского от железнодорожного вокзала до улицы Гагарина».

В рамках корректировки проекта рассматривается вариант подземного пересечения железнодорожных путей с помощью тоннеля, сооружаемого щитовым способом (ТПМК). Тоннель предназначен для пропуска трамвайной линии, а также для размещения инженерных коммуникаций (кабелей) от трансформаторной подстанции. По трассе планируется строительство тоннельного комплекса из двух тоннелей протяженностью от портала до портала около 1152 м.

Территория проектирования характеризуется сложными и очень сложными геологическими условиями. В связи с этим изучение инженерно-геологических условий территории в соответствии с современными требованиями инженерной геологии является актуальной задачей, направленной на повышение безопасности и эффективности строительных работ.

Знание неоднородности и изменчивости инженерно-геологических условий – это научная основа для решения прикладных задач при проектировании, строительстве и безопасной эксплуатации транспортных сооружений. Поскольку именно инженерно-геологические условия определяют сложность строительства инженерных сооружений в транспортном строительстве, то недостаточно полное изучение и учет инженерно-геологических и гидрогеологических условий района строительства может привести к негативным последствиям.

В геолого-структурном отношении район участка располагается в пределах Кочкарско-Адамовской структурно-формационной зоне (СФЗ). Принципы выделения формаций на Урале разработаны большим коллективом геологов, сформулированы И. Д. Соболевым (1970) и А. П. Сиговым (1969), и обобщены В. В. Стефановским по мезозойским и кайнозойским формациям [1, 2].

Инженерно-геологические условия района проектирования

Стратиграфия района работ

- *Нижнепротерозойская эонотема*

Городская толща (PR_1?gr) сложена биотитовыми и амфибол-биотитовыми гнейсами с прослоями плагиогнейсов, слюдистых кварцитов, биотит-амфиболовых гнейсов и амфиболитов. Мощность толщи по геологическим построениям 1500 м. Возраст городской толщи принят раннепротерозойским.

- *Палеозойская эратема*

Миасская толща (C_1ms) установлена в Копейской СФЗ и сложена полимиктовыми песчаниками, гравелитами, конгломератами, алевролитами, аргиллитами, известняками. Мощность толщи 1000–1500 м. Возраст миасской толщи принимается как ранний карбон, визейский век.

Федоровская толща (C_2fd) установлена в северо-западной части Копейской СФЗ. Представлена серыми известняками (до

95 %), с прослоями полимиктовых песчаников и алевролитов. Мощность толщи 900–1100 м. Возраст федоровской толщи определен как средний карбон, башкирский век.

Ухановская толща (C_2uh) установлена в пределах Копейской СФЗ. Представлена пестроцветными полимиктовыми гравелитами, песчаниками, алевролитами, аргиллитами, известняками, часто доломитизированными. Мощность толщи оценивается в 800–1000 м. Возраст ухановской толщи определен как средний карбон, московский век.

- *Кайнозойская эратема*

Наурзумская свита (N_1^{1-2nr}) распространена по всей площади, часто обнажена, представлена каолиновыми глинами: вверху пестроцветными, ниже – серыми, светло-серыми до белых, которые через переслаивание вниз по разрезу сменяются разнозернистыми, глинистыми, кварцевыми песками, с песчано-гравийно-галечным материалом в основании. Мощность отложений варьирует от 1,5 до 15 м. Возраст отложений по их положению в разрезе, принят как ранний/средний миоцен.

Светлинская свита (N_1^{3sv}) распространена по площади на участках, приуроченных к тальвегам и бортам современных логов. Свита представлена преимущественно глинами пестроцветными (охристо-желтыми, с серыми и кирпично-красными пятнами и разводами), с различной примесью песчаного материала, иногда с гравием, галькой и мелким щебнем кварца, с железисто-марганцовистым бобовником и карбонатными конкрециями. Мощность свиты от 0,10 до 10 м. Возраст ее принят как позднийміоцен.

Кустанайская свита (N_2^{2ks}) распространена на всей площади в виде изолированных участков различных размеров, приуроченных к склонам долин, логов и озерных чаш. Свита представлена преимущественно глинами буровато-коричневыми, коричневыми, зеленовато-серыми с различным количеством полевошпат-кварцевого материала, иногда со щебнисто-гравийно-галечным материалом, с карбонатными конкрециями и железисто-марганцовистым бобовником. Мощность свиты до 14 м. Возраст ее принят как средний плиоцен.

- *Четвертичная система*

Элювиально-делювиальные отложения (edII–III) представляют собой элювий, незначительно перемещенный вниз по склону. Налегают они с большим стратиграфическим перерывом на любые нижележащие породы. Вниз по склону фациально замещаются одновозрастным делювием и отложениями верхнего неоплейстоцена. Мощность до 1,5 м.

Североуральский надгоризонт. Делювиальные образования (dIIIsv) покрывают склоны возвышенностей на междуречьях, представлены бурыми глинами и суглинками, со щебнем подстилающих пород и редким гравием полимиктового состава. Мощность делювия до 3 м. Возраст – поздний неоплейстоцен.

Полигенетические образования (L,epIIIsv) представлены известковистыми суглинками, супесями лессовидного облика. Залегают на более древних образованиях на пологих склонах. Мощность до 3 м. Возраст образований принят как поздний неоплейстоцен.

Аллювиальные отложения камышловской и режевской террас нерасчлененных (aIII) представлены полимиктовыми гравийными песками и алевритами с прослоями глин, суглинками, супесями. Они формируют аккумулятивную террасу долин рек Миасс, Зюзелга, Сухарыш. Мощность аллювия до 10 м. Возраст поздний неоплейстоцен.

Аллювиальные отложения (aHgr) распространены в руслах современных крупных рек и представлены галечниками, гравелитами, полимиктовыми песками, илистыми глинами руслового и пойменного комплекса. Мощность отложений до 10 м. Возраст определен как голоценовый.

Делювиально-аллювиальные отложения (daHgr) слагают русла современных мелких рек и притоков. Отложения представлены песками гравийными с галькой, глинистыми песками, глинами. В обломочном материале преобладает кварц. Мощность до 5 м.

Венчают разрез четвертичных отложений техногенные образования (tHgr2) различной мощности, которые сложены насыпным грунтом чёрного, темно-серого, бурого цвета. Он представлен механической смесью перемятого суглинка, почвы, дресвы, щебня, с включением строительного мусора, кирпичных обломков. Максимальная их мощность (27 м) – у отвалов Коркинского карьера.

Интрузивный магматизм

Интрузив представлен Смолинским диорит-тоналитовым комплексом ($\delta C?s$) мигматитов, диоритогнейсов и кварцевых диоритов нерасчлененных, слагающим небольшие тела в западной частях полиформационного Челябинского плутона.

Породы комплекса сложно дислоцированы, испытали позднейший метасоматоз под влиянием гранитоидных интрузивных комплексов и интенсивные тектонические деформации, особенно в зоне Челябинского разлома. Возраст смолинского комплекса принят кембрийским.

Ольховский гранит-лейкогранитовый комплекс ($\gamma;l\gamma,\gamma\pi P_1 o l$). Массив сложен среднезернистыми порфировидными и крупнозернистыми биотитовыми гранитами. Жильные породы представлены гранит-порфирами и лейкократовыми гранитами. Возраст комплекса принят как раннепермский.

Кременкульский гранит-лейкогранитовый комплекс ($\gamma;\gamma\pi P2kr$) гранитов, лейкогранитов. Граниты обычно светло-розовые биотитовые средне- и крупнозернистые, реже порфировидные и пегматоидные, мелкозернистые. Граниты в отдельных зонах грейзенизированы и калишпатизированы. Возраст комплекса принят позднепермским.

Тектоническое строение

В региональном плане площадь расположена в пределах структур Челябинской континентальной палеорифтовой системы: ее западного фланга (восточная подзона Кочкарско-Адамовской СФЗ) и осевой части (Копейская СФЗ). Границей этих структур является зона Челябинского разлома. В Копейской СФЗ выделены две структуры, разделенные Западно-Копейским разломом: Ухановский блок – система чередующихся горстов и грабенов, и Челябинский грабен.

Главной структурной особенностью площади является ее блоковое строение, создаваемое системами рифтогенных субмеридиональных разломов и парагенезисом сдвиговых нарушений северо-восточного, северо-западного и северо-северо-западного направлений, формирующихся в зоне активного динамического влияния трансформного разлома северо-западного простирания, осевая часть которого прослеживается как Кременкульско-Азбаевский линеамент. С крутыми разрывными дислокациями парагенетически связаны пологие тектонические структуры.

Наиболее долгоживущей структурой на участке проектируемых сооружений является глубинный Челябинский разлом, входящий в состав Кременкульско-Азбаевского структурного шва.

В качестве внутриплитного орогена Южный Урал оформился после позднекиммерийских событий, которые привели к закрытию триасово-юрских рифтовых бассейнов и к интенсивной деформации слагающих их комплексов. Закрытие рифтовых бассейнов на Урале происходило синхронно с отмиранием подобных структур во всем пространстве. Исследованный участок приурочен к наиболее пережатому сегменту Челябинской рифтовой зоны, исходя из его строения, анализа как региональных данных, так и данных об истории макродеформаций непосредственно в шовной зоне. Деформационной обстановкой для позднеюрских движений предполагается левосторонняя транспрессия [1,2].

Новейшее (неотектоническое) преобразование региона связывалось с плиоцен-четвертичными поднятиями, максимальная амплитуда которых по представлениям В. А. Сигова (1965) не превышала 200–300 м. По мнению большинства исследователей, того времени, новейший орогенез не привел ко сколько-нибудь интенсивной структурной перестройке региона.

Тем не менее, свидетельства новейших деформаций на Урале известны уже несколько десятилетий. Наиболее выразительные среди них следующие:

- описанные Шабалиной молодые надвиги с амплитудами в сотни метров, приуроченные главным образом к зоне восточного контакта «палеозойского» Урала;
- мощные накопления раннечетвертичных грубых галечников в бассейне Тобола, описанные Лидером (по мнению этого исследователя, они фиксируют быстрое поднятие Урала);
- обнаруженные за последние годы разрывно-складчатые деформации молодых четвертичных образований в долинах Восточно-Уральского плато и др.

В целом, по оценкам В. П. Трифонова (1965), скорость современных поднятий в сечении Южного Урала 4–5 мм/год, или около 1 км за четвертичное время.

Современные вертикальные движения, зафиксированные повторными нивелировками по линиям железных дорог, в центральной части Южного Урала, составляют 3–5 мм/год.

Неотектонические движения являются ведущим фактором морфогенезиса.

На исследованной площади отмечаются отрицательные микроформы рельефа, представленные логами, приуроченными к зонам разломов Челябинского парагенезиса и литологическим контактам. В их тальвегах часто наблюдаются заболоченные участки и сезонные водотоки.

Сейсмичность на южном Урале выражена слабо, поскольку масштабные процессы в глубинных частях земной коры завершены, но землетрясения все-таки происходят. Очаги большинства из них располагаются на западном склоне Уральских гор. Интенсивность их не превышает 5–6 баллов по шкале Рихтера, а до Челябинска доходят лишь затухающие колебания.

Интенсивность сейсмических воздействий в баллах согласно приложению А СП14.13330.2018 и на основе комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2015 для района строительства принимается ОСР-2015-А 10 %; ОСР-2015-В 5 % – 5 баллов; ОСР-2015-С 1 % – 5–6 баллов, т. е. 5 баллов.

Результаты инженерно-геологических изысканий

На начальном этапе работ геологические и инженерно-геологические условия территории прохождения трассы были изучены недостаточно. До начала проектирования детальные площадные, а тем более комплексные инженерно-геологические исследования на данной территории не проводились.

Поэтому к началу инженерно-геологических работ, выполняемых для проектирования тоннелей, инженерно-геологические условия территории были изучены недостаточно полно и не охватывали весь комплекс возможных инженерных задач, при решении которых требуется непосредственная оценка инженерно-геологических параметров, характеризующих массив горных пород.

На первом этапе изысканий изучалось геологическое строение, инженерно-геологические и гидрогеологические условия района, области возможного распространения опасных геологических процессов. Оценивалось состояние массива, выявлялась тектоническая нарушенность горных пород, активность и направленность тектонических движений, дизъюнктивная нарушенность тектонических зон.

Полученные данные дополнялись и уточнялись комплексом геофизических исследований. Работы проводились для расчленения геологического разреза по физическим параметрам, картирования тектонических нарушений и зон повышенной трещиноватости.

Обобщая результаты проведенных в прошлые годы буровых работ, геологической и инженерно-геологической съемок, структурно-тектонических и гидролого-гидрогеологических исследований различного масштаба, была произведена оценка и получено представление об инженерно-геологических условиях массива пород, вмещающих подземное сооружение, и грунтов, являющихся основанием для размещения строительных площадок. Были приняты проектные решения по условиям проходки тоннелей с применением высокопроизводительных тоннелепроходческих комплексов.

Анализ и обобщение фондовых геологических материалов [1, 2] и геолого-геофизические исследования, выполненные АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» в 2026 г., показали, что разрез территории проектирования в геологическом отношении относится к зоне главного Челябинского разлома, ширина которого, по некоторым источникам, может достигать 700 м, заложение разлома произошло, вероятно, в рифее. Активные движения по нему продолжались до неотектонического этапа. Строение зоны Челябинского разлома сложное. Разлом представлен метаморфическими, вулканогенными и метасоматическими породами палеозоя. Шовная зона Челябинского разлома в местах пересечения его тоннелями откартирована по результатам геофизических изысканий, выполненных АО «Ленметрогипротранс» в 2026 г., мощность составила 58 м, состоит

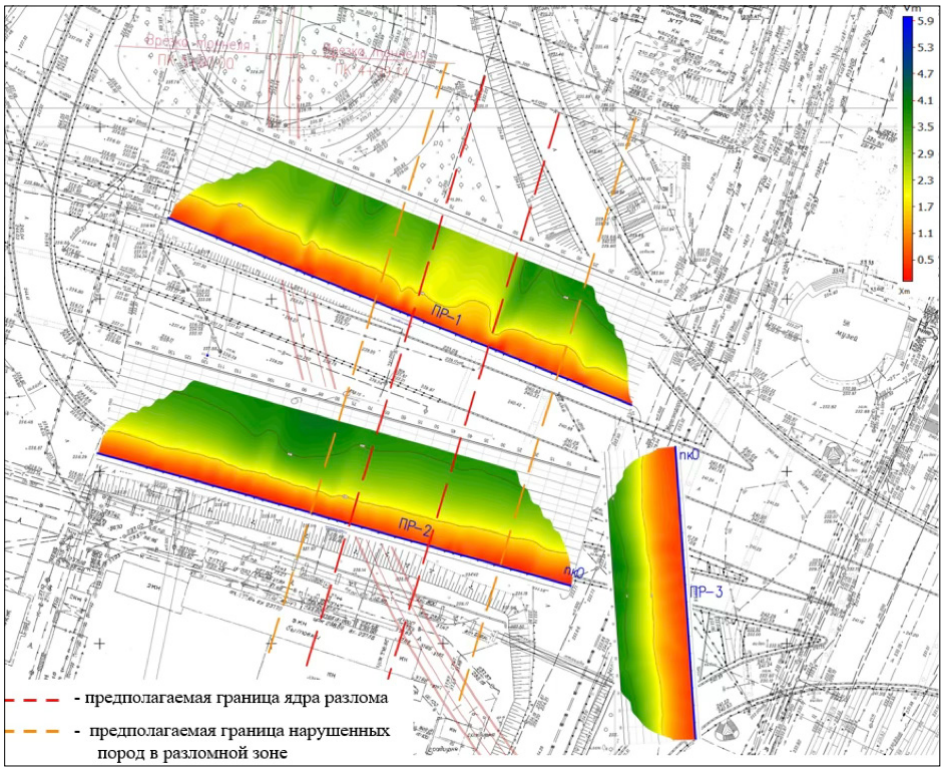


Рис. 1. План-схема расположения выделенного разлома и зоны его влияния (с нанесенными сейсмическими разрезами)

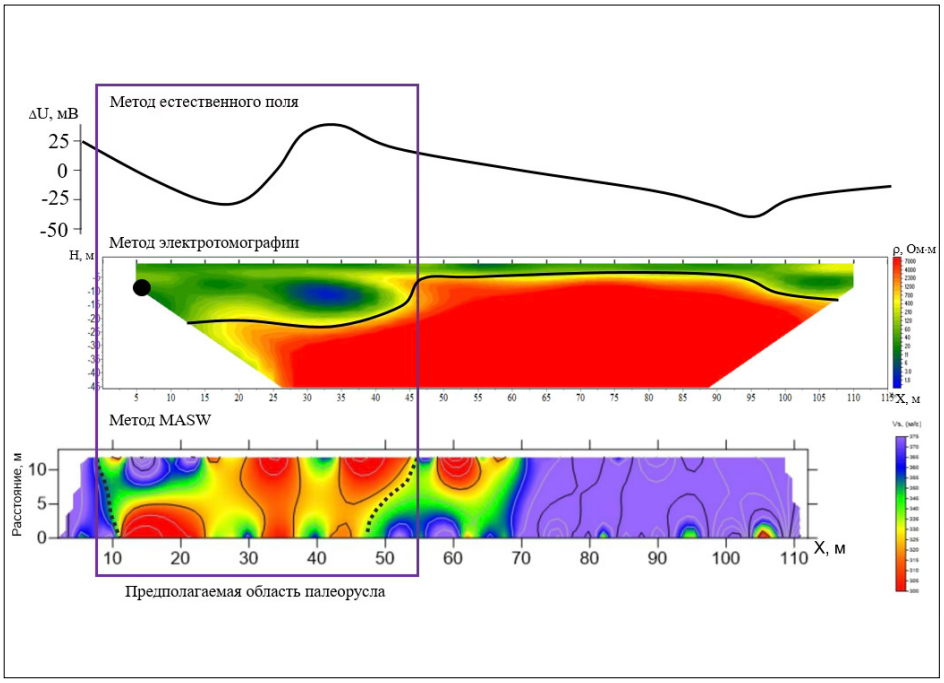


Рис. 2. Результаты геофизических исследований, выполненных методами электроразведки (электротомографии и метода естественного поля) и сейсморазведки (МАПВ), с выделение области потенциального палеорусла

из раздробленной центральной части мощностью 33 м, с периферийными более залеченными участками. К западу от разлома картируются отложения вулканогенного Мариновского диорит-плагиогранитового комплекса. К востоку – терригенные отложения Миасской толщи нижнего карбона (рис. 1).

Гранитоиды разрушены процессами выветривания до суглинистых грунтов, обогащенных обломочным дресвяно-щебенистым материалом. Выделяются элювиальные отложения мезозоя и аллювиально-пролювиальные олигоцен-плиоценовые отложения.

Отложения нижнего карбона, по архивным данным, представлены преимущественно сланцами (аргиллитами), в верхней части породы выветрелые [3, 5].

Условия проходки тоннеля

Проходка тоннелей от рампового участка будет начинаться в весьма неблагоприятных условиях, в глинисто-щебенистых обводненных элювиальных отложениях мезозоя. Через следующие 34 м проходки ожидается врезка в выветрелую вулканогенную формацию палеозоя. При наличии в кровле неустойчивых грунтов условия проходки остаются весьма неблагоприятными.

Далее на протяжении 81 м ожидается проходка в зоне влияния Челябинского разлома, в элювиальных отложениях мезозоя. Условия проходки остаются весьма неблагоприятными. За тектоническим разломом проходка будет осуществляться в выветрелых породах Миасской толщи. При наличии в кровле неустойчивых грунтов условия проходки остаются весьма неблагоприятными. При выходе коренных пород за расчетную границу, принятую как двойной свод обрушения при коэффициенте крепости f = 2, что составило 6,4 м, выявляются участки с неблагоприятными условиями.

В дальнейшем тоннель пересекает погребенные, также обводненные, аллювиальные отложения р. Игуменка, с зарегулированным руслом в канализационном коллекторе. [4]. Расстояние от свода тоннеля до трубы коллектора 6,4 м. Условия проходки по интервалу весьма неблагоприятные. Планируется частичное перекрытие подрусового потока, при этом выраженного барражного эффекта не ожидается.

Долина реки и слагающие её аллювиальные отложения были откартированы геофизическими исследованиями, выполненными АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» в 2026 г.

Для выявления и локализации палеорусловой зоны проводились электроразведочные работы методами электротомографии и естественного поля, а также осуществлен многоканальный анализ поверхностных волн (МАПВ или MASW – Multichannel Analysis of Surface Waves), (рис. 2).

Далее тоннель постепенно входит в аллювиально-пролювиальные среднеплейстоценовые четвертичные и плиоценовые неогеновые отложения. Условия проходки до выхода в рамповый участок определяются как весьма неблагоприятные.

В итоге проходка в неблагоприятных условиях ожидается на протяжении 315 м (29 % от длины тоннеля), в весьма неблагоприятных условиях – на протяжении 837 м (71 % от длины тоннеля).

Вывод

По результатам изыскательских работ и на основании обработки всей имеющейся на настоящее время геологической информации были определены инженерно-геологические условия строительства тоннелей.

Суммируя полученные результаты, можно сделать следующий вывод: материалы и объемы выполненных геологосъемочных, инженерно-геологических, горнопроходческих и геофизических работ позволяют принять принципиальные проектные решения, которые значительно снижают риски строительства тоннелей в сложных горно-геологических условиях г. Челябинска.

Ключевые слова

Геологическое строение, тектоника, стратиграфия, инженерно-геологические условия, инженерная геология, геофизика, геофизические методы.

Список литературы

1. Кузнецов Н. С. Отчет о геологической съемке и геологическом доизучении масштаба 1:200000 листа N-41-VIII (новая серия). Челябинская площадь. – 1999, Челябинский филиал ФБУ «ТФГИ по Уральскому федеральному округу».
2. Моисеев А. В. Проект на выполнение работ «Геологическое изучение и оценка пригодности участка недр для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых (линия скоростного транспорта в г. Челябинске)». Челябинск: АО «Челябинский метротрамвай». –2024. – 174 с.
3. Обоснование инвестиций «Строительство трамвайной линии по улице Дзержинского от железнодорожного вокзала до улицы Гагарина». Челябинск: ООО «Челябинскдортранспроект», 2022. – 76 с.
4. Технический отчет «Реконструкция автомобильных дорог по ул. Новороссийской и ул. Игуменка – Строительство канализационной насосной станции ливневых стоков (ЛНС-6), расположенной на пересечении ул. Новороссийская и ул. 5-я Электровозная и напорного коллектора дождевой канализации от проектируемой ЛНС-6 до точки врезки в централизованные сети дождевой канализации по ул. Игуменка (автодорога Меридиан)». Челябинск: ООО «ЧелябинскТИСИЗ», 2025. – 112 с.
5. Технический отчет «Строительство трамвайной линии по улице Дзержинского от железнодорожного вокзала до улицы Гагарина». Челябинск: ООО «ЧелябинскТИСИЗ», 2022. – 50 с.

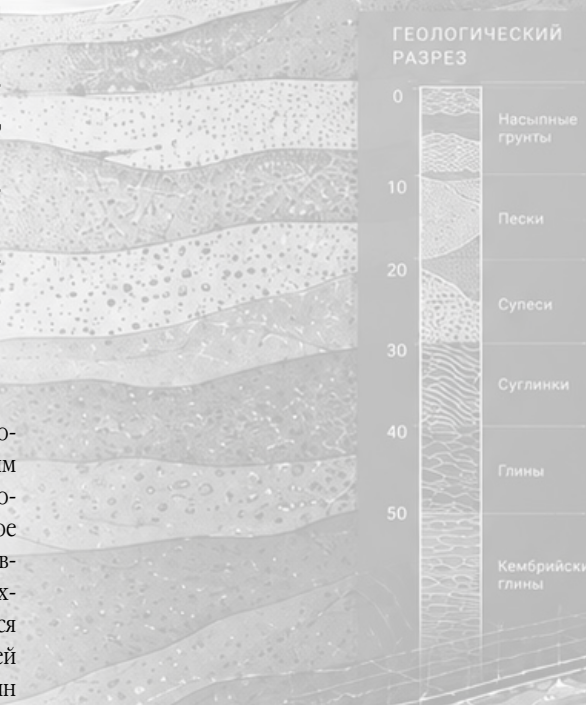
Для связи с автором

Штыров Владимир Геннадьевич
vshtyrov@lmgt.ru

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РИСКОВ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Е. А. Ломакин, к. г.-м. н., СРО А «ОПС – Проект»
А. Е. Журавлев, ООО «ПИКС РОБОТИКС»

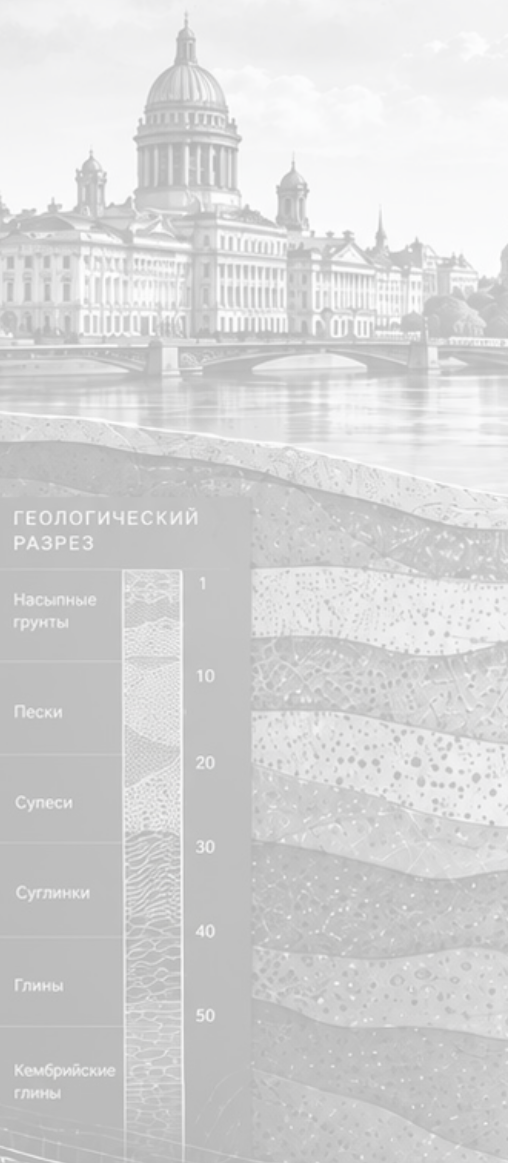
Инженерно-геологические условия Санкт-Петербурга представляют собой сложное и изменчивое сочетание моренных суглинков, лужских песков, котлинских (кембрийских) глин, а также локальных включений газоносных грунтов и древних палеодолин. Для системного учета этого многообразия разработана методика геотехнического районирования, основанная на выделении трех типов территорий по условиям строительства, определяемым глубиной залегания кровли котлинских глин. Рассматриваются подходы к построению прогнозных моделей распределения моренных и межморенных грунтов, анализируются причины аварий на конкретных участках (включая перегон «Лесная» – «Площадь Мужества») и формулируются принципы выбора оптимальных проектных решений в зависимости от инженерно-геологической обстановки. Особое внимание уделено палеодолинам, заполненным рыхлыми отложениями, которые создают повышенные риски при строительстве и эксплуатации подземных сооружений.



Санкт-Петербург расположен в зоне сочленения Балтийского кристаллического щита и Русской платформы, что определяет исключительное разнообразие инженерно-геологических условий. В основании геологического разреза залегают котлинские (кембрийские) глины – плотные, малопроницаемые породы, обладающие высокой несущей способностью. Выше них залегают отложения четвертичного возраста, представленные моренными суглинками, межморенными песками, супесями и глинами, а также древними палеодолинами – погребенными долинами рек, заполненными рыхлыми, часто водонасыщенными грунтами.

Для систематизации этого многообразия разработана классификация территорий по условиям строительства подземных объектов, основанная на глубине залегания кровли котлинских глин. Выделены три основные категории. Первая – неблагоприятные условия, где кровля котлинских глин залегает в интервале от –320 до –65 м. Такие территории занимают 3,92 % площади города и 17,5 % территории центра. Вторая – переходные условия, с кровлей палеодолин в интервале от –65 до –35 м. Они охватывают 20,89 % площади города и 44,9 % центра. Третья – благоприятные условия, где котлинские глины залегают в интервале от –35 до +20 м. На более чем половине территории города (75,23 %) и 37,63 % центра они залегают в интервале от –35 до –15 м. Условия строительства определяются литологическим составом грунтов, заполняющих палеодолину, и их сочетанием в разрезе. Особое внимание уделено палеодолинам – древним речным долинам, заполненным рыхлыми отложениями, которые отличаются неоднородностью и пониженной несущей способностью. В пределах палеодолин встречаются мощные водонасыщенные горизонты, тиксотропные несвязные грунты, которые теряют прочностные свойства при строительстве и эксплуатации. Именно наличие таких грунтов стало причиной аварии на участке «Лесная» – «Площадь Мужества», где в основании палеодолины залегал мощный водонасыщенный горизонт, отсутствующий в других палеодолинах. На этом участке было выявлено, что ограждающие конструкции не полностью подавляют водопритоки, возможен эффект «схлопывания» и «выпор» через дно котлована, а несущие конструкции дают неравномерные осадки.

На основе анализа инженерно-геологических разрезов разработаны прогнозные модели распределения моренных и межморенных грунтов. Для неблагоприятных условий, где кровля палеодолин залегает глубже 65 м, оптимальным вариантом



для объектов глубокого заложения является размещение ограждающих и несущих конструкций в котлинских глинах. Для объектов неглубокого заложения оптимальным положением конструкций признана кровля твердых супесей лужской морены. В переходных условиях (кровля палеодолин от –65 до –35 м) выбор проектных решений требует сопоставления литологического состава грунтов, заполняющих палеодолину, и их сочетания в разрезе.

Для детализации проектных решений в условиях газоносных грунтов требуется картирование мизинских песков и черных суглинков с обломками раковин – специфических отложений, которые могут быть источниками газовыделения или зонами повышенной пористости. Проницаемость грунтов в газоносных зонах варьируется от 10^{-3} до 0,13 м в сутки, влажность – от 20 до 36 %, коэффициент пористости – от 0,4 до 0,95, модуль деформации – от 35 до 125 кгс/см^2. Для объектов глубокого заложения в газоносных грунтах ограничений по глубине нет, оптимальным вариантом являются котлинские глины. Для объектов неглубокого заложения оптимальное положение ограждающих и несущих конструкций – кровля твердых супесей лужской морены.

На практике построение геотехнических паспортов осуществляется на основе принципа обратной связи: выявленное инженерно-геологическое строение определяет выбор проектных решений, а затем по результатам проектирования уточняется геологическая модель. Применяется принцип стратификации, при котором алгоритм влияния геологических условий фиксируется при выборе экспертной модели по условиям использования ресурсов подземного пространства. По сути, это алгоритм типового проектирования, при котором под представленные схемы районирования подбираются оптимальные проектные решения. Ключевым выводом из представленного материала является утверждение о необходимости систематизации данных при построении объемных геологических моделей. Категорически не рекомендуется строить модели только по возрасту или литологии (инженерно-геологическим комплексам) без учета топологии, а также пытаться «привязывать» характеристики грунтов к конкретным инженерно-геологическим элементам без учета их пространственного распространения. Необходимо изначально строить модели по инженерно-геологическим элементам (ИГЭ) с учетом их топологии, что позволяет корректно прогнозировать изменение свойств грунтов в пространстве и выбирать оптимальные проектные решения.

Практическая значимость такого подхода заключается в возможности заблаговременного выбора методов производства работ, типа ограждающих конструкций («стена в грунте», шпунтовое ограждение, буросекущиеся сваи), способов укрепления основания и гидроизоляции. Наличие детального геотехнического паспорта позволяет снизить риски аварийных ситуаций, оптимизировать затраты на строительство и обеспечить долговременную надежность подземных сооружений. Особенно это важно при строительстве в условиях палеодолин, где активные методы укрепления грунтов могут привести к изменениям их свойств именно в зоне влияния укрепления, а фактическая зона риска может многократно превышать нормативную.

Сравнительный анализ различных типов условий – газоносных грунтов и палеодолин – показывает, что выбор оптимального горизонта для заложения несущих конструкций является ключевым фактором успеха. В обоих случаях котлинские глины представляют собой наиболее надежное основание, обладающее высокой несущей способностью и низкой проницаемостью. Для неглубокого заложения предпочтение отдается моренным отложениям (тугопластичным суглинкам лужской морены), обладающим более высокими прочностными характеристиками по сравнению с междустадиальными грунтами.

Моренные суглинки имеют проницаемость от 0,01 до 0,05 м/сут, влажность от 32 до 34 %, коэффициент пористости от 0,75 до 0,82, модуль деформации от 0 до 35 кгс/см^2. Вне палеодолин они залегают на глубине от 18 до 25 м, мощность составляет от 10 до 15 м. В пределах палеодолин глубина их залегания увеличивается до 25–30 м, а мощность – до 25–30 м. Мощность вышележащих тиксотропных несвязных грунтов вне палеодолин составляет 15–25 м, а в палеодолине – от 25 до 30 м. Тиксотропные грунты не являются несущими основаниями, требуют специальных методов укрепления и могут терять прочностные свойства при динамических воздействиях.

Таким образом, детальное геотехническое районирование с выделением трех типов территорий, построением разрезов по скважинам и учетом топологии инженерно-геологических элементов является необходимым условием безопасного и экономически эффективного подземного строительства в Санкт-Петербурге. Оно позволяет прогнозировать риски, выбирать оптимальные конструктивные решения и избегать аварийных ситуаций, подобных той, что произошла на перегоне «Лесная» – «Площадь Мужества». Применение системного подхода к оценке инженерно-геологических условий должно стать обязательным на всех этапах проектирования и строительства подземных сооружений, от предпроектных проработок до эксплуатации.

Для связи с авторами

Ломакин Евгений Алексеевич
info@proekttunnel.ru

ОБЗОР НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «МЕТРОСТРОЙ» И «МЕТРО» В XX ВЕКЕ (I ЧАСТЬ)



М. О. Лебедев,
АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

В статье приведен краткий анализ научно-исследовательских работ, опубликованных в журнале «Метро и тоннели» («Метрострой») за 1957–2000 гг., в которых рассматриваются вопросы, связанные с расчетами несущих конструкций подземных сооружений, натурными исследованиями проявления горного давления и частично применением современных технологий строительства.

В настоящее время для публикации статей в большинстве журналах одним из требований является наличие определенного количества ссылок на публикации не старше пяти лет. В погоне за такими требованиями «исследователи» невольно могут упускать цепочку исторической последовательности и корней своих исследований. А в наиболее тяжелых случаях вовсе ошибочно показывать результаты своих исследований новыми, в то время как аналогичные результаты были получены значительно раньше.

Такую судьбу также имеет фондовая литература, которая при наличии соответствующего грифа годами «пылится» в шкафах, а авторы этих исследований остаются в тени.

В материалах данной статьи нет попыток выявить недобросовестных исследователей, но есть большое желание вспомнить авторов научных работ, последователями которых все мы являемся.

1953–1973 годы

В работе [1] инженер В. Г. Храпов в свете сложных представлений при решении задач по учету проявлений горного давления в подземных выработках предлагает использовать инерционное моделирование для определения величин напряжений и деформаций в подземных конструкциях. В сравнении с центробежным моделированием и методом «эквивалентных материалов» инерционное моделирование отличается простотой и дешевизной оборудования. Дается описание построенной в МИИТе установки. Конструкция камеры была устроена для соответствия кровли выработки, представленной слабыми породами. Приведены результаты исследований давления в кровле прямоугольной выработки в зависимости от угла ее наклона (от 0 до 90°) и заглубления. Сопоставление результатов опыта с величинами давления, полученными по формуле М. М. Протодьяконова, показали расхождение, не превышающее 6 %. В выводах говорится о возможности распространения результатов исследований для сооружений метрополитенов на глубинах, на которых горные породы еще не достигают пластического состояния под действием вышележащих пород.

В этом же выпуске инженер В. Г. Храпов публикует еще одну статью [2] о выборе расчетной схемы для наклонных тоннелей (статья-рассуждение). Здесь автор еще раз обращается к инерционному моделированию в части распределения напряжений по длине тоннеля. С учетом условий заделки наклонного тоннеля в оголовках, предлагается разделять систему на две расчетные схемы. По первой схеме выполняется расчет кольца в упругой среде по схеме заданных нагрузок с равномерными вертикальной и горизонтальной составляющих нагрузок. По второй схеме обделка рассчитывается как труба в упругой среде с упругой заделкой в оголовках, находящаяся под действием равномерно распределенного изгибающего момента. Результаты расчетов по обеим схемам суммируются на основании принципа независимости действия сил. В конце статьи автор подчеркивает роль различных факторов в принимаемых допущениях и необходимости специальных исследований.

Вскоре появляется статья инженера А. И. Семенова [3], который считает необоснованными предложения В. Г. Храпова по расчету обделки наклонного хода. В статье приводятся замечания ко второй расчетной схеме. В качестве обоснования рассматриваются жесткое защемление с натяжной камерой в нижней части и два варианта соединения с вестибюлем – с большими или меньшими осадками по отношению к наклонному тоннелю. Подробно описываются иная расчетная схема и последовательность выполнения расчета. Отмечается, что с учетом различной плотности породы по длине тоннеля равномерно распределенный изгибающий момент возникать не может. Также указывается, что выполнение расчетов по двум расчетным схемам не имеет смысла. Достаточно свести расчет к решению плоской задачи для кольца в упругой среде на различных участках наклонного тоннеля.

В этом же номере Б. Тягин [4] приводит информацию об использовании ультразвуковых методов испытаний бетона за рубежом и наличии статей об этом методе в разных журналах СССР. Предлагается приобретать существующую по данному разделу отечественную и зарубежную аппаратуру и проводить практические исследования в тоннелестроении и на железных дорогах.

В работе [5] Я. Г. Гельман отмечает большую практическую ценность для дальнейшего совершенствования тоннельных конструкций путем исследования напряженного состояния тоннельных обделок с целью выяснения фактически действующих величин, нагрузок горного давления и действительной статической работы тоннельной обделки. Приводятся результаты исследований, выполненные ЦНИИСом на объектах метрополитенов Москвы и Ленинграда. Показаны конкретные примеры выполненных исследований в перегонных тоннелях и станциях с развитием напряженного состояния конструкций во времени. В то же время нет информации о том, что это за объекты. Показана эконо-

мическая эффективность внедренных технических решений. Отмечено, что горное давление, особенно в пластичных глинах, по своей величине и закономерности распределения воздействия на обделку в большинстве своем не соответствует теории расчета по Протодьяконову.

Еще одна работа Я. Г. Гельмана выходит в 1960 г. [6]. Сотрудниками ЦНИИСа и Метрогипротранса разработана цельносекционная обделка из монолитного железобетона с предварительно напряженной арматурой для использования в качестве опускной крепи в котлованы. Для однопутных и двухпутных участков показан расход материалов. В качестве примера приведен опыт использования таких секций в Гамбурге.

Здесь же в работе [7] Б. Е. Славина приводится метод расчета целиков станций пилонного типа. Автор выполнил эксперименты методом эквивалентных материалов в лаборатории сооружения тоннелей ЦНИИС. В результате были получены формулы для расчета целиков. Испытания на плоских и пространственных моделях выполнялись при разных размерах целиков для хрупких пород типа Московских известняков и для мягких глинистых пород Ленинградского и Киевского метрополитенов.

Начало строительства метрополитена – это колоссальные материальные затраты, привлечение специалистов, значительные сроки строительства. В СССР много внимания уделялось индустриальному развитию республик. На злобу сегодняшнего дня мы видим документальные подтверждения этому. Так в статье [8] идет речь о завершении строительства первого участка Киевского метрополитена (рис. 1) и ввода его в эксплуатацию в честь 43-й годовщины Великого Октября. Отмечено, что за годы Советской власти Киев никогда не получал такого развития. В строительстве Киевского метрополитена принимал участие не только коллектив Киевского метростроя. Строительной техникой, материалами, оборудованием Киевметрострой снабжали сотни заводов и предприятий. Строительство велось с учетом опыта строительства метрополитенов в Москве и Ленинграде, привлекались организации этих городов, имеющие соответствующий опыт. Много исследований было выполнено на базе ЦНИИС. «Строители ощущали неослабную заботу и внимание партийных, общественных и других организаций, без чьей помощи строительство такого сооружения немыслимо» – цитата из статьи (член-корреспондент АС и А УССР Л. Д. Сапрыкин).

В этом же выпуске опубликовано еще три статьи по строительству Киевского метрополитена, посвященных архитектуре, способах строительства и механизации.

В статье [9] идет речь об изучении проявления горного давления на моделях. Инженер Б. Е. Славин описывает преимущества метода эквивалентных материалов перед другими методами моделирования, а также исключение «недостатков» экспериментальных исследований, которые проводятся в производственных условиях. Этими «недостатками» является то, что измеренные величины деформаций и усилий представляют собой суммарный результат действия всей совокупности факторов, которые невозможно оценить по-отдельности. Под руководством В. Л. Маковского автор выполнил исследование деформаций сборных железобетонных обделок станций метрополитена пилонного типа, результаты которого были опубликованы в работе [7].

На страницах журнала за 1962 г. [10] О. Ю. Антонов пишет о мировом опыте строительства односводчатых станций. Указывает на преимущества сборной конструкции сводов по отношению к монолитным. Автор приводит выводы, полученные в результате выполненных натурных исследований напряженного состояния чугунных тоннельных обделок ЦНИИСом. Предлагается вариант конструкции односводчатой станции со сводами, выполненными из сборного железобетона, и делается вывод о том, что такая конструкция может работать в устойчивых породах. А в пластичных породах при наличии большого горного давления податливая обделка может со временем получить значительные деформации с последующей потерей устойчивости конструкции.

На страницах этого же журнала приводятся результаты совещания по обмену опытом тоннелестроения. Здесь начальник Ленинградского метрополитена Д. И. Большаков привел информацию о положительном опыте строительства станции без боковых посадочных платформ. А главный инженер Ленметростроя Ю. Ф. Соловьев и начальник Ленметропроекта С. С. Казанцев доложили о положительном опыте внедрения сборного железобетона на четырех станциях, привели технико-экономические показатели, отражающие экономическую эффективность внедренных конструкций.

В. Ф. Подаков в своей статье [11] отмечает важное значение исследований института ВНИМИ по изучению деформационных процессов при строительстве метрополитенов с целью нахождения защитных мер для зданий и сооружений, попадающих в мульду осадок. Приведены исследования при строительстве одной из станций Ленинградского метрополитена с определением величин деформаций зданий на всех этапах строительства станции. Приведены графики кривых оседаний реперов и скоростей оседания с детальным описанием процесса образования трещин по фасадам зданий.

Инженер В. В. Саблин в этом же журнале продолжает рассматривать развитие деформаций в массиве при строительстве станции [11]. Станция «Московские ворота» Ленинградского метрополитена была построена



Рис. 1. Сема трассы Киевского метрополитена первой очереди [8]

в переходном слое (перемятых глинах) с низкими деформационно-прочностными свойствами. Если на станциях пилонного типа, расположенных в протерозойских глинах осадки поверхности составляли до 150 мм, то на этой станции максимальные осадки через год после окончания строительства достигли 651 мм. Возникали большие трудности в соединении вновь устанавливаемого кольца с ранее установленным, так как происходило очень быстрое обжатие вновь установленных колец. Осадки поверхности проявлялись немедленно после раскрытия забоя и достигали до 200 мм от сооружения одного тоннеля диаметром 8,5 м.

Главный инженер Киевского Метропроекта И. Ф. Жуков [13] тоже изучает вопросы осадок поверхности земли при строительстве станции «Политехнический институт» Киевского метрополитена. Это первая станция, запроектированная полностью из железобетонных конструкций, расположена в спондиловой глине. Станцию пилонного типа построили за 21 месяц. К концу сооружения станции осадки составили 104 мм. Выполнена привязка величин осадок ко всем этапам строительства. Из общей максимальной осадки, 82 мм связаны с сооружением станционных тоннелей и тоннеля тяговой подстации, а 22 мм – за счет сооружения пилонов и проемов. Рекомендуется массовый переход на применение железобетонных конструкций при строительстве метрополитена.

В журнале № 3–4 за 1963 г. инженер О. Ю. Антонов приводит данные по измерению горного давления на обделки перегонных тоннелей в Москве, Ленинграде и Киеве [14]. Указывается на многофакторность весьма неравномерного распределения контактных давлений по внешнему контуру. После выполнения нагнетания за обделку выравнивания контактного давления не происходит, напротив неравномерность значительно возрастает вместе с резким увеличением абсолютной величины давлений. Подробно описано влияние статической работы обделки связей растяжения (болтов) в продольных стыках, конструкции стыков, неточность изготовления элементов обделки, чеканка швов, количество элементов в кольце, деформации обделки в монтажный период, перевязка колец и связи между кольцами, переборы породы. Исследование сводится к категоричному отказу от тюбинговых обделок и переходу к многошарнирным конструкциям блочной обделки с распором на породу.

В этом же журнале напечатаны две статьи по замораживанию грунтов. В первой статье профессор Я. А. Дорман [15] описывает опыт применения рассольного замораживания при строительстве эскалаторного тоннеля и вестибюля станции «Красные Ворота» в Москве. Уникальность этой работы состоит в том, что это сооружение вплотную примыкает к одновременно строящему высотному (138,5 м) зданию. Принятые решения дали возможность сочетать строительство здания с возведением сложного подземного сооружения, расположенного в плывунных грунтах. Впервые в строительстве был разработан котлован длиной 30,2 м и шириной 21,1 м без внутреннего крепления расстрельными системами. Благодаря принятым технологиям и параллельному ведению работ было сэкономлено большое количество материалов и сокращены сроки строительства на 12 месяцев. Эффективность реализованных работ соответствует результатам, полученным ранее коллективом Ленинградского Метростроя (выпуск № 4 за 1956 г.), которые выполнили проходку наклонных тоннелей с одновременным сооружением машинных помещений и вестибюлей станций. В этой же статье [15] показаны примеры дифференцированного замораживания при строительстве вертикальных и горизонтальных выработок Московского и Киевского метрополитенов с указанием пути дальнейшего развития способа искусственного замораживания грунтов.

Во второй статье по замораживанию в этом журнале проф., доктор технических наук Н. Г. Трупак описывает накопленный опыт по закреплению массива замораживанием грунтов из подземных выработок [16]. Рассмотрены примеры выполненных работ на шахте № 3 «Бегичевской» (подмосковный угольный бассейн), при сооружении станции глубокого заложения Московского метрополитена, в Чехословакии и Польской народной республики. Показаны схемы замораживания, описана технология выполнения работ в стесненных условиях и приведены основные ТЭП (технико-экономические показатели).

Прогноз осадок поверхности, но уже при щитовом способе строительства перегонных тоннелей в песчаных грунтах, выполнен в работе [17]. Рассматриваются технологические особенности щитовой проходки, влияющие на осадки. Предложен эмпирический метод расчета осадок при проходке тоннелей, основанный на математической обработке экспериментальных данных по осадкам, полученным при строительстве тоннелей в Москве и Ленинграде. Для разных типов грунтов и технологических особенностей при проходке предложено применение разных коэффициентов.

Еще раз мы встречаем работу В. Ф. Подакова [18] по изучению деформационных процессов при строительстве метрополитенов, но уже при строительстве станции «Невский проспект» Московско-Петроградской линии Ленинградского метрополитена – станция пилонного типа со значительным слоем кембрийских глин над шелыгой свода. Расчет ожидаемых оседаний земной поверхности был выполнен по методике проф. Ю. А. Лиманова и на основе статистических данных опыта строительства других станций. Расчетные осадки составили 360 мм. С учетом короткого срока строительства – 9 месяцев и корректировки некоторых элементов технологии возведения строительных конструкций, оседание составило 160 мм.

В статье [4] упоминалось о необходимости использования в метростроении ультразвукового метода определения прочности бетона. И вот молодые инженеры И. Я. Дорман и Г. Г. Рехвиашвили уже пишут о полученных результатах [19]. Лабораторией сооружения тоннелей и метрополитенов ЦНИИС совместно с кафедрой тоннелей Грузинского политехнического института им. Ленина (ГПИ) были проведены измерения прочности монолитной обделки тоннеля с использованием ультразвука на станции Бирюлево. Исследование проводилось на участке длиной 80 м, в каждом месте измерений проводился контроль эталонным молотком. Исследования, выполненные ультразвуком, показали более правдоподобные результаты. Результаты исследований также показали нарастание прочности бетона с увеличением возраста обделки (возраст бетона составлял от 1 до 9,5 месяцев). Обращает на себя внимание предварительное получение тарировочной кривой зависимости времени прохождения ультразвука от прочности бетона. Для этого выполнялись испытания кубов на специальной установке.

В журнале № 1 за 1965 г. дана справочная информация об окончании строительства автодорожного тоннеля через перевал Тюя-Ашу (в настоящее время тоннель им. К. Кольбаева Киргизской Республики), расположенного на высоте 3200 м над уровнем моря и протяженностью 2500 м. Он соединил север и юг Киргизии и открыл доступ к высокогорной Сусамырской долине. К сожалению, в настоящее время тоннель не удовлетворяет многим требованиям: габаритам приближения (движение осуществляется по светофору поочередно в каждую сторону), вентиляции, освещению, пожарной безопасности и др. В зимний период часто движение прерывается из-за заноса снегом. Инженеры В. Бурштерн, Б. Грейц и Н. Малко-

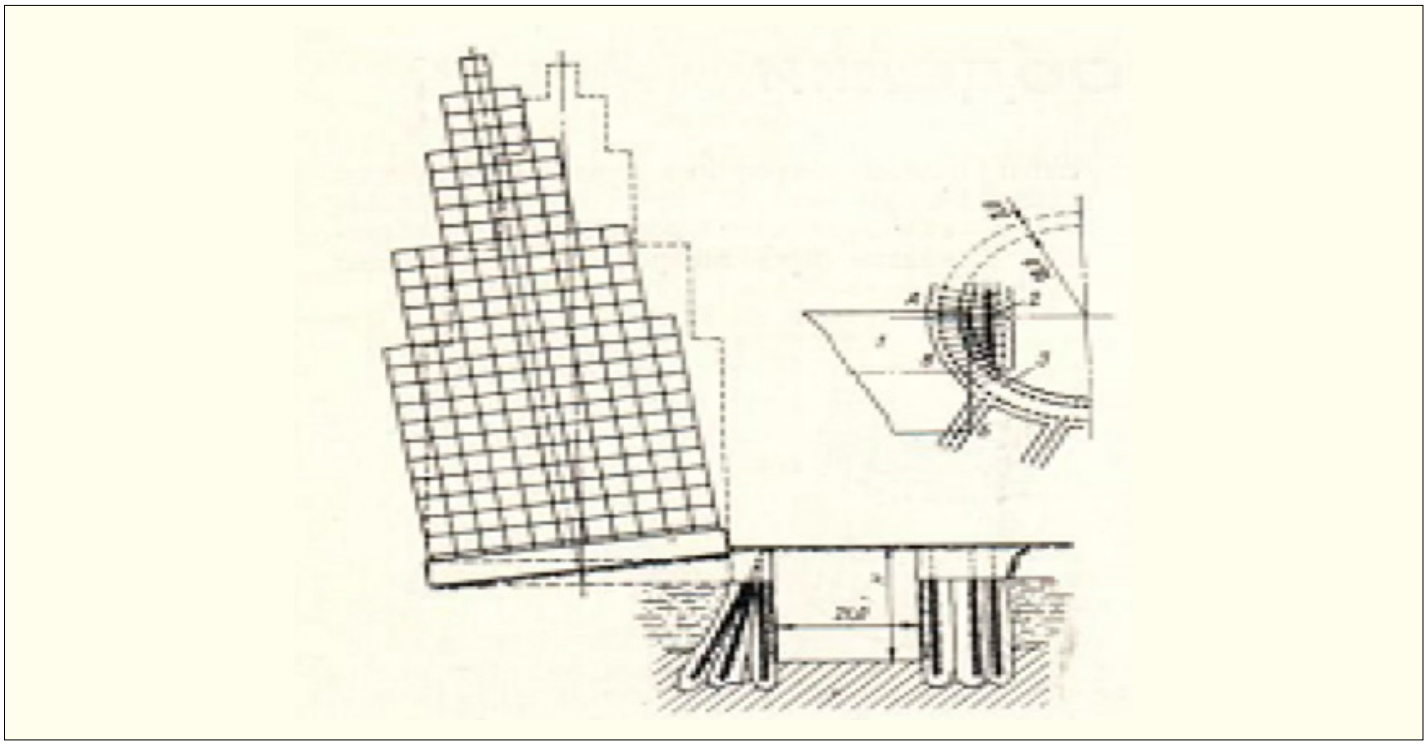


Рис. 2. Схема положения котлована и строящегося здания [34]

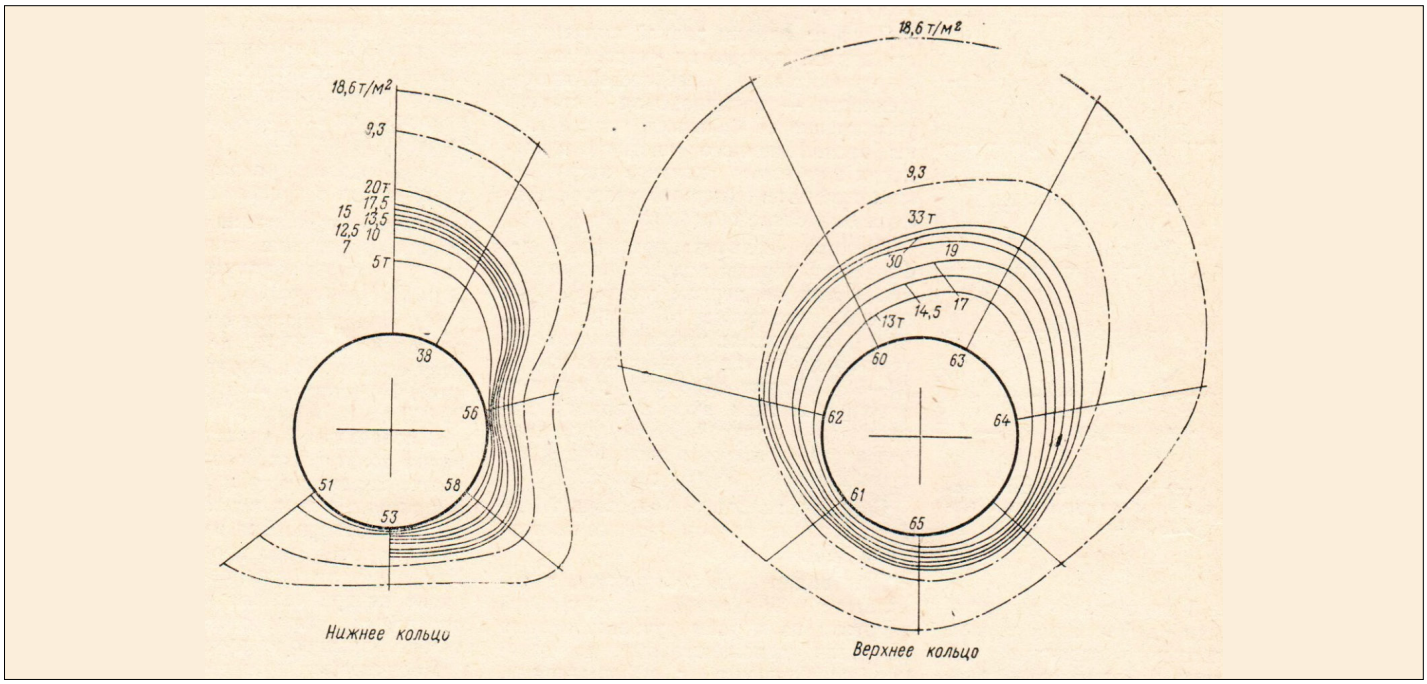


Рис. 3. Эпюры контактных давлений между обжимаемой обделкой и породой [36]

ва [20], отмечая сложность и в значительной степени неопределенность статической работы обделки тоннелей, говорят о необходимости экспериментальных исследований для получения сведений о действительной работе конструкций обделки, нужных для рационального ее проектирования. В ЦНИИСе были разработаны датчики-тензостолбики, помещаемые внутрь бетонных конструкций. На стендах были испытаны бетонные обоймы, в которых разместили тензостолбики. Построены графики зависимости средними напряжениями и средними относительными деформациями. На испытательном стенде Ленметростроя был испытан железобетонный тюбинг, оснащенный датчиками. Результаты опыта показали надежность работы измерительного оборудования в зоне упругих деформаций бетона.

Продолжает исследовать статическую работу тоннельных конструкций О. Антонов [21]. Ссылаясь на свою предыдущую работу [14], автор говорит о необходимости применения многошарнирных обделок с распором в грунт, которые дают возможность управлять нагрузками на тоннельные конструкции. Равномерно распирая кольцо в породу, можно обеспечить по всему периметру кольца только сжимающие напряжения, близкие по величине, практически исключая изгибающие моменты. В комплексе с механизированным проходческим щитом может быть достигнута безосадочная проходка. Продолжает свою работу в части обделок из монолитно-прессованного бетона [19] инженер И. Я. Дорман [22]. Исследования уплотняемости и деформаций грунтового массива над тоннелем также выполняются на станции Бирюлево. В эксперименталь-

ных исследованиях определялась величина полного грунтового массива вокруг тоннеля и вертикальные деформации над тоннелем на разной глубине. В результате получена зависимость величины полного уплотнения грунта вокруг тоннеля от усилий обжатия и мощность уплотняемого грунта над тоннелем, составившая около 90 см.

Не откладывая в долгий ящик, инженер И. Дорман делает сравнение технологий строительства со сборными обделками и монолитно-прессованными обделками в части деформаций поверхности земли [23] для тоннелей мелкого заложения. Рассмотрено два примера со сборными обделками, но с применением разных конструкций щитов, двух примеров с применением монолитно-прессованных обделок и одного примера на моделях в лаборатории ЦНИИС. Для сборных обделок осадки поверхности составили более 200 мм, а для монолитно-прессованных – в пределах точности измерений. Сделан соответствующий вывод.

Тему с монолитно-прессованными бетонными обделками продолжает инженер В. Корольков [24]. В данной работе рассматриваются те же объекты, что и в работах [19, 22, 23]. Определялась величина горного давления на обделки при помощи датчиков (струнные месдозы конструкции ЦНИИСа), размещаемых на контакте обделки с массивом. Для определения напряженного состояния монолитно-прессованных бетонных обделок были проведены измерения относительных деформаций на внутреннем контуре. Получены эпюры нормальных контактных давлений, действующих на внешней поверхности обделки и эпюры относительных деформаций на внутренней поверхности. Говорится о различии в статической работе монолитно-прессованных и «обычных» обделок. При этом данных по «обычным» обделкам не приведено. Также констатируется, что точность выполненных измерений на внутреннем контуре невелика поскольку возможность начала таких измерений была возможна с отставанием от момента возведения обделки. Необходимы дальнейшие исследования.

Об основных способах сооружения тоннелей круглого очертания с предварительно напряженной обделкой пишет инженер В. Гарбер [25]. Здесь подробно описана технология выполнения работ и примеры их использования в Советском Союзе и за рубежом, реализованные к тому времени. Показаны достоинства и недостатки этих методов. Говорится о широких возможностях использования конкретных способов в условиях мягкопластичных глин в Киеве и Ленинграде. В статье [26] инженер С. Чесноков приводит результаты экспериментальных исследований, полученных английскими исследователями и доложенных на VI Международной конференции по механике грунтов и фундаментостроению в 1965 г. в Монреале.

Исследовалось напряженно-деформированное состояние сборных обделок из чугуна и бетона в лондонской глине на глубинах от 17 до 26 м. Для этого выполнялись измерения конвергенции контура и измерялись относительные деформации тензометрами. Получено, что с момента возведения обделки в течение 20 месяцев усилия в обделке составляют около 75 % от величины давления полного столба породы, действующего по гидростатическому закону. Затем, в течение еще 2,5–5 лет, усилия в обделке постепенно достигают величины, соответствующей давлению полного столба породы.

Кандидат технических наук О. Антонов и инженер Ю. Айвазов пишут о важных вопросах по конструированию и расчету предварительно напряженных сборных обделок [27]. Здесь говорится о требованиях к проходческим щитам, способах и усилиям обжатия, а также конструкциях обделок и инженерно-геологических условях. В то время для расчета тоннельных обделок широко применялся метод Метропроекта. Авторами статьи для исключения недостатков этого метода расчета, в том числе исключения понятия – «зона отлипания», предлагается метод расчета обделки как системы кривых брусьев на податливом основании. Сказано, что результаты расчетов, проведенных по предлагаемому способу, хорошо согласуются с данными натурных исследований. Однако сравнения не приведено. Развитие данного метода расчета авторами изложено в работе [44], где метод расчета звучит как теория криволинейных брусьев на упругом основании. Получены системы уравнений для расчета обжимаемых в породу обделок (разжатие в своде, в боках или в лотке) в стадии их возведения и в эксплуатационный период.

Журнал № 6–7 за 1967 г. посвящен 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции. На страницах журнала говорится о награждении коллективов предприятий, организаций, совхозов и колхозов – победителей в социалистическом соревновании – памятными Знаменами ЦК КПСС, Президиума Верховного Совета СССР, Совета Министров СССР и ВЦСПС. В числе награжденных памятными знаменами – коллективы ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени Управления строительства Московского метрополитена «Мосметрострой» и ордена Ленина Управления строительства Ленинградского метрополитена «Ленметрострой». Дана хронология строительства метрополитенов советскими специалистами и других значимых объектов в стране и за рубежом.

При строительстве канализационного тоннеля-коллектора диаметром 3,3 м в Киеве впервые было применено предварительное напряжение обделок распором в породу, о чем пишет инженер В. Лапшин [28]. На двух участках, проходимых разными механизированными щитами, были выполнены экспериментальные исследования при помощи специальных тензометрических клиновых блоков – динамометров. Начальная нормальная сила в блоках после разжатия составляла 10–30 т. В течение следующих 1,5–2 месяцев усилия возрастали до 40–60 т. В дальнейшем рост усилий был незначительным и стабилизировался через 10 месяцев наблюдений. Осадок поверхности не зафиксировано. Говорится о целесообразности увеличения усилий обжатия. О накопленном статистическом материале по деформациям земной поверхности, в частности станционных конструкций без боковых посадочных платформ, говорится в статье инженеров В. Подакова и В. Саблина [29]. В период ведения горнопроходческих работ происходит основной процесс сдвижения пород кровли и земной поверхности, составляющий 80–85 % своих максимальных значений. В течение последующих трех-четырех лет он проходит с затуханием вследствие ползучести горных пород. В работе показана взаимосвязь с толщей кембрийских глин над выработками. Показаны конструктивные меры защиты зданий для восприятия больших осадок.

Кандидат технических наук А. Бегун и инженер В. Меркин делятся результатами полученных закономерностей проявления горного давления при возведении станции колонного типа [30]. Исследования выполнены на плоских и пространственных моделях в ЦНИИСе. Использовался метод фотоупругости и метод электротензометрии. Моделировались все этапы раскрытия станции на полное сечение. Показаны вертикальные и горизонтальные нагрузки на конструкции в долях γH. Среднее давление на станцию не превысило веса налегающих пород, но отмечено, что отдельные элементы конструкции в процессе строительства могут испытывать давления, большие γH.

О результатах определения прочности бетона по периметру кольцевой обделки из монолитно-прессованного бетона пишет кандидат технических наук Л. Афендиков [31]. Исследования выполнены при строительстве тоннеля-коллектора р. Неглинной

при помощи специально тарированного эталонного молотка системы Кашкарова. Измерения в нескольких точках по периметру колец обделки показали, что прочность бетона обделки переменна по периметру. Эта неравномерность сохранялась до полного набора прочности бетоном. Такую неравномерность объяснили неравномерным давлением прессования при повороте щита. Говорится о необходимости учета повышенных расчетных коэффициентах однородности бетона относительно рекомендаций СНиП.

В работе [32] указывается на то, что применение в расчетах конструкций коэффициентов упругого отпора, полученных для одиночных выработок, приводит к большим погрешностям при их использовании в расчетах конструкций сложного очертания, что подтверждается маркшейдерскими измерениями. Физическое моделирование станции закрытого типа Ленинградского метрополитена в ЛИИЖТе позволило получить коэффициенты отпора для таких сооружений с учетом пластических деформаций вмещающего массива.

Продолжает тему физического моделирования, но уже односводчатой станции в кембрийских глинах, инженер В. Ларионов [33]. Под руководством профессора Ю. А. Лиманова, методом эквивалентных материалов, было выполнено исследование с предложением комплексной механизации и обжатием многошарнирного свода распором в породу. Сооружение модели учитывало все этапы раскрытия сечения и технологии строительства. Результаты исследований подтвердили техническую возможность сооружения односводчатых конструкций большого пролета в кембрийских глинах.

Доктор технических наук Я. Дорман описывает способ сооружения здания высотой 135,5 м и весом 27 тыс. т, не имеющего аналогов в строительной практике [34]. Здание возводилось параллельно со строительством эскалаторного тоннеля станции «Лермонтовская», котлован для которого находился на расстоянии 6 м от здания (рис. 2). С учетом большой практики замораживания различных типов грунтов были подобраны параметры замораживания грунтов вокруг котлована таким образом, чтобы в процессе последующего регулируемого оттаивания здание, возводимое с заданным углом наклона, к окончанию строительства заняло проектное положение.

Журнал № 3 за 1970 г. посвящен знаменательной дате – столетию со дня рождения Владимира Ильича Ленина, вождя Октябрьской революции, основателя Коммунистической партии и первого в мире социалистического государства. На страницах журнала коллективы строящихся метрополитенов Советского Союза делятся своими достижениями.

В работе [35] авторы продолжают приводить результаты исследований распора обделки в породу на участках сданного в эксплуатацию девятикилометрового тоннеля коллектора диаметром 3,6 м в Киеве [28]. Описаны конструкции обделок на разных участках, особенности изготовления сборной железобетонной обделки и технология строительства. Высокие скорости проходки, совместная забота обделки с массивом при немедленном создании преднапряжения и своевременное нагнетание за обделку позволили получить практически безосадочную технологию строительства тоннелей.

Приведены графики нарастания усилий в обделках с распором в породу и без распора. На стенде ЦНИИСа были проведены исследования сборной железобетонной обделки, обжимаемой в глине [36]. Плотность глины доводили до состояния, близкого к плотности кембрийских глин. Распор выполняли вдавливанием клинового блока в своде. Контактные давления между обделкой и породой измеряли грунтовыми динамометрами. По мере вдавливания клинового блока ступенями, измерялись величины контактных давлений (рис. 3). Опыты подтвердили большие потери обжатия вследствие трения.

Об учете суммарной величины линейных деформаций (сжатия) стыков говорят кандидаты технических наук Ю. Айвазов и О. Антонов [37]. Вместо сложных и продолжительных экспериментальных методов предлагается использовать современные математические методы определения таких деформаций. Получена зависимость линейной деформации для стыков отдельных элементов обделки заданной кривизны. Показана удовлетворительная сходимость расчетных деформаций стыков с экспериментальной кривой средних величин деформаций стыков, полученной в ЦНИИСе при схожих исходных данных.

В 1970 г. построен первый в стране опытный участок тоннеля Ленинградского метрополитена длиной 400 м со сборной железобетонной обжатой в грунт обделкой РБ-5НСК-4 [38]. Конструкция разработана инженерами Ленметростроя, Ленметропроекта и ЦНИИСа. В статьях [39, 44] приведены результаты натурных исследований напряженно-деформированного состояния обделки. Разжатие осуществлялось на уровне горизонтального диаметра с двух сторон относительно небольшим усилием – около 10 т. Обделка оснащалась мерными базами для определения относительных деформаций бетона на уровне горизонтального диаметра. Аналогичным образом мерные базы устанавливались на обделку без разжатия.

Измерения выполнялись при участии ЛИИЖТа. В результате исследований разжатая конструкция показала более лучшую статическую работу за счет равномерного распределения усилий в сечении тюбингов и без наличия больших изгибающих моментов по сравнению с обделкой без разжатия. Спустя три месяца после возведения обделки горное давление продолжает развиваться, а конечные величины относительных деформаций бетона тех и других колец примерно одинаковы.

О возможности применения крепи из набрызг-бетона в слабых скальных породах пишет кандидат технических наук Д. Голицинский [40]. В статье приведен краткий обзор мирового опыта применения крепей из набрызг-бетона. Описаны результаты физического моделирования на эквивалентных материалах прямоугольно-сводчатой выработки в слабо трещиноватых песчанистых сланцах. Получена качественная картина происходящих деформационных процессов под действием горного давления.

Кандидат технических наук В. Виноградов и инженер Л. Шустрова приводят результаты серии испытаний колец сборных обделок из железобетона с разными вариантами обжатия, выполненных в лаборатории ЦНИИС [41]. Испытывалось пять вариантов обжатия колец обделки, приведены эпюры распределения усилий по периметру обделок. Лучшие результаты статической работы обделки были получены для варианта обжатия на горизонтальном диаметре с двух сторон, – наиболее равномерное распределение усилий по кольцу. Для всех вариантов получили наибольшую потерю обжатия (около 50 %) на первом к месту обжатия блоке. Получены закономерности усилий в кольце в зависимости от величины усилия обжатия.

Кандидат технических наук Е. Демешко анализирует результаты натурных исследований при строительстве перегонного тоннеля Московского метрополитена в песчаных грунтах с применением щитового комплекса ТЩБ-1 с монолитно прессованной обделкой [42]. Использование глубинных реперов позволило получить закономерности формирования вертикальных смещений над контуром выработки и поверхности земли в зависимости от местоположения щита. Выявлены процессы разрыхления и уплотнения грунта.

В статье [43] Ю. Лиманов перечисляет исследования по различным вопросам тоннелестроения, выполняемых в лаборатории моделирования тоннелей ЛИИЖТа. Привел результаты моделирования методом экви-

валентных материалов статической работы односводчатой станции и второй работы – исследование статической работы обделок, возводимых при реконструкции железнодорожных тоннелей с демонтажем старой обделки.

Обобщение длительных наблюдений за деформациями зданий и сооружений в районе проходки тоннелей мелкого заложения («московский» способ строительства) шести радиусов Московского метрополитена изложены в работе [45]. Построены кривые распределения средних осадок для: отдельных технологических комплексов; различных грунтов; глубин заложения; типов крепления; технологий нагнетания. Показаны характерные кривые осадок во времени, в соответствии с которыми период полной стабилизации развития деформаций поверхности длится пять-шесть месяцев, а в отдельных случаях – до трех лет.

Список литературы

1. Храпов В. Г. Инерционное моделирование горизонтальных и наклонных выработок // Метрострой. – 1957. – № 6–7. – С. 51–55.
2. Храпов В. Г. Пространственная работа обделки наклонного хода // Метрострой. – 1957. – № 6–7. – С. 55–56.
3. Семенов А. И. О пространственной работе обделки наклонного эскалаторного тоннеля // Метрострой. – 1958. – № 2. – С. 25–27.
4. Тягин Б. В редакцию сборника «Техническая информация» (отклик на статью Г. Г. Еремеева «Акустические методы исследования бетонов и горных пород») // Метрострой. – 1958. – № 2. – С. 27.
5. Гельман Я. Г. Из опыта натурных исследований напряженного состояния тоннельных обделок // Метрострой. – 1958. – № 3–4. – С. 26–29.
6. Гельман Я. Г. Цельносекционная обделка и экспериментальные исследования // Метрострой. – 1960. – № 3. – С. 15–18.
7. Славин Б. Е. Метод расчета целиков станций метрополитена пилонного типа // Метрострой. – 1960. – № 3. – С. 24–26.
8. Сапрыкин Л. Д., Оралов Л. Н. Киевский метрополитен // Метрострой. – 1960. – № 5. – С. 1–6.
9. Славин Б. Е. Изучение проявления горного давления на моделях // Метрострой. – 1960. – № 5. – С. 26–27.
10. Антонов О. Ю. О несущей конструкции односводчатой станции // Метрострой. – 1962. – № 1. – С. 26–28.
11. Подаков В. Ф. Исследование деформации земной поверхности на участке строительства Ленинградского метрополитена // Метрострой. – 1962. – Сентябрь-октябрь. – С. 33–35.
12. Саблин В. В. Особенности производства работ и их влияние на величину осадок поверхности // Метрострой. – 1962. – Сентябрь-октябрь. – С. 36–40.
13. Жуков И. Ф. Особенности конструкции и методов сооружения и их влияние на величину осадок поверхности // Метрострой. – 1963. – № 1–2. – С. 15–18.
14. Антонов О. Ю. О некоторых факторах, влияющих на статическую работу тоннельной обделки // Метрострой. – 1963. – № 3–4. – С. 46–50.
15. Дорман Я. А. Усовершенствование способа замораживания грунтов при строительстве тоннелей и метрополитенов // Метрострой. – 1963. – № 3–4. – С. 23–27.
16. Трупак Н. Г. Замораживание грунтов при горизонтальных выработках // Метрострой. – 1963. – № 3–4. – С. 28–31.
17. Демешко Е. А., Ходош В. А. Прогнозирование осадок поверхности при щитовой проходке тоннеля в песчаных грунтах // Метрострой. – 1963. – № 3–4. – С. 50–53.
18. Подаков В. Ф. Исследование деформации земной поверхности на трассе Московско-Петроградской направления // Метрострой. – 1963. – № 3–4. – С. 56–57.
19. Дорман И., Рехвиашвили Г. Исследование ультразвуком прочности монолитных обделок тоннелей // Метрострой. – 1964. – № 8. – С. 17–19.
20. Бурштерн В., Грейц Б., Малкова Н. Способ измерения внутренних деформаций в бетонных тоннельных конструкциях с помощью тензостолбиков // Метрострой. – 1965. – № 2. –С. 24–25.
21. Антонов О. Ю. Об управлении нагрузками на конструкции // Метрострой. – 1965. – № 3. – С. 25–26.
22. Дорман И. Деформации грунтового массива при сооружении тоннелей с обделками из монолитно-прессованного бетона // Метрострой. – 1965. – № 5. – С. 26–27.
23. Дорман И. Об устранении деформаций поверхности при сооружении тоннелей мелкого заложения // Метрострой. – 1965. – № 8. – С. 20–21.
24. Корольков В. О статической работе монолитно-прессованных монолитных обделок // Метрострой. – 1967. –№ 2. – С. 14–16.
25. Гарбер В. Предварительное напряжение тоннельных обделок // Метрострой. – 1967. – № 3. – С. 9–11.
26. Чесноков С. Тоннели в Лондонской глине // Метрострой. – 1967. – № 3. – С. 25–28.
27. Антонов О., Айвазов Ю. Предложения по конструированию и расчету обжатых в породу обделок // Метрострой. – 1967. – № 4. – С. 14–16.
28. Лапшин В. Определение усилий обжатия тоннельных колец // Метрострой. – 1968. – № 4. – С. 13–14.
29. Подаков В., Саблин В. Изучение условий сооружения станций нового типа // Метрострой. – 1968. – № 6. – С. 19–20.
30. Бегун А., Меркин В. Что показали исследования колонной станции? // Метрострой. – 1968. – № 7. – С. 12–13.
31. Афендиков Л. Определение расчетных сопротивлений бетона монолитно-прессованных обделок // Метрострой. – 1968. – № 8. – С. 17–18.
32. Богородецкий А., Амусин Б. Влияние отпора породы на статическую работу несущих конструкций станций закрытого типа // Метрострой. – 1968. – № 8. – С. 19–20.
33. Ларионов В. Конструкция большого пролета в кембрийских глинах // Метрострой. – 1969. – № 3. – С. 14–15.
34. Дорман Я. Вспучивание грунтов при искусственном замораживании // Метрострой. – 1969. – № 3. – С. 16–17.
35. Оралов Л., Поправко В., Антонов О. Тоннель с обычной железобетонной обделкой, преднапряженной распором в породу // Метрострой. – 1970. – № 4. – С. 10–13.
36. Храпов В., Михельсон И. Контактные давления между обжимаемой обделкой и породой // Метрострой. – 1970. – № 5. – С. 28–29.
37. Айвазов Ю., Антонов О. Деформации стыков при обжатии обделок // Метрострой. – 1970. – № 7. – С. 27.
38. Грейц Б. Перспективный метод // Метрострой. – 1970. – № 8. – С. 22.
39. Антонов О., Сильвестров С., Скобенников Г. Может быть рекомендована // Метрострой. – 1970. – № 8. – С. 23–24.
40. Голицинский Д. Набрызг-бетон в тоннелестроении // Метрострой. – 1971. – № 1. – С. 26–27.
41. Виноградов В., Шустрова Л. Исследование вариантов обжатия тоннельных колец // Метрострой. – 1973. – № 1. – С. 26–28.
42. Демешко Е. Натурные измерения грунтового массива // Метрострой. – 1973. – № 3. – С. 7–8.
43. Лиманов Ю. Моделирование тоннелей // Метрострой. – 1973. – № 3. – С. 23–24.
44. Айвазов Ю., Антонов О. Расчет обжатых в породу сборных обделок // Метрострой. – 1973. – № 4. – С. 23–25.
45. Меркин В., Дмитриев М., Афанасьев В., Воробьев Л., Бирюков О. Влияние технологии строительства на осадки поверхности // Метрострой. – 1973. – № 7. – С. 9–10.

Для связи с автором

Лебедев Михаил Олегович
lebedev-lmgt@yandex.ru

VII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ МОСТОВ, ТОННЕЛЕЙ И МЕТРОПОЛИТЕНОВ» — ЧТЕНИЯ, ПОСВЯЩЕННЫЕ ПАМЯТИ ЛАВРА ДМИТРИЕВИЧА ПРОСКУРЯКОВА

С 18 по 21 мая 2026 г. в г. Сочи на базе Сочинского института транспорта – филиала ФГАОУ ВО «РУТ «МИИТ» была проведена VII Международная научно-техническая конференция «Проектирование, строительство и эксплуатация мостов, тоннелей и метрополитенов» – чтения, посвященные памяти Лавра Дмитриевича Проскурякова. Организаторами конференции выступили кафедра «Мосты и тоннели» ФГАОУ ВО РУТ «МИИТ» и Сочинский институт транспорта – филиал ФГАОУ ВО «РУТ «МИИТ».



В 2026 г. по сложившейся традиции в г. Сочи состоялась VII Международная научно-техническая конференция, посвященная актуальным вопросам проектирования, строительства и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры. Мероприятие прошло в формате памятных чтений, приуроченных к наследию выдающегося ученого и инженера Лавра Дмитриевича Проскурякова, внесшего значительный вклад в развитие мостостроения и транспортного строительства.

Конференция была организована в соответствии с планом выполнения научного проекта, поддержанного Министерством образования и науки РФ в форме субсидии «Анализ и разработка теоретических основ с исследованием и разработкой конструктивно-технологических решений по обеспечению эксплуатационной надежности объектов транспортной инфраструктуры в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов».

Это уже вторая конференция, проведенная в г. Сочи на базе Сочинского института транспорта: филиала ФГАОУ ВО «РУТ «МИИТ». В очном и дистанционном формате в этом году в мероприятии приняли участие порядка 100 специалистов из разных субъектов РФ: Новосибирск, Астрахань, Иркутск, Саратов, Тюмень, Краснодар, Армавир, Санкт-Петербург, Москва и Сочи.

Всего в рамках конференции было заслушано порядка 40 докладов, посвящённых актуальным проблемам подземного и мостового строительства в России и зарубежных странах.

Представители ФКУ Упрдор «Прибайкалье», ФКУ Упрдор «Тамань», ФКУ Упрдор «Черноморье» и ФКУ «Сибуправтодор», ФГБУ «Росдортехнология», ООО «МетроПроект», АО «ВНИИЖТ», АО «БЭТ», ООО «НПП СК МОСТ», ООО «НПП Геотехника», а также аспиранты, студенты и научные сотрудники ФГАОУ ВО «РУТ МИИТ», ФГАОУ ВО «МАДИ», ФГБОУ ВО «СГУПС», ФГБОУ ВО «КГАСУ» отметили проработанность докладов, научный подход и актуальность представленных исследований.

Участники конференции обсудили вопросы подготовки кадров для отрасли и вузов, образовательные программы и стандарты.

Впервые в этом году в очном формате в конференции приняли участие научные сотрудники, преподаватели и аспиранты Китайской Народной Республики: представители Северо-восточного университета (г. Шеньян).

В торжественной церемонии открытия приняли участие: заместитель главы администрации г. Сочи В. И. Бауэр; заместители начальника ФКУ Упрдор «Черноморье» М. Ю. Шешелко и М. С. Бородин; представители Северо-восточного университета КНР профессор Джао Вэнь и профессор Ван Шухунг; директор института ИПСС РУТ МИИТ Т. В. Шепитько; заведующий кафедрой «Мости и тоннели» ИПСС РУТ МИИТ А. А. Пискунов и директор Сочинского института транспорта С. В. Жаденова.

Деловая программа научно-технической конференции была разделена на три дня, первый из которых был посвящен работам молодых и будущих специалистов отрасли – студентов.

В рамках студенческой научной секции было заслушано 12 докладов от студентов кафедры «Мосты и тоннели» РУТ МИИТ и магистров Тюменского государственного университета.

Второй день конференции начался с пленарного доклада «Мост в профессию: особенности подготовки будущих инженеров на примере базовой кафедры «АО Мостострой-11»» И. Г. Овчинникова, д. т. н., профессора кафедры «Мостострой-11» Тюменского индустриального университета. В докладе рассматриваются методы и практики, обеспечивающие качественную подготовку специалистов в области мостостроения, а также роль реальных производственных условий в образовательном процессе. Доклад демонстрирует успешные подходы к интеграции теории и практики, а также пути повышения конкурентоспособности выпускников на современном рынке труда.

В рамках деловой программы был заслушан доклад главного инженера УП «Автодор» В. В. Вишневского на тему «Организация и проведение реконструкции и капитального ремонта транспортных сооружений на новых территориях РФ». Автор рассмотрел особенности планирования, технические и организационные аспекты реализации таких проектов, а также современные методы и стандарты, обеспечивающие качество и безопасность реконструкции. Доклад подчёркивает важность своевременного обновления инфраструктуры для развития регионов и повышения их транспортной доступности.

А. И. Панченко, д. т. н., профессор, заведующий лабораторией кафедры «Мосты и тоннели» РУТ МИИТ представил свою работу на тему «Повышение морозостойкости и выносливости бетона транспортных сооружений». Этот доклад подробно освещает современные методы повышения морозостойкости и выносливости бетона, используемого в транспортных сооружениях. Рассматриваются эффективные материалы и воздухововлекающие и водоотталкивающие добавки, которые помогают снизить пористость бетона. Также обсуждаются особенности технологии укладки и режимы твердения, обеспечивающие оптимальные параметры прочности и устойчивости конструкции при воздействии низких температур. Подчеркивается важность проведения современных испытаний на морозостойкость, соблюдения нормативных требований, а также подбор материалов с требуемыми характеристиками.





Церемония открытия конференции

Следующим выступил руководитель группы ООО «МетроПроект» Е. А. Шапошников с докладом на тему «Обоснование конструктивно-технологических параметров станций метрополитена без боковых посадочных платформ». В презентации рассматриваются особенности проектирования таких станций, их преимущества и недостатки, связанные с обеспечением безопасной и высокой пропускной способности. Анализируются требования к платформенной части, системам освещения, вентиляции и безопасности входных групп, а также предлагаются оптимальные конструктивно-технологические решения, направленные на повышение эффективности эксплуатации объекта и безопасности пассажиров.

Об обзоре результатов работы научной школы «Развитие теории и совершенствование методов расчета прочности и долговечности конструкций, работающих в экстремальных условиях эксплуатации, развитие научных основ эксплуатации сложных инженерных сооружений» рассказал д. т. н., профессор кафедры «Мостострой-11» Тюменского индустриального университета И. Г. Овчинников. Он рассмотрел достижения в области моделирования поведения сложных инженерных сооружений при низкой температуре, воздействие агрессивных сред, вибрации, а также привел разработку новых расчетных методов и технологий оценки их надежности. Доклад подчеркивает значение научных основ для повышения безопасности, долговечности и эффективности эксплуатации современных инженерных объектов в сложных условиях.

Доклад на тему «Влияние характеристик межфазной поверхности на динамическое разрушение бетонного композитного слоя: к вопросу об устойчивой защите тоннелей от горных ударов» представил Tong Zhang и Meng Chen, Северо-восточный университет КНР. Тема доклада является темой диссертационного исследования зарубежных специалистов, поэтому особое внимание было уделено анализу причин и последствий разрушения бетонной крепи горной выработки при горных ударах. Анализируются механизмы разрушения на границе горный массив – крепь. В работе представлены результаты математического и численного моделирования, а также результаты лабораторных испытаний на специализированной установке. Авторами предложены рекомендации по оптимизации конструктивных решений для повышения устойчивости и долговечности крепи горных выработок.

Затем выступил зам. директора научного

центра «Инфраструктура» АО «ВНИИЖТ» К. Л. Заграничек с докладом на тему «Моделирование работы изолирующих рельсовых стыков и прогнозирование их ресурса». Сообщение посвящено моделированию работы ключевых элементов железнодорожной инфраструктуры, обеспечивающих безопасную и эффективную эксплуатацию рельсовых путей. Автор рассматривает методы анализа механических и тепловых процессов, происходящих в стыках при различных условиях эксплуатации, а также разработанные компьютерные модели для оценки их поведения и износа. Особое внимание в докладе уделено прогнозированию ресурса стыков на основе полученных результатов моделирования, что позволяет планировать своевременное проведение ремонтов и замены для повышения надежности и безопасности железнодорожных перевозок.

Далее об исследовании и применении малогабаритной системы крепления балок перекрытия из труб на примере станции метро г. Шэньяна рассказали Qian Bai и Wen Zhao, Северо-восточный университет КНР. Авторами представлена инновационная система опережающей крепи для сооружения станционного комплекса метрополитена. В докладе рассматриваются конструктивные особенности системы, преимущества такой технологии, например, компактность, легкость монтажа и высокая несущая способность системы. В качестве примера приводится опыт внедрения на станции метро в г. Шэньян Китайской Народной Республики, где успешно решены вопросы увеличения темпов строительных работ и обеспечения безопасности. Доклад демонстрирует эффективность данного решения в условиях ограниченного строительного пространства и перспективы его дальнейшего применения на других объектах метрополитена.

Заместитель генерального директора АО «Бетонные элементы транспорта» С. А. Гнездилов рассказал участникам конференции о диагностике и мониторинге железобетонных элементов конструкций в процессе их эксплуатации. В презентации рассмотрены технические средства и технологии, позволяющие своевременно выявлять дефекты, трещины, коррозию и другие виды повреждений, а также оценивать состояние структур без их разрушения. Особое внимание уделяется применению неразрушающих методов контроля, автоматизированных систем контроля и датчиков, обеспечивающих постоянное наблюдение за состоянием объекта в реальном времени. Результаты исследований помогают повышать безопасность, продлевают срок службы инженерных сооружений и позволяют своевременно планировать ремонтные работы.

Следующим выступил начальник службы проектирования АО «Объединение «Ингеоком» Б. А. Хубаев с докладом на тему «Строительство участка Рублево-Архангельской линии Московского метрополитена». Специалист представил основные технические и организационные решения, применяемые при реализации крупного инфраструктурного проекта в условиях плотной городской застройки. В докладе анализируются особенности инженерных решений, методы управления строительством, а также вопросы обеспечения безопасности и минимизации влияния на окружающую среду при выполнении строительно-монтажных работ. Доклад подчеркивает высокий уровень организации строительства на всех площадках для успешного завершения такого масштабного объекта в краткие сроки и в соответствии с действующими нормативами и стандартами.

Затем Bo Lu и Shuhong Wang представили доклад на тему «Новая подземная опорная конструкция: исследование и применение». Авторами предложена инновационная система крепи для сооружения станционных комплексов метро и тоннелей большого поперечного сечения. В презентации представлены теоретические основы и методы исследования прочности и долговечности такой конструкции, а также особенности проектирования и изготовления. Особое внимание уделено практическому применению новых технологий в строительстве подземных сооружений, также в докладе анализируется опыт реализации подобных конструкций на различных объектах. Благодаря результатам исследования и успешным кейсам внедрения, представленное решение способствует повышению надежности, безопасности и эффективности строительства подземных объектов в сложных условиях плотной городской застройки.

Об оценке остаточного ресурса железобетонных пролетных строений мостов на основе вероятностного анализа рисков рассказал к. т. н., зав. кафедрой «Мосты, тоннели и строительные конструкции» ФГБОУ ВО МАДИ Ш. Н. Валиев. Автором предложены подходы к моделированию состояния конструкций с учетом различных факторов повреждений, накапливающихся за время эксплуатации, таких как трещины, коррозия арматуры и усталостные дефекты. Доклад также исследует возможности интеграции данных о фактическом состоянии сооружений, полученных с помощью неразрушающих методов контроля для более точного прогнозирования их текущего состояния. Результаты этого исследования позволяют повысить безопасность мостовых сооружений, оптимизировать программы технического обслуживания и ремонта, а также снизить риски аварийных ситуаций благодаря своевременному принятию решений о замене или ремонте конструкций мостового сооружения.

Далее выступил генеральный директор ООО «НПП СК МОСТ» В. Ю. Казарян с докладом на тему «Ремонт и реконструкция коробчатых мостовых сооружений». В первую очередь был представлен анализ типовых дефектов и повреждений таких мостов, а также основные подходы к их устранению начиная от локальных ремонтных работ до полной реконструкции. Автор также уделил внимание современным подходам к ремонту и реконструкции, которые позволяют значительно продлить срок службы мостов. Кроме того, в докладе анализируются особенности выполнения ремонтных мероприятий с учетом эксплуатации мостов в сложных климатических условиях. Результаты работы подчеркивают важность своевременного обслуживания и модернизации мостовых сооружений для обеспечения их надежной эксплуатации в долгосрочной перспективе.

Ассистент кафедры «Мосты и тоннели» ФГАОУ ВО РУТ МИИТ А. А. Карпухина выступила с докладом на тему «Влияние водопроявлений на НДС тоннельной обделки в условиях ММГ». В нем рассмотрены причины возникновения водопроявлений в таких условиях, а также их воздействие на крепь подземных сооружений различного назначения. Особое внимание уделено процессам растепления и замораживания влаги в конструктивных элементах тоннелей, а также методам диагностики и профилактики водопроявлений. Анализируются современные технологии защиты от водопроявлений, позволяющие снизить негативные последствия и обеспечить стабильное напряженно-деформированное состояние тоннелей. Полученные результаты способствуют улучшению проектных решений, применяемых при строительстве подземных сооружений в условиях многолетнемерзлых и вечномерзлых грунтов.

Третий день деловой программы конференции начался с доклада д. т. н., зав. каф. «Мосты» ФГБОУ ВО СГУПС А. Н. Яшнова на тему «К вопросу организации мониторинга технического состояния мостов на высокоскоростной железнодорожной магистрали». Исследуются современные методы и технологии, позволяющие постоянно отслеживать деформации, износ и общее состояние конструкций в реальном времени. Рассматриваются принципы формирования системы автоматизированных датчиков, сбор и обработка данных, а также применение аналитических методов для своевременного выявления потенциальных дефектов. Доклад подчеркивает

важность эффективной организации мониторинга для обеспечения безопасности, надежности и долговечности инфраструктуры высокоскоростных магистралей, а также способствует снижению затрат на техническое обслуживание и ремонт.

Далее о решении проблем и задач механики разрушения в программном комплексе GeomechaniCS участникам рассказали д. т. н., профессор кафедры «Мосты и тоннели» С. В. Коваль; к. ф.-м. н., заведующий лабораторией системного математического моделирования жизненного цикла транспортных сооружений ФГАОУ ВО РУТ МИИТ Ф. Б. Киселёв и аспирант ИМАШ РАН М. С. Складнова. Авторами были проанализированы возможности и особенности этого программного продукта для моделирования процессов разрушения и деформации строительных конструкций и массива грунта. Особое внимание уделяется используемому в программном комплексе методу численного моделирования и принципу его работы. Также представлены конкретные примеры применения GeomechaniCS для решения актуальных инженерных задач в области геомеханики и строительной механики. Современный программный комплекс GeomechaniCS позволяет повысить точность прогнозирования при выполнении специализированных геотехнических расчетов.

Е. А. Пестрякова, к. т. н., доцент кафедры «Мосты и тоннели» ФГАОУ ВО РУТ МИИТ представила свою работу «Учет наличия стыков в сборных тоннельных обделках при численном моделировании сейсмических воздействий». В презентации рассмотрены методы создания расчетных моделей, позволяющих более точно учитывать влияние стыков на распределение напряжений и деформаций в конструкции под сейсмическим воздействием. Анализируются подходы к моделированию трещинообразования и энергии рассеяния при сейсмических колебаниях с учетом условий соединения элементов тоннеля. Также даны примеры расчетных сценариев и результаты, демонстрирующие влияние стыков на общую сейсмостойкость сооружений. Полученные выводы помогают повысить надежность и безопасность тоннелей в сейсмоопасных районах, а также оптимизировать проектирование сборных тоннелей.

Об использовании цифровых технологий в дипломном проекте станционного комплекса метрополитена в условиях г. Новосибирска рассказали И. Ю. Жданов, С. С. Паничев, В. В. Никонов, ФГБОУ ВО СГУПС под руководством Г. Н. Полянкина, к. т. н., доцент, зав. НИЛ «Геотехника, тоннели и метрополитены». На примере дипломного проекта рассматриваются инновационные методы моделирования, автоматизации проектных расчетов, использования геоинформационных систем (ГИС), а также технологий BIM (Building Information Modeling). Особое внимание уделяется адаптации цифровых решений к специфике региональных климатических и геологических условий, а также повышению эффективности проектирования, точности расчетов и сокращению сроков выполнения работ. Доклад подчеркивает, что применение цифровых технологий не только облегчает работу инженеров, но и способствует созданию более безопасных, эффективных и устойчивых объектов метро, отвечающих современным требованиям инфраструктурного развития крупных городов.

Ассистент кафедры автомобильных дорог, мостов и тоннелей ФГБОУ ВО «КГАСУ» Е. В. Новицкий представил доклад на тему «Расчет деформативности составных деревянных балок с учетом жесткости нагельных соединений». В нем рассматриваются особенности моделирования поведения таких конструкций, а также влияние характеристик нагелей – их прочности и жесткости – на общие деформирования балок. Анализируются параметры, определяющие устойчивость и долговечность соединений, а также предлагаются подходы к более точному расчету прогибов и деформаций. В результате работы обеспечивается более надежное проектирование деревянных конструкций, что способствует увеличению их долговечности и безопасной эксплуатации в различных типах сооружений.

Затем к. т. н., доцент, зав. НИЛ «Геотехника, тоннели и метрополитены», ФГБОУ ВО СГУПС Г. Н. Полянкин представил работу «Опыт скоростной проходки тоннелей с использованием инновационных технологий и оборудования горного способа при строительстве совмещенной (автомобильной и железной) дороги «Адлер – Альпика-Сервис в Сочи». В ней рассматриваются особенности использования передовых методов и техник горного дела, таких как БВР, автоматизация процессов и внедрение инновационных систем контроля и безопасности. Также обсуждаются результаты, достигнутые благодаря применению современных технологий – это повышение скорости выполнения работ, снижение затрат и улучшение экологической безопасности. Доклад демонстрирует как использование прогрессивных технологий способствует успешной реализации крупных инфраструктурных проектов в горных условиях с максимальной эффективностью и минимальными рисками.

Ассистент кафедры «Мосты и тоннели» ФГАОУ ВО РУТ МИИТ И. А. Галабурда представил доклад на тему «Совершенствование II принципа сооружения фундаментов на ММГ». В работе представлена технология сооружения фундамента мостовой опоры для облегченного композитного пролетного строения. Выполнен анализ существующих методик сооружения фундаментов на многолетнемерзлых грунтах, выполнено их сравнение с предложенной технологией. В докладе подробно описана последовательность работ, необходимых для сооружения фундамента и представлен проект производства работ.

Об инклинометрической системе для проведения геомониторинга на подходах к мостовым переходам рассказал к. т. н., доцент Геопроект Н. А. Устян. В докладе рассматриваются принципы работы системы, методы измерения уклонов конструкций, а также особенности установки и эксплуатации оборудования в условиях реального строительного и эксплуатационного режима. Анализируются задачи своевременного выявления деформаций и смещений, связанных с воздействием внешних факторов, таких как нагрузки, геологические условия и климатические изменения. Доклад подчеркивает необходимость использования современных инклинометров для обеспечения надежности мостовых сооружений, а также демонстрирует эффективность диагностики в процессе эксплуатации транспортных объектов.

Следующим с докладом на тему «Разработка методики исследования напряженно-деформированного состояния асфальтобетонных покрытий в зоне продольных и поперечных швов сопряжения с учетом характера деформаций» выступил Т. А. Ниров, аспирант Воронежского государственного технического университета. Автор рассматривает особенности моделирования и анализа напряжений, возникающих в различных типах швов, влияющих на долговечность и эксплуатационные характеристики покрытия. Анализируются методы определения деформаций и напряжений, влияющих на развитие трещин и общего износа. Также предложены подходы к усилению конструкции и оптимизации расположения швов для повышения надежности дорожного покрытия. Результаты исследования помогают повысить качество проектирования и ремонта асфальтобетонных полотен, а также увеличить их ресурс.

О применении временных мостовых сооружений в районах крайнего севера Российской Федерации рассказал А. М. Шарипов, ассистент кафедры «Мосты и тоннели» ФГАОУ ВО РУТ МИИТ. Рассматриваются особенности проектирования, строительства и эксплуатации временных мостов в сложных условиях, таких как низкие температуры, сильные ветры, увеличенные снежные нагрузки. Ана-

лизируются типы временных мостов, их технологические решения и материалы, а также способы повышения надежности и долговечности при краткосрочных и долгосрочных задачах. Доклад подчеркивает роль временных мостов в обеспечении транспортной доступности удаленных населенных пунктов, объектов промышленности и инфраструктурных проектов в условиях сурового климата. Также рассматриваются современные инновации и стратегии их оптимального использования для повышения эффективности и безопасности таких сооружений.

А. Р. Попонин, аспирант кафедры «Мосты и тоннели» ФГАОУ ВО РУТ МИИТ, представил работу на тему «Совершенствование второго принципа сооружения фундаментов в зонах ММГ. Расчетное обоснование». Автором представлена технология сооружения фундамента транспортного объекта в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов. Для предложенной технологии выполнено расчетное обоснование в специализированном программном комплексе Midas GTS NX, а также подобраны параметры паровой иглы для предварительного растепления массива ММГ, приведен геотехнический деформационный расчет сооружаемой конструкции, представлены результаты расчетов с подбором оптимальной конструкции фундамента и их сравнение с существующими технологиями сооружения фундаментов в аналогичных условиях.

О применении ГПГ в строительстве рассказал Г. Чесноков, НПП «Геотехника». Доклад посвящён применению ГПГ в современном строительстве и анализу новых тенденций в использовании этого материала. В работе рассматриваются ключевые свойства ГПГ – низкая теплопроводность, высокая огнестойкость, долговечность и экологичность, которые делают его перспективным теплоизоляционным решением. Особое внимание уделяется инновационным направлениям: снижению себестоимости за счёт использования вторичного стекла, разработке композитных модификаций с улучшенными механическими свойствами и интеграции ГПГ в проекты «зелёного» строительства. Также освещаются сферы применения материала – от утепления фасадов и кровель до дорожного строительства в зонах вечной мерзлоты и создания энергоэффективных зданий. В заключение подводятся итоги о растущем потенциале ГПГ и перспективах его массового внедрения в строительной отрасли в ближайшие годы.

Заключительным стал доклад аспиранта ФГАОУ ВО РУТ МИИТ А. А. Ибрагимовой на тему «Исследование физико-механических характеристик композитных материалов



Встречи со студентами



Технический тур

на основе полимеров по экспериментальным данным». В работе рассматриваются ключевые характеристики материала, а именно его прочность на растяжение и сжатие, модуль упругости, износостойкость и термостойкость. Представлены экспериментальные данные по испытаниям образцов с различным типом и долей наполнителей. Проведён сравнительный анализ результатов, который позволил выявить требуемые соотношения компонентов для достижения заданных эксплуатационных свойств. Выводы доклада содержат рекомендации по применению исследованных композитных материалов в мостовом строительстве.

В рамках конференции состоялось обучение по краткосрочной программе «Проектирование, строительство и эксплуатация мостов, тоннелей и метрополитенов», а также выездные производственные туры и экскурсии по г. Сочи.

Несколько спикеров провели отдельные встречи (лекции и мастер-классы) со студентами Института транспорта и сервиса с информацией по специфике работы отрасли, изменению законодательства, вопросам строительства и реконструкции объектов в сложных условиях, транспортной безопасности.

В завершение были подведены итоги прошедшей конференции. Все подчеркнули, что мероприятие стало эффективной площадкой для обмена знаниями и опытом между учеными, студентами, аспирантами и представителями строительных организаций. Участники обсудили современные вызовы в области транспортного строительства, поделились результатами исследований и наметили пути решения актуальных задач. Организаторы благодарят всех за активное участие в мероприятии и ждут встречи на следующей конференции в 2027 году!

Обзор подготовили

Попонин Артём Романович
artempoponin1@gmail.com
Жадёнова Светлана Владимировна
rutsochi@yandex.ru
Телятникова Наталья Александровна
sharklike@mail.ru
Галабурда Игорь Андреевич
igor.galaburda@yandex.ru
Шарипов Артур Маратович
artur.sharipov.77@mail.ru

ТВОРЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК К. П. БЕЗРОДНОГО В ЖУРНАЛЕ «МЕТРО И ТОННЕЛИ»

Безродный Константин Петрович (1945–2024), доктор технических наук, являлся почетным членом Тоннельной ассоциации России, членом Российского общества по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению, председателем Государственной аттестационной комиссии по специальности «Строительство подземных сооружений» в Горном институте Санкт-Петербурга. Им было написано 187 печатных работ, в том числе несколько монографий. Долгие годы работал на разных должностях в ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», где создал и возглавил научно-исследовательский отдел, состоящий из трех лабораторий – геомеханики, геофизики и геоэкологии. Активно участвовал в публикациях статей в журнале «Метро и тоннели». Редакция «Метро и тоннели», сделав двадцатилетний обзор содержания выпусков журнала, считает полезным в краткой форме для тоннельной отрасли проинформировать специалистов подземного строительства о содержании статей К. П. Безродного, отдавая ему дань памяти и уважения коллег.



Специальные способы работ при сооружении транспортно-дренажной штольни на Северомуйском железнодорожном тоннеле

Приведена краткая характеристика условий строительства. Описано преодоление разлома в РТДШ на ПК 17+80 в 4-1 тектонической зоне. Сделан вывод, что локальный дренаж в условиях 4-й тектонической зоны Северомуйского железнодорожного тоннеля эффективно улучшает условия проходки закрепленных участков неустойчивых грунтов при значительных гидростатических давлениях [1].

О строительстве тоннеля под Гибралтарским проливом

Основной вариант строительства включает три тоннеля каждый длиной 38 км, 28 км под водой между мысами Палома и Малабата, которые в нижней своей точке достигают 400 м ниже уровня моря и 100 м под морским дном. Геофизическая съемка на суше (около 15 км профилей) и буровые работы (всего около 3500 м пробурено с отбором керна) практически охватили все задачи, запланированные на стадии технико-экономического обоснования, несмотря на относительно ограниченные масштабы [2].

Обследование автодорожного тоннеля в г. Уфе

Проект автодорожного тоннеля для обеспечения транзитного проезда транспорта по автодороге федерального значения М-5 Самара – Уфа – Челябинск, общей длиной 1249 м (в том числе подземным способом 1025,5 п. м, открытым – 223,5 п. м) был выполнен генеральным проектировщиком – Проектным бюро № 1 ФГУП «УС30» В соответствии с разработанным проектом строительство тоннеля ведется с поэтапным раскрытием сечения, состоящим из девяти фаз. С учетом полученных результатов исследований, анализа проектной и исполнительной документации по строительству рассматриваемого тоннеля, было сделано заключение с оценкой состояния подземных выработок и качества выполненных работ – о скорейшем возобновлении строительства, корректировке проектной документации и сооружении подземных выработок в соответствии с принятой технологией [3].

Комбинированная технология стабилизации грунтов при сооружении эскалаторных тоннелей станций Петербургского метрополитена

В статье описывается создание надежного противофильтрационного и прочностного ограждения для обеспечения безопасности сооружения эскалаторных тоннелей и исключения больших осадок дневной поверхности в неустойчивых водоносных грунтах [4].

Основные проектные положения совмещенной (автомобильной и железной) дороги Адлер – Красная Поляна

Всего на трассе запроектировано шесть железнодорожных тоннелей общей протяженностью 10,5 км, три автодорожных общей длиной 7,5 км. Между первыми железнодорожным и автодорожным, третьим железнодорожным и вторым автодорожным, пятым железнодорожным и третьим автодорожным тоннелями предусмотрены штольни общей протяженностью 9,1 км. Третий железнодорожный, второй автодорожный тоннели и штольни будут сооружать щитовыми механизированными тоннелепроходческими комплексами с закрытой грудью с блочной круговой железобетонной водонепроницаемой обделкой. Остальные тоннели подковообразного очертания. Их прокладка запроектирована горным способом. Обделка железобетонная с пленочной гидроизоляцией [5].

II Межрегиональная научно-практическая конференция

26–28 ноября 2008 г. в Санкт-Петербурге в помещении ОАО «ЛенНИИпроект» состоялась II Межрегиональная научно-практическая конференция «Обеспечение безопасности при использовании современных технологий строительства подземных сооружений в сложных условиях городской застройки», посвященная освоению подземного пространства северной столицы. Заслушав доклады и сообщения, участники конференции отметили, что конференция способствует консолидации усилий по использованию безопасных технологий возведения подземных сооружений в городской застройке, правильное применение которых зависит от учета геотехнических свойств грунтов с прогнозом их изменений, а также внедрению новых технологических механизмов производства работ и мониторинга на всех стадиях строительства и эксплуатации подземных объектов [6].

Новое «рождение» набрызг-бетона на Петербургском метрострое

Статья обосновывает возможность и целесообразность использования набрызг-бетона в качестве тоннельной обделки для вспомогательных выработок в плотных протерозойских глинах [7].

Сквозь годы и горы

Тоннели под Байкальским, Северомуйским, Кодарским хребтами и на побережье озера Байкал – наиболее сложные, барьерные объекты Байкало-Амурской железнодорожной магистрали. Их строительство характеризовалось концентрацией капитальных вложений и исключительной напряженностью. Около 90 % объемов СМР приходилось на горно-капитальные работы, от которых главным образом зависел своевременный ввод в эксплуатацию тоннелей. Высокой производительности горно-капитальных работ можно достичь лишь

после соответствующей подготовки, заключающейся в продуманном освоении районов строительства и проведении всесторонних организационно технических мероприятий, особенно по созданию производственных баз. Такие проблемы требуют планомерного решения комплекса взаимосвязанных вопросов [8].

Результаты обследования Гимринского автодорожного тоннеля

В статье представлены результаты инструментального и визуального обследования состояния всех конструкций автодорожного тоннеля [9].

Натурные исследования напряженно-деформированного состояния систем «обделка-массив» в составе горно-экологического мониторинга

В статье изложены результаты исследований напряженно-деформированного состояния системы «крепь-обделка-массив».

Результаты легли в основу поверочных расчетов строительных конструкций [10].

Формирование и применение новой теории и аналитических методов расчета крепи горных выработок

В качестве модели массива пород принимается линейно деформируемая среда, к которой применимы методы математической теории упругости. Благодаря этому положению математическим языком механики подземных сооружений является математический аппарат теории упругости, развитый в классических трудах отечественных ученых: Н. И. Мусхелишвили, Д. И. Шермана, С. Г. Лехницкого, их учеников и современных авторов. Отсюда следует принципиально важная особенность аналитических методов расчета крепи: они основаны на строгих (аналитических) решениях соответствующих задач теории упругости (соответствующих принятым расчетным схемам).

В настоящее время можно отметить крутой поворот мировой науки и практики к аналитическим методам расчета подземных конструкций [11].

Новые разработки института за последние пять лет

Очень важным явилась разработка совместно с Тоннельной ассоциацией России и УРАН ИПКОН РАН «Методического руководства по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей», которое согласовано Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ и включено в реестр обязательных нормативных документов. Во многом результаты геотехнического мониторинга позволили принимать правильные технические решения в части технологии сооружения горных тоннелей, конструкций крепей и обделок. При этом создан банк данных по инженерно-геологическим, гидрогеологическим, природно-климатическим условиям и соответствующим им способам сооружения, конструкциям крепей и обделок, что дает возможность осуществлять методологию аналогового проектирования.

На основании проведенных исследований разработаны экспериментально-теоретические методы расчета подземных конструкций, новые методы натурных наблюдений [12].

Малоосадочные технологии при строительстве метро в историческом центре Санкт-Петербурга

Санкт-Петербург является вторым по количеству жителей (5 млн) городом России, и вопросы развития современного пассажирского транспорта здесь стоят очень остро, тем более что город расположен на более чем 40 островах в дельте реки Невы, а существующие мосты сильно перегружены наземным транспортом.

В настоящее время в городе действуют пять линий метро протяженностью около 120 км с 64 станциями; в сутки осуществляется перевозка 2,3 млн пассажиров. Инженерно-геологические условия строительства Петербургского метрополитена непростые. С поверхности мощностью до 40 м расположена толща четвертичных водонасыщенных отложений. Грунты чрезвычайно неустойчивы. Под четвертичными отложениями находится мощный слой плотных сухих протерозойских глин.

Существующие до настоящего времени технологии строительства станционных узлов метрополитена и наклонных эскалаторных тоннелей приводили к значительным деформациям вышележащей толщи грунта и расположенных на ней зданий и сооружений, приводящим иногда к нарушению конструкций и к полному выводу сооружений из эксплуатации.

Особенно нетерпимо, когда в исторической части города мемориальные здания и архитектурные памятники подвергаются полному разрушению. Поэтому чрезвычайно важным является разработка и внедрение технологий по предотвращению недопустимых деформаций существующих зданий и сооружений.

В статье представлены наиболее значимые научные разработки, новые конструкции, технологии, внедренные в практику проектирования, строительства и эксплуатации Санкт-Петербургского метрополитена за последние 26 лет, обеспечивающие: минимальные воздействия на здания и сооружения, особенно исторической части города; снижение материальных и денежных ресурсов; безопасность при ведении проходческих работ и эксплуатации метрополитена [13].

Комплексный геотехнический мониторинг сопровождения строительства эскалаторных тоннелей в четвертичных водонасыщенных грунтах с помощью ТПМК

Эскалаторный тоннель диаметром 10,4 м сооружен ТПМК с грунтовым пригрузом забоя, способным вести проходку в грунтах от пылеватых песков до полускальных и скальных грунтов при гидростатическом давлении до 0,55 МПа. Геотехнический мониторинг включает систему постоянных и непрерывных наблюдений, анализа и прогноза геодинамического состояния объектов, подвергаемых воздействию в процессе вновь производимых строительных работ, а также оценку негативного влияния горных работ на окружающую застройку. По результатам измерений, проведенных по датчикам гидростатического давления, строили распределение внутрипластовых давлений, оценивали напряженное состояние грунтового массива под зданиями, контролировали его напряженное состояние в период строительства, а также технологические параметры пригруза забоя и нагнетания за обделку. [14].

Опережающее забой тоннеля изучение инженерно-геологических и гидрогеологических условий методом ЭМИ СШП зондирования и регистрации ЕИЭМПЗ

В результате опытно-методических и производственных работ в период 1984–1987 гг. был выбран метод ЕИЭМПЗ. В условиях проходки Северомуйского тоннеля была подтверждена эффективность метода ЕИЭМПЗ при обнаружении разломов из забоя на удалении до 20 м. Измерения методом ЕИЭМПЗ для целей опережающей разведки проводятся регулярно в забое не менее одного раза в смену и не менее одного замера на 5–10 м проходки. Для контроля данных ЕИЭМПЗ по забою используются измерения на опорных точках в сечениях вблизи забоя с датчиками деформаций [15].

Геотехническое обеспечение при строительстве двухпутного перегонного тоннеля с помощью ТПМК

Представлено геотехническое сопровождение строительства двухпутного перегонного тоннеля с помощью ТПМК в четвертичных совершенно неустойчивых грунтах в Санкт-Петербурге при плотной городской застройке. Даны результаты проведенной работы, обеспечившей безосадочную и безаварийную проходку тоннеля. Рассмотрены результаты натурных измерений в составе геотехнического мониторинга [16].

Строительство эскалаторных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена

Тоннели и станции Санкт-Петербургского метрополитена располагаются в плотных

протерозойских и кембрийских глинах. Выше находятся водонасыщенные четвертичные отложения. Эскалаторные тоннели пересекают эти грунты. На сегодняшний день реализовано несколько способов сооружения этих тоннелей и конструкций обделок для снижения деформаций дневной поверхности. Классическим способом строительства эскалаторных тоннелей для Санкт-Петербурга является способ замораживания водонасыщенных грунтов для их стабилизации. Крепление выполняется сборной тюбинговой обделкой. Разработка малоосадочных технологий строительства позволила реализовать метод комплексной стабилизации грунтов с закреплением грунта методом струйной технологии и замораживания в пределах закрепленных грунтов, проходку эскалаторных тоннелей при помощи тоннелепроходческого механизированного щита с грунтовым пригрузом забоя, а также строительство под защитой «стены в грунте» в сочетании с методом струйной цементации [17].

Что нового в научно-технических разработках к юбилею ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

В настоящем материале даны следующие научно-технические достижения института за последний период времени. 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.

Сохранение исторической части города при строительстве тоннелей метрополитена.

Перспективы дальнейшего совершенствования конструкций и технологии строительства тоннелей Петербургского метрополитена [18].

Горно-экологический мониторинг как инструмент понимания геомеханических процессов при строительстве метрополитена

Представлены результаты натурных исследований напряженно-деформированного состояния обделки наклонного тоннеля в неустойчивых грунтах. Напряженное состояние обделки, полученное в результате исследований, соответствует расчетным данным, вычисленным методами механики сплошной среды. Таким образом, технология проходки эскалаторного тоннеля с помощью ТПМК с грунтовым пригрузом забоя не нарушает сплошности грунтового массива [19].

Современный опыт применения теоретических подходов геомеханики в подземном строительстве, базирующихся на методах механики сплошной среды

Проанализированы современное состояние теории расчета и накопленный опыт проектирования транспортных подземных сооружений. Приводятся примеры реализации сложных инженерных решений, иллюстрирующие несостоятельность появившихся в последнее время в научных публикациях попыток отказа от традиционных подходов в геомеханике, основанных на методах механики сплошной среды [20].

Результаты выполнения комплексной программы совершенствования технологии сооружения и постоянных конструкций Петербургского метрополитена

За последние два десятилетия при строительстве Санкт-Петербургского метрополитена были внедрены новые технологические решения, направленные на снижение деформаций дневной поверхности, увеличение доли механизации горнопроходческих работ и стабилизации грунтового массива на время проходки подземных сооружений.

Новые технологические решения разработаны для горизонтальных и наклонных выработок. Эффективность внедряемых технологий определяется по результатам натурных исследований в рамках горно-экологического (геотехнического) мониторинга. Исследования напряженно-деформированного состояния системы «обделка – вмещающий массив» позволяют определить оптимальные методы расчета подземных сооружений [21].

Новые технологические и конструктивные решения, рожденные при строительстве тоннелей БАМ

Были разработаны на уровне изобретений два геофизических метода. Один основан на регистрации естественных импульсов электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ). Получено, что при проходке тоннеля, когда зона концентрации напряжений в массиве (зона опорного давления) попадает в предразломную зону, электромагнитная имиссия (ЭМИ) увеличивается, затем при продвижении забоя, когда зона опорного давления попадает в разлом (зона дезинтеграции грунтов) ЭМИ падает.

Второй метод – это сверхширокополосная (СШП) георадиолокация. Также специалисты Ленметрогипротранса разработали проект замораживания водонасыщенных грунтов разлома жидким азотом. В результате теоретических исследований инъекционно закрепленных грунтов был разработан метод расчета косвенно армированных грунтов прожилками раствора с использованием методов механики сплошной среды. Большие исследования были проведены и по конструкциям крепей и обделок тоннелей.

Сложнейшие условия строительства тоннелей БАМ стали толчком для создания новых технологий и конструкций, а тоннелестроительная отрасль СССР приобрела новый технический уровень и высококвалифицированных специалистов в тоннелестроении [22].

О тоннеле на о. Сахалин

XXI век по праву можно считать не только временем развития новых технологий, но и их внедрения. Современные инженерные решения воплощаются во многих отраслях народнохозяйственной деятельности. Как, например, строительство первой в мире плавучей атомной теплоэлектростанции, которая в 2019 г. начнет давать тепло и электричество на Чукотке. Не отстает во внедрении новых технологий и направление по освоению подземного пространства. Новые технологии реализуются в масштабных транспортных проектах, обеспечивая экономическое развитие регионов, разгрузку существующих транспортных магистралей, появление новых рабочих мест, туристическую привлекательность. После окончания строительства таких уникальных сооружений, как объекты к проведению зимней олимпиады 2014 г., мостовых переходов в Крым, объекты к проведению чемпионата мира футболу 2018 г., появляется необходимость развития транспортной инфраструктуры других регионов. Так в комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 г., утвержденный Правительством Российской Федерации, включено строительство железнодорожной линии Селихин – Ныш с переходом пролива Невельского [23].

Ленметрогипротранс – 30 лет в Тоннельной ассоциации России

Первым и самым важным объектом Тоннельной ассоциации стали тоннели Байкало-Амурской железнодорожной магистрали. Генеральным проектировщиком этих тоннелей был Ленметрогипротранс, а генеральным подрядчиком по строительству – Бамтоннельстрой. Специалисты ЛМГТ разработали методы, позволяющие уточнить инженерно-геологические и гидрогеологические условия впереди забоя тоннеля, для выбора оптимальных технологий сооружения тоннелей. Был разработан проект замораживания водонасыщенных грунтов разлома жидким азотом, был разработан проект комплексного водопонижения в Ангараканской депрессии для сооружения транспортно-дренажной штольни (ТРДШ) и тоннеля. Был применен разработанный для различной степени дезинтеграции грунтов впереди забоя опережающий забой экран из труб. Большие исследования были проведены по конструкциям крепей и обделок тоннелей. Другим очень важным направлением для ТАР было проектирование и строительство метрополитена в Санкт-Петербурге. С начала XXI в. был получен ряд достижений института: реализация комплексной программы по разработке и внедрению новых конструктивно-технологических решений с применени-

ем набрызг-бетонной крепи и опережающих забой инъекционных анкеров при строительстве подземных выработок Санкт-Петербургского метрополитена; сохранение исторической части города при строительстве тоннелей метрополитена; перспективы дальнейшего совершенствования конструкций и технологии строительства тоннелей Петербургского 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 [24].

Транспортный переход в тоннельном варианте на о. Сахалин

Возникшая пауза в принятии решения о транспортном переходе на о. Сахалин создаёт естественную возможность ещё раз вернуться к этому важному объекту, проект которого отнюдь не потерял своё технико-экономическое и социальное значение. Проблема постоянной и надёжной транспортной связи о. Сахалина с материковой частью России давно привлекает внимание специалистов разного профиля. Обсуждение ведётся в области проектирования, строительства и эксплуатации соответствующих крупномасштабных транспортных объектов с учётом особенностей природы и климата прилегающей территории материка и о. Сахалин, в том числе, большая длительность холодного периода с обильными зимними осадками, а также высокая сейсмоактивность региона, а также современной социально-экономической картины. Соответственно, мнения высказаны в самых разных литературных источниках, и есть опасность, что не все указанные мнения будут учтены при принятии решения в целом и по отдельным техническим вопросам. В связи с этим целесообразно, по-видимому, дать их обобщение, высказать точку зрения профессионального сообщества по этому стратегически важному социально-экономическому и геополитическому вопросу [25].

Размыв, год 1974 – год 2023

История Размыва между станциями «Лесная» и «Площадь Мужества» Санкт-Петербургского метрополитена достойна войти в учебники с описанием реализованных технологий строительства, борьбы с аварийными ситуациями и особенностями эксплуатации тоннелей в плывунных грунтах. На примере строительства перегонных тоннелей между указанными станциями есть замечательная возможность сравнения двух технологий сооружения тоннелей в одинаковых инженерно-геологических и гидрогеологических условиях [26].

Список использованных источников

1. Салан А. И., Безродный К. П., Мацегора А. Г. Специальные способы работ при сооружении транспортно-дренажной штольни на Северомуйском ж/д тоннеле // Метро и тоннели. 2005. № 2. С. 20–21.
2. Безродный К. П., Салан А. И. О строительстве тоннеля под Гибралтарским проливом // Метро и тоннели. 2005. № 1. С. 22–23.
3. Безродный К. П., Лебедев М. О., Педчик А. Ю. Обследование автодорожного тоннеля в г. Уфе // Метро и тоннели. 2008. № 6. С. 15–18.
4. Безродный К. П., Маслак В. А., Марков 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. 2009. № 5. С. 35–37.
5. Салан А. И., Безродный К. П., Соловьев А. Н. Основные проектные положения совмещенной (автомобильной и железной) дороги Адлер – Красная Поляна // Метро и тоннели. 2009. № 2. С. 14–15.
6. Безродный К. П., Лебедев М. О., Кулагин Н. И. II Межрегиональная научно-практическая конференция // Метро и тоннели. 2009. № 1. С. 38.
7. Безродный К.П., Крюковский Ю.А., Голицынский Д.М., Старков А.Ю., Власов Н.И. Новое «рождение» набрызг-бетона на Петербургском Метрострое // Метро и тоннели. 2009. № 1. С. 24–26.
8. Бессолов В. А., Касапов Р. И., Власов С. Н., Кулагин Н. И., Меркин В. Е., Безродный К. П., Салан А. И. Сквозь годы и горы // Метро и тоннели. 2010. № 4. С. 14–18.
9. Безродный К. П., Алёхин А. В., Гевирц Г. Я. Результаты обследования Гимринского автодорожного тоннеля // Метро и тоннели. 2010. № 2. С. 36–38.
10. Безродный К. П., Лебедев М. О. Натурные исследования напряженно-деформированного состояния систем «обделка-массив» в составе горно-экологического мониторинга // Метро и тоннели. 2011. № 6. С.28–30.
11. Булычев Н. С., Фотиева Н. Н., Безродный К. П. Формирование и применение новой теории и аналитических методов расчета крепи горных выработок // Метро и тоннели. 2011. № 6. С. 18–19.
12. Безродный К. П. Новые разработки института за последние пять лет // Метро и тоннели. 2011. № 6. С. 12–13.
13. 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. С. 26–29.
14. Безродный К. П., Лебедев М. О., Марков В. А., Старков А. Ю., Лаптев Н. А., Морозов А. В., Уханов А. В. Комплексный геотехнический мониторинг сопровождения строительства эскалаторных тоннелей в четвертичных водонасыщенных грунтах с помощью ТПМК // Метро и тоннели. 2012. № 1. С. 30–32.
15. Безродный К. П., Исаев Ю. С., Басов А. Д., Романевич К. В., Болтинцев В. Б., Ильяхин В. Н., Андрианов С. В. Опережающее забой тоннеля изучение инженерно-геологических и гидрогеологических условий методом ЭМИ СШП зондирования и регистрации ЕИЭМПЗ // Метро и тоннели. 2013. № 3. С. 28–30.
16. 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. 2015. № 5. С. 16–18.
17. Безродный К. П., Лебедев М. О., Егоров Г. Д. Строительство эскалаторных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена // Метро и тоннели. 2015. № 1. С. 14–17.
18. Безродный К. П. Что нового в научно-технических разработках к юбилею ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» // Метро и тоннели. 2016. № 6. С. 7–10.
19. Безродный К. П., Лебедев М. О. Горно-экологический мониторинг как инструмент понимания геомеханических процессов при строительстве метрополитена // Метро и тоннели. 2016. № 3. С. 10–11.
20. Безродный К. П., Лебедев М. О., Самаль А. С. Современный опыт применения теоретических подходов геомеханики в подземном строительстве, базирующихся на методах механики сплошной среды // Метро и тоннели. 2018. № 4. С. 20–21.
21. Безродный К. П., Лебедев М. О., Старков А. Ю. Результаты выполнения комплексной программы совершенствования технологии сооружения и постоянных конструкций Петербургского метрополитена // Метро и тоннели. 2018. № 1. С. 18–23.
22. Безродный К. П. Новые технологические и конструктивные решения, рожденные при строительстве тоннелей БАМ // Метро и тоннели. 2019. № 3. С. 26–27.
23. Кулагин Н. И., Маслак В. А., Безродный К. П., Лебедев М. О. О тоннеле на о. Сахалин // Метро и тоннели. 2019. № 1. С. 18–20.
24. Безродный К. П., Лебедев М.О. Ленметрогипротранс – 30 лет в Тоннельной ассоциации России // Метро и тоннели. 2020. № 1. С. 16–23.
25. Кулагин Н. И., Безродный К. П., Лебедев М. О., Космин В. В., Меркин В. Е. Транспортный переход в тоннельном варианте на о. Сахалин // Метро и тоннели. 2021. № 4. С. 40–43.
26. Безродный К. П., Лебедев М. О. Размыв, год 1974 – год 2023 // Метро и тоннели. 2023. № 4. С. 10–12.

ТВОРЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ ПРОФЕССОРА Ю. С. ФРОЛОВА В ЖУРНАЛЕ «МЕТРО И ТОННЕЛИ»



Заслуженный строитель Российской Федерации, доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения (ЛИИЖТ) Юрий Степанович Фролов (1939–2024) активно сотрудничал с Тоннельной ассоциацией России. Приводим краткий обзор его статей в журнале «Метро и тоннели» и полагаем, что, отдавая дань памяти, в какой-то мере отобразим спектр его научно-производственных интересов и достижений.

Лиманов – ученый, педагог, инженер (к 120-летию со дня рождения)

В 1929 г. Юрий Андреевич Лиманов заканчивает Ленинградский институт инженеров путей сообщения (ЛИИПС) и поступает на работу в институт «Лентрансмостпроект», где он являлся автором ряда ответственных проектов, связанных с реконструкцией тоннелей Транссиба. Технические указания, разработанные с участием Ю. А. Лиманова, были использованы позднее при восстановлении тоннелей во время Отечественной войны, после окончания которой Ю. А. Лиманов возвращается к довоенным проектам, и теперь его научные интересы тесно связаны со строительством Ленинградского метрополитена. Являясь в эти годы доцентом кафедры тоннелей в ЛИИПС, он одновременно с 1946 по 1948 г. руководит проектной организацией Ленметростроя. В 50-е годы исследования Ю. А. Лиманова направлены на изучение процесса сдвижения земной поверхности при производстве тоннельных работ, на снижение их негативного влияния на городскую застройку. В 1959 г. по инициативе и под руководством профессора Ю. А. Лиманова при кафедре была создана научно-исследовательская лаборатория моделирования тоннелей, целью которой стало проведение исследований, связанных с проектированием, строительством и эксплуатацией подземных сооружений различного назначения, с применением этого метода. Ю. А. Лиманов для нас особенно дорог еще и тем, что он входит в плеяду знаменитых выпускников старейшего путейского института [1].

Научно-практическая деятельность кафедры тоннелей и метрополитенов ПГУПС

Многолетняя научно-практическая деятельность коллектива кафедры широка и многообразна и включает обширный круг исследований, которые условно можно разделить по следующим направлениям.

1. Разработка концепции совершенствования городских транспортных связей на основе двухуровневой транспортной сети путем строительства автотранспортных тоннелей.
2. Обоснование возможности и целесообразности применения набрызг-бетонных тоннельных обделок в слабых породах.
3. Экспериментально-теоретические исследования работы конструкций транспортных тоннелей и подземных сооружений метрополитена методами физического и математического моделирования, оценка их эксплуатационной надежности.

Новаторские идеи строительства метрополитена на линиях мелкого заложения методом сквозной проходки, научно обоснованные и детально проработанные на кафедре, признаны специалистами новым прогрессивным направлением в отрасли и рекомендованы к внедрению на объектах метростроения [2].

Первой в России кафедре тоннелей и метрополитенов – 85 лет

14 июня 1930 г. постановлением Комитета по высшему образованию при ЦИК СССР в Ленинградском институте инженеров путей сообщения (ЛИИПС) была организована первая в нашей стране кафедра тоннелей, которая с 1967 г. стала называться кафедрой тоннелей и метрополитенов. Кафедра была создана в связи с возникшей необходимостью подготовки инженерных кадров по тоннельной специальности, т. к. предстояло начать строительство первой очереди Московского метрополитена, а также резко увеличился объем работ по строительству и реконструкции существующих железнодорожных тоннелей [3].

Опыт проходки автотранспортных тоннелей при пересечении с действующим железнодорожным тоннелем на трассе дублера курортного проспекта в г. Сочи

С целью уточнения конструкции обделки железнодорожного тоннеля и для оценки

технического состояния обследуемого участка, первоначально сотрудниками кафедры тоннели и метрополитены был проведен комплекс работ, включающий анализ результатов предыдущих обследований; визуальное обследование обделки с составлением дефектных карт; определение прочностных характеристик материалов обделки; георадарные исследования стен тоннеля и прилегающего к тоннелю грунтового массива. На основании проведенного обследования было установлено следующее.

1. Обделка тоннеля выполнена в виде трехрядной кладки из бетонных блоков толщиной 270–300 мм на цементно-песчаном растворе. Общая толщина обделки – 850–900 мм. За обделкой тоннеля присутствуют элементы деревянной временной крепи и каменная забутовка, выполняющая функции дренажа. Прочность на сжатие бетона блочной обделки составляет 35–50 МПа, прочность раствора – 15–20 МПа.
2. Дефекты тоннельной обделки представлены вертикальными трещинами в стенах секций раскрытием до 0,4 мм, отдельными вертикальными трещинами по деформационным швам между секциями раскрытием до 1 мм, трещинами в монолитном бетоне ниш и камер. Общее количество дефектов незначительно. Течей и зон увлажнений на обследуемом участке не обнаружено.
3. По результатам обследования техническое состояние обделки железнодорожного тоннеля после почти векового периода эксплуатации следует классифицировать как работоспособное (по СП13-102-2003). Принятые конструктивно-технологические решения, реализованные при сооружении автотранспортных тоннелей, обеспечили как безопасность производства строительных работ, так и эксплуатационную надежность действующего железнодорожного тоннеля [4].

Опыт и перспективы развития транспортной инфраструктуры Испании (по материалам практической конференции)

Тоннельная ассоциация России по предложению AETOS организовала для российских специалистов практический семинар «Метрополитен и тоннели в Испании: проектирование, строительство, эксплуатация. Опыт и перспективы». В семинаре приняли участие специалисты ЮГСУ (Сочи), Управления строительства № 30 (Межгорье), Ленметрогипротранса, Метростроя, Спецгидроизоляции и ПГУПСа (Санкт-Петербург), ООО «Волгатрансстройпроект» (Самара), ОАО «Уралгипротранс» (Екатеринбург). Докладчики поделились опытом проектирования, строительства и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов, основываясь на конкретных примерах. В 2006 г. в Испании насчитывалось 1700 железнодорожных тоннелей общей протяженностью около 800 км. Длина 150 из них превышает 1 км. Самыми длинными являются тоннели Гуадаррама – 28,4 км и Педжерес – 24 км, построенные, соответственно, в декабре 2007 и в сентябре 2008 г. на высокоскоростных магистралях. К 2010 г. количество тоннельных пересечений на железных дорогах страны приблизилось к 1800 общей протяженностью более 850 км. Пребывание в Мадриде завершилось посещением уникального сооружения в центре города – пересадочного узла Chamartin и строящегося тоннеля для высокоскоростных поездов, который соединяет вокзалы Chamartin и Atocha. Программа пребывания в Барселоне включала знакомство с конструктивно-технологическими и эксплуатационными особенностями линий 9 и 10 метрополитена. От имени участников семинара выражаем благодарность испанским коллегам и Тоннельной ассоциации России за организацию и успешное проведение конференции в Испании [5].

Научно-практическая деятельность в современных условиях

Несмотря на рост уровня автомобилизации населения 73 % спроса на пассажирские перевозки обеспечивает общественный транспорт. При этом структурную основу системы городского пассажирского транспорта Петербурга составляет метрополитен, являясь единственным надежно функционирующим видом городского пассажирского транспорта общего пользования. В 2000–2010 гг. были введены в строй новые станции метрополитена, что привело к увеличению протяженности его линий до 113,6 км с 64 станциями. За 12–15 лет намечается построить и ввести в эксплуатацию 70 км новых линий и 41 станцию. Очевидно, что успешная реализация намеченных планов будет зависеть не только от финансирования, но и в значительной степени от внедрения прогрессивных конструктивно-технологических решений, обеспечивающих снижение материальных и финансовых затрат, высокие темпы и экологическую безопасность возведения объектов метрополитена. Поставленные задачи всегда успешно решались в тесном содружестве проектировщиков и строителей с учеными кафедры тоннелей и метрополитенов Петербургского государственного университета путей сообщения. Основные результаты исследований, проведенных на кафедре с целью внедрения новых конструктивно-технологических решений на Петербургском метрополитене и обеспечения эксплуатационной надежности его подземных сооружений, изложены в монографиях, учебниках, отраслевых справочниках и нормативных документах, а также в многочисленных публикациях в периодической печати [6].

Внедрение опережающей крепи при проходке выработок в протерозойских глинах Санкт-Петербурга

Особенности инженерно-геологических и градостроительных условий Санкт-Петербурга обусловили строительство станций в основном только глубокого заложения в толще верхнепротерозойских глин, которые, в основной массе, сухие твердой консистенции. Такие грунты хорошо фрезеруются и скалываются, что позволило внедрить высокопроизводительные механизированные щитовые комплексы для проходки перегонных тоннелей (рекордная скорость щитовой проходки перегонного тоннеля в протерозойских глинах – 1250 м в месяц). По согласованию с СКС ГУП «Ленметрополитен» был разработан проект сооружения подходной выработки с использованием опережающей крепи кровли и лба забоя в протерозойских глинах на объектах Петербургского метрополитена. Новизна технологии проходки и нетрадиционные конструктивные решения крепи, а также сравнительно небольшой опыт их применения в отечественной практике подземного строительства обусловили необходимость проведения предварительной качественной и количественной оценки напряженно-деформированного состояния грунтового массива и элементов опережающей крепи кровли и лба забоя, а также устойчивости выработки при заданных конструктивных и технологических параметрах. В результате проведенных исследований рекомендовано оптимизировать сечение арок с учетом реальной нагрузки, либо устанавливать их с большим шагом. Кроме того, в процессе сооружения подходной выработки было принято решение увеличить заходку до 1,6 м и сократить перехлест анкеров крепи лба забоя с 6 до 4 м [7].

Устойчивость выработки, пройденной с опережающей крепью кровли и лба забоя в протерозойских глинах

Проблема механизации проходческих процессов и сведения к минимуму осадок земной поверхности может быть решена, если вместо традиционных технологий (эректорная проходка со сборной обделкой) вести проходку с применением опережающей крепи и постоянных конструкций из монолитного бетона. С целью эффективного решения поставленных задач был разработан проект сооружения околоствольной

выработки в протерозойских глинах с помощью опережающей крепи кровли и лба забоя. Испытания комбинированной опережающей крепи выполнялись методом эквивалентных материалов в лаборатории физического моделирования кафедры тоннели и метрополитены ПГУПС. Результаты испытания модели при увеличенных нагрузках позволяют сделать заключение о том, что принятая система временной крепи обеспечивает устойчивость кровли и лба забоя в течение длительного времени при нагрузках, более чем в 3 раза превышающих проектную. Дальнейшее нагружение модели приводит к увеличению деформаций кровли и лба забоя, превышению напряжений под пятами арок предела длительной прочности грунта и разрушению грунта в основании арок, однако не влечет за собой аварийного разрушения крепи и катастрофического обрушения грунта в забой [8].

Высокие технологии строительства горных транспортных тоннелей

Развитие приемов и методов сооружения горных транспортных тоннелей идет по двум традиционным направлениям: проходка горным способом и с применением тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК). В связи с этим, в подавляющем большинстве случаев, главным вопросом в процессе принятия проектных решений при прокладке горных тоннелей является выбор способа сооружения между горным и ТПМК. Приводятся примеры из практики, которые представляются весьма показательными для суждения как об успешных, так и ошибочных решениях. Анализ мирового опыта строительства транспортных тоннелей горным способом позволяет выделить два, которые отвечают на современном этапе развития тоннелестроения требованиям «высоких технологий»: Новоавстрийский (NATM) и Норвежский (NTM) методы. Как правило, ТПМК используются при сооружении горных тоннелей протяженностью более 4 км. В том случае, если условия вдоль трассы соответствуют техническим параметрам комплекса, то достигаются превосходные результаты [9].

Исследование методом моделирования напряженно-деформированного состояния обделки тоннелей станции метро «Жибек Жолы» г. Алматы

Одной из центральных станций первой очереди метрополитена в г. Алматы является «Жибек Жолы». Она запроектирована трехсводчатой, пилонного типа с монолитной бетонной обделкой. Важное место в системе такой крепи отводится набрызг-бетону, процесс нанесения которого автоматизирован. Для исследования напряженно-деформированного состояния обделки станционных тоннелей, а также установления характера её взаимодействия с грунтом на разных этапах строительства использован наиболее апробированный и универсальный метод физического моделирования с применением эквивалентных материалов. Экспериментальные исследования проводились в лаборатории моделирования тоннелей кафедры тоннели и метрополитены ПГУПСа. В ходе проведения эксперимента по моделированию статической работы станционного комплекса «Жибек Жолы» методом эквивалентных материалов было установлено, что основные деформации проявляются на стадии включения в работу временной крепи [10].

Современные методы сооружения тоннелей горным способом в слабых скальных и полускальных грунтах

Анализ мирового опыта строительства транспортных тоннелей в сильнотрещиноватых скальных и полускальных, а также гравелистых грунтах позволяет выделить два способа, которые отвечают требованиям «высоких технологий»: Новоавстрийский (NATM) и Норвежский (NTM). При NATM новация заключается в переходе на поточную схему организации работ и применении контурной податливой крепи для сооружения тоннелей в полускальных мягких грунтах. Концепция NTM первоначально разрабатывалась для сооружения тоннелей в крепких скальных, но сильнотрещиноватых грунтах, в 1990-х гг. метод расширился в область слабых неустойчивых грунтов. Вместо использования набрызг-бетона, армированного сеткой, практическое применение нашел фибронабрызг-бетон, усиленный в слабых грунтах системой анкеров и арматурными арками [11].

Система «крепь – грунтовый массив». Численный анализ напряженно-деформированного состояния с учетом технологии проходки тоннеля

Результаты исследований, выполненных на математических моделях, позволили при проходке тоннеля исключить из бетона временной крепи стальные арки, изготовленные из прокатного профиля, и выполнить её из монолитного бетона. Это привело к существенному снижению трудоемкости работ и сокращению времени проходческого цикла до 42 ч вместо 48 ч, предусмотренных в проекте. В результате среднемесячная скорость сооружения калотты составила 50 м/мес. Результаты численного анализа дают также основание считать, что при разработке грунта комбайном со стреловым исполнительным органом в условиях, близких к изложенным в статье, целесообразно крепь из монолитного бетона заменить на облегченную набрызг-бетонную с анкерами [12].

Список использованных источников

1. Фролов Ю. С. Ю. А. Лиманов – ученый, педагог, инженер (к 120-летию со дня рождения) // Метро и тоннели. 2023. № 2. С. 27–29.
2. Кавказский В. Н., Фролов Ю. С. Научно-практическая деятельность кафедры тоннелей и метрополитенов ПГУПС // Метро и тоннели. 2020. № 1. С. 26–31.
3. Ледяев А. П., Голицынский Д. М., Фролов Ю. С. Первой в России кафедре тоннелей и метрополитенов – 85 лет // Метро и тоннели. 2015. № 3. С. 34–35.
4. Фролов Ю. С., Коньков Н. А., Пеньков Б. Д., Соловьев Д. А., Мордвинков Ю. А., Данилов В. В. Опыт проходки автотранспортных тоннелей при пересечении с действующим железнодорожным тоннелем на трассе дублера Курортного проспекта в г. Сочи // Метро и тоннели. 2014. № 1. С. 6–10.
5. Фролов Ю. С. Опыт и перспективы развития транспортной инфраструктуры Испании (по материалам практической конференции) // Метро и тоннели. 2012. № 3. С. 6–10.
6. Фролов Ю. С. Научно-практическая деятельность в современных условиях // Метро и тоннели. 2011. № 6. С. 20–23.
7. Морозов А. В., Уханов А. В., Фролов Ю. С., Ледяев А. П., Ларионов А. А. Внедрение опережающей крепи при проходке выработок в протерозойских глинах Санкт-Петербурга // Метро и тоннели. 2009. № 1. С. 27–29.
8. Фролов Ю. С., Ларионов А. А. Устойчивость выработки, пройденной с опережающей крепью кровли и лба забоя в протерозойских глинах // Метро и тоннели. 2008. № 2. С. 24–26.
9. Фролов Ю. С. Высокие технологии строительства горных транспортных тоннелей // Метро и тоннели. 2007. № 5. С. 22–25.
10. Голицынский Д. М., Фролов Ю. С., Кавказский В. Н., Укшебаев М. Т. Исследование методом моделирования напряженно- деформированного состояния обделки тоннелей станции метро «Жибек Жолы» г. Алматы // Метро и тоннели. 2006. № 1. С. 44–45.
11. Фролов Ю. С., Мордвинков Ю. А. Современные методы сооружения тоннелей горным способом в слабых скальных и полускальных грунтах // Метро и тоннели. 2006. № 2. С. 18–21.
12. Фролов Ю. С., Мордвинков Ю. А. Система «крепь – грунтовый массив». Численный анализ напряженно-деформированного состояния с учетом технологии проходки тоннеля // Метро и тоннели. 2006. № 5. С. 32–35.



Григорий Казакевич

В тридцатые годы самоотверженный труд метростроителей вдохновлял многих поэтов и писателей, создававших произведения самых разных жанров, посвящённые людям этой замечательной профессии. Достаточно вспомнить вдохновенные стихи Евгения Долматовского о комсомольцах-добровольцах, фильмы о строителях метрополитена и многое другое.

И в наше время современное поколение поэтов и писателей не обходит эту тему стороной. В этом номере журнала редакция предлагает читателям, на наш взгляд, замечательные стихи поэта Григория Казакевича, написанные к юбилею Московского метростроя. В них в поэтической форме отражён созидательный труд проектировщиков и строителей.

В своих чеканных, рубленых строфах автор обращается не к романтике профессии, а к суровой реальности труда инженера, прораба и проходчика, превращая её в развёрнутую метафору выбора жизненного пути и профессии.

СТРОИТЕЛИ ТОННЕЛЕЙ

Решенье. Средство. Смета.
Мечты остались где-то,
Теперь – конкретно заданная цель.
Проект. Чертёж. Расчёты.
Немерено работы –
Но будет быстро строиться тоннель.
Прикидки. Буры. Пробы.
Их нужно сделать, чтобы
Знать чётко, где песок, где известняк.
С расчётом полководца
Знать, где вода прорвётся,
И чем остановить её и как.

Подземные проходы –
Свидетельство работы.
Устойчивость. Надёжность. Красота.
Плод воли и азарта,
Порою до инфаркта,
Но часть судьбы недаром прожита.
Назло земному слою
Проходит под землёю,
И не одна, связующая нить.
Отёрли капли пота.
Приказ. Проект. Работа.
И вновь людей дорогой единить.

Планёрка. Сбор. Доклады.
Не все докладу рады.
Начальник беспристрастен, знающ, хмур.
Возможна рокировка,
Движенье очень ловко:
Игра с частичной сменою фигур.

Подземные тоннели.
Осилили. Сумели.
Нелёгкий труд, порой – кромешный ад.
Работаем как надо,
И лучшая награда –
Когда дороги мир объединят.

Идёт отчёт бригады.
Успеху очень рады,
Всё сделали, как должно, в нужный срок.
Но кто-то на контроле
Отрезал: «Напороли!»,
И мямлящий прораб от пота взмок:
«Трудились, как умели!..»
«Умели еле-еле!
Надежда на “авось”!» – начальник крут.
Отчёт. Оценка. Минус.
Бригаду в хлам на вынос.
Шлют новую в теченье двух минут.

Глубокие тоннели.
Сумели, не сумели...
История кладёт свои пласты.
Тяжёлые завалы.
Усилия немалы.
Пробьётесь, значит, будете чисты.
Кончается работа.
Идёт пора отчёта.
Достигнута ли истинная цель?
Начальство очень строго:
«Один тоннель – до Бога.
Старайтесь не попасть в другой тоннель!»

Приказ. Работа. Сроки.
Движенье на потоке.
Закон: тот опоздал, кто не успел.
Здесь Дарвин в полной мощи,
И даже чётче, проще:
Идёт отбор, и слабый не у дел.

Решенье. Средства. Смета.
Путь нового сюжета.
Иных тысячелетий толстый слой.
Тоннели. И над ними
Лучами золотыми
Пусть светит шпиль с сияющей иглой!

24.08.2026

26 ноября 2026

ТОННЕЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ РОССИИ
ОБЩЕРОССИЙСКАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА МЕГАПОЛИСОВ И ТРАНСПОРТНЫЕ ТОННЕЛИ - 2026

80 лет
АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

г. Санкт-Петербург
Проспект Римского-Корсакова, 5-7
Отель «Амбассадор»
Конференц-зал «Амбассадор»



Генеральные партнёры мероприятия:

ЛЕНМЕТРОГИПРОТРАНС 80 лет основан в 1946 году

95 лет Мосметрострой

ГРУППА КОМПАНИЙ МОСПРОЕКТ-3

Информационные партнёры:

МТ

Подземные горизонты Underground Horizons

Евразия вести



БИРСС-Д

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
И РЕМОНТА ОБЪЕКТОВ
ТОННЕЛЕСТРОЕНИЯ
И ИНФРАСТРУКТУРЫ
МЕТРОПОЛИТЕНА



birss-d.ru

info@birss-d.ru

+7 (499) 519-13-39
+7 (925) 589-66 06

г.Москва, ул.Мелитопольская,
вл.11, корп.2