

Журнал
Тоннельной ассоциации России

Председатель редакционной коллегии

С. Г. Елгаев, доктор техн. наук

Зам. председателя редакционной коллегии

В. М. Абрамсон, канд. эконом. наук
И. Я. Дорман, доктор техн. наук

Ответственный секретарь

Г. И. Будницкий

Редакционная коллегия

В. П. Абрамчук
В. В. Адушкин, академик РАН
В. Н. Александров
М. Ю. Беленький
А. Ю. Бочкарев, канд. эконом. наук
Н. Н. Бычков, доктор техн. наук
С. А. Жуков
А. М. Земельман
Б. А. Картозия, доктор техн. наук
Е. Н. Курбачкий, доктор техн. наук
С. В. Мазеин, доктор техн. наук
И. В. Маковский, канд. техн. наук
Ю. Н. Малышев, академик РАН
Н. Н. Мельников, академик РАН
В. Е. Меркин, доктор техн. наук
М. А. Мутушев, доктор техн. наук
А. А. Пискунов, доктор техн. наук
М. М. Рахимов, канд. техн. наук
М. Т. Укшебаев, доктор техн. наук
Б. И. Федунец, доктор техн. наук
Т. В. Шепитько, доктор техн. наук
Е. В. Щекудов, канд. техн. наук

Тоннельная ассоциация России

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

Издатель

ООО «Метро и тоннели»

тел./факс: +7 (495) 981-80-71
127521, Москва,
ул. Октябрьская, д. 80, стр. 3,
оф. 4206
e-mail: metrotunnels@gmail.com

Генеральный директор

О. С. Власов

Компьютерный дизайн и вёрстка

С. А. Славин

Фотограф

С. А. Славин

Журнал зарегистрирован

Минпечати РФ ПИ № 77-5707

Перепечатка текста и фотоматериалов
журнала только с письменного
разрешения издательства
© ООО «Метро и тоннели», 2015

№ 3 2015

В Тоннельной ассоциации России

VII Транспортный конгресс 2

Строительство метро

Открытие второго вестибюля станции

Петербургского метрополитена «Спортивная» 4

Е. И. Гигиняк

Вопросы проектирования

Повышение безопасности и комплексности

при градостроительном проектировании объектов метрополитена (пример Москвы) 6

В. Л. Беляев

Применение Tekla Structures в проектировании объектов метрополитенов. Опыт Финляндии 9

П. Л. Храпкин, А. А. Антонов

О построении переходных кривых по методике со сдвигом центра кривизны дуги и с сохранением ее радиуса 12

С. А. Гришин

Современные технологии

Технико-экономические резервы при строительстве перегонных тоннелей закрытого способа работ 14

В. Р. Гоппе

Щитовая проходка

Мониторинг отпора и объема грунта в тоннеле при щитовой проходке с бентонитовым пригрузом 18

С. В. Мазеин, Б. И. Федунец, А. С. Вознесенский

Буровзрывные работы

Сейсмическое действие БВР с электронной системой инициирования 22

В. И. Куликов, А. Ю. Дмитриев, Ф. И. Галушко

Метрополитены

К истории отечественного метровагоностроения 28

В. А. Мнацаканов

Юбилей

Первой в России кафедре тоннелей и метрополитенов – 85 лет 34

А. П. Ледяев, Д. М. Голицынский, Ю. С. Фролов

СОДЕРЖАНИЕ



ФОТО НА ОБЛОЖКЕ

Траволатор в комплексе
второго вестибюля
ст. «Спортивная»
Санкт-Петербургского
метрополитена

VII ТРАНСПОРТНЫЙ КОНГРЕСС



Церемония открытия конгресса

С 27 по 29 апреля 2015 г. на ВДНХ состоялась VII Транспортный конгресс, в рамках которого была проведена VII Международная выставка «Интертоннель-2015». Тоннельная ассоциация России (ТАР), как один из организаторов выставки, приняла активное участие во всех мероприятиях. На стенде ТАР была представлена экспозиция, отражающая новейшие технологии, применяемые на крупных объектах Москвы, Санкт-Петербурга, Сочи и других городов России.

В рамках выставки состоялся круглый стол «Транспортные тоннели для будущих скоростных магистралей». Всего было заслушано девять докладов следующей тематики:

- «Формирование научных приоритетов в области железнодорожного тоннелестроения в России»;
- «Городские подземные сооружения для легкого транспорта»;
- «Выполнение разбивочных работ на этапе строительства тоннелей различного назначения. Правила, контроль выполнения и требования к результатам работ»;
- «Вклад академика Саваренского в строительство Московского метрополитена»;
- «Создание базальта-пластиковой футеровки для высокоточных железобетонных блоков при строительстве городских коммуникационных тоннелей»;
- «Повышение безопасности и комплексности при градостроительном проектировании объектов метрополитена»;
- «Преимущества тоннеля из опускных секций при сооружении перехода через Керченский пролив по сравнению с мостовым»;
- «Применение технологии компенсационного нагнетания при защите зданий и сооружений от влияния подземного строительства»;
- «Использование анкерной стальной фибры при строительстве транспортных тоннелей».

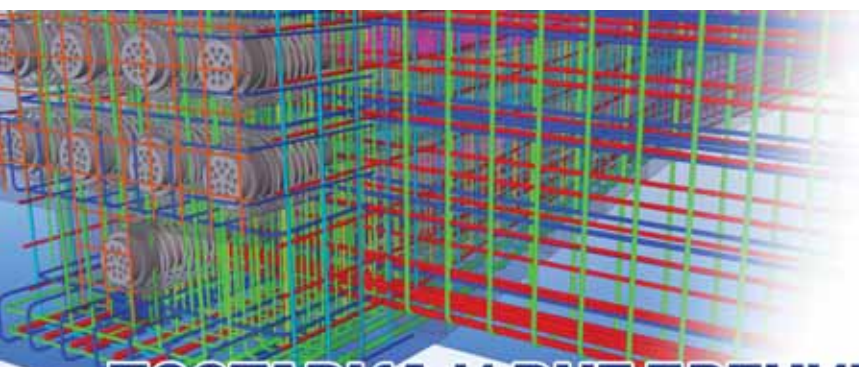
Участники круглого стола выразили благодарность организаторам мероприятия за освещение интересных аспектов подземного строительства.



Стенд Тоннельной ассоциации России

Выступление профессора РГГУ Е. М. Пашкина





Санкт-Петербург, ул. Белоостровская 28
+7 (812) 496-6929, +7 (495) 258-0319
Email: tekla@esg.spb.ru

реклама

ПОСТАВКА И ВНЕДРЕНИЕ TEKLA STRUCTURES

ПОЛНЫЙ КОМПЛЕКС СОПУТСТВУЮЩИХ ПОСТАВКЕ УСЛУГ

- ❖ Проведение обследования предприятия
- ❖ Создание баз компонентов для работы в Tekla Structures
- ❖ Разработка приложений и плагинов
- ❖ Интеграция Tekla Structures с Intergraph, AVEVA, Autodesk и др.
- ❖ Обучение и комплексное внедрение
- ❖ Техническое сопровождение
- ❖ Создание информационных моделей
- ❖ Внедрение технологии BIM



www.esg.spb.ru

ОТКРЫТИЕ ВТОРОГО ВЕСТИБЮЛЯ СТАНЦИИ ПЕТЕРБУРГСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА «СПОРТИВНАЯ»

Е. И. Гигиняк, начальник службы по связям с общественностью (пресс-служба) ОАО «Метрострой», Санкт-Петербург

27 мая 2015 г. открылся второй вестибюль станции «Спортивная». Теперь у Васильевского острова появился еще один вход в метрополитен, благодаря которому транспортная ситуация этого района Санкт-Петербурга должна улучшиться.



Аванзал. Панно из камня

Подготовка к строительству второго вестибюля станции «Спортивная» началась в 2010 г., когда на месте будущей строительной площадки стартовали работы по перекладке инженерных сетей. Контракт на производство работ между администрацией Санкт-Петербурга и ОАО «Метрострой» стоимостью 6,7 млрд р. был заключен в конце 2012 г. В течение 2013–2014 гг. велось активное сооружение наклонного хода, тоннеля и вестибюля.

Второй выход станции метро «Спортивная» располагается в исторической части города непосредственно под площадью, образующей перекресток набережной Макарова и Кадетской линии Васильевского острова с выездом на Тучков мост, в непосредственной близости от Малой Невы. Минимальное расстояние от сооружений метрополитена до реки составляет 5,8 м, до исторической застройки – 5 м. Вестибюль находится ниже уровня Малой Невы примерно



Траволаторный тоннель



Сооружение подземной части вестибюля



Губернатор Санкт-Петербурга Георгий Полтавченко и гендиректор Метростроя Вадим Александров на траволаторе

на 10 м. Площадь вестибюля и подземного перехода составляет 3700 м². Длина переходного коридора, залегающего под Малой Невой, более 300 м.

Наклонный ход эскалаторного тоннеля выполнен в монолитной обделке. Основные конструкции вестибюля сооружены по технологии «стена в грунте». Произведены работы по усилению грунта. Подземный вестибюль развернут под всей территорией пло-

Еlevator. Также впервые в Петербургском метро появились так называемые траволаторы – горизонтальные пассажирские конвейеры, которые применяются в сооружениях большой протяженности (аэропорты, торговые центры, метрополитены и пр.). Так как переходной тоннель, соединяющий станцию «Спортивная» со вторым выходом на Васильевском острове, имеет длину более 300 м, проектом была предус-

эскалаторного тоннеля и подземного вестибюля. Движение трамваев было остановлено всего на два месяца.

Одна из главных сложностей состояла в том, что с одной стороны строительную площадку омывали воды Малой Невы, а с другой – расположились здания, образующие неповторимый архитектурный ансамбль. Чтобы сохранить эти здания, был организован непрерывный мониторинг сооружений в зоне строительства. Помимо строителей, процесс контролировали проектировщики и специализированная мониторинговая геодезическая компания. К чести метростроевцев, за все время работ не произошло ни одной просадки.

Чтобы не допустить обводнения грунтов в зоне проведения работ и обеспечить сохранность зданий, по всему периметру будущего котлована был выполнен комплекс ограждающих конструкций «стена в грунте». Железобетонная конструкция толщиной 650 мм сооружалась на глубину 23 м. В процессе работы выяснилось, что этот участок территории еще царские инженеры когда-то отвоевали у реки – в грунте обнаружилось большое количество деревянных свай диаметром 300–400 мм, остатки кирпичных стен, гранитные включения, которыми был укреплен невиский берег. Несмотря на минувшие столетия, бревна хорошо сохранились, и это существенно осложняло разработку грунта.

К строительству были привлечены три подрядчика, входящие в структуру Метростроя: ЗАО «СМУ-11 Метрострой», специалисты которого занимались строительством непосредственно второго вестибюля и сооружением наклонного хода, ЗАО «СМУ-13 Метрострой», осуществлявшего прокладку тоннеля под Малой Невой и ЗАО «СМУ-9 Метрострой», в задачи которого входил монтаж систем сигнализации, вентиляции, электроснабжения, всего эскалаторного оборудования, а также устройство водопровода и канализации.

Работы выполнены с опережением графика. Сдача объекта произведена на полгода раньше срока, указанного в контракте.



«Спортивная» – это уникальная двухъярусная односводчатая станция глубокого заложения, рассчитанная на прием одновременно четырех составов поездов по двум линиям. Подобная конструкция станции применена впервые в мире. Из одного яруса на другой выводят шесть малых эскалаторов, объединенных в две группы по три эскалатора. Двухэтажное решение было обусловлено желанием объединить две станции в одной – в будущем на «Спортивной» предполагается создать пересадочный узел между Фрунзенско-Приморской и перспективной Кольцевой линиями. Такая идея позволяет существенно увеличить пропускную способность узла и сокращает время на пересадку, в том числе и для пассажиров, следующих в обратном направлении.

В кассовом зале за эскалаторами расположено мозаичное панно, набранное из смальты. Авторы данной художественной композиции – это авторы самой станции «Спортивная» (народный художник, академик Российской академии художеств А. К. Быстров и заслуженный архитектор Российской Федерации А. С. Константинов). Сюжет данного панно завершает единое по теме оформление всего комплекса. Художественная тема всей станции посвящена истории зарождения спорта и греческой культуре, давшей начало развитию спорта в современном мире.

К моменту открытия «Спортивной» в 1997 г. в качестве задела были построены небольшие отрезки четырёх тоннелей будущей Кольцевой линии: два в сторону «Петроградской» и два в сторону «Василеостровской». Архитекторы уникальной станции: А. С. Константинов, В. С. Волонсевич и О. А. Кузнецов.

щади, оборудован четырьмя лестничными спусками, два из которых оснащены поэтажными эскалаторами.

На объектах впервые в практике Петербургского метрополитена установлено эскалаторное оборудование немецкого производства. В соответствии с современными нормативными требованиями в эскалаторном тоннеле необходимо устанавливать четыре нитки эскалаторов, а не три, как это было ранее. По результатам исследования рынка эскалаторного оборудования был выбран концерн Thyssen Krupp

монтена установка двух участков траволаторов по три нитки каждый.

Принципиальным условием заказчика было сохранение движения транспорта в период строительства, и для соблюдения этого требования метростроители семь раз перемещали строительную площадку. Чтобы сохранить трамвайное движение была возведена специальная мостовая конструкция – под рельсовым полотном установлена железобетонная плита перекрытия пешеходного перехода. Параллельно с монтажом под плитой продолжались работы по сооружению

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И КОМПЛЕКСНОСТИ ПРИ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА (ПРИМЕР МОСКВЫ)

INCREASE SECURITY AND INTEGRITY WITH THE URBAN DESIGN OF UNDERGROUND OBJECTS (EXAMPLE OF MOSCOW)

В. Л. Беляев, к. т. н., доцент кафедры проектирования зданий и градостроительства Московского государственного строительного университета

V. L. Belyaev, Associate Professor of engineering buildings and town planning Moscow State building University

Рассматриваются правовые и иные проблемы обеспечения безопасности и проведения инженерных изысканий, развития сети объектов Московского метрополитена как каркаса освоения городского подземного пространства. Акцент делается на этап градостроительного проектирования. Обосновываются направления устойчивого развития подземной части территории крупнейших городов.

Deals with legal and other problems of security and engineering surveys, development of the network of the Moscow metro as a skeleton of urban underground space. Emphasis is placed on the stage of town planning. Justification sustainable development direction of underground parts of major cities.

Практика передовых стран показывает прогрессивность комплексного развития городского подземного пространства (далее – РГПП), причем именно на основе инфраструктурного каркаса метрополитена как направления обеспечения устойчивого (безопасного и комфортного уже сегодня, но без ущерба будущим поколениям) развития города. Наши города, включая Москву, отстают в темпах и комплексности РГПП. При предельной интенсивности использования сетей метрополитена Москвы их удельная плотность пока значительно уступает показателям в ведущих городах мира (рис. 1).

Крупнейшая авария летом 2014 года (рис. 2), продолжающиеся затруднения в проектировании и строительстве объектов Московского метрополитена вызывают у органов исполнительной власти города необходимость в очередной раз обратиться к вопросам безопасности в данной сфере (протоколы заседания Объединенного НТС по вопросам градостроительства столицы от 12.11.2014 и от 22.04.2015). Однако замыкание вопроса на рассмотрении отдельных аспектов обеспечения безопасности, причем исключительно уровня архитектурно-строительного проектирования (выполнение мониторинга и научно-технического сопровождения проектирования и строительства конкретных объектов или составления отдельных нормативно-технических документов для данного уровня) не решает проблемы. Последняя носит комплексный характер и связана с системными недостатками в государственном управлении пространственным развитием, прежде всего, на федеральном уровне.

Безопасность среды жизнедеятельности рождается при градостроительном проекти-

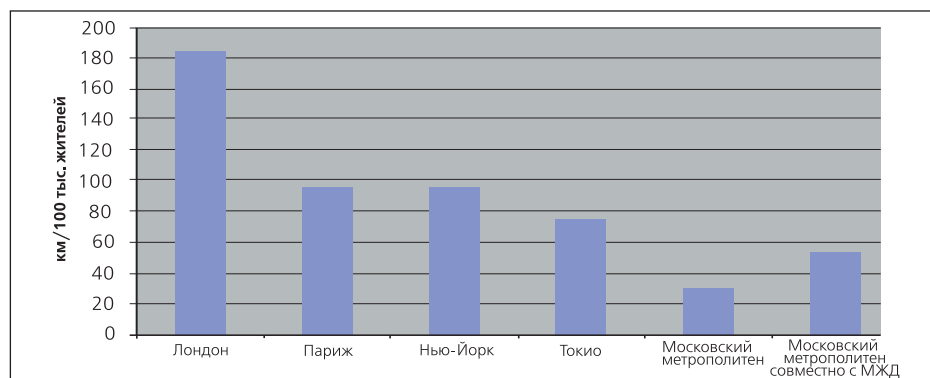


Рис. 1. Сравнительная удельная протяженность сетей метрополитена Москвы и мировых столиц (без учета присоединенных территорий)

ровании (территориальном планировании, планировке территории), составляющем функциональную основу государственного пространственного развития. Эффективность принятия решений при этом намного выше, потому что масштабнее уровни геологических и иных рисков, а, следовательно, выше и эффект от возможности их снижения путем рационального размещения территорий и объектов капитального строительства (далее – ОКС), включая сооружения метрополитена. Тем более данные объекты чаще всего относятся к особо опасным и технически сложным, а также уникальным ОКС со сроком службы 100 и более лет, к которым требуется применение более жестких норм проектирования, строительства, проведения процедур оценки соответствия при экспертизе, надзоре, приемке в эксплуатацию [1].

В ходе реформ, как в области градостроительной деятельности, так и в области технического регулирования, данный вопрос остался в тени. Он недостаточно концептуально изу-

чен, отсутствуют унифицированные методики оценки опасности территорий, непосредственное применение к ним стандартных методик оценки и менеджмента риска затруднительно. Как следствие – отсутствие технических регламентов планировочной безопасности и невозможность проведения экспертизы (отсутствие ее предмета). Вдобавок до сих пор не создан механизм регулирования допуска на рынок планировочных услуг [1].

Наиболее ярко проблема проявляется в области РГПП, в том числе при размещении объектов метрополитена. Последние являются ОКС регионального значения, а, следовательно, и объектами градпроектирования. Большинство из них относится к нетиповым линейным объектам, подпадающим под системный механизм регулирования граддеятельности, который состоит в обязательности подготовки проектов планировки и межевания территории взамен градрегламентов и ГПЗУ. Это полностью отвечает букве и духу ГрК РФ, так как в составе Кодекса отсутствует

модель предварительного согласования размещения ОКС, с выбором соответствующих земельных участков, характерная для ЗК РФ.

Решающую роль в оценке соответствия требованиям безопасности играют документы по стандартизации, эффективность которых оставляет желать лучшего. Далеко не все важные нормы актуализированных в массовом и спешном порядке редакций СНиП (формат Сводов правил) носят обязательный характер. Поэтому некоторые нормы СП по планировке, СП по инженерным изысканиям не могут, например, применяться при экспертизе проектов и результатов изысканий. Даже если, например, СП42.13330.2011 по планировке и содержит правильные нормы в части РТПП, статуса документа явно не достаточно для его обязательного применения при градпроектировании, так как в ГрК РФ роль СП для данного уровня нивелирована (упор сделан на региональные и местные нормативы градпроектирования, которые, в свою очередь, призваны, прежде всего, решать вопросы не безопасности, а комфортности пространственной искусственной среды жизнедеятельности, то есть ее предельной доступности и инфраструктурной обеспеченности). Для радикального решения вопроса необходимо включение аналогичных норм в состав ФЗ, прежде всего – в формате техрегламентов, а также гармоничное их отражение в СП и нормативах градпроектирования. Кроме того, необходимо, наконец, решить проблему гармонизации СП и СанПиН, прояснить критерии разделения норм на «обязательные» для применения и «рекомендательные».

Актуализация СНиП проходила, чаще всего, без достаточного обоснования, многие нормы оторваны от правовых требований безопасности, переключались из устаревших СНиП (например, в части длины перегонных тоннелей метрополитенов, в разы превышающей зарубежные аналоги). В то же время территориальные нормы (в Москве – МГСН, комплексно регулирующие и вопросы безопасности), а также региональные инструктивно-методические документы оказались в ходе реформирования вне правового поля. Некоторые значимые СП (по проектированию метрополитенов, инженерным изысканиям и др.) сохранили идеологию «обоснований инвестиций» и «предварительного согласования размещения объекта», не предусмотренную ГрК РФ. Ряд СП для объектов, непосредственно связанных с метрополитеном (например, ТПУ), вообще отсутствует, что продлевает мало рыночную практику получения специальных технических условий на проектирование. Их получение обеспечивается целым отрядом федеральных чиновников, требует немалых затрат времени и средств застройщиков-заказчиков, формируя своего рода псевдо-проектно-экспертный бизнес.

Особое место в обеспечении безопасности в области градостроительства занимает институт инженерных изысканий (далее – ИИ),

который в соответствии со ст. 1 ГрК РФ направлен на обоснование как градостроительного, так и архитектурно-строительного проектирования в части учета и прогноза изученности соответствующих природных и техногенных условий. К сожалению и здесь заметен нормативный перекос (нивелирование роли ИИ при генпланировании, пробел на уровне планировки территории). Специальные СП по ИИ для РТПП также пока не разработаны.

Вопросы комплексности планирования и проектирования РТПП и обеспечения при этом безопасности также урегулированы крайне слабо (ТПУ и другие подземно-наземные комплексы на базе объектов метрополитена, системное использование городами подземных водных и георесурсов, геоматериалов). В этих условиях в Москве заказчики также вынуждены при проектировании значимых объектов штучно получать спецтехусловия или финансировать подготовку федеральных СП.

При неэффективном федеральном контроле соблюдения законодательства о градостроительности сохраняется несоответствие ряда норм градзаконодательства Москвы нормам ГрК РФ. Так возможность разработки «предпроектных предложений по трассировке линий и размещению объектов метрополитена» позволяет на практике вне процедуры градпроектирования уточнять местоположение объектов, утвержденное Генпланом (Законом города Москвы) и даже проектировать не предусмотренные Генпланом линии. Безусловно, из-за неполноты материалов по обоснованию не все трассы метрополитена выбраны Генпланом удачно, на что, например, обращают внимание такие ведущие инженеры-геологи как В. И. Осипов и Е. М. Пашкин. Не разработаны и детализирующие Генплан отраслевые схемы линейных объектов транспортной инфраструктуры¹. Однако это не оправдывает практику отступлений от Генплана, так как она также противоречит духу и букве ГрК РФ.

Особое беспокойство вызывает тенденция экономить бюджетные средства за счет отказа от проведения ИИ для градпроектирования на присоединенных территориях, где изученность инженерно-геологических и иных природных условий явно недостаточна для принятия безопасных решений. В нарушение ГрК РФ она наблюдается и при планировке территории линейных объектов метрополитена. Следует отметить, что по поручению Правительства РФ Минрегион России с участием автора настоящей статьи подготовил еще в 2014 г. законопроект о внесении изменений и дополнений в ГрК РФ, предусматривающий проведение ИИ для обоснования планиров-

ки территории всех видов, однако данный проект закона Минстроем России до сих пор не передан в Правительство РФ для внесения в Госдуму. В этом отношении необходимо понимать, что проведение таких ИИ с одной стороны нельзя отождествлять, например, с тотальным бурением скважин, с другой стороны – сами ИИ рассматривать как «адмбарьер». Оптимизацию ИИ необходимо рассматривать не только в аспекте объема и видов, но и в аспекте поэтапной технологии их проведения. В большинстве своем ИИ на уровне градпроектирования ограничатся сбором, анализом и обобщением имеющейся информации. Однако для этого положение о Геофонде города Москвы необходимо привести в соответствие порядку создания и ведения геофонда материалов и данных ИИ. Такой порядок должен быть подготовлен в 2015 г. Минстроем России, и его целесообразно гармонизировать, прежде всего, с развитием ИСОГД. Кроме того, необходимо обеспечить соответствие требованиям к составу и содержанию работ, осуществляемых в ходе ИИ для подготовки документации по планировке территории, которые должны быть приняты в 2015 г. на федеральном уровне (планируется подготовка СП «Инженерные изыскания для обоснования документации по планировке территории», в котором необходимо отразить специфику применительно к РТПП и к объектам метрополитена). По нашему мнению, особенности инженерных изысканий как особого, «сквозного» (межуровневого) вида градостроительности также требуют более полного и цельного правового регулирования, например, в специальной главе ГрК РФ.

К указанной псевдо экономии, видимо, следует отнести и введенный правительством Москвы мораторий на проектирование сооружений метрополитена как объектов двойного назначения, хотя необходимость их использования и как защитных сооружений предусмотрена федеральными нормами ГО и ЧС, а целесообразность этого в новых геополитических условиях России становится очевидной.

Рис. 2. Крупнейшая авария в Москве летом 2014 года



¹ Наличие таких схем не предусмотрено ГрК РФ и является одной из особенностей (часто критикуемых) ГрК Москвы.



Рис. 3. Модель «Глубокий город» (эксплицированы ресурсные подсистемы геотермальной энергии, пространства и геоматериалов, а также подземных вод)

Необходимо отметить, что уровень доступности и полнота информационных ресурсов, обеспечивающих градостроительство на территории Москвы, также оставляют желать лучшего. Так, ИСОГД (ИА ИСОГД) города содержит, по сути, только метаданные о результатах ИИ, сами результаты хранятся в Геофонде и выдаются на коммерческой основе. Увлечение коммерциализацией является видимо одной из причин недостаточно эффективного использования на практике тематических геологических крупномасштабных карт территории Москвы (без присоединенных территорий), которые выполнены в 2007 г. и с 06.04.2010 г. должны быть размещены в Геофонде города. Эти карты не всегда используются при обосновании планировки территории объектов городского заказа, не говоря уже о случаях подготовки такой документации третьими лицами (например, попытки запуска механизма ГЧП для строительства объектов метрополитена). В то же время, для включения карт с составом ИАИСОГД необходимо обеспечить их госрегистрацию в установленном порядке. В свою очередь приказ Москомархитектуры о порядке выполнения ИИ от 18.06.2009 г. № 160, регулирующий и порядок ведения Геофонда, применяться не может в связи с внесением 09.06.2014 г. изменений в постановление Правительства РФ от 19.01.2006 г. № 20 о порядке выполнения ИИ. К тому же правительство Москвы до последнего времени не выполняло требование ГрК РФ об обеспечении доступа на официальном сайте к соответствующей информации для ее размещения на портале ФГИС ТП и не приняло участие в проекте масштабного расширения функционала ФГИС ТП.

Известно, что в состав исходных данных для принятия планировочных решений включаются зоны с особыми условиями использования территорий, госучет которых в кадастре недвижимости является необходимым условием безопасности таких решений. Несмотря на то, что объем ограничений под землей существенно меньше, есть проблема гармонизации земельного, градостроительного и кадастрового правового регулирования, установления сроков включения ограничений в ГКН и ЕГРП, ПЗЗ, по-

вышения ответственности уполномоченных лиц. Это в полной мере касается установления технических зон линий метрополитена, регулирование установления которых осуществляется устаревшими нормами СП и приказами Москомархитектуры. К тому же, госучет участков недр не соответствует идеологии ГК РФ. Имеются проблемы и с госучетом подземных ОКС. Представляется, что эффективное решение данных

проблем возможно при развитии модели трехмерного кадастра по опыту таких стран как Израиль, Нидерланды, Швеция, Австралия и др.

Специфика и ответственность объектов метрополитена, а также факт вывода метро из устава железных дорог, требуют цельного и современного правового регулирования и, в первую очередь, в части градотношений. В этой связи следует поддержать необходимость принятия федерального закона о метрополитенах. В то же время представляется, что проект такого закона, подготовленный в 2015 г. Минтрансом России, носит узкоотраслевой характер и требует дополнительной увязки с законодательством о градостроительности и с новым ФЗ о стратегическом планировании.

Если же говорить в целом о системном РГПП, то правительству Москвы следовало бы инициировать проведение (совместно с Минстроем России, РААСН и Национальными объединениями в области строительства) работ в следующих основных направлениях.

1. Включение темы РГПП в состав программы исследований Технологической платформы «Строительство и архитектура», в проект стратегии инновационного развития строительной отрасли с разработкой «Дорожной карты устойчивого развития подземного пространства городов».

2. Подготовка и принятие единой концепции комплексного развития федерального законодательства (гражданского, земельного, о градостроительной деятельности, о недрах) в области РГПП и внесение соответствующих законов в Госдуму ФС РФ (с участием других Министров и заинтересованных организаций)².

3. Разработка и утверждение Минстроем России плана подготовки документов технического регулирования и стандартизации в области РГПП.

4. Рассмотрение возможности совершенствования информационных систем в области градостроительности, включая создание и ведение Геофонда материалов и данных ИИ в увязке с созданием городских многоуровневых информационных моделей РГПП, развитием ФГИС ТП и ИСОГД, а также в увязке с реализацией национальной концепции инфраструк-

туры пространственных данных. В дальнейшем осуществлять РГПП крупнейших городов на основе усовершенствованной и адаптированной к российским условиям концепции «Глубокий город» (рис. 3) [2].

5. Принятие мер к усилению качества инженерно-геологического обоснования проектов РГПП и контроля в данной сфере на основе принятия соответствующих стандартов профессиональной деятельности.

6. Рассмотрение совместно с Минобнауки России вопроса совершенствования образовательной базы в области РГПП с принятием ФГОС ВПО.

7. Принятие по образцу передовых мировых практик концепций и программ РГПП на базе каркасной инфраструктуры метрополитена, увязанных с подготовкой стратегии развития столицы и актуализацией Генплана Москвы.

Следует также содействовать вновь образованному Национальному объединению проектировщиков и изыскателей (НОПРИЗ) в образовании и становлении профильного структурного подразделения, и обеспечить совместно с Комитетом по освоению подземного пространства НОСТРОЙ подготовку и проведение в 2016 г. в Санкт-Петербурге Международной профессиональной конференции и генеральной ассамблеи Объединения исследовательских центров подземного пространства мегаполисов (ACUUS).

Очевидно, что при решении перечисленных задач ключевая роль отводится вопросам планового, комплексного и безопасного развития объектов Московского метрополитена.

Ключевые слова

Развитие городского подземного пространства, градостроительное проектирование, объекты Московского метрополитена, безопасность и комплексность проектов и планировки, инженерные изыскания.

Development of urban underground space, urban design, objects of the Moscow metro, security and complexity of projects and planning, engineering survey.

Список литературы

1. Градостроительный кодекс Российской Федерации. Режим доступа: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LA;W;n=173884;div=LAW;md=0.2659744643250>
2. Атапов С. Н., Беляев В. Л., Ломакин Е. А. Развитие городского подземного пространства – путь от дорожной карты к проектным решениям // Сб. трудов Международной научной конференции «Российский опыт строительства метрополитена в г. Москве. Тенденции. Проблемы. Перспективы» М., 2014, с. 7–14.

Для связи с автором

Беляев Валерий Львович
pz@mgsu.ru



² Инициатива автора настоящей статьи о подготовке такой концепции поддержана профильным Комитетом Госдумы, правительством Москвы, руководителями национальных объединений в области строительства, ведущими учеными страны (подготовлено и направлено обращение в адрес Правительства РФ, которое в настоящее время рассматривается Минстроем России и другими Министерством).

ПРИМЕНЕНИЕ TEKLA STRUCTURES В ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ МЕТРОПОЛИТЕНОВ. ОПЫТ ФИНЛЯНДИИ

П. Л. Храпкин, директор по развитию, InterCAD

А. А. Антонов, начальник отдела внедрения САПР в ПГС, InterCAD

Строительство линии метро из Хельсинки в Эспоо стало одним из крупнейших инфраструктурных проектов в Финляндии, объединившим в работе над ним тысячи людей. В общей сложности проект состоял из 8 станций, 15 вертикальных шахт, 28 км железнодорожных тоннелей, 5 км служебных тоннелей. Полная протяженность тоннелей составила 33 км. Очевидно, что без 3D-модели разобраться в таком сложном проекте не представлялось возможным.

Проектирование и строительство станции метро «Лауттасаари» стало одним из этапов этого большого проекта. 3D-модель станционного узла в 2013 г. была номинирована на получение премии Tekla BIM Awards и отмечена в номинации «Специальный проект». В данной статье будут рассмотрены особенности реализации проекта.

При выборе программной платформы, позволяющей работать над проектированием наземных и подземных объектов метрополитена, решено было остановиться на программном продукте Tekla Structures. Работы велись несколько лет, в процессе проектирования были использованы различные версии Tekla Structures (с 12 по 18). К участию привлекались специалисты из разных мастерских, однако работа с единой моделью не вызывала никаких нареканий и групповая работа, по оценкам инженеров из проектной компании Design Ltd., прошла весьма успешно.

В проекте использовались как сборные, так и монолитные железобетонные конструкции, заливаемые на месте. Дополнительно применялись стальные и деревянные конструкции.

Строительство преимущественно осуществлялось под землей, частично открытым способом, что значительно усложнило проектирование, особенно в части несущих конструкций. Существенные особенности проекта связаны с тем, что станция и тоннель располагались на скальных породах, нагрузки на которые необходимо было учитывать. Другая особенность прокладывания линии метрополитена через горы заключалась в том, что скальные породы источают влагу, что также должно было быть учтено в проекте. Кроме этого, в расчет принимались нагрузки, связанные с пассажиропотоком. В проекте строго соблюдались требования безопасности. Цель состояла в том, чтобы спроектировать и построить самое безопасное метро в мире.

Каждая из восьми проектируемых на ветке станций имела собственную модель. Железнодорожные тоннели были разделены на пять отдельных моделей.

Информация о пространственных координатах железнодорожных путей, по-

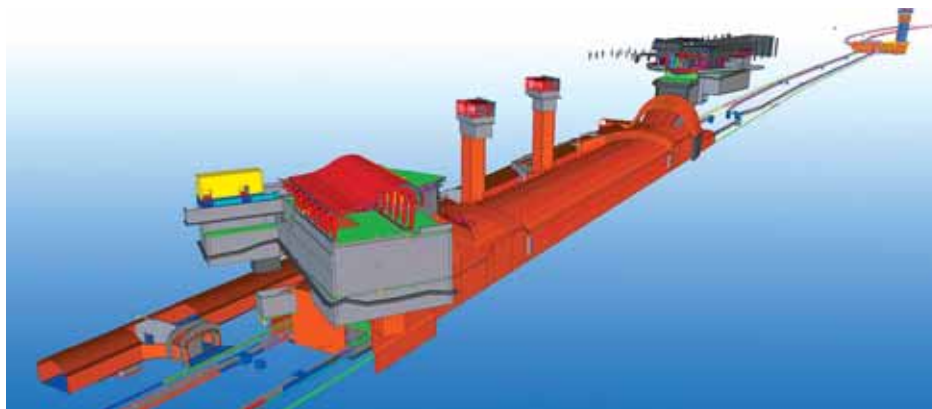


Рис. 1. Модель станции метро «Лауттасаари»

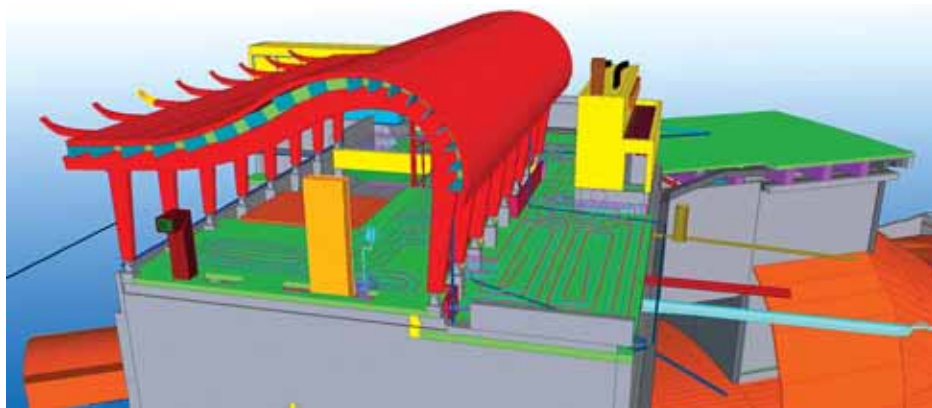


Рис. 2. Наземная станция

Рис. 3. 3D-визуализация наземного вестибюля станции «Лауттасаари». Источник: <http://www.lansimetro.fi/en/stations/lauttasaari.html>



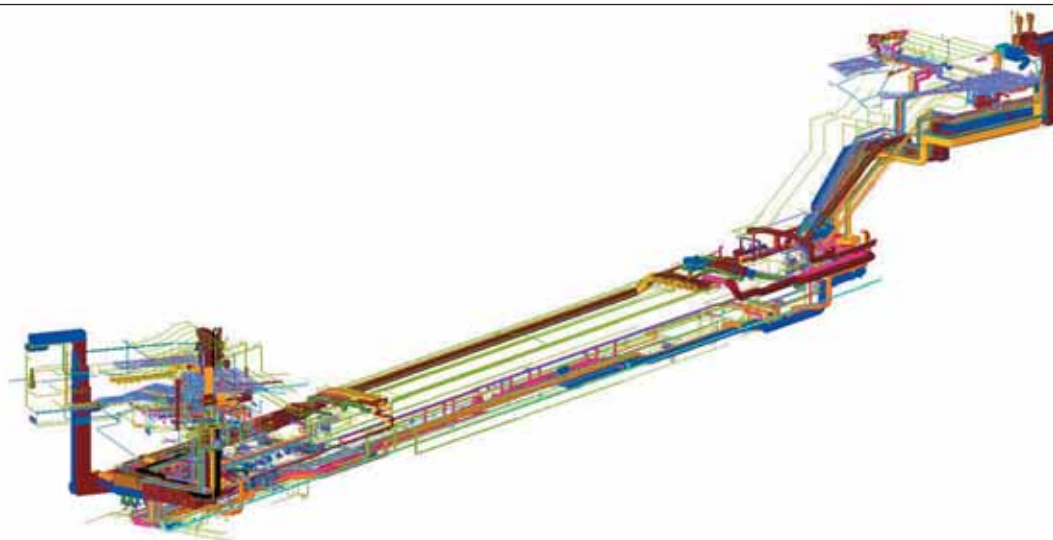


Рис. 4. 3D-модель станции в Tekla

лученная из Tekla Civil, использовалась при моделировании железнодорожных тоннелей. С помощью Tekla Open API было разработано приложение, позволяющее автоматически загрузить в модель информацию о пространственных координатах путей.

Участвовавшие в проекте проектировщики инженерных сетей обменивались информацией со специалистами по несущим конструкциям через форматы IFC и DWG.

Теоретическая поверхность скальных пород была предоставлена архитекторами, однако окончательная модель появилась на более поздней стадии работ, когда стали доступны данные 3D-сканирования. Именно результаты 3D-сканирования использовались при проектировании опалубок.

Важно отметить, что все дисциплины применяли свои собственные локальные системы координат, это породило дополнительные сложности при решении задачи совместного использования разных моделей.

Комплексная конструкторская модель сыграла решающую роль в координации между разными частями проекта. Благодаря наглядности такой модели при обсуждении критических участков все участники совещаний могли ясно видеть и понимать предмет обсуждения. Например, конструкторская модель помогала при обсуждении с архитекторами устройства тех

или иных архитектурных и конструкторских элементов.

Стоит добавить, что модель Tekla Structures все более становилась востребованной на стройплощадке по мере того, как подрядчики узнавали о ее возможностях. В настоящее время при проектировании различных конструкций используются обмеры поверхности горных пород, снятые на стройплощадке подрядчиками.

Тот факт, что BIM-технологии повсеместно применяются в Европе при проектировании на всех этапах, от предпроекта до стройки и эксплуатации, давно не вызывает удивления, информация о таких проектах появляется регулярно. Мы привыкли, что запад опережает Россию в этих вопросах, и часто ссылаемся на то, что, будучи созданными «там», эти технологии приспособлены для «их» рынка и никогда не приживутся в наших реалиях. Более того, находим аргументы, подтверждающие такую точку зрения. Однако внимательное рассмотрение проектов западных коллег и изучение ситуации в российских проектных компаниях и на российской стройплощадке неизбежно подводят нас к пониманию того, что оперативное перенимание их опыта – в интересах всех участников процесса.

Специфичен ли представленный в примере опыт для Европы, применим ли для наших условий?

Проведенные специалистами компании InterCAD работы по использованию Tekla Structures при решении задач проектирования метрополитенов позволяют заключить, что да, вполне применим.

Несущие конструкции метрополитенов – это, в первую очередь, железобетонные конструкции (монолитные и сборные), а в Tekla Structures достаточно инструментов для детального проектирования таких конструкций любой степени сложности. При этом речь идет о стадии рабочей документации, когда от проектировщиков требуется полная проработка проекта: опалубочные чертежи, армирование, разработка КЖИ. Довольно сильно сокращают время инструменты автоматизированной генерации чертежей, с помощью которых можно получить, нет, не полностью готовую документацию, но заготовки чертежей с достаточно высокой степенью готовности.

Важно понимать, что ПО Tekla предназначено для проектирования именно несущих конструкций, смежные разделы разрабатываются при помощи другого программного обеспечения. Именно поэтому ПО Tekla обладает широкими возможностями по взаимодействию со сторонними САПР. Для этого используются различные форматы передачи информации: IFC, IGS, DGN, STP, CIS/2, SKP, DWG или DXF.

Рис. 5. Участок с шахтой

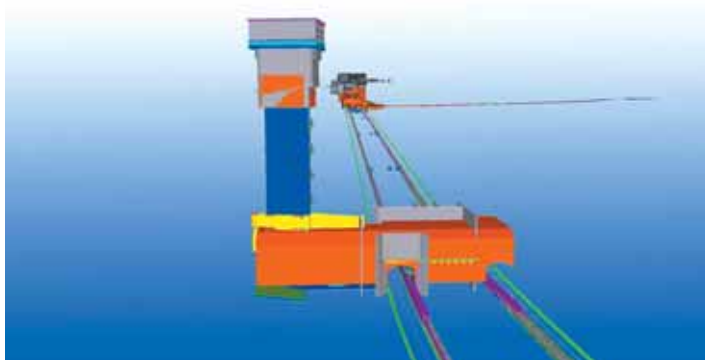
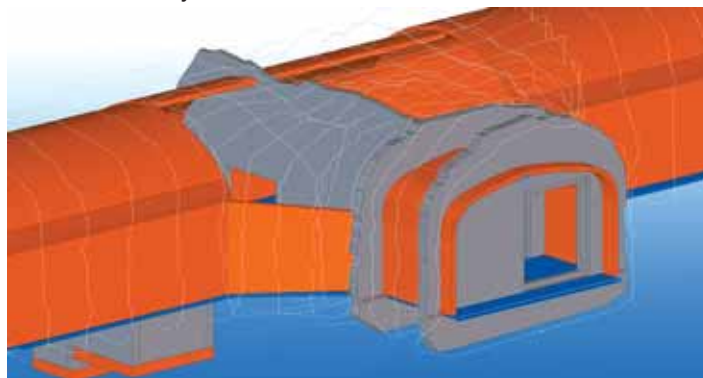


Рис. 6. Подземный участок



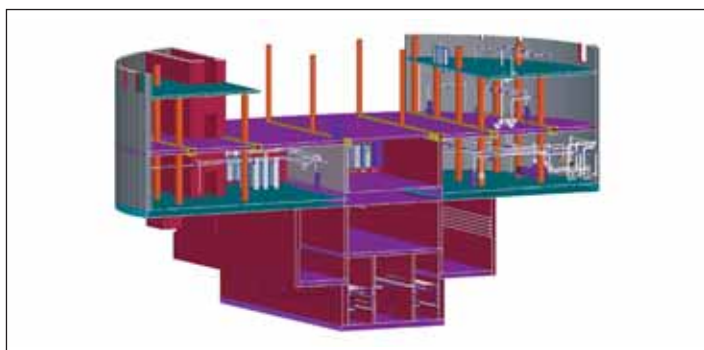


Рис. 7. Проект Tekla. Общий вид

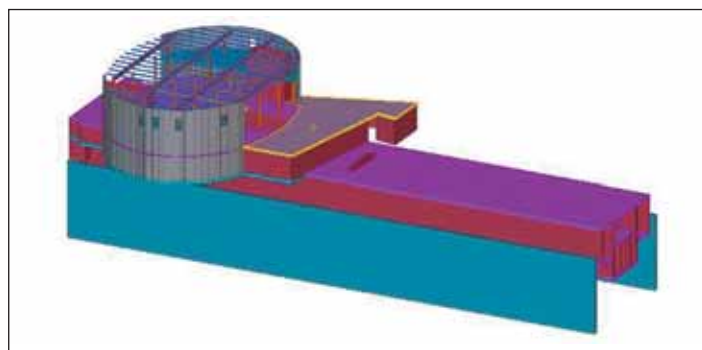


Рис. 8. Использование опорных моделей

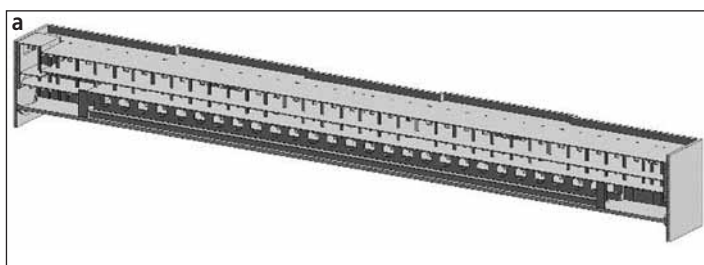
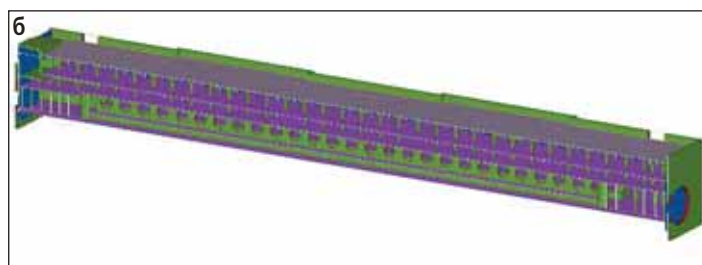


Рис. 9. Модель станции мелкого заложения, выполненная в Revit (а) и перенесённая для дальнейшей детализовки в проект Tekla (б)



Например, в проект Tekla Structures можно загрузить проект инженерных сетей, выполненный в MagiCAD или Autodesk Revit MEP. Причём, если формат передачи предполагает сохранение атрибутивной информации (формат IFC), то внутри проекта Tekla мы можем получить доступ к этой информации. Однако, в первую очередь, такие возможности по загрузке сторонних проектов используются для координации работы смежных отделов и поиска междисциплинарных коллизий (см. рис. 8). Специальный механизм внутри ПО Tekla позволяет находить пересечения между несущими конструкциями и объектами опорных моделей. Дополнительно проектировщики могут отслеживать изменения в опорных моделях. Таким образом, при обновлении, скажем, модели сетей ОВ и ВК, конструктору не придётся каждый раз тратить время на то, чтобы найти места, где произошли изменения. Программа сама выделит новые или изменённые объекты.

Отдельно стоит отметить возможности взаимодействия ПО Tekla Structures с ПО Autodesk. Не секрет, что именно это программное обеспечение сейчас наиболее распространено в нашей стране. Кроме возможности подгружать проекты Revit в Tekla Structures как опорные модели в формате IFC, имеется возможность преобразовывать объекты IFC в объекты Tekla. Также верно и обратное, при необходимости можно преобразовать модель или часть модели Tekla в формат IFC и загрузить его в проект Revit.

Данный механизм, конечно, является вспомогательным. В ходе такого переноса возникают определённые трудности, необходимость в нём возникает не каждый день, но он работает. В качестве примера приводим модель станции мелкого заложения, выполненной в Revit и перенесённой для дальнейшей детализовки в проект Tekla через формат IFC (см. рис. 9).

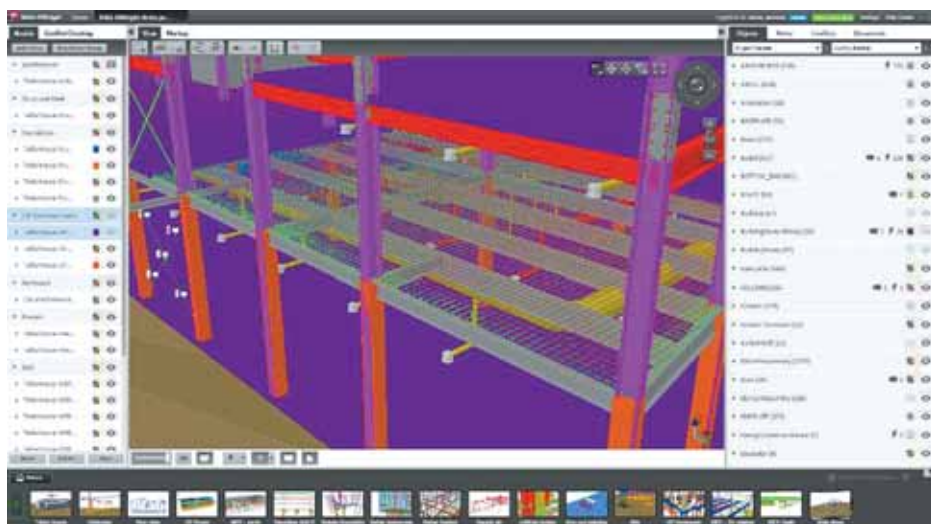


Рис. 10. Интерфейс Tekla BIMSight

Если в организации уже выстроена технология проектирования на базе продуктов Autodesk, то встроить Tekla Structures в эту цепочку не представляет проблем. Уже упомянутый формат IFC позволяет подгрузить проект Tekla в Autodesk Navisworks для получения комплексной модели проекта. Чертежи, выполненные в Tekla Structures, могут быть преобразованы в формат DWG. В свою очередь, файлы DWG могут быть использованы внутри проекта Tekla как в пространстве модели, так и на листах в качестве внешних ссылок.

Задачи координации проекта можно решать и на базе программного обеспечения компании Tekla. Tekla BIMSight, аналогично Autodesk Navisworks, позволяет собирать разнородные модели в едином пространстве с целью поиска коллизий, контроля хода работ над проектом, для проведения совещаний и принятия проектных решений. Этот продукт позволяет сохранять виды модели с пометками, сделанными в режиме

«красного карандаша», и отсылать эту информацию по электронной почте. При этом стоит отметить, что Tekla BIMSight – бесплатное ПО, доступное для свободного скачивания с сайта Tekla.

Представленный в этой статье пример проектирования метрополитена города Эспоо и опыт специалистов InterCAD по применению ПО Tekla позволяют однозначно заключить, что не существует принципиальных препятствий в использовании этих продуктов для решения любых конструкторских задач по проектированию метрополитенов. При этом не стоит забывать, что процесс внедрения технологии информационного проектирования (BIM) – это серьёзный вызов для любой проектной организации, длительный процесс, требующий вовлечения в него как специалистов проектных отделов, так и руководящего состава.



В статье использованы материалы с сайта www.tekla.com

О ПОСТРОЕНИИ ПЕРЕХОДНЫХ КРИВЫХ ПО МЕТОДИКЕ СО СДВИГОМ ЦЕНТРА КРИВИЗНЫ ДУГИ И С СОХРАНЕНИЕМ ЕЕ РАДИУСА

ON THE EASEMENT SPIRAL LAYOUT SCHEME KEEPING THE ARC RADIUS AND SHIFTING THE CENTER POINT

С. А. Гришин, д. ф.-м. н., Метрогипротранс, ИПМех РАН, Москва

S. A. Grishin, Dr.S., Moscow

Сформулирована и решена базовая система уравнений названной схемы разбивки переходных кривых. Проведено сравнение результатов с традиционной схемой, сохраняющей центр и уменьшающей радиус дуги.

The base system of equations for the named scheme is formulated and solved. Results discussed and compared with the scheme keeping the arc center point and decreasing the arc radius.

Введение

В ОАО «Метрогипротранс» накоплен многолетний опыт проектирования трасс метрополитена и, в частности, разбивки переходных кривых. Тем не менее, Метрогипротранс регулярно пересматривает и совершенствует технологию проектирования в связи со сменой поколений сотрудников, прогрессом науки и вычислительной техники.

Исторически принят способ разбивки переходных кривых с оставлением на месте центра круговой кривой и уменьшением ее радиуса. То есть требуется совпадение центров дуг разбивочной оси и оси пути. При этом радиус круговой дуги оси пути неизбежно получается несколько меньшим радиуса дуги разбивочной оси.

В литературе встречаются и иные способы построения переходных кривых (см. например [1], с. 122). В частности, можно требовать совпадения радиусов дуг разбивочной оси и оси пути, но при этом неизбежно приходится смещать центр дуги оси пути относительно центра дуги разбивочной оси.

В настоящей статье выведем основные формулы такой методики и сравним ее с традиционной.

Говоря о переходных кривых, всюду ниже имеем ввиду фрагмент клотоиды (именуемой также клофондой, радиоидальной спиралью, спиралью Корню, спиралью Эйлера). Рассматриваем основной случай переходной кривой: с прямой на дугу при условии равенства длин входной и выходной кривых.

Основное геометрическое построение

Рассмотрим чертеж. Прямолинейный участок разбивочной оси в точке T сопрягается

с дугой окружности радиуса R с центром в точке $C_{\text{разбивочной оси}}$. Хотим разбить переходную кривую AB заданной длины L_c так, чтобы радиус дуги оси пути в точности равнялся R . Это возможно только при условии смещения центра дуги оси пути в точку $C_{\text{оси пути}}$. Из предположения равенства длин входной и выходной клотоид следует симметрия: центр дуги оси пути лежит на продолжении биссектрисы опорного угла дуги разбивочной. Расстояние между центрами дуг обозначим через z (оно пока неизвестно). Величину опорного угла дуги разбивочной обозначим через 2γ (она известна).

Введем декартову систему координат, совместив ее начало с начальной точкой переходной кривой A (НПК) и направив ось x через точку T (НК). Неизвестное расстояние между точками A и T обозначим через l .

В безразмерных декартовых координатах клотоида задается параметрически, как

$$\tilde{x} = C(s); \quad \tilde{y} = S(s),$$

где через $C(s)$ и $S(s)$ обозначены интегралы Френеля

$$C(s) = \int_0^s \cos\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt,$$

$$S(s) = \int_0^s \sin\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt,$$

а s и t суть безразмерные параметры (действительные числа, способные принимать любые значения от $-\infty$ до ∞).

Орт касательной получается дифференцированием по s :

$$\left(\cos\left(\frac{\pi}{2} s^2\right), \sin\left(\frac{\pi}{2} s^2\right)\right).$$

Безразмерная кривизна и орт нормали – повторным дифференцированием по s :

$$\pi s \left(-\sin\left(\frac{\pi}{2} s^2\right), \cos\left(\frac{\pi}{2} s^2\right)\right), \quad s \geq 0.$$

Безразмерные координаты мгновенного центра кривизны даются формулами:

$$\tilde{x} = C(s) - \frac{1}{\pi s} \sin\left(\frac{\pi}{2} s^2\right),$$

$$\tilde{y} = S(s) + \frac{1}{\pi s} \cos\left(\frac{\pi}{2} s^2\right), \quad s \geq 0.$$

Легко видеть, что значение параметра $s = 0$ отвечает точке распрямления клотоиды и началу декартовой системы координат, ось абсцисс направлена по касательной к клотоиде в этой точке, а ось ординат – по нормали.

Переходная кривая представляет собой масштабированный фрагмент клотоиды.

Введем (неизвестный) масштаб m (размерности длины), тогда уравнение переходной кривой в «размерных» координатах чертежа будет:

$$x = mC(s), y = mS(s), \quad 0 \leq s \leq s_{\max},$$

где $s_{\max}$ – неизвестное значение безразмерного параметра s клотоиды, отвечающее точке сопряжения B (КПК на оси пути).

Длина L_c переходной кривой AB связана с m и $s_{\max}$ очевидной формулой:

$$L_c = m s_{\max}.$$

В точках сопряжения A и B требуем совпадения координат как точки переходной кривой и как точки разбивочной оси или оси пути, а также совпадения ортов касательной и кривизны.

Для точки A все эти требования выполнены по построению.

Совпадение кривизн в точке B запишем через радиусы кривизны:

$$R = m \frac{1}{\pi s_{\max}}$$

Обозначив через φ неизвестный угол между вертикалью и радиусом, направленным из точки $C_{\text{оси пути}}$ в точку B , приравняем друг другу компоненты орта касательной к дуге окружности и к переходной кривой в точке B :

$$(\cos \varphi, \sin \varphi) = (\cos(\frac{\pi}{2} s_{\max}^2), \sin(\frac{\pi}{2} s_{\max}^2)).$$

Отсюда немедленно следует, что

$$\varphi = \frac{\pi}{2} s_{\max}^2.$$

Совпадение координат точки B (как точки переходной кривой и точки дуги оси пути) выражается уравнениями:

$$l - z \sin \gamma + R \sin \varphi = mC(s_{\max}),$$

$$R + z \cos \gamma - R \cos \varphi = mS(s_{\max}).$$

Система пяти уравнений в рамках позволяет определить пять неизвестных: $m, s_{\max}, \varphi, z, l$ по заданным значениям L_c, R, γ .

Решение, обсуждение и пример

Из первых двух рамок получаем:

$$m = \sqrt{\pi R L_c}; \quad s_{\max} = \sqrt{\frac{L_c}{\pi R}}.$$

Из третьей:

$$\varphi = \frac{L_c}{2R}.$$

Из последней явно выражаем z и l через известные величины:

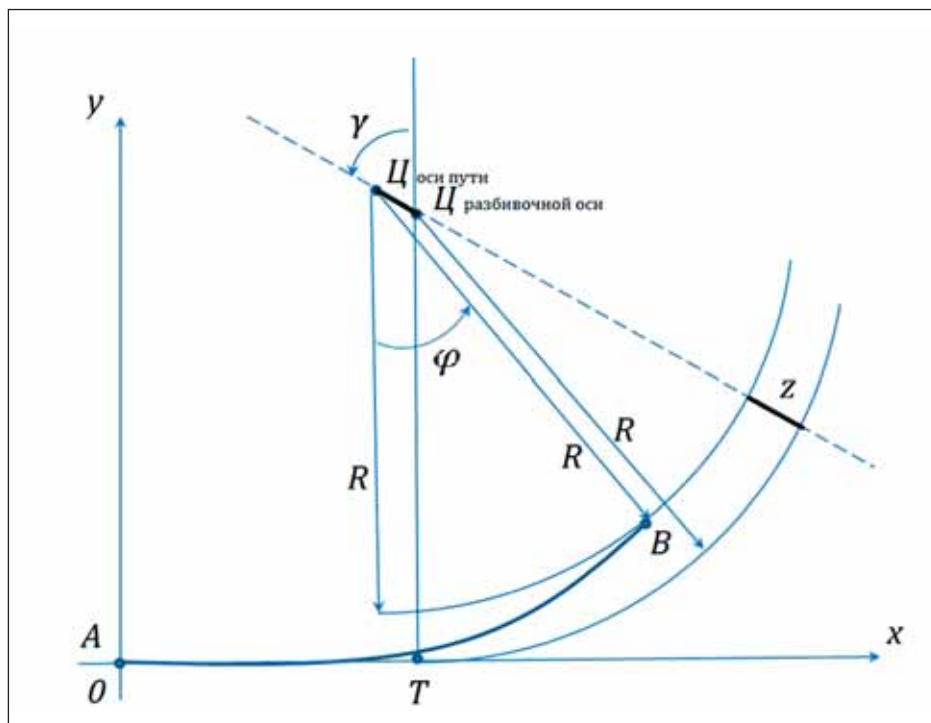
$$z = \frac{1}{\cos \gamma} (mS(s_{\max}) - R(1 - \cos \varphi)),$$

$$l = mC(s_{\max}) - R \sin \varphi + z \sin \gamma.$$

Таким образом, система уравнений обсуждаемой методики допускает точное решение: все неизвестные последовательно выражаются явными формулами. Система «рассыпалась» из-за того, что в уравнение сопряжения по кривизне (вторая рамка) не входит «смещение дуги» z .

Напомним, что при точной реализации традиционного способа разбивки переходной кривой приходится численно решать уравнение на $s_{\max}$, после чего остальные неизвестные даются явными формулами. На современном уровне развития вычислительной техники численное решение такого уравнения затруднений не вызывает.

Явные формулы для z и l , приведенные выше, содержат в правых частях интегралы Френеля, для вычисления которых приходится применять либо стандартную программу, либо разложение в степенной ряд (как, например, в [2, пп. 11.08-11.09]) – то есть вычислять их приближенно.



Из формулы для z видно, что при значении угла $\gamma = \pi/2$ (что отвечает развороту пути на 180°) косинус в знаменателе равен нулю, и смещение центра дуги становится бесконечным. Такое значение опорного угла – формальная граница применимости описанной методики. Уравнения традиционной схемы от угла γ явно не зависят.

При реалистических значениях опорного угла ($2\gamma = 90^\circ$), радиуса дуги разбивочной ($R = 400$ м) и длины переходной кривой ($L_c = 80$ м) имеем следующие результаты расчета (с округлением, верхнее значение – традиционная методика без разложений в ряды, нижнее – обсуждаемая методика):

$s_{\max}$	0,25252 0,25231
φ	0,100167 0,100000
m	316,802 м 317,066 м
$z_{\max}$ z	667,54 мм 942,47 мм
l	39,99 м 40,65 м

Смещение центра кривизны дуги z можно трактовать также как максимальное (по всей кривой) смещение оси пути по нормали к разбивочной оси (см. чертеж). В традиционной методике максимум смещения $z_{\max}$ достигается в точке КПК (точке B), после чего смещение остается постоянным вдоль всей дуги оси пути вплоть до точки сопряжения с «выходной» переходной кривой (на которой оно уменьшается). В обсуждаемой методике, по построению, смещение продолжает

расти и на круговой дуге оси пути (после точки B), достигая максимума z в точке пересечения с биссектрисой опорного угла, после чего оно уменьшается.

В приведенном примере максимальное смещение по обсуждаемой методике больше на 275 мм, чем смещение по традиционной схеме разбивки. Это является недостатком обсуждаемой методики. Реальные трассы могут иметь и большие опорные углы дуг (при тех же радиусах и длинах переходных), чем в рассмотренном примере. Для них различие между $z_{\max}$ и z окажется еще большим.

Подводя итоги, следует признать, что рассмотренная в настоящей статье схема разбивки переходных кривых для тоннелей не приводит к трассе лучшего качества и не дает больших практических преимуществ в процессе проектирования по сравнению с многолетней практикой. Традиционная схема, реализованная исторически как набор явных приближенных формул, обеспечивающих достаточную точность расчетов, или как компьютерная программа, может применяться и в дальнейшем.

Ключевые слова

Переходная кривая, клотоида.
Transition curve, easement spiral, Euler spiral.

Список литературы

1. Железнодорожный путь. Под ред. проф. Т. Г. Яковлевой. М. «Транспорт». 1999. 405 с.
2. ВСН 160–69. Инструкция по геодезическим и маркишейдерским работам при строительстве транспортных тоннелей. М. Минтрансстрой. 1970.

Для связи с автором

Гришин Сергей Анатольевич
grishin45@hotmail.com

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВЫ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ ЗАКРЫТОГО СПОСОБА РАБОТ

TECHNICAL AND ECONOMIC RESERVES AT CONSTRUCTION SUBWAY TUNNELS

В. Р. Гоппе, к. т. н., Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)

V. R. Hoppe, Candidate of Technical Sciences, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)

В данной статье приведены реализованные в зарубежном (японском) метростроении некоторые конструктивно-технологические решения по сооружению перегонных тоннелей, обозначены технико-экономические резервы и возможности по оптимизации, экономии финансовых ресурсов, трудозатрат и сокращения сроков строительства для третьего пересадочного контура (ТПК) Московского метрополитена. В заключение даны рекомендации по организации дополнительных организационно-технических мероприятий, которые реально позволяют снизить стоимость строительства аналогичных объектов.

In this paper are represented some constructive and technological decisions on a construction of subway tunnels realized in foreign (Japanese) metro engineering, also are denoted some technical and economic reserves and opportunities for optimization, saving of financial resources, labor costs and reduction of terms of construction for the third interchange contour (TIC) of Moscow Metro are. In conclusion are given recommendations for additional organizational and technical actions which really allow to reduce the cost of building of similar objects.

Введение

Как известно, при строительстве отдельных участков третьего пересадочного контура Московского метрополитена предполагается применение конструктивно-технологического решения испанских специалистов-метростроителей (ООО «БУСТРЕН»), основанного на опыте сооружения метро в Мадриде. Предложение испанских специалистов предполагает строительство станций не с одной островной, а с двумя боковыми платформами – при этом поезда метро будут двигаться через среднюю часть станции, а по перегонам – в двухпутных тоннелях.

В частности, по вышеуказанному конструктивно-технологическому решению предполагается сооружать перегонные тоннели между станциями двухпутными при по-

мощи тоннелепроходческих комплексов (ТПМК) с внутренним диаметром $\varnothing_{\text{вн}} = 9,4$ м (следует отметить, что предпринималась попытка разработать габарит приближения строений для двухпутных тоннелей кругового очертания для ТПМК с $\varnothing_{\text{нар}}/\varnothing_{\text{вн}} = 9,4/8,4$ м – работа была прекращена).

Ниже будет показано, что для перегонных тоннелей в данном случае более экономичным было бы применение двухочковой тоннельной обделки, сооружаемой методом Double-O-Tube (DOT).

Примеры применения метода Double-O-Tube (DOT)

Метод DOT используется с начала 90-х годов XX столетия, многократно апробирован

при сооружении линий метрополитена, в т. ч. в Японии и КНР.

Рассмотрим пример сооружения перегонных тоннелей на линии метро Astram в городе Хиросима (Япония). Перегонные двухпутные тоннели сооружались здесь по методу DOT – при помощи ТПМК (рис. 1). Поперечное сечение ТПМК: 10,69 м шириной и 6,09 м высотой.

Как видно из рис. 1, ТПМК – с герметичной камерой, т. е. использовался в сложных инженерно-геологических условиях, на проходке в неустойчивых породах (илистый песок, ил и глина).

На рис. 2 представлен DOT-тоннель метрополитена Хиросимы, линия Astram [1].

Рис. 1. Тоннелепроходческий комплекс DOT для сооружения перегонных тоннелей на линии метро Astram в городе Хиросима



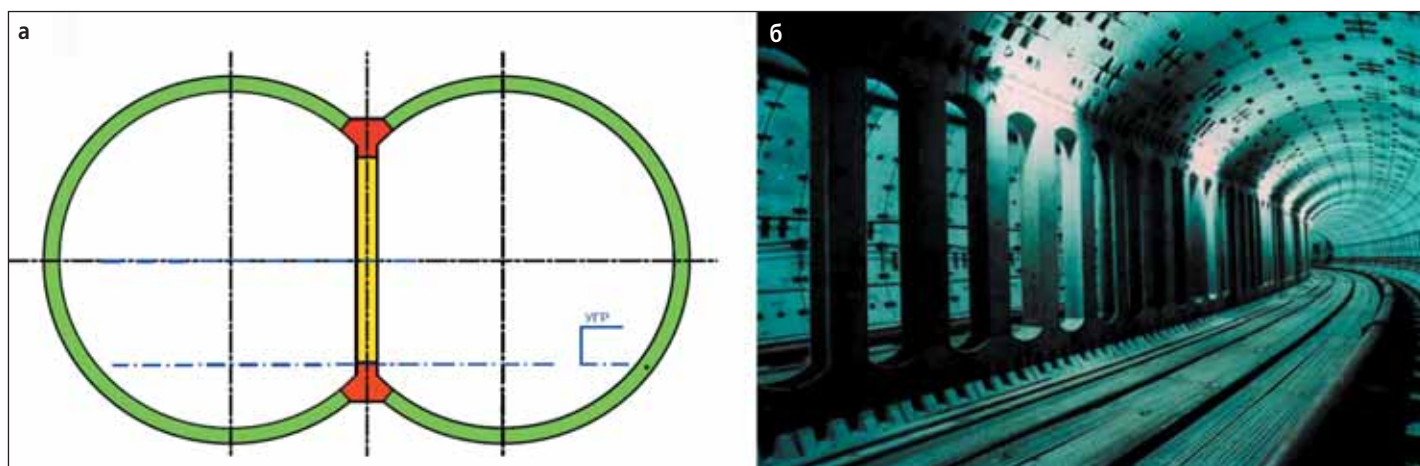


Рис. 2. DOT-тоннель метрополитена Хиросимы, линия Atram (радиус: 135 м): а – схема конструкции тоннельной обделки; б – сооруженная тоннельная обделка

Из сравнительно недавно сооруженных линий метрополитена с использованием метода DOT:

- линия М8 в г. Шанхай (КНР, 2004 г.);
- линия № 4 в г. Нагоя (Япония, 2004 г.) [2].

Преимущества метода DOT

В чем преимущества метода DOT для сооружения двухпутного перегонного тоннеля перед сооружением такого тоннеля при помощи ТПМК большого диаметра?

1. Сравнение геометрических размеров обделок (рис. 3) показывает, что экономия на каждом погонном метре тоннеля при применении двухочковой конструкции составит:

- в проходческих работах – 34,7 м³;
- в нагнетании раствора за обделку – 5 м³;
- в объеме железобетона тоннельной обделки – 7,5 м³;
- в объеме бетона жесткого основания под верхнее строение пути – 4,5 м³.

Итого экономия на 1 пог. м двухпутного тоннеля составит ориентировочно 0,22 млн р/пог. м.

При средней протяженности перегонов 2000 пог. м экономия на перегон составит ориентировочно 440,0 млн р. – или ориентировочно 15–20 % стоимости перегонного тоннеля.

2. Схема рис. 4 показывает, что перегонный тоннель большого диаметра требует более глубокого заложения, чем DOT-тоннель. Таким образом, требуется и более глубокое заложение станционного комплекса, что в свою очередь требует более глубокого котлована – это утяжеляет (удорожает) несущие конструкции ограждения котлована и несущие конструкции самого станционного комплекса. Кроме этого, глубже заложенная линия и, соответственно, станции на ней требуют установки на станциях эскалаторов (рис. 5) и более мощного вентиляционного оборудования, что в будущем повысит эксплуатационные затраты.

3. DOT-ТПМК более маневрен (легче управляется при проходке), чем ТПМК большого диаметра, что подтверждается, например, тем, что на линии Atram метрополите-

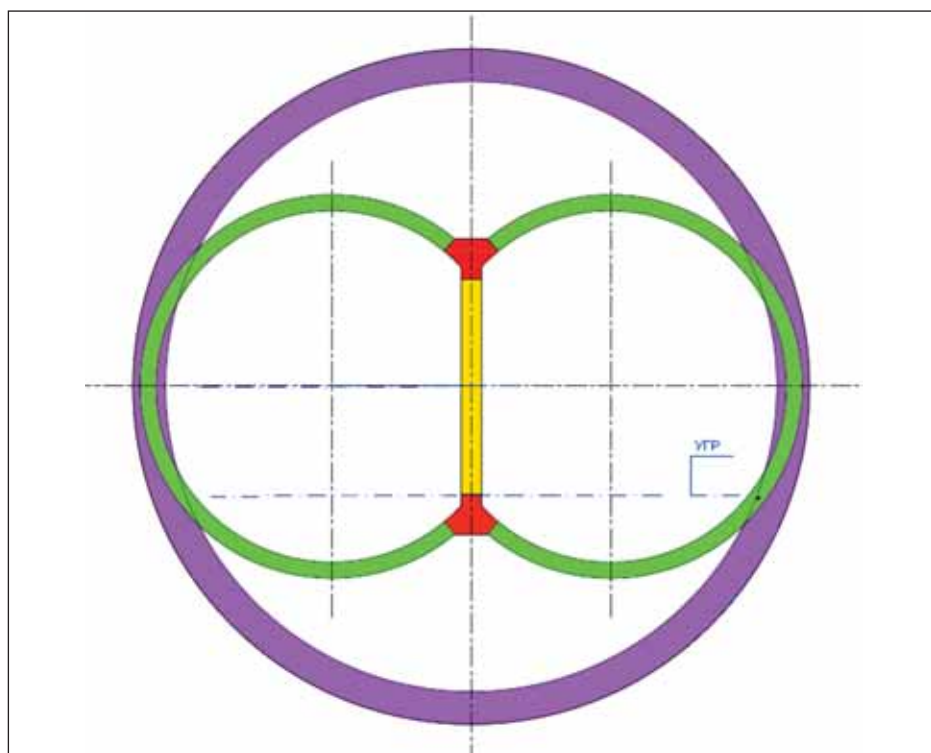
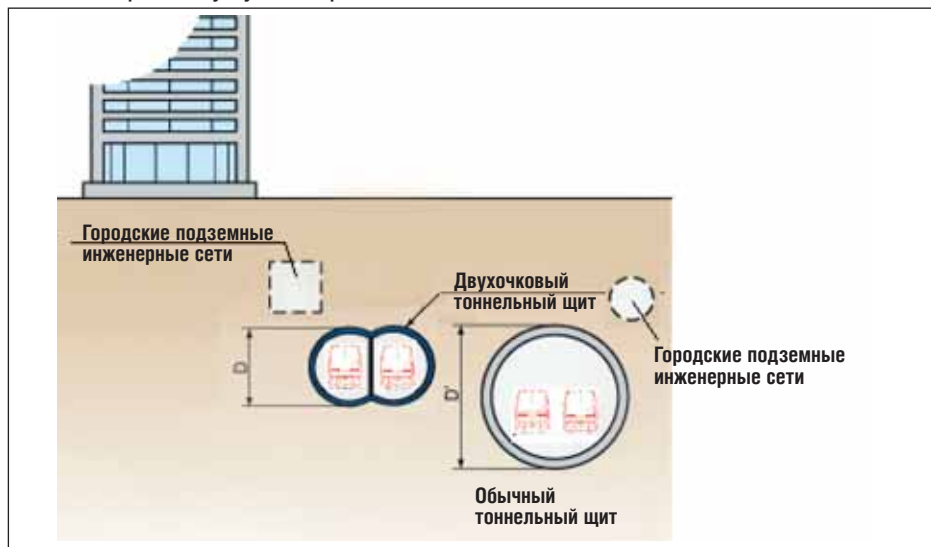


Рис. 3. Схема сравнения геометрических размеров обделок, сооруженных по DOT-методу и в тоннеле большого диаметра для двухпутного перегонного тоннеля

Рис. 4. Схема сравнения глубины заложения обделок, сооруженных по DOT-методу и тоннеля большого диаметра для двухпутного перегонного тоннеля



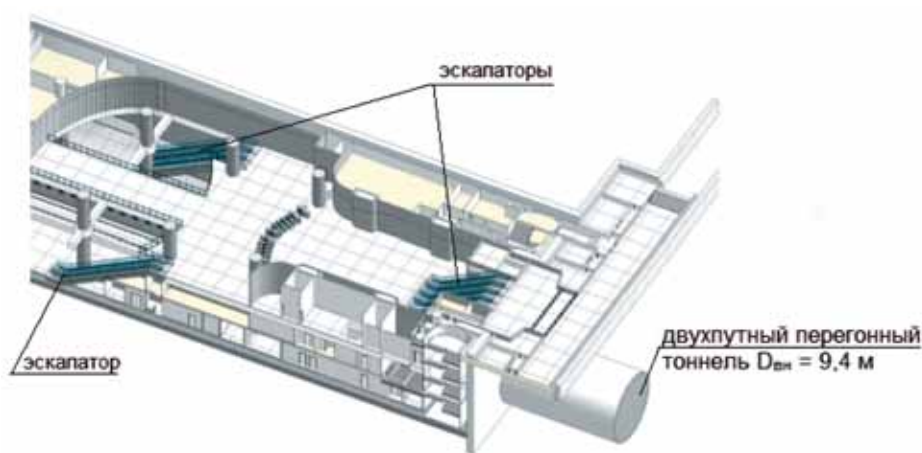


Рис. 5. Фрагмент станции по испанскому конструктивно-технологическому решению для Московского метрополитена

на Хиросимы, как указано выше, пройден тоннель с радиусом 135 м.

4. DOT-ТПМК более гибкая система, чем ТПМК большого диаметра – в случае если части забоя при проходке сложены различными породами, на одном из роторов DOT-ТПМК можно заменить режущий инструмент.

5. DOT-ТПМК потребляет существенно меньше электроэнергии – более экономичен в эксплуатации, чем ТПМК большого диаметра.

6. DOT-ТПМК в меньшей степени нарушает природную геолого-гидрогеологическую подземную среду, что уменьшает возможности суффозии и карстообразования на трассе сооружаемого перегонного тоннеля.

В целом к уже указанной выше экономии на стоимости двухпутных перегонных тоннелей необходимо добавить удешевление строительства станционных комплексов при снижении глубины их заложения – ориентировочно экономия может составить 10 % стоимости земляных работ, ограждения котлована и основных конструкций.

Также сократятся эксплуатационные расходы на сооруженной линии метрополитена.

О некоторых проблемах применения метода DOT в отечественном метростроении

Следует отметить, что DOT-метод не может быть немедленно применен на строительстве линий Московского метрополитена, в т. ч. ТПК.

Поскольку в отечественном метростроении DOT-метод пока не применялся, для его внедрения необходимо решить три основные проблемы.

1. Нет соответствующей проходческой техники и опыта ее применения.

2. Не разработаны конструкции и нет оснастки для изготовления DOT-тоннельной обделки.

3. Не разработан габарит приближения строений для двухпутных тоннелей кругового очертания.

Это основные проблемы, и есть все условия для их решения.

Вся проходческая техника в настоящее время в России приобретается по импорту, поэтому необходимые DOT-ТПМК могут быть приобретены, например, в Японии или КНР.

Стоимость ТПМК $\frac{\varnothing_{нар}}{\varnothing_{вн}} = 10,4/9,4$ м и DOT-ТПМК $2\varnothing_{нар} = 2 \times 6$ м соизмерима – ориентировочно 20 млн евро.

Конструкторская документация DOT-тоннельной обделки и техническая документация на оснастку для ее изготовления могут быть разработаны отечественными специалистами.

Габарит приближения строений может быть разработан отечественными специалистами. Следует отметить, что ГОСТ 23961-80 «Метрополитены. Габариты приближения строений, оборудования и подвижного состава» не входит в Перечень национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». В связи с этим габарит приближения строений для двухпутных тоннелей кругового очертания может быть разработан как стандарт предприятия (Московского метрополитена).

Выводы

По рассмотренным в данной статье техническим вопросам целесообразно провести научно-исследовательские (научно-практические) работы по следующим темам:

- «Разработка технического предложения по рациональным конструкциям двухпутных перегонных тоннелей»;

- «Разработка стандарта предприятия на габарит приближения строений для двухпутных тоннелей кругового очертания».

Разработка и внедрение технических решений по данной тематике позволит в дальнейшем избежать повышенных затрат при сооружении двухпутных перегонных тоннелей и станционных комплексов открытого способа работ Московского метрополитена.

Заключение

Для того чтобы реально снизить стоимость строительства Московского метрополитена, необходимо:

- проводить предпроектные проработки концепций строительства новых линий метро – стоимость таких проработок (5 % от стоимости Проектной документации) несоизмеримо ниже, чем то удорожание, которое получается за счет применения недостаточно проработанных проектных решений;

- проводить негосударственную экспертизу концепций строительства с привлечением ведущих научно-исследовательских организаций. Это связано с тем, что Государственная экспертиза Проектной документации в своей работе не принимает во внимание и не анализирует возможные предпроектные концептуальные варианты линий, а рассматривает представленную на экспертизу Проектную документацию как готовую концепцию с минимальными необходимыми требованиями к ней (в силу п. 6, ст. 3 ФЗ № 384 «Технологический регламент безопасности зданий и сооружений»);

- по результатам негосударственной экспертизы утверждать перечень необходимых научно-исследовательских работ для обеспечения эффективной работы проектных организаций при разработке документации стадии Проектная документация на строительство новых линий метрополитена;

- по результатам негосударственной экспертизы утверждать на НТС Департамента строительства г. Москвы к дальнейшей разработке прошедшие экспертизу концепции и перечень необходимых научно-исследовательских работ.

Ключевые слова

Двухпутный перегонный тоннель метрополитена, DOT-ТПМК, экономия в проходческих работах.

Two-railway subway tunnel, DOT shield tunneling.

Список литературы

1. http://www.shield-method.grip/pdf_data/e_dot.pdf
2. Kawamura T., Miki K., Takeda A., Miki T. 2003. DOT shield tunneling beneath residential districts in Nagoya City's subway construction // (Re)Clamming the Underground Space. Saver (ed.). – Swets&Zeitinger, Lisse, Netherlands/ P. 697–713.

Для связи с автором

Юппе Виталий Рейнгольдович
vrhoppe@yandex.ru





СПЕЦИАЛЬНАЯ СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА



(495) 226-18-37

(342) 219-61-56

info@cct-drill.ru

WWW.CCT-DRILL.RU



FIGARO MASCHINE 400T

БУРОВЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

МОНИТОРИНГ ОТПОРА И ОБЪЕМА ГРУНТА В ТОННЕЛЕ ПРИ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКЕ С БЕНТОНИТОВЫМ ПРИГРУЗОМ

MONITORING FOR THE RESISTANCE AND VOLUME OF THE EXTRACTED SOIL DURING THE TBM BENTONITE SUPPORT

С. В. Мазеин, д. т. н., Тоннельная ассоциация России

Б. И. Федунец, д. т. н., проф., Горный институт НИТУ МИСИС

А. С. Вознесенский, д. т. н., проф., Горный институт НИТУ МИСИС

Sergey V. MAZEIN, Ex. management of Russian Tunneling Association, Russia

Boris I. FEDUNETZ, Mining Institute of NITU MISiS, Moscow, Russia

Alexander S. VOZNESENSKY, Mining Institute of NITU MISiS, Moscow, Russia

Во время проходки перегонного тоннеля для Московского метрополитена исследованы силовые и объемные параметры технологии гидропригрузного щита: усилия отпора грунта и разности расходов потоков бентонитовой суспензии в трубах. Сформулированы рекомендации для расчета и вывода на монитор ТПМК усредненных за цикл значений коэффициента превышения давления гидропригруза, а также показателей извлекаемого объема грунта.

During the slurry-shield tunneling were studied technological parameters: the cutterhead thrust force, soil and bentonite flows in pipes. Formulated recommendations for the calculation and TBM-monitor displaying for averaged per cycle exceeding coefficient of face support pressure, as well as values of extracted soil volume.

Введение

В рамках реализации обширной стратегической программы правительства Москвы по развитию Московского метрополитена за период 2011–2020 гг. для строительства перегонных тоннелей закрытым способом задействовано более 20 тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК), ведущих проходку щитами с герметичной головной частью [1]. Технология щитовой проходки таких тоннелей предусматривает грунтопригруз или реже – бентонитовый пригруз (гидропригруз) забоя. При этом возможен мониторинг силовых показателей работы щита [2], в том числе усилия подачи привода режущей головки, адекватного грунтовому отпору [3]. Компьютерная система сбора и статистической обработки основных технологических показателей имеет возможность их архивации. Архивные данные в любое время, до истечения срока их хранения, можно извлечь из бортового компьютера щита для анализа рабочего процесса проходки в выбранные промежуточные времени реализации текущего и предыдущих проектов.

Для наиболее сложных инженерно-геологических условий осваиваемого метрополитеном подземного пространства Москвы используется бентонитовый пригруз забоя. Таким типом пригруза оснащен ТПМК диаметром 6,28 м, эксплуатируемый ОАО «Мосметрострой» с 2005 г. После своей первой проходки (сервисный тоннель под Серебряным Бором) данный ТПМК строил перегонный тоннель в районах Троице-Лыково и Строгино. Точное значение давления бентонитового пригруза

поддерживалось сжатым воздухом в верхней половине рабочей (задней) камеры щита за сообщаемой с ее нижней частью передней камерой экскавации. Преимущество бентонитового пригруза заключалось в постоянном удерживании им поверхности забоя, даже при остановке продвижения щита [4]. При этом проводился дискретно-непрерывный контроль давлений в камерах щита и в гидравлике продольного перемещения роторного привода при его подаче на забой. При строительстве протяженного тоннеля под городской застройкой с возможными остановками проходки такой контроль был особенно важен.

Во избежание превышения осадки городской поверхности или утечки бентонитового раствора в грунтовый массив, то есть для надежного обеспечения устойчивости забоя, всегда рассчитывают предварительные показатели давления бентонитового пригруза. Имеется ряд методик по расчету такого давления, используются различные модели, при этом рекомендуются соответствующие коэффициенты запаса нагрузок. Вводимые коэффициенты запаса часто нивелируют результаты расчетов по различным методикам. Кроме того, предварительные расчеты давления пригруза на протяжении будущей проходки имеют ряд недостатков:

- они ведутся по неточным предварительным данным инженерно-геологических изысканий;
- не учитываются колебания давления грунта и напора грунтовой воды по технологическим причинам, выявленным недавно [5];
- приводятся только для характерных протяженных участков трассы проходки.

Предлагаемое нами решение описанной выше проблемы – разработка рекомендаций по совершенствованию мониторинга давления гидропригруза. Основная идея рекомендаций, основанных на практическом опыте проходки щитами с гидропригрузом, – при задании давления бентонитового пригруза учитывать силовую реакцию грунта на фронт забоя, измеряемую усилием подачи привода ротора.

Решаемые данным исследованием задачи:

- рассмотрение опыта проходки щитами с гидропригрузом;
- анализ структуры архивации значений технологических параметров;
- установление взаимосвязей значений, извлеченных из архива параметров технологических процессов;
- формулирование рекомендаций по совершенствованию контроля давления гидропригруза.

Опыт проходки щитами с гидропригрузом

Трасса двух параллельных перегонных тоннелей с внутренним диаметром обделки 5,4 м имеет протяженность около 3 км для каждого тоннеля. Этот участок удлиняющейся линии № 3 Московского метро начинается от примыкания с системой Серебряноборских тоннелей («точка С»), проходит через сооружаемую вчерне станцию «Троице-Лыково», далее идет между поймой реки Москвы и жилым районом Строгино, поворачивая к станции метро «Строгино». От «точки С» тоннель сооружается щитом с гидропригрузом Herrenknecht (проект S-353) на глубине 20–22 м в четвертичных

мелких песках средней плотности, на 2–7 м выше поверхности горизонта грунтовых вод до ст. «Троице-Лыково». Перегонный тоннель проектируется от ст. «Троице-Лыково» до ст. «Строгино» на первом участке длиной 1500 м на глубине от 8–10 до 22–25 м ниже поверхности горизонта грунтовых вод (расстояние между УГВ и тоннелем максимум 5 м). Далее проходка производится в мелких песках и мелкопесчаных супесях при гидростатическом давлении на обделку от 0 до 1,1 бар.

На рис. 1 приведены значения усилия подачи роторного привода N [кН], измеренные во время проходки, обработанные для 2283-х циклов и заархивированные общепринятым образом.

При этом продвижение щита за один проходческий цикл осуществлялось в среднем на ширину одного собираемого кольца обделки (1,2 м).

Усилие противодействия роторного привода давлению бентонита было рассчитано нами по давлению сжатого воздуха в верхней половине рабочей камеры щита.

Сглаженные колебания значений усилий подачи привода при проходке (1), измеренных и усредненных за проходческий цикл, и усилий противодействия давлению бентонита (3) в целом качественно совпадают. При этом значения (1) превышают значения (3) примерно в 2 раза. Пиковые значения показателя (1) соответствуют разработке ротором «стен в грунте» (ст. «Троице-Лыково») и нескольких твердых неоднородностей.

Колебания минимальных значений усилий подачи привода при проходке (2) имеют самый большой разброс в диапазоне значений от показателя (3) к показателю (1), что не позволяет сравнивать значения (2) и (3), например, в водонасыщенных грунтах на второй половине трассы проходки. Автоматически заархивированные показатели минимальных значений подачи привода ротора не пригодны для нашего исследования. Поэтому требуется, изучив архив значений технологических параметров, вручную извлечь и статистически обработать нужную информацию для установления взаимосвязей между ними.

Структура архивации значений технологических параметров

Современный тоннелепроходческий комплекс оснащен средствами контроля, измерения и регистрации параметров технологических процессов ТПМК. Объектами контроля являются гидравлические контуры и электрические сети комплекса, а также перемещение и положение щита и отдельных его узлов в пространстве.

Приборами контролируются основные параметры технологических процессов ТПМК:

- величина и состояние пригрузки;
- техническое состояние и функционирование механизмов в забойной зоне;
- функционирование транспортного цикла;
- работа проходческих домкратов;
- состояние уплотнения хвостовика;
- работа нагнетания за обделку;
- состояние гидравлической системы;

- ориентация щита в пространстве.

Все измеренные параметры графически изображаются на мониторах пульта управления. Актуализация результатов измерений, появляющихся на мониторе, происходит синхронно со сбором данных, которые при необходимости статистически обрабатываются и вносятся в память бортового компьютера ТПМК. Далее основные статистические показатели параметров рассчитываются в протоколе проходки по окончании ее цикла. На рис. 2 изображен весь архивный каталог результатов обработки значений технологических параметров.

Программа *PDVEXE* для обработки и визуализации значений технологических параметров находится в основном каталоге и осуществляет прием, обработку, сохранение, отображение и анализ значений. Все данные измерений непрерывно собираются и визуализируются приемником значений параметров с предварительно заданной дискретностью (обычно 6 раз в минуту), а протоколируются в определенные моменты времени (обычно по окончании цикла проходки). Период расчета среднего значения параметра можно выбрать отдельно для каждого состояния рабочего режима. Для расчета доступны три периода, обозначающих состояние (статус) соответствующего рабочего режима ТПМК:

- «проходка» (статус 2);
- «сборка кольца» (статусы 4 и 5);
- «состояние покоя» (статус 6).

Режимы «проходка» и «сборка кольца» включаются при помощи клавиши на пульте управления. До тех пор, пока сигнал включения имеется, программируемому контроллеру ТПМК сообщается однозначно выбранный рабочий режим. Если не включена ни одна из двух клавиш, то ТПМК находится в статусе 6 «состояние покоя» или в статусах ожидания 1 и 3.

Каталог *Database* содержит все полученные или обработанные значения параметров в формате *database file (DBF)*. Мгновенные зна-

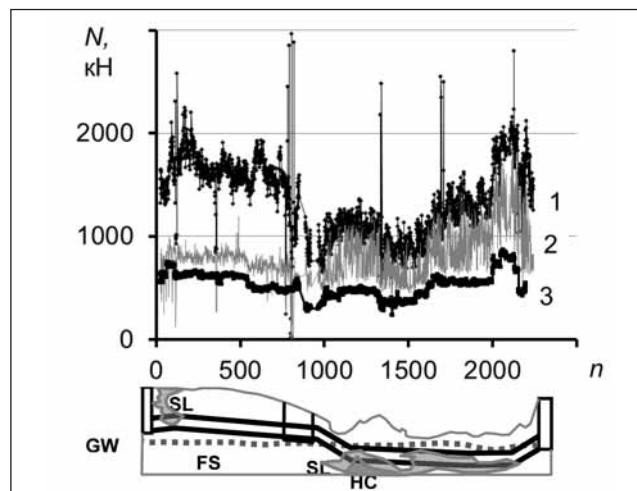
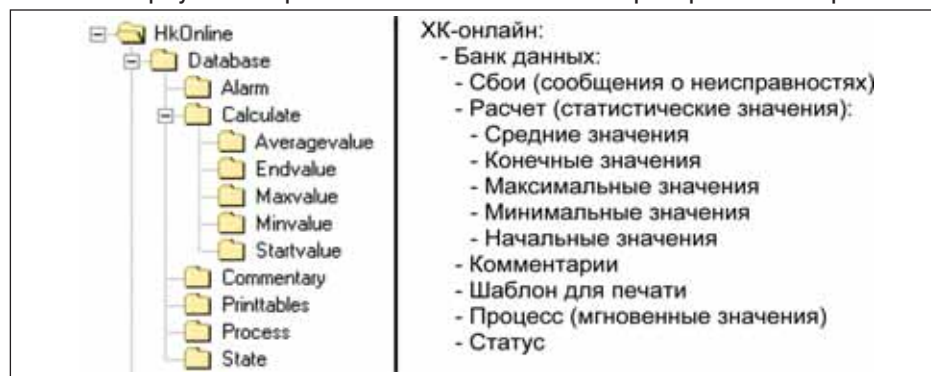


Рис. 1. Зависимости значений усилия подачи ротора N [кН]: средних (1) и минимальных (2) при проходке, средних против давления бентонита (3) – от номера 1,2 м-цикла n . Геологический разрез: GWL – уровень грунтовых вод; SL – супесь; FS – мелкий песок; HC – тяжелая глина

чения являются результатами измерений, выдаваемыми программируемым контроллером, а также расчетными значениями. Для каждого нового цикла проходки создается таблица с мгновенными значениями, в которой во время всего цикла одного кольца сохраняются данные параметров. Для отнесения табличных данных к соответствующему кольцу имя файла таблицы содержит номер текущего кольца, а сам файл по окончании цикла проходки помещается в каталог *Process*.

Статистические данные каждого подкаталога (средние *Averagevalue*, начальные *Startvalue*, конечные *Endvalue*, минимальные *Minvalue* и максимальные *Maxvalue* значения) сохраняются в отдельном каталоге *Calculate*. Эти статистические данные вычисляются по значениям параметров из файлов каталога *Process* только для рабочего режима «проходка» (статус 2), на практике занимающего лишь менее одной трети времени цикла проходки. Основные статистические данные попадают в итоговый протокол проходки, отражающий достигнутые результаты в цикле для анализа. Однако значения из протокола проходки не всегда удобны для оперативного анализа, поскольку часто требуется сводная таблица для показателей, усредненных за цикл. Некоторые параметры не включены в протокол, а отдельно для режимов «сборка кольца» и «состояние покоя» статистические значения основных

Рис. 2. Каталог результатов обработки значений технологических параметров в компьютере ТПМК



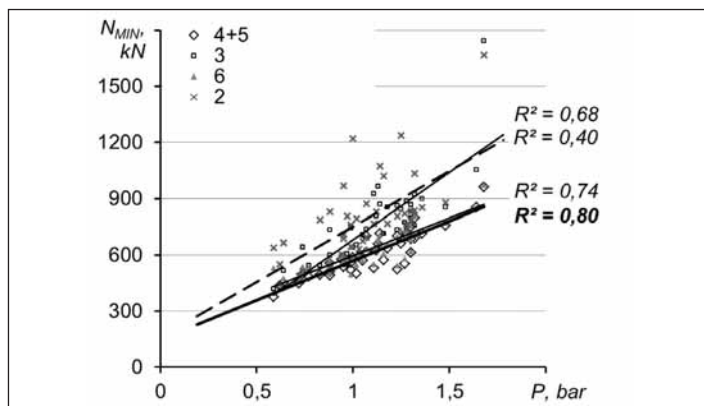


Рис. 3. Зависимости минимальных значений подачи привода ротора N_{MIN} [кН] при режимах: «сборка кольца» (4+5); «ожидание» перед сборкой кольца (3); «состояние покоя» после сборки кольца (6); «проходка» (2) – от давления P [бар] бентонитового пригруза в центре забоя

рабочих характеристик ТПМК не вычисляют, программа обработки результатов. Во время этих продолжительных рабочих режимов без продвижения щита информация сохраняется в каталоге *Process* лишь в больших файлах для каждого цикла.

Взаимосвязи значений технологических параметров

Подача привода ротора и давление гидропригруза

Для нахождения приведенных на рис. 1 зависимостей использовались данные подкаталога средних значений параметров *Averagevalue*, сохраненные в каталоге *Calculate*. Файлы формата *DBF* преобразовывались нами в формат *XLS* для их открытия и работы с ними на удаленном компьютере. Нами была поставлена задача подтверждения состоятельности предположения, что измеряемое при проходке несвязного грунта усилие подачи привода ротора противодействует усилию со стороны грунта и усилию со стороны опорной среды бентонитового пригруза для щита диаметром 6,28 м [3]. Это предположение было первоначально выдвинуто после анализа работы щита диаметром 14,2 м с гидропригрузом, а в трудах Всемирного тоннельного конгресса в 2014 г. [6] освещена наша концепция мониторинга соответствия давлений грунта и опорной бентонитовой суспензии.

Ранее мы убедились, что минимальные значения N_{MIN} усилия подачи ротора при проходке имеют большие колебания на коротких участках проходки (кривая (2) рис. 1). Такие колебания не позволяют по этим данным, которые сохранены в подкаталоге минимальных значений *Minvalue* для режима 2 «проходка», точно оценить усилие N_{MIN} по значениям давления P бентонитового пригруза из подкаталога *Averagevalue*. Чтобы определить, при каком рабочем режиме ТПМК минимальные значения N_{MIN} будут наиболее адекватны давлению P , была проведена ручная выборка N_{MIN} для режимов 3, 4+5 и 6 через каждые 50 циклов проходки. Далее были установлены зависимости минимальных значений подачи привода ротора при данных режимах от значения P , приведенного для центра забоя (рис. 3).

Максимальный коэффициент детерминации R^2 прямых тренда для полученных зависимостей указал на рабочий режим, при котором целесообразно проводить выборку минимальных показателей N_{MIN} . Таким образом, мы выбрали режим 4+5 «сборка кольца», N_{MIN} при котором имеет линейную зависимость от P с полученным максимальным коэффициентом детерминации $R^2 = 0,8$.

Для обеспечения баланса давления бентонитового пригруза и горизонтальной составляющей давления P массива нами был рекомендован текущий корректирующий расчет коэффициента превышения давления гидропригруза. Этот расчет для щита диаметром 6,28 м, как и для щита диаметром 14,2 м, основан на результатах измерений усилий подачи N привода ротора. Для этого во время проходки рассчитывается среднеарифметический показатель усилия N_{AV}^A подачи привода ротора, а во время режима «сборка кольца» выбирается минимальное значение N_{MIN}^M .

Действующий коэффициент превышения давления гидропригруза принимаем как

$$K = N_{MIN}^M / (N_{AV}^A - N_{MIN}^M), \quad (1)$$

где N_{MIN}^M – минимальное значение усилия подачи привода ротора во время сборки кольца, кН;

N_{AV}^A – среднеарифметическое значение усилия подачи при проходке, кН.

В соответствии с формулой (1) мы рассчитали коэффициент K через каждые 50 циклов, провели полиномиальную линию тренда с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,41$. Совмещенный график K и P от номера цикла n приводим на рис. 4.

Действующее давление P бентонитового пригруза – от 0,5 до 1,75 бар, а линия тренда зависимости коэффициента K колеблется от 0,5 до 1,25 при рекомендуемом нами для щита диаметром 6,28 м диапазоне от 1,1 до 1,25.

Далее исследуем, как давление P и его отношение к давлению грунта (коэффициент K) влияет на деформацию забоя, то есть на экструзию грунта, определяемую его извлекаемым объемом.

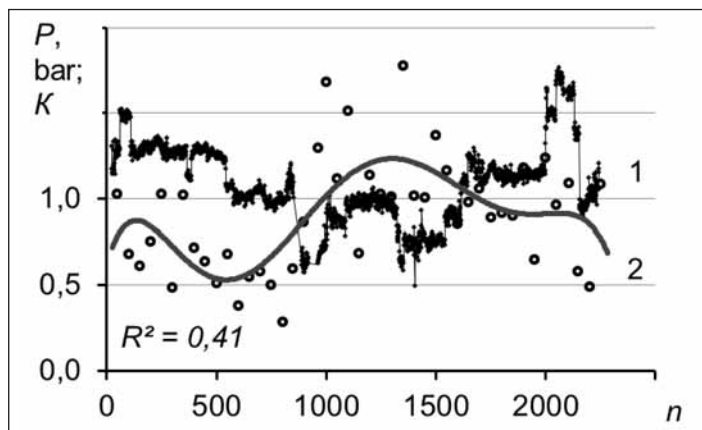


Рис. 4. Зависимости усредненных за цикл значений давления бентонитового пригруза P [бар] (1) и коэффициента K превышения гидропригруза (2) по центру щита – от номера 1,2 м-цикла n

Извлекаемый объем грунта и давление гидропригруза

Извлекаемый за цикл проходки объем грунта можно рассчитать:

$$V = (Q_2 - Q_1) T, \quad (2)$$

где V – суммарный объем вынутаго грунта за цикл проходки, m^3 ,

Q_1 и Q_2 – усредненные показатели расходов входящего и выходящего потоков трубопроводного транспорта породы соответственно, $m^3/ч$,

T – время проходки, ч.

Теоретически вынимаемый объем массива V_T полностью зависит от геометрии щита (диаметр $D = 6,28$ м, длина кольца $L = 1,2$ м):

$$V_T = \pi L D^2 / 4 = 37,15 m^3. \quad (3)$$

По результатам расчета значений извлекаемого за цикл объема грунта построен их график (рис. 5).

На графике мы построили прямую линию теоретически вынимаемого объема V_T , значение которого совпадает с V на участках с водонасыщенными грунтами.

Частые изменения извлекаемого объема, вероятно, вызваны различной величиной экструзии грунта в камеру экскавации и связаны с колебаниями давления грунта по выявленным техногенным причинам. Такие изменения превышают погрешность измерений [7] и требуют отдельного исследования. Однако есть и сглаженные полиномиальным трендом изменения извлекаемого объема грунта. На первой трети трассы тоннеля наблюдается пониженный уровень значений извлекаемого объема, поскольку здесь грунт аэрирован, а в трубопроводном транспортном контуре формируется и измеряется поток только твердых и жидких фаз грунта.

На второй трети трассы значения извлекаемого и теоретического объемов грунта сопоставимы, здесь происходит постепенная смена аэрированных грунтов на водонасыщенные породы (см. рис. 1), а коэффициент K превышения гидропригруза в основном больше 1 (кривая 2 рис. 5). На последней трети трассы значе-

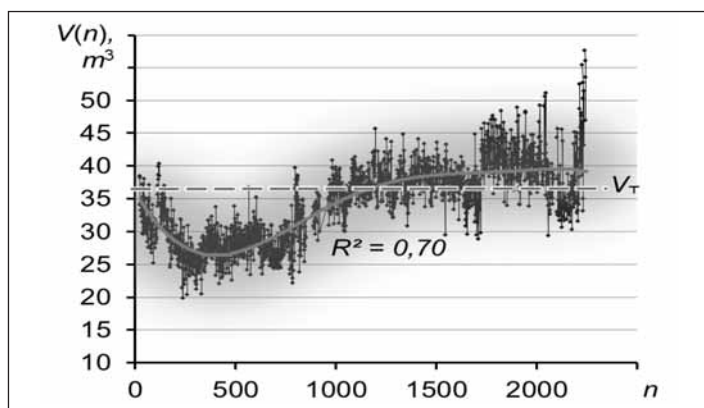


Рис. 5. Зависимость значений извлекаемого за цикл объема грунта V [м³] от номера 1,2 м-цикла n

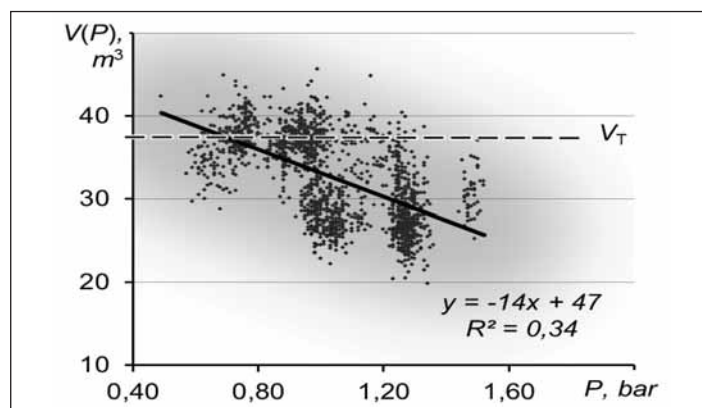


Рис. 6. Зависимость извлекаемого за цикл объема грунта V [м³] от давления бентонитового пригруза P [бар] по центру щита

ния извлекаемого объема водонасыщенного грунта преваляют над уровнем теоретического объема выработки, а коэффициент $K < 1$.

Найдена обратная линейная зависимость извлекаемого за цикл объема грунта V [м³] от давления бентонитового пригруза P [бар] по центру щита (рис. 6), которая доказывает возможность уменьшения экструзии грунта и дренажа грунтовой воды в забой за счет увеличения давления P .

Установленная закономерность такова, что увеличение давления P на 0,1 бар уменьшает извлекаемый объем V на 1,4 м³ за цикл. Однако при сверхнормативном увеличении P существует опасность уменьшения выходящего потока Q_2 в формуле (2). Это уменьшение сигнализирует об утечках бентонитовой суспензии в грунт, которые вызывают ложное уменьшение измеряемого значения извлекаемого объема. Таким образом, чтобы соблюсти вещественный баланс в забое, необходим контроль баланс давлений от грунта и пригруза от бентонитовой суспензии.

Рекомендации по совершенствованию контроля гидропригруза

1. Создать в каталоге *Calculate* подкаталог *4+5_Minvalue* минимальных значений технологических параметров в режиме «сборка кольца».

2. Организовать обработку файлов из каталога *Process* с выборкой минимальных значений технологических параметров в режиме «сборка кольца» с хранением их в подкаталоге *4+5_Minvalue*.

3. Организовать расчет значения коэффициента K превышения давления бентонитового пригруза по формуле (1), используя данные N из подкаталогов *Averagevalue* и *4+5_Minvalue*.

4. Организовать расчет значения извлекаемого за цикл проходки объема грунта V по формуле (2), используя данные параметров Q_2 , Q_1 и T из подкаталога *Averagevalue*. Для водонасыщенных грунтов проводить сравнение V с теоретическим объемом выемки V_T .

5. Организовать вывод усредненных за цикл значений K и V на монитор оператора и в протокол после каждого цикла проходки. В протоколе предусмотреть печать пяти предыдущих значений K и V .

6. Рекомендовать операторам ТПМК удерживать коэффициент K в пределах 1,1–1,25

регулированием давления P бентонитового пригруза, таким образом учитывать колебания давления грунта.

7. Рекомендовать операторам ТПМК дополнительно отслеживать извлекаемый объем V , при его резком увеличении повышать давление P бентонитового пригруза, при резком уменьшении V – понижать давление P . Повышение P на 0,1 бар уменьшает V на 1,4 м³ за цикл.

Заключение

Проанализированы 2283 цикла проходки перегонного тоннеля метро щитами диаметром 6,28 м с гидропригрузом. Замечено, что усилия подачи привода ротора при проходке превышают значения усилия подачи при противодействии только давлению бентонита примерно в 2 раза.

Проведен анализ архивных каталогов значений технологических параметров проходки. Замечено, что статистические данные вычисляются программой обработки результатов по значениям параметров из файлов каталога *Process* только для рабочего режима «проходка», на практике занимающего лишь менее одной трети времени цикла, а для режимов «сборка кольца» и «состояние покоя» не вычисляются.

Исследования зависимостей минимальных значений подачи роторного привода от средних значений давления гидропригруза показали, что целесообразно проводить выборку минимальных показателей подачи роторного привода при режиме «сборка кольца». Используя эти показатели, рекомендуется проводить расчет коэффициента превышения пригруза.

Найдена обратная линейная зависимость извлекаемого за цикл объема грунта V от давления бентонитового пригруза P по центру щита. Увеличение давления P на 0,1 бар уменьшает извлекаемый объем V на 1,4 м³ за цикл.

Сформулированы рекомендации по совершенствованию контроля гидропригруза, включающие в себя расчет и вывод на монитор ТПМК усредненных за цикл значений коэффициента превышения давления гидропригруза, а также величины извлекаемого объема грунта. В соответствии со значениями этих показателей необходимо для безопасности работ регулировать давление бентонитового пригруза при колебаниях давления грунта по техногенным и другим причинам.

Ключевые слова

Тоннелепроходческий комплекс, бентонитовый пригруз забоя, подача ротора, извлеченный объем грунта

Slurry-shield, face bentonite support, cutter-bead thrust force, extracted volume.

Список литературы

1. Елгаев С. Г. Метро- и тоннелестроение в России: современный этап и перспективы / *Транспортное строительство*. – 2014. – № 1.
2. Мазеин С. В. Измерение технологических параметров щитовой проходки транспортных тоннелей // *Метро и тоннели*. – 2009. – № 2. – С. 8.
3. Мазеин С. В. Использование характеристик прижима ротора для контроля запаса суспензионного пригруза при тоннельной щитовой проходке // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2010. – № 3. – С. 2–8.
4. Мазеин С. В. Исследование прижимного роторного усилия и опускания грунта для прогноза суспензионного пригруза в забое проходческого щита / *Горное оборудование и электромеханика* – 2010. – № 5. – С. 6–12.
5. Вознесенский А. С., Мазеин С. В. Исследование периодичности усилий прижима ротора и горизонтального давления грунтов при щитовой проходке выработки // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – ИГД СО РАН. – 2012. – № 2. – С. 38–45.
6. Mazein, S. V.; Voznesensky, A. S.: 2014. *Monitoring the Variation of Rotor Pressing Forces and Horizontal Soft Soil Pressure during Shield Tunneling / Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a better Life. Iguassu Falls, Brazil.*
7. Мазеин С. В. Оперативный контроль объема и веса выемки грунта механизированной щитовой проходкой тоннелей метрополитена // *Горное оборудование и электромеханика*, – 2009. – № 6. – С. 2–7.

Для связи с авторами

Мазеин Сергей Валерьевич
mazein@rus-tar.ru

Федуец Борис Иванович
fedunets@msmu.ru

Вознесенский Александр Сергеевич
ftkp@mail.ru

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ БВР С ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ ИНИЦИИРОВАНИЯ

SEISMIC ACTION DEW WITH ELECTRONIC INITIATION

В. И. Куликов, к. ф.-м. н., внс Института динамики геосфер РАН
А. Ю. Дмитриев, зам. главного инженера ООО «СМУ-5 Мосметростроя»
Ф. И. Галушко, технический директор ЗАО «Орика СиАйЭс»

V. I. Kulikov, A. Yu. Dmitriev, F. I. Galushko

Ранее в журнале «Метро и тоннели» была описана система электронного инициирования зарядов при БВР, проанализированы достоинства этой системы по сравнению с пиротехническими средствами инициирования [1]. В данной работе приведены результаты натурных исследований сейсмического действия БВР при проходке горных выработок метрополитена с электрической и электронной системой инициирования. В работе показаны недостатки технологии короткозамедленного взрывания с применением электродетонаторов. Продемонстрировано преимущество электронной системы инициирования I-KON, которая позволила реализовать пошпуровое взрывание с минимально возможным сейсмическим воздействием.

Earlier in the magazine «Metro and Tunnels» has been described the system of electronic initiation charges at DEW and has been analyzed the advantages of this system compared to the pyrotechnic initiation [1]. This paper presents the results of field studies of the seismic action of DEW upon building of mine workings with electric and electronic initiation system. The paper shows the shortcomings of short-delay blasting technology, which uses electric detonators. It demonstrates the benefits of electronic initiation system I-KON, which allowed to implement single hole blasting with lowest possible seismic action.

Проходку станционных и перегонных тоннелей глубокого заложения (уровень 64 м) обычно ведут буровзрывным способом. Горный массив на этой глубине представлен известняками средней прочности, трещиноватыми, с прослоями твердой глины. Коэффициент крепости по шкале Протодяконова известняка составляет 4–7, глины около 3–6.

Сейсмозрывные воздействия – это практически всегда негативная сторона буровзрывных работ (БВР). Густая сеть действующих линий метрополитена приводит к тому, что БВР при проходке новых горных выработок ведутся в непосредственной близости от дей-

ствующих перегонных тоннелей и станций. Например, строящиеся перегонные тоннели Люблинско-Дмитровской линии находятся на расстоянии 10 м от действующих тоннелей Серпуховско-Тимирязевской линии. В таких условиях БВР являются источником сильных сейсмозрывных волн, которые могут привести к нарушению герметичности чугунного тюбинга тоннеля и затюбингового бетонного заполнителя, разрушению вмещающего тюбинга грунтового массива.

Для определения уровня сейсмозрывных нагрузок на действующие тоннели была проведена регистрация сейсмозрывных

волн при проходке технологических выработок на станции «Петровско-Разумовская», причем исследования велись при электрической с электродетонаторами ЭД-3-Н и электронной системе инициирования I-KON, которая обсуждается в работе [1]. Это позволило выявить преимущества электронной системы инициирования, которая позволяет вести БВР на новом технологическом уровне и с меньшим уровнем сейсмозрывных воздействий.

Традиционную технологию БВР Мосметростроя с электрическим инициированием иллюстрируют рис. 1 и 2. На рис. 1 показана

Рис. 1. План-схема горных выработок и размещения сейсмопунктов

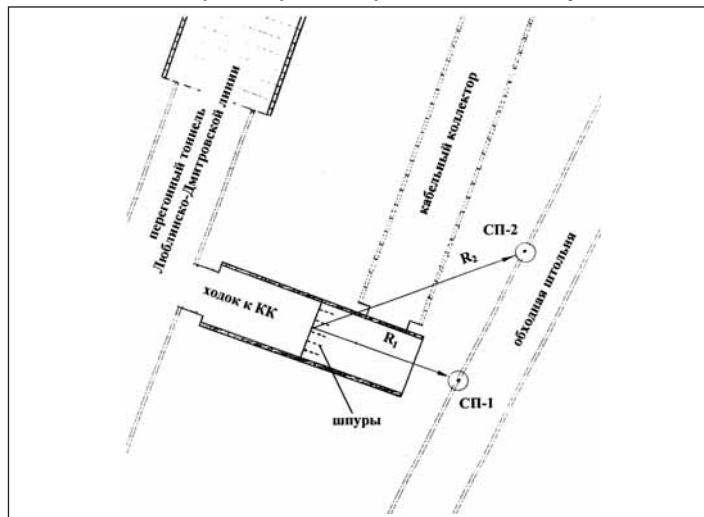


Рис. 2. Схема забоя с расположением шпуров и их коммутации при электрической системе инициирования

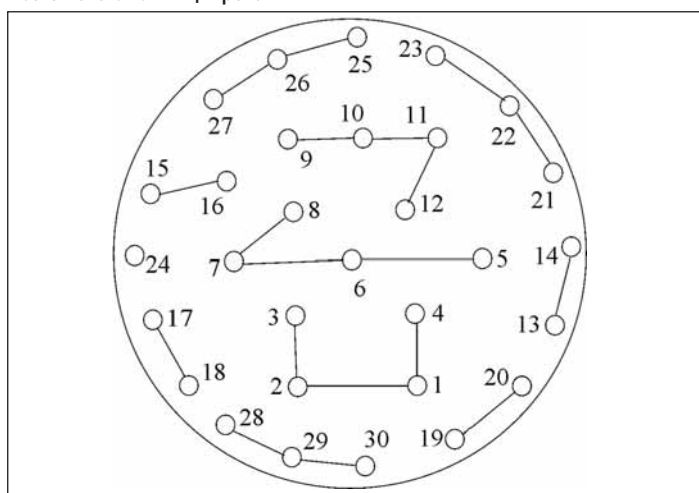


Таблица 1

Параметры взрыва с электродетонаторами

Номер ступени	Число шпуров в ступени	Номера шпуров	Масса ВВ в ступени, кг	Величина замедления, мс
1	4	1–4	0,8	40
2	4	5–8	1,2	80
3	4	9–12	1,2	100
4	4	13–16	1,4	150
5	4	17–20	1,6	200
6	4	21–24	1,4	350
7	3	25–27	1,0	450
8	3	28–30	1,4	500
Всего	30		10,0	

план-схема проходки технологической выработки для кабельного коллектора, которую вело СМУ-5 Мосметростроя. Ее диаметр 4,5 м. Вид проходческого забоя показан на рис. 2. В забое разбурено 30 шпуров диаметром 42 мм на глубину 1,1 м. В шпуры помещали патронированный аммонит 6ЖВ. Масса ВВ в шпурах варьировалась от 0,2 до 0,8 кг. Забойкой шпуров служила глина. Каждый взрыв увеличивал длину выработки на 1 м, и на это расстояние перемещается забой.

Для снижения сейсмического действия БВР Метрострой применяет метод короткозамедленного взрывания (КЗВ) с использованием промышленных электродетонаторов ЭД-3-Н. Они выпускаются с номиналами замедления от 20 до 10000 мс, всего 36 различных серий. Как будет показано ниже на рис. 6 и 8, продолжительность цуга колебаний сейсмозрывной волны от одного шпурового заряда около 50 мс, период колебаний около 15 мс, поэтому для КЗВ шпуровых зарядов необходимы замедления 7 мс и менее. Промышленность не выпускает электродетонаторы таких номиналов, поэтому реализовать КЗВ шпуровых зарядов практически невозможно. Реально при таких взрывах электродетонаторы разделяют во времени сейсмозрывные волны от групп зарядов. В эти группы коммутируют от 4 до 8 шпуров и в результате масса ВВ в ступени замедления может достигать 4 кг. Из-за этого сейсмозрывные волны формируются одновременным взрывом нескольких шпуров и имеют значительную амплитуду.

Для взрыва в технологической выработке коммутация шпуров в группы (ступени) показана на рис. 2. В табл. 1 приведены основные параметры этого взрыва. Суммарная масса взрыва 10 кг ВВ, число ступеней замедления 8, число шпуров в одной ступени – 3 или 4, максимальная масса ВВ в одной ступени 1,6 кг; масса ВВ во врубе (первая ступень) 0,8 кг ВВ, номиналы электродетонаторов от 40 до 500 мс.

Для регистрации сейсмозрывных волн в обходной штольне были размещены два сейсмических пункта СП-1 и СП-2, показанные на рис. 1. Грунт стенки обходной штольны представлен слоями красной и синей глины, плотной и влажной. В стенке штольны просверлены отверстия, в которые зацементированы деревянные дюбели. К ним саморезами крепились дюралевая платформа с сейсмоприемниками (геофоны и акселерометры). В каждом сеймопункте регистрировались колебания стенки в двух направлениях: по нормали к стенке, т. е. в радиальном направлении от взрыва, и вдоль оси обходной штольны. Расстояния от забоя до сеймопунктов при первом взрыве составляли 9,2 и 14 м. При последующих взрывах за счет перемещения забоя эти расстояния уменьшались. Сигналы с сейсмоприемников оцифровывались с частотой 10 кГц и записывались на ноутбук.

На рис. 3 приведена акселерограмма радиальных (по нормали) колебаний стенки

выработки, зарегистрированная при одном из взрывов в сеймопункте СП-1 с гипоцентральной расстоянием 8,2 м. Ускорение представлено в единицах g, время в миллисекундах.

Из акселерограмм были рассчитаны велосигаммы и сейсмограммы смещений и их спектры. Из этих данных получено, что при колебаниях стенки выработки ускорения достигали величины 20g, скорости колебаний – 0,24 м/с, смещения – 0,6 мм, максимум спектра велосигаммы имел частоту 70 Гц. По разности времени прихода сейсмозрывной волны на сеймопункты СП-1 и СП-2 была получена скорость распространения волны в горном массиве – 2,3 км/с. Отсюда длина сейсмозрывной волны составляет 33 м. Такую волну можно считать короткой для горной выработки и потому следует учитывать, что на стенке горной выработки произошло отражение взрывной волны, которое приводит к удвоению ускорения и скорости колебаний стенки.

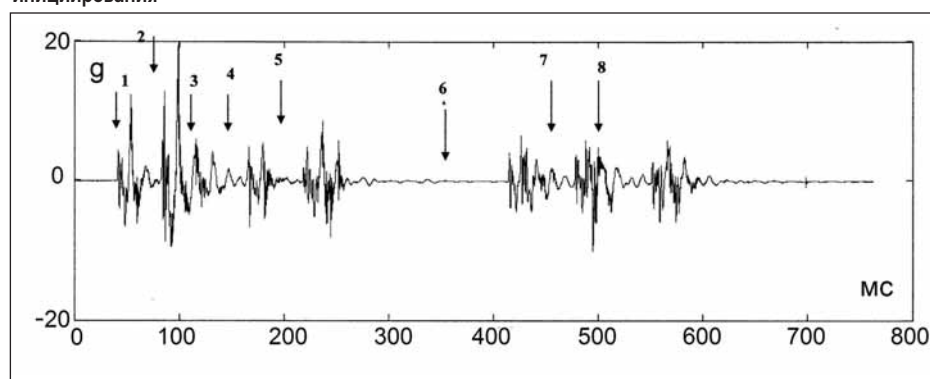
Вертикальные стрелки на рис. 3 отмечают номинальное время срабатывания электродетонаторов. Из рисунка видно, что акселерограмма состоит из восьми цугов колебаний, что соответствует восьми ступеням замедления. Однако время следования этих цугов не соответствует номиналам электродетонаторов, и отклонения от номинала достигают 35 %. Этот недостаток электродетонаторов ранее отмечался в работах [2, 3] при

взрывах скважинных зарядов на карьерах. Из-за разброса времени срабатывания электродетонаторов возможна суперпозиция цугов от соседних ступеней и это приводит к значительным амплитудам сейсмозрывной волны [3]. Очевидно, что минимальную по амплитуде сейсмозрывную волну можно получить от одного шпура и, следовательно, надо осуществить пошпуровое взрывание с интервалом времени замедления, равном продолжительности колебаний от взрыва одного шпура. Такое опытное пошпуровое взрывание в кабельном коллекторе было осуществлено специалистами ИДГ РАН и СМУ-5 Мосметростроя совместно с сотрудниками компании ORICA, которая разработала и поставила Мосметрострою систему электронного инициирования I-KON.

Система электронного инициирования достаточно подробно представлена на сайте фирмы ORICA и в статье [1]. Здесь отметим только, что каждый детонатор может быть настроен на время замедления от 0 до 15000 мс с шагом 1 мс.

В кабельном коллекторе было проведено несколько взрывов с использованием этой системы. Для примера рассмотрим один из этих взрывов, для которого забой показан на рис. 4. В забое кабельного коллектора также было разбурено 30 скважин. Шпуры в группы не коммутировались, каждый из них имел свое индивидуальное время инициирования, которое указано в табл. 2. Только во

Рис. 3. Акселерограмма радиальных колебаний стенки горной выработки при электрической системе инициирования



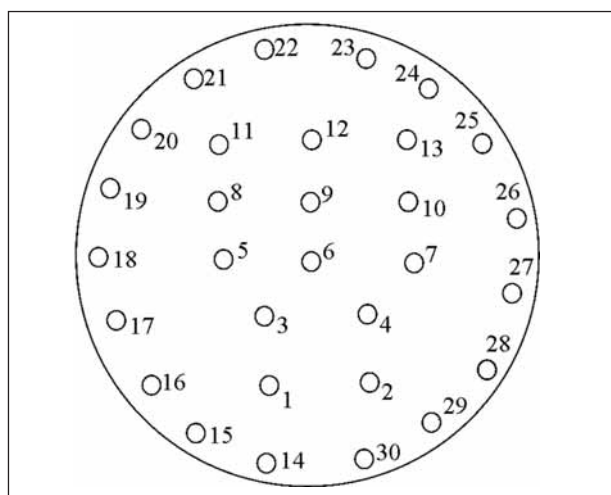


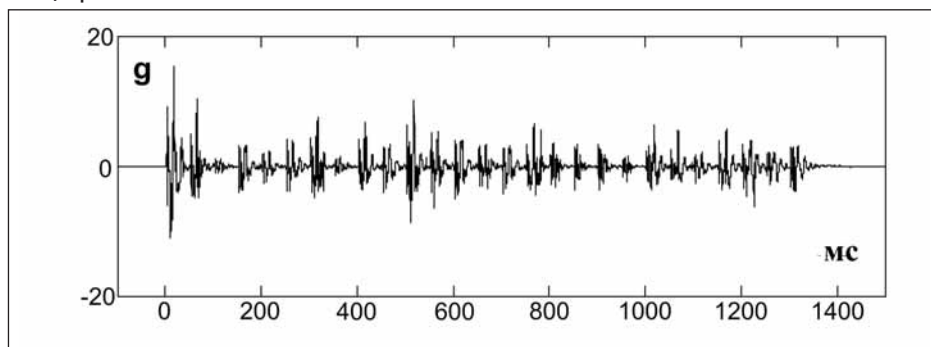
Рис. 4. Схема забоя с расположением шпуров при электронной системе инициирования

Таблица 2

Параметры взрыва с электронным инициированием

Номер ступени	Номера шпуров	Масса ВВ в ступени, кг	Величина замедления, мс
1	1–4	0,8	0
2	5	0,3	50
3	6	0,3	100
4	7	0,3	150
5	8	0,3	200
6	9	0,3	250
7	10	0,3	300
8	11	0,3	350
9	12	0,3	400
10	13	0,3	450
11	15	0,4	500
12	16	0,4	550
13	17	0,4	600
14	18	0,4	650
15	19	0,4	700
16	20	0,4	750
17	21	0,4	800
18	22	0,4	850
19	23	0,4	900
20	24	0,4	950
21	25	0,4	1000
22	26	0,4	1050
23	27	0,4	1100
24	28	0,4	1150
25	29	0,4	1200
26	30	0,4	1250
27	14	0,4	1300
Итого		10,3	

Рис. 5. Акселерограмма радиальных колебаний стенки горной выработки при электронной системе инициирования



врубке взрывалось четыре заряда (шпуры № 1–4) с одинаковым замедлением 0 мс.

Зарегистрированная в сейсмопункте СП-1 акселерограмма радиальных колебаний при этом взрыве показана на рис. 5. Гипоцентральный расстояние до сейсмопункта составляло 7,2 м, т. е. на 1 м меньше, чем при описанном выше взрыве с электродетонаторами (забой продвинулся на 1 м).

На рис. 5 выделяются 27 цугов колебаний, времена следования которых соответствуют запрограммированным временам инициирования шпуров (согласно табл. 2). Ни одного факта отклонения запрограммированного времени инициирования от фактического времени детонации зарядов более чем на 1 мс не зафиксировано. Продолжительность колебаний в одном цуге около 25 мс, поэтому при выбранном замедлении 50 мс суперпозиция волн была исключена и каждый цуг колебаний – это сейсмозврывающая волна от одного шпурового заряда. Такое взрывание следует считать «пошпуровым».

Амплитуда колебаний в первом цуге от взрыва вруба наибольшая и соответствует суммарной массе ВВ 0,8 кг в четырех шпурах вруба. Максимальные ускорения от вруба 15g, максимальные скорости колебаний 0,15 м/с, в спектре доминирует частота 70 Гц. Амплитуда волны от вруба практически такая же, как и при электрическом инициировании, что обусловлено одинаковыми массами ВВ во врубах при электронном и электрическом инициировании. Амплитуды волн от остальных шпуров меньше, но они не-

одинаковы, что объясняется тем, что на эффективность излучения волн влияют различные случайные факторы, такие как неоднородность грунтового массива, разница в качестве забойки шпуров, трещины и новые обнаженные поверхности, которые возникают от взрывов предыдущих шпуров.

На рис. 6 приведен фрагмент акселерограммы (рис. 4), показывающий волну от взрыва одного шпура (ступень замедления № 6, шпур № 9, масса заряда 0,3 кг). Максимальное ускорение от этого шпура 4g, максимальная скорость колебаний 0,05 м/с, основная частота в спектре велосиграммы 70 Гц. От одного шпура максимальные ускорения и скорости получились в 3 раза меньше, чем от взрыва вруба. Основная причина этого в различии масс зарядов одного шпура и вруба. Но следует учитывать и то, что врубовый заряд «работает» в почти зажатой среде (у него только одна свободная граница – поверхность забоя), что также увеличивает его сейсмическую эффективность. При последующих опытных взрывах с электронным инициированием заряды вруба подрывались последовательно с интервалом замедления 25 мс, т. е. и для вруба было реализовано «пошпуровое» взрывание. За счет этого при электронном инициировании масса ВВ в одной ступени (шпуре) была 0,2; 0,3 или 0,4 кг ВВ, т. е. на порядок меньше, чем в одной ступени при электрическом инициировании. Это привело к снижению амплитуды сейсмозврывающей волны.

При этих экспериментах откола или отслоений на грунтовой стенке обходной штольни зафиксировано не было. Устойчивость горной выработки подтверждается также оценками, которые приведены ниже.

Предельно-допустимые сейсмозврывающие нагрузки на горные выработки определяют либо по деформациям грунтового массива, либо по напряжениям на ее контуре. Деформации в сейсмозврывающей волне оцениваются по формуле:

$$\varepsilon = V/C, \quad (1)$$

где V – максимальная скорость колебаний,

C – скорость распространения сейсмозврывающей волны.

Для одного шпура максимальная скорость колебаний стенки выработки составляла 0,05 м/с (рис. 6). С учетом отражения волны от стенки выработки в падающей на стенку волне максимальная скорость колебаний 0,025 м/с. Отсюда оценка по формуле (1) дает деформацию 10^{-5} . Согласно нормам, принятым в энергетической отрасли [4], критическое значение деформации 10^{-4} и, следовательно, устойчивость выработки при взрыве одного шпура обеспечена. При взрыве с электродетонаторами в ступени замедления всегда несколько шпуров и деформации близки к критическим.

Для оценки напряжения сжатия в сейсмозврывающей волне, падающей на грунтовую стенку выработки, воспользуемся соотношением для упругих волн:

$$\sigma_{сж} = \rho \cdot V \cdot C, \quad (2)$$

где ρ – плотность породы,

V – максимальная скорость колебаний в падающей волне,

C – скорость распространения сейсмозрывной волны.

Отсюда в падающей волне от одного шпура при $\rho = 2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и $C = 2,3 \text{ км/с}$, по формуле (2) получим $\rho_{\text{сж}} = 10^5 \text{ Па}$. Для горных пород с крепостью более 3 по шкале Протодьяконова, каким является глинистый грунт, такое напряжение на два порядка меньше прочности на раздавливание образца. Следовательно, сейсмозрывная волна не может раздавить (раздробить) грунтовую стенку обходной штольни.

При отражении волны от стенки горной выработки возникают напряжения растяжения, причем их величина численно равна напряжениям в волне сжатия (для треугольного профиля волны) [5]. В этом случае $\sigma_{\text{раст}} = 10^5 \text{ Па}$. Прочность горных пород на растяжение примерно в 15 раз меньше прочности на сжатие. Поэтому для пород с крепостью около 3 прочность на растяжение около $20 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Эта величина на порядок больше напряжений растяжения при взрыве одного шпура. Следовательно, такая сейсмозрывная волна не может вызвать откольных явлений в стенке выработки. При взрыве с электродетонаторами амплитуды волн из-за эффекта суперпозиции волн от нескольких шпуров в 3–5 раз больше, чем от одного шпура, и появляется вероятность откола.

При промышленных взрывах на карьерах (скважинное короткозамедленное взрывание) было показано, что сейсмический эффект массовых взрывов (максимальная скорость сейсмических колебаний) зависит и от эпицентрального расстояния от взрываемого блока до объекта (места регистрации) и от массы заряда на одну ступень замедления [6]. Параметром этой функциональной зависимости является приведенное эпицентральное расстояние – $R/q^{1/3}$, а сама зависимость описывается формулой:

$$V = K \cdot \left(\frac{q^{1/3}}{R} \right)^n, \quad (3)$$

где V – максимальная скорость колебаний,

q – масса заряда на одну ступень замедления, кг,

R – эпицентральное (в нашем случае гипоцентрального) расстояние, м.

Коэффициент «К» в этой формуле получил название коэффициента сейсмичности. Его величина зависит от физико-механических свойств вмещающей горной породы (прочности, трещиноватости, влажности и т. д.) и условий взрывания (зажатая среда, число обнаженных поверхностей, качество забойки скважин и т. д.) и меняется в широких пределах от 10 до 50 м/с. В формуле (3) «n» – степень затухания волны с расстоянием. Исследования показали, что в ближней зоне взрыва «n» около 2, в дальней – около 1,5 [6].

Анализ сейсмического эффекта БВР в метро проводился по максимальным скоростям

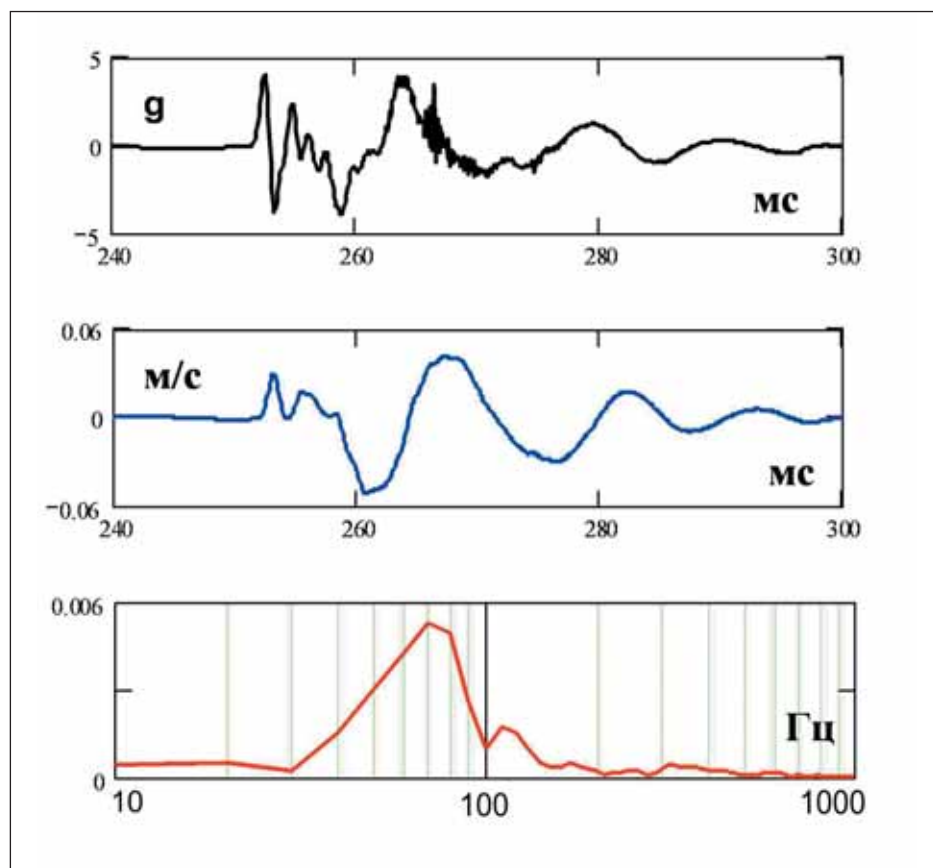
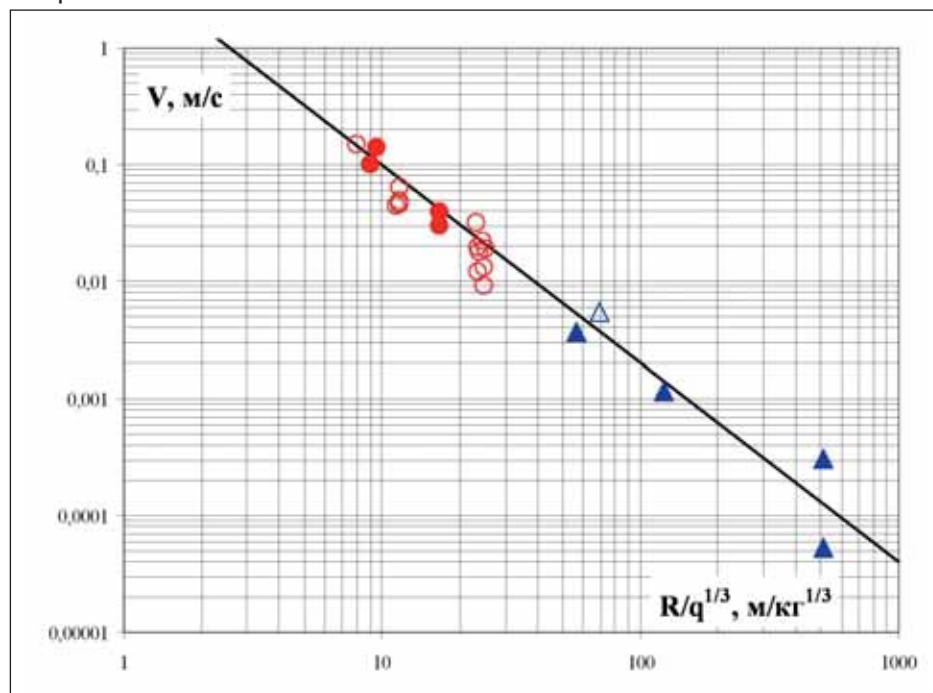


Рис. 6. Акселерограмма, велосигграмма и ее спектр от взрыва одного шпурового заряда

радиальных колебаний. Из велосигграмм можно было выделить амплитуды скорости колебаний практически для каждой ступени замедления. Однако, как видно из рис. 3 и 5, в этом случае получим большой разброс экспериментальных данных. Выше говорилось, что взрыв последующих за врубом ступеней замедления (шпуров) происходит в незажатой и частично раздробленной среде, про-

низанной трещинами от взрывов предыдущих ступеней. Это приводит к утечке продуктов детонации в раскрытые трещины грунта и, как следствие, к снижению сейсмического эффекта взрыва. Эффект снижения сейсмического действия взрыва особенно ярко виден на рис. 5 на примере цуга сейсмических колебаний от взрыва последних ступеней замедления. Только заряды вруба

Рис. 7. Зависимость максимальной радиальной скорости колебаний от приведенного гипоцентрального расстояния



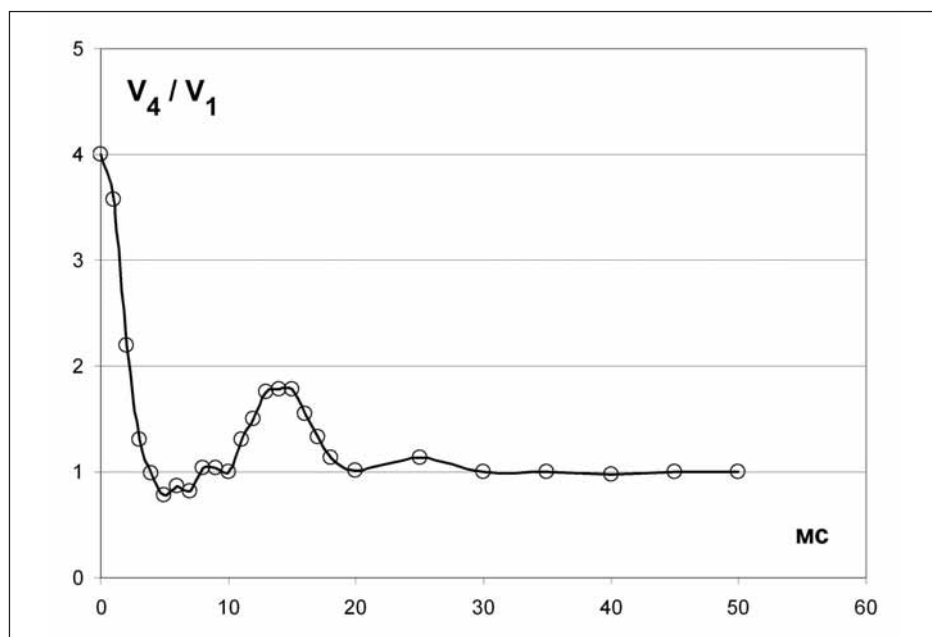


Рис. 8. Зависимость относительной скорости колебаний для взрыва четырех шпуров от интервала замедления

работают в одинаковых условиях ненарушенной среды и дают максимальный сейсмический эффект и минимальный разброс амплитуд. Поэтому на рис. 7 была построена зависимость максимальной радиальной скорости колебаний от приведенного расстояния только для взрыва врубных шпуров. Круглые значки относятся к регистрации волны на стенке горной выработки, треугольные – к регистрации на дневной поверхности, закрашенные значки относятся к взрывам с электродетонаторами, незакрашенные – к взрывам с электронной системой инициирования.

По методу наименьших квадратов по этим данным была получена усредненная зависимость вида (3), которая на рис. 7 изображена прямой линией:

$$V = 5 \cdot \left(\frac{q^{1/3}}{R} \right)^{1.7}, \quad (4)$$

где q – масса ВВ в одной ступени замедления, кг;

R – гипоцентрального расстояние, м,

V – максимальная радиальная скорость, м/с.

Как видно из рис. 7, сейсмический эффект (коэффициент сейсмичности) БВР не зависит от системы инициирования. Это естественный результат, так как сейсмический эффект определяется физико-механическими свойствами среды. При электронном инициировании сейсмозрывные нагрузки (амплитуда волны) получаются минимальными за счет «пошпурового взрывания», когда в ступени замедления масса ВВ минимальна и совпадает с массой заряда в одном шпуре, а время замедления при «пошпуровом взрывании» должно быть более продолжительности цуга колебаний от одного шпура.

Система электронного взрывания I-KON также наилучшим образом подходит для ре-

ализации короткозамедленного взрывания как скважинных, так и шпуровых массовых взрывов. Ниже приведен расчет оптимального замедления при взрыве шпуровых зарядов. Для этого использовали велосигramму на рис. 6, зарегистрированную от взрыва одного шпура. Затем по методу суперпозиции [7] были проведены расчеты синтетической радиальной велосигramмы от четырех шпуров, выполненные для интервалов замедления от 0 до 50 мс. На рис. 8 приведена полученная зависимость относительной скорости колебаний от интервала замедления, где V_4 – расчетная максимальная радиальная скорость колебаний от четырех шпуров, V_1 – экспериментальная радиальная максимальная скорость колебаний от одного шпура. Из этой зависимости видно, что оптимальное замедление составляет 5 мс и при нем амплитуда колебаний от четырех шпуров даже на 20 % меньше, чем от одного шпура. При замедлениях более 30 мс амплитуда колебаний от четырех шпуров такая же, как от одного шпура. Но, как ясно из этой работы, при замедлениях более 30 мс реализуется не «короткозамедленное взрывание», а «пошпуровое взрывание». Точно такие же результаты были получены при расчетах синтетической велосигramмы для большего количества шпуров (до 40), которые подтвердили, что оптимальное замедление составляет 5 мс. Естественно, что номенклатура выпускаемых электродетонаторов ЭД-3-Н (их минимальное замедление 20 мс) не позволяет осуществить короткозамедленное взрывание при шпуровых взрывах, но это вполне возможно при системе электронного взрывания I-KON, так как она позволяет выбирать замедления с любым интервалом от 1 мс. ООО «СМУ-5 Мосметрострой» по результатам этих исследований оформило Акт приемочных испытаний ЭСИ «I-KON». На основании документов, направленных в Ростехнадзор, ЗАО

«Орика СиАйЭс» получило разрешение Ростехнадзора на постоянное применение ЭСИ «I-KON» при взрыве шпуровых зарядов при БВР Мосметростроя.

Выводы

Выполнены исследования сейсмозрывных волн при БВР метрополитена с использованием электродетонаторов и электронной системы инициирования I-KON шпуровых зарядов. Показано, что в отличие от электродетонаторов система I-KON обеспечивает замедления инициирования зарядов с миллисекундной точностью, что позволяет исключить суперпозицию волн от различных ступеней взрыва.

Система электронного инициирования при БВР метростроя позволяет реализовать «пошпуровое взрывание», при котором сейсмическое действие БВР на горный массив и охраняемые объекты минимально.

Для оценки сейсмозрывных нагрузок получена зависимость (4) максимальной скорости радиальных колебаний от приведенного гипоцентрального расстояния.

Ключевые слова

Сейсмозрывные волны, акселерограммы, велосигramмы, короткозамедленное взрывание, электронное инициирование, пошпуровое взрывание.

Seismic waves, accelerograms, velocitygrams, short-delay firing, electronic initiation, single hole blasting.

Список литературы

1. Гришин А. Н., Полянкин Г. Н., Анощенко Д. А. Внедрение инновационных технологий БВР при строительстве подземных сооружений. // Метро и тоннели, 2013, № 2, с. 34–35.
2. Белин В. А., Горбонос М. Г., Мангуш С. К., Эквист Б. В. Новые технологии ведения взрывных работ. // ГИАБ, отдельный выпуск 1, 2015, с. 87–102.
3. Эквист Б. В., Гирич И. Б. Поражающие факторы взрывов с применением неэлектрической системы инициирования. // Взрывное дело, 2014, № 112/69, с. 243–250.
4. Технические правила ведения взрывных работ в энергетическом строительстве. // Изд. Институт Гидропроект, 1997 г., 232 с.
5. Методическое руководство по оценке сейсмического действия массовых взрывов на горные выработки. // Изд. НИИКМА, г. Губкин, 1984 г., 32 с.
6. Цейтлин Я. И., Смолий Н. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. // Изд. Недра, 1981 г., 192 с.
7. Адушкин А. В., Гончаров А. И., Куликов В. И. Оценка оптимальных параметров КЗВ на карьерах КМА. // Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли. Сб. научных трудов ИДГ РАН. 2003, книга 2, с. 213–216.

Для связи с автором

Куликов Владимир Иванович
kulikov@idg.chph.ras.ru



Компания **CONDAT**, имеющая 15-летний опыт в области тоннелестроения и работ, связанных с укреплением грунтов, всегда играла активную роль в разработке специализированных продуктов для этой отрасли. Компанией разработан полный спектр продукции, соответствующей различным типам грунтов и применяемого оборудования, а также отвечающей требованиям экологии и безопасности.

Продукция **CONDAT Stab** была разработана для решения задач укрепления грунта и водонепроницаемости при строительстве подземных сооружений и других видов подземных работ.

Компания **CONDAT** предлагает ускорители схватывания для растворов на силикатной основе, используемых для укрепления грунта путем нагнетания. Благодаря их высокой проникающей способности можно достичь максимального заполнения пустот и трещин в грунте, а следовательно, и максимальной водонепроницаемости. Нагнетание раствора в проницаемый грунт позволяет:

- повысить его механическую прочность;
- уменьшить проницаемость.

Области применения CONDAT Stab

Укрепление стен стартовых котлованов при запуске тоннелепроходческих комплексов



Ремонт существующих подземных коммуникаций в случае их повреждения



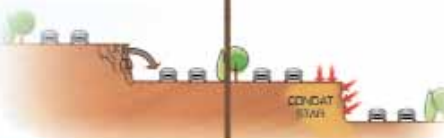
Ремонт и укрепление фундаментов



Водонепроницаемость и герметизация подземных сооружений



Укрепление насыпей



Работа тоннелепроходческого комплекса в предельно тяжелых условиях



Официальный представитель фирмы Condat Lubrifiants в России

ООО «ТА Инжиниринг Инт.»

107078, Москва, ул. Октябрьская, д. 80, стр. 3

тел.: (495) 724-7481

тел./факс: (495) 981-8071

реклама

К ИСТОРИИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МЕТРОВАГОНОСТРОЕНИЯ

В. А. Мнацаканов, генеральный директор ООО «ТОМАК, ЛТД», член-корр. Российской инженерной академии, к. т. н.

В статье рассматривается история развития отечественных модификаций вагонов для метрополитена. Дан анализ их конструктивных и тягово-энергетических показателей и сделан вывод о превосходстве метропоездов российских фирм над аналогами иностранных компаний.

В советский период работы Московского метрополитена (1935–1991 гг.) было разработано и запущено в серийное производство семь типов вагонов метро (А, Г, Д, Е, модели 81-717/714, 81-715/716 и 81-718/719) и несколько модификаций вагонов типа Е и мод. 81-717/714. Все они оснащались тяговыми приводами постоянного тока, поскольку в СССР был накоплен большой опыт применения коллекторных тяговых двигателей на пригородных электропоездах.

Габариты тоннеля определяют ширину и высоту вагонов метро. А их длина, как правило, составляет 19–20 м, поскольку должна быть кратна длине платформ. Поэтому габариты вагонов метро разных типов и их максимальная вместимость примерно одинаковы. А их показатели назначения (скорость сообщения, провозная способность, расход электроэнергии на тягу) являются производными от массы тары, мощности тягового электропривода и характеристик тяговых двигателей.

Вагоны типа А с тяговыми двигателями ДМП-151 были первыми вагонами Московского метрополитена. Кузов, тележки и элементы механического оборудования вагонов А разработал Мытищинский машиностроительный завод (ММЗ), а тяговое электрооборудование – завод «Динамо» (г. Моск-

ва). Двигатели ДМП-151 имели большую мощность (151 кВт), поскольку в метropоездах из четырех вагонов типа А половина были моторными массой 51,7 т, а половина безмоторными, прицепными массой 36,3 т (средняя масса тары вагона 44 т). Масса тягового электрооборудования моторного вагона типа А составляла около 15 т. Из них 9 т – масса тяговых двигателей, а 6 т – масса регулирующей аппаратуры.

Вагоны типа Г имели среднюю массу тары 43,7 т (почти как у вагонов А) и выпускались на ММЗ с 1939 по 1955 г. Они были очень надёжными в эксплуатации. Их коллекторные тяговые двигатели ДК-102Г массой около 1,5 т имели большие запасы по реактивной эдс и потенциальным условиям на коллекторе. Даже в самых напряжённых режимах работы (при максимальной скорости движения) коммутация на коллекторах была «тёмной», они практически не искрили. Начиная с вагонов типа Г все вагоны метрополитена, выпущенные в СССР, были моторными (табл. 1).

При разработке вагонов типа Д (выпуск с 1955 г.) была поставлена задача – максимально сократить массу тары. По сравнению с вагонами типа Г она была сокращена на 7,5 т (17 %) и составила 36,2 т. А масса тягового дви-

гателя типа ДК-104Д уменьшилась на 790 кг (50 %) по сравнению с массой тягового двигателя вагона типа Г.

При разработке вагонов типа Е (выпуск с 1963 г.) массу тары удалось сократить еще на 3,7 т (10 %). Она составила около 32,5 т. Вагоны Е (модель 81-710) поставлялись не только на внутренний рынок. В 1973 г. их (под маркой Е_{чс}) стали готовить к поставке на строящийся с участием советских специалистов Пражский метрополитен, который поставил условие – модернизировать тяговое электрооборудование: применить силовую электронику и обеспечить возможность автоматического электрического торможения вагонов Е_{чс} с максимальной скорости 90 км/ч (на серийных вагонах Е автоматический тормоз применялся со скоростей менее 60 км/ч, а в диапазоне скоростей 90–60 км/ч машинист управлял электрическим тормозом вручную).

Для решения этой сложной задачи необходимо было внедрить на вагоны автоматические регуляторы токов возбуждения тяговых двигателей. Эту работу поставщик тягового привода (завод «Динамо») поручил научной группе института МИИТ под руководством доцента, к. т. н. А. И. Хоменко. Ею были разработаны тиристорно-импульсные регу-

Таблица 1

Тип (модель) вагона	Год выпуска	Средняя масса тары, т	Тип тяговой машины	Номинальная мощность, кВт	Масса тягового двигателя, кг	Удельная пусковая мощность, кВт/т	Удельный расход электроэнергии на тягу*, Втч/ткм
А, мот/безм.	1935	51,7/36,3	ДМП-151	151	2340	7,2	78**
Г	1946	43,7	ДК-102Г	83	1490	9,3	72**
Д	1955	36,2	ДК-104Д	73	700	8,9	73**
Е, Е _{чс} (81-710)	1963, 1973	32,5	ДК-108А, ДК-116А	68, 72	630	8,8	62***
Е _и , Е _{ир} (81-710)	1972, 1975	32,5	ДК-108А	68	630	8,8	61**** без рекуп.
81-717, 81-540	1977, 1997	33,8	ДК-117А	110	740	9,9	68
81-717М/714М	1979	33,8	ДК-117А	110	740	9,9	66
Е _{нв} (81-710)	1980	32,5	ДК-108А	68	630	8,8	–
И 81-715/716	1982	31	ДК-117А	90	740	8,7	73 без рекуп.
81-718/719	1983, 1991	33,8	ДК-117А	110	740	10	67 без рекуп.

*На перегоне 1700 м при скорости сообщения 48 км/ч и стоянке 25 с /1/

**Экспертная оценка

***На 1500 м при скорости сообщения 42,3 км/ч и стоянке 25 с

****На 1500 м при скорости сообщения 45 км/ч и стоянке 25 с

ляторы токов возбуждения РТ-300/300А массой 130 кг на отечественных тиристорах. Это позволило автоматизировать процесс электрического торможения вагонов, сократить тормозные пути, повысить безопасность движения.

Была сделана попытка применить регуляторы РТ-300/300А в режимах тяги. Но она потерпела неудачу: во время работы регуляторов с частотой 100 Гц возникали режимы «деления частоты» и в рельсовых цепях появлялись гармонические составляющие тягового тока с частотами 50–300 Гц. Они оказывали мешающее влияние на работу систем безопасности АРС-АЛС, работающих на частотах 75–275 Гц. Поэтому от работы РТ-300/300А в режимах тяги пришлось отказаться. Так на экспортных вагонах $E_{\text{эк}}$ (и на вагонах $E_{\text{жз}}$ для внутреннего рынка) появились две системы регулирования токов возбуждения: одна – реостатно-контактная (работала в режимах тяги), а другая – тиристорно-импульсная (работала в режимах электрического торможения). Это было неэкономичным решением.

В это же время (1967–1975 гг.) другая научная группа института МИИТ, под руководством д. т. н., проф. В. С. Хвостова, по договору с Московским метрополитеном разрабатывала другие модификации вагонов типа Е (для их последующей модернизации в электродепо). Было переоборудовано, испытано и запущено в опытную эксплуатацию с пассажирами два опытных состава: из вагонов типа $E_{\text{н}}$ и вагонов типа $E_{\text{нр}}$.

На метropоезде из вагонов $E_{\text{н}}$ тиристорно-импульсные системы управления (ТИСУ) обеспечивали в режимах тяги импульсный безреостатный пуск и импульсное регулирование токов возбуждения тяговых двигателей, а в режимах электрического торможения – импульсное регулирование токов возбуждения и тормозных реостатов. Рекуперация электроэнергии при электрическом торможении не предусматривалась.

Силовая электрическая схема вагонов $E_{\text{н}}$ была более экономичной, чем у вагонов Е и $E_{\text{жз}}$. За счёт безреостатного пуска тяговых двигателей она сэкономила до 5 % от расхода электроэнергии на тягу по сравнению с вагонами Е и $E_{\text{жз}}$.

Еще более экономичной оказалась силовая схема, примененная на вагонах $E_{\text{нр}}$. В ней наряду с безреостатным пуском было применено рекуперативно-реостатное торможение тяговых двигателей с отдачей электрической энергии торможения в контактную сеть. Тяговые двигатели на время торможения становились генераторами и превращали механическую энергию тормозящихся вагонов в электроэнергию. С учётом рекуперации экономия электроэнергии на тягу вагонов $E_{\text{нр}}$ в опытной эксплуатации с пассажирами составила 17,3 % по сравнению с вагонами Е и $E_{\text{жз}}$ [1]. Это стало большим успехом нового вида электрического торможения – рекуперативного. Стало известно, какой может быть экономия электроэнергии,

если оборудовать тяговые подстанции метрополитена устройствами приёма рекуперированной энергии. Следует отметить, что ТИСУ на вагонах $E_{\text{н}}$ и $E_{\text{нр}}$ были выполнены на отечественных диодах и тиристорах. Это тоже было большим достижением.

В процессе разработки и испытаний метropоездов из вагонов $E_{\text{н}}$ и $E_{\text{нр}}$ с ТИСУ стало ясно, что тяговые двигатели на этих вагонах должны быть другими по мощности и по тяговым характеристикам, чем на серийных вагонах (Е и 81-717/714) с реостатным регулированием тяги. Поэтому в МИИТе под руководством д. т. н., проф. В. С. Хвостова в 1973 г. началась подготовка кандидатской диссертации по выбору мощности тягового двигателя для вагонов метрополитена с ТИСУ [2]. В ней был сделан вывод, что для таких вагонов требуется резкое (в 2 раза) повышение номинальной и пусковой мощности тягового двигателя (до 160 и 190 кВт соответственно). Было установлено, что коллекторные тяговые двигатели для ТИСУ тяги должны проектироваться как форсажные тяговые двигатели с «высоколежащими» характеристиками. Это позволит в тех же габаритах повысить пусковую мощность коллекторного тягового двигателя, снять ограничения по коллектору (по потенциальным условиям и реактивной эдс) и добиться практически такой же надёжности его работы и такой же регулируемости, как у асинхронного тягового двигателя [1, 2]. С проведёнными в диссертации тяговыми, энергетическими и технико-экономическими расчётами был ознакомлен главный конструктор завода «Динамо» к. т. н. А. А. Рабинович.

На новых вагонах метро модели 81-717/714 (выпуск с 1977 г.) номинальная мощность тяговых двигателей типа ДК-117А была повышена до 110 кВт, т. е. в 1,5 раза по сравнению с двигателями ДК-116А (72 кВт) серийных вагонов $E_{\text{жз}}$, а пусковая мощность – на 30 %, со 100 до 130 кВт. Столь значительный рост мощности, потребляемой тяговыми двигателями из контактной сети, потребовал принципиально нового подхода к их проектированию: учитывать ограниченность мощности тяговой сети и необходимость эффективно и бережно использовать её в эксплуатации [1, 2].

В 1977 г. были проведены тягово-энергетические испытания вагонов мод. 81-717/714 с максимальной нагрузкой. На них, как и на $E_{\text{жз}}$, были установлены регуляторы РТ-300/300А. На перегоне 1700 м была достигнута скорость сообщения 48 км/ч (средняя скорость с учётом времени стоянки на станции 25 с). Удельный расход электроэнергии на тягу вагонов составил 68 Втч/ткм. Для того времени это был хороший результат. Вагоны мод. 81-717/714 оказались настолько надёжными в эксплуатации, что в 1980 г. их наряду с ММЗ начал выпускать и Ленинградский вагоностроительный завод «Вагонмаш».

В реальной эксплуатации скорость сообщения вагонов мод. 81-717/714 составляет 42–43 км/ч, а удельный расход электроэнер-

гии на тягу – 50 Втч/ткм. Среднесуточное заполнение вагона – около 50 пассажиров. Расход электроэнергии на перемещение одного вагона (т. е. 50 пассажиров) на расстояние 13 км (среднестатистическая дальность поездки пассажира Московского метро) составляет около 25 кВтч. Значит на перевозку одного пассажира Московского метро расходуется 0,5 кВтч электроэнергии (это 2,5 руб. в ценах 2015 г.). С учётом электроэнергии, затрачиваемой на спуск и подъём пассажира на эскалаторах, на вентиляцию, освещение станций и переходов, цифра расхода электроэнергии на перевозку одного пассажира увеличится примерно вдвое (до 1 кВтч).

В 1979 г. удалось решить проблему мешающего влияния импульсных регуляторов РТ-300/300А на системы АРС-АЛС, возникшую в 1973 г. на вагонах $E_{\text{жз}}$. Для этого были разработаны и испытаны на модернизированном вагоне мод. 81-717М (№ 9068) принципиально новые ступенчато-импульсные регуляторы токов возбуждения РТМ-350/350 [1]. Они были внедрены на юбилейных метropоездах из вагонов мод. 81-540.7/541.7, построенных в 2003 г. к 300-летию Санкт-Петербурга. Проведённые ОАО «ВНИИ вагоностроения» тягово-энергетические испытания юбилейного шестивагонного метropоезда, оснащённого регуляторами РТМ-350/350, показали, что удельный расход электроэнергии на тягу по сравнению с серийными вагонами мод. 81-717/714 сократился на 3 % (с 68 до 66 Втч/ткм). А испытания юбилейного метropоезда на мешающее влияние регуляторов РТМ-350/350 на работу систем АРС-АЛС подтвердили, что оно отсутствует.

В 1980 г. под руководством д. т. н., проф. В. Д. Тулупова на кафедре электрического транспорта МЭИ была проведена работа по установке на вагон типа Е системы независимого возбуждения тяговых двигателей. В модернизированном вагоне $E_{\text{нр}}$ обмотки возбуждения тяговых двигателей питались от отдельного статического преобразователя напряжения на тиристорах. Это позволило обеспечить электрическое рекуперативное торможение вагона $E_{\text{нр}}$ практически до полной остановки. Однако широкого применения на вагонах метро система независимого возбуждения тяговых двигателей не получила.

В соответствии с государственным планом развития метровагоностроения на ММЗ в 1974 г. были построены опытные вагоны метро типа И (модель 81-715/716) с кузовом из алюминиевых сплавов. Предполагалось, что это позволит увеличить срок службы и сократить расход электроэнергии на тягу облегчённых вагонов. Для вагонов типа И была разработана новая ТИСУ на тиристорах. К сожалению, тяговые двигатели на вагонах типа И были «старыми», спроектированными для реостатного пуска.

Первые тягово-энергетические испытания вагонов типа И, проведённые в 1983 г., показали, что они имеют такие же показатели разгона и торможения, как и у вагонов мод. 81-717/714. Иначе и быть не могло, поскольку

ку на вагонах И тиристорные регуляторы работали просто как пускатели «реостатных» тяговых двигателей ДК-117 и никаких новых качеств и преимуществ тяге вагонов они не давали. Поэтому разгон до 80 км/ч (при напряжении сети 850 В) на вагонах мод. 81-717/714 обеспечивался за 33,9 с, а на вагонах типа И – за 34,3 с. [1].

Реостатное торможение у вагонов мод. 81-717/714 и типа И тоже было одинаковым: тормозной путь с 60 км/ч – 127 м. Удельный расход электроэнергии на тягу вагонов типа И (при напряжении сети 750 В) составил 73 Втч/ткм, т. е. на 7,3 % больше, чем у мод. 81-717/714 (68 Втч/ткм). Это было результатом применения на вагонах И неудачной схемы импульсного регулирования токов возбуждения тяговых двигателей, которая на 10 % понижала напряжение на якорах тяговых двигателей.

С 1974 по 1987 г. проводилась доработка опытных вагонов типа И. Были изготовлены три их модификации. В 1987–1988 гг. провели тягово-энергетические испытания третьей модификации. Результаты испытаний показали, что и доработанные вагоны И никаких преимуществ по сравнению с вагонами мод. 81-717/714 не имеют. Вагоны мод. 81-717/714 и были запущены на ММЗ в серийное производство в 1977 г., чтобы прикрыть затянувшуюся почти на 15 лет разработку вагонов типа И. Такой долгий путь разработки сложных технических устройств был характерен для СССР. Предприятия не были заинтересованы в выпуске новой техники. Поэтому в СССР с 1935 по 1991 г. на разработку каждого нового типа вагона метро уходило в среднем от восьми до десяти лет. Это привело к техническому отставанию отечественных вагонов метро от мирового уровня.

Модернизацией вагонов метро занимались научные группы учебных институтов, в основном МИИТ и МЭИ. Их силы и возможности были ограничены. Работы велись практически «на общественных началах» и на энтузиазме. Было очевидно, что развитие в стране силовой электроники требует масштабного, государственного подхода к внедрению новой техники на подвижной состав метрополитена. Поэтому к решению проблем внедрения были подключены институт ВНИПТИ кранового и тягового оборудования, а также специально созданный в 1973 г. в институте ВНИИ вагоностроения отдел городского электрического транспорта. Их учёные и специалисты внесли заметный вклад в разработки новых вагонов метрополитена. В них впервые начал зарождаться системный научный подход к проектированию тяги вагонов метрополитена [1, 2].

Разработанный научной группой проф. В. С. Хвостова метropоезд из вагонов типа Е_н передали в эксплуатацию с пассажирами в 1973 г. В 1975 г. был передан в эксплуатацию с пассажирами и метropоезд из вагонов Е_{нр}. Он был настолько «доведён до ума», что Харьковский и Ташкентский метрополитены сделали ММЗ заказ на поставку вагонов

мод. 81-718/719. Их кузова, тележки и тяговые двигатели – те же, что и у вагонов мод. 81-717/714, а силовая электроника – на базе ТИСУ вагонов Е_{нр}. На Харьковский метрополитен было поставлено 25, а на Ташкентский 20 вагонов мод. 81-718/719.

В [1] проанализированы практически все выполненные по состоянию на 1985 г. разработки отечественных вагонов метро с силовой электроникой. Представлены и зарубежные вагоны метрополитенов Японии, США, ФРГ, Великобритании, Франции, Швеции и Финляндии с тяговыми двигателями постоянного тока и с асинхронными тяговыми двигателями, управляемыми инверторами.

В СССР в 1970–1985 гг. предпринимались попытки разработать асинхронные тяговые приводы для вагонов метрополитена на инверторах из силовой электроники отечественного производства (тиристорах и диодах). Однако они не обеспечили требуемую надёжность ввиду несовершенства силовой электроники. Поэтому внедрения асинхронного тягового привода на отечественных вагонах метро не состоялось до появления силовых IGBT транзисторов.

В 1988 г. было выпущено распоряжение № 1299р Совета Министров СССР «Об ускорении работ по созданию новых вагонов метро». Ими стали вагоны модели 81-720/721 («Яуза»). Поставщик тягового электрооборудования (завод «Динамо») принял решение установить на вагоны «Яуза» испытанный на вагонах типа И тяговый привод с ТИСУ. Оно оказалось неудачным. Следовало установить на вагоны «Яуза» хорошо себя зарекомендовавшую ТИСУ вагонов Е_{нр} и мод. 81-718/719. В результате ТИСУ коллекторными тяговыми двигателями, как новая технология управления тягой, исчезла с отечественных вагонов метрополитена. Следует сказать, что завод «Динамо» вёл свою техническую политику как бесконтрольный монополист. Это его и погубило: завод не вписался в складывавшуюся конкурентную среду, потерял заказы и обанкротился.

После длительных доработок (в 1991–1994 гг.) было начато производство, а в 1996 г. первый опытный 6-вагонный состав из вагонов «Яуза» был передан Московскому метрополитену для тягово-энергетических испытаний. Они были проведены институтом ВНИИЖТ МПС в 1997 г. Оказалось, что вагоны «Яуза» имеют такой же удельный расход электроэнергии на тягу, как у вагонов типа И – 73,3 Втч/ткм. Это на 7,8 % больше, чем у серийных реостатных вагонов мод. 81-717/714 выпуска 1977 г.

При изучении причин перерасхода электроэнергии на вагонах «Яуза» по сравнению с серийными вагонами мод. 81-717/714 выяснилось, что они те же, что и на вагонах типа И: система регулирования возбуждения понижала напряжение на тяговых двигателях по отношению к напряжению сети и этим снижала мощность тяги. Несмотря на неудачу с расходом электроэнергии на тягу, ожидалось, что бесконтактная ТИСУ вагонов

«Яуза», столь длительно разрабатывавшаяся, обеспечит им более высокую надёжность в эксплуатации по сравнению с вагонами мод. 81-717/714. Поэтому было принято решение выпустить опытную партию вагонов «Яуза».

В 1999 г. первый 7-вагонный метropоезд из вагонов «Яуза» был передан в опытную эксплуатацию с пассажирами. Всего было изготовлено и запущено в эксплуатацию на Московском метрополитене восемь 7-вагонных составов из вагонов «Яуза». Статистика эксплуатации показала, что надёжность работы вагонов «Яуза» в 2–3 раза ниже надёжности работы серийных вагонов мод. 81-717/714. Поэтому в 2003 г. руководством Московского метрополитена было принято решение больше не заказывать вагоны «Яуза» с ТИСУ. Так закончились продолжавшиеся более 25 лет разработки вагонов типа И и «Яуза» с ТИСУ, которые принесли стране огромный финансовый ущерб.

Следует отметить, что вагоны мод. 81-718/719 с ТИСУ эксплуатируются по сей день. Они признаны специалистами Харьковского метрополитена более надёжными и более энергоэффективными в эксплуатации по сравнению с вагонами мод. 81-717/714.

В 1998 г., практически сразу после получения неудовлетворительных результатов испытаний вагонов «Яуза», генеральным директором ЗАО «Метровагонмаш» (бывший ММЗ) Ю. А. Гулько было принято решение отказаться от услуг завода «Динамо» и установить на вагоны мод. 81-720А/721А асинхронный тяговый привод производства фирмы «Альстом» (Великобритания). Это было «дорогое удовольствие». Стоимость комплекта тягового электропривода для одного вагона составила 420 тыс. долл. США. В 1998 г. цена вагона «Яуза» была 870 тыс. долл., а комплект его тягового электропривода с ТИСУ стоил 150 тыс. долл. (17 % от стоимости вагона «Яуза»). И всё же, под давлением неудач с вагонами «Яуза», это решение было принято. Оно оказалось дальновидным. С него началась эра внедрения асинхронного тягового привода на вагоны метрополитена России. Фактически начался выход из того тупика, в котором к концу XX века оказалось отечественное метровагоностроение.

Вагоны мод. 81-720А/721А с тяговым приводом «Альстом» были первыми вагонами метро, построенными не в СССР, а в России. Их построили сравнительно быстро, менее чем за два года. Это было большим достижением ЗАО «Метровагонмаш», если учесть, что за столь короткий срок пришлось кардинально поменять развеску, установку электрооборудования и весь электромонтаж вагонов мод. 81-720/721, чтобы приспособить их к системе трёхфазного асинхронного тягового привода.

Сразу вслед за первым важным решением Ю. А. Гулько принял ещё одно: пригласил на ЗАО «Метровагонмаш» команду отечественных специалистов по асинхронному тяговому приводу. Им была поставлена задача – «русифицировать» комплект асинхронного

Таблица 2

Модель вагонов/поставщик тягового оборудования	Год выпуска	Средняя масса тары вагона, т	Тип асинхронного тягового двигателя	Номинальная мощность двигателя, кВт	Масса тягового двигателя, кг	Удельная пусковая мощность, кВт/т	Уд. расход электроэнергии на тягу*, Втч/ткм
81-720/721 з-д Динамо	1996	35	ДК-117 пост. тока	110	740 з-д Динамо	7,3	73,3
81-720А/721А Альстом	1999	35,5	4EFA 1832B	160	801 Альстом	9,2	60
81-720Х/721Х Хитачи	2000	35	EFO-K60	160	700 Хитачи	10,8	59
81-740/741 Альстом	2003	48,2	4EFA 1832B	160	801 Альстом	7,5	41**
81-720/721 Метровагонмаш	2003	35,2	ТАД 280 М4У2	170	800 з-д Динамо	10,8	59
81-553/554/555 Шкода (Казань)	2005	32,7	ML 3844 К/4	170	660 Шкода	10	62
81-760/761 Метровагонмаш (Ока)	2010	37	ДАТЭ-170-4У2	170	805 Лысьва	10	60
81-556/557/558 Шкода (НеВа)	2012	26,7	MLU 3839 К/4	167	577 Шкода	11,3	60
81-760А/761А/763А Метровагонмаш	2014	34,3	ДАТЭ-170-4У2	170	805 Лысьва	9	62***
81-760/761/763 Хитачи (Охта)	2015	33,4	EFO-K60	170	700 Хитачи	10,3	60***

*Перегон 1700 м, скорость сообщения 48 км/ч, стоянка 25 с, нагрузка 8 чел./м²

**Перегон 1700 м, скорость сообщения 42 км/ч, стоянка 25 с, нагрузка 6,6 чел./м²

***Экспертная оценка

Примечание: за 25 лет (1991–2015 гг.) в России разработано 10 новых типов вагонов.

тягового привода «Альстом». С этой задачей они полностью справились. И даже разработали свой, более совершенный вариант отечественного асинхронного тягового привода для вагонов метро. В результате на ЗАО «Метровагонмаш», впервые в России, была реализована возможность производить и механическое, и тяговое электрооборудование вагонов метро на территории одного предприятия, т. е. обеспечивать практически полный цикл производства (за исключением производства асинхронных тяговых двигателей). Это стало большим достижением отечественного метровагоностроения.

Тягово-энергетические испытания вагонов мод. 81-720А/721А, оснащённых асинхронными двигателями (АД) номинальной мощностью 160 кВт, управляемыми инверторами напряжения на IGBT транзисторах, показали, что при стандартной скорости сообщения 48 км/ч на стандартном перегоне 1700 м с 25-секундной остановкой удельный расход электроэнергии на тягу вагонов с максимальной нагрузкой 8 чел./м² (18,5 т) составил 60 Втч/ткм (табл. 2). Это на 12 % меньше, чем у вагонов мод. 81-717/714 и на 18% меньше, чем у «Яузы» с двигателями ДК-117А мощностью 110 кВт.

При тщательном изучении составляющих экономии электроэнергии на вагонах мод. 81-720А/721А выяснилось, что из 12 % экономии 4,5 % – это экономия не за счёт асинхронного тягового привода, а за счёт уменьшения сопротивления движению вагонов [3]. Сопротивление движению вагона с АД существенно уменьшилось по сравнению с серийным вагоном мод. 81-717/714 (и вагоном

«Яуза»), поскольку значительная часть его электрооборудования была размещена в одном большом контейнере (компоновочная схема). А на вагонах мод. 81-717/714 и «Яуза» электрооборудование размещено в десятках отдельных ящиков, подвешенных под вагоном. Они создают завихрения воздуха и повышают сопротивление движению вагонов. Этот эффект исчез при компоновочной схеме размещения электрооборудования.

Ввиду положительных результатов испытаний вагонов мод. 81-720А/721А было принято решение закупить 40 комплектов тягового привода с АД у фирмы «Альстом» для оснащения ими 40 вагонов мод. 81-740/741 («Русич») Бутовской линии Московского метрополитена. Их общая стоимость составила 14 млн евро. Особенность вагонов «Русич» состоит в том, что они сочленённые, имеют длину 26–28 м и массу тары 46–48 т. Из трех тележек каждого вагона одна не обмоторена. Поэтому мощности закупленных комплектов тягового привода с АД оказалось для них недостаточно. В результате ускорение при разгоне метropоезда «Русич» с 66 % обмоторенных осей составило 0,92 м/с², а замедление – 1 м/с² (вместо 1,3 м/с² на вагонах мод. 81-720А/721А со 100 % обмоторенных осей).

Для создания конкуренции при закупках асинхронного привода предложение о поставке комплекта электрооборудования с АД было направлено фирме «Хитачи» (Япония). Причём было поставлено условие, чтобы конструктивно и по техническим параметрам комплекты приводов с АД обеих фирм были взаимозаменяемыми. Это условие конструкторами ЗАО «Метровагонмаш» было

выполнено. Тягово-энергетические испытания вагонов мод. 81-720Х/721Х с тяговым приводом фирмы «Хитачи» показали, что их тяговые, тормозные и энергетические показатели практически совпали с показателями вагонов мод. 81-720А/721А с приводом фирмы «Альстом» (см. табл. 2). Корректировка алгоритмов тяги-торможения вагонов мод. 81-720А/721А и мод. 81-720Х/721Х выполнялась с участием автора.

Внедрение асинхронного тягового привода производства ЗАО «Метровагонмаш» состоялось на вагонах метро мод. 81-720/721 в 2003 г. Тягово-энергетические испытания этих вагонов с приводом ЗАО «Метровагонмаш» показали, что их тяговые и тормозные характеристики, а также результаты по расходу электроэнергии на тягу ни в чём не уступают результатам, полученным на вагонах с приводами фирм «Альстом» и «Хитачи».

В 2002 г. на ЗАО «Вагонмаш» (Санкт-Петербург), который стал главным конкурентом ЗАО «Метровагонмаш», начались работы по внедрению асинхронного тягового привода фирмы «Шкода» (Чехия) на вагоны метро мод. 81-553/554/555, предназначенные для поставки на строящийся метрополитен г. Казани (введён в эксплуатацию в 2005 г.). Особенностью этой разработки явилось то, что согласно техническим требованиям Казанского метрополитена четырёхвагонный метropоезд формировался в составе 2ГМ+П+М (два головных моторных, промежуточный безмоторный и промежуточный моторный вагоны). То есть 75 % осей состава были моторными, а 25 % – безмоторными. При этом ставилась задача – на метropоезде

Таблица 3

Показатель	Вагоны «НеВа» (7 вагонов) 5М+2П	Вагоны Хитачи (6 вагонов) 4М+2П	Преимущество «НеВы», %
Конструктивные показатели			
Длина состава, м	136	135	–
Масса тары метropоезда, т	190	230	17
Масса тары на 1 м длины, т/м	1,4	1,7	18
Средняя масса вагона, т	27,1	38,3	30
Вместимость поезда при 8 ч/м ² , пасс.	1860	1556	20*
Масса тары на 1-го пассажира, кг	102	148	31
Масса поезда при 8 ч/м ² , т	320	339	5,6
Моторных осей в поезде, %	71,4	66,7	7
Удельная пусковая мощность, кВт/т	11,8	8,9	32
Длина вагона по торцевым стенкам, м	19,25	22	–
Ширина вагона, м	2,67	3,15	–
Высота вагона, м	3,655	3,865	–
Ширина колеи, м	1,524	1,435	–
Тягово-энергетические показатели			
Максимальное ускорение, м/с ²	1,35	0,92	46
Максимальное замедление, м/с ²	1,4	0,97	44
Скорость сообщения, км/ч	48 (на 1700 м)	44,5 (на 1700 м)	8**
Уд. расход электроэнергии на тягу, Втч/ткм	58	не более 62	6,5***

*Провозная способность линии с вагонами «НеВа» на 20 % больше, чем с Хитачи

**Скорость сообщения на линии с вагонами «НеВа» на 8 % выше

***Вагоны «НеВа» на 6,5 % энергоэффективнее, чем вагоны Хитачи

с безмоторным вагоном обеспечить тягово-энергетические показатели, не уступающие показателям полномоторных метropоездов производства ЗАО «Метровагонмаш».

Проектные тяговые и тормозные расчёты, выполненные ООО «ТОМАК, ЛТД», показали, что этого можно добиться, если применить новые алгоритмы тяги-торможения, увеличить реализуемый моторными вагонами коэффициент тяги и перевести их частично в «электровозный» режим, когда каждый моторный вагон тянет не только себя, но и часть максимально загруженного безмоторного вагона. Теоретически это удалось. Но на практике полностью внедрить новые алгоритмы тяги на вагонах мод. 81-553/554/555 не получилось.

Следующим «ходом» ОАО «Метровагонмаш» стало внедрение в 2010 г. «своего» асинхронного тягового привода на вагоны мод. 81-760/761. Оно тоже было успешным. Однако за счёт установки на вагоны мод. 81-760/761 кондиционеров салона масса каждого вагона возросла примерно на 1,5 т, а средняя масса тары вагона составила около 37 т.

При массе тары вагона метро 25 т и его среднесуточном заполнении 50 чел./вагон (как на Московском и Петербургском метрополитенах) каждый пассажир платит за свою перевозку и перевозку 500 кг конструкции вагона. При массе тары вагона 30 т пассажир платит за себя, за 500 кг конструкции

вагона и за «багаж», составляющий 100 кг (5 т/50 чел.). При массе тары 35 т «багаж» пассажира составляет уже 200 кг (10 т/50 чел.), что очень много. Поэтому масса тары вагона экономически очень важна.

В 2012 г. ООО «Вагонмаш» построило инновационный метropоезд мод. 81-556/557/558 («НеВа») с асинхронным тяговым приводом фирмы «Шкода», который имеет среднюю массу тары вагона 26,7 т [4]. У метropоезда «НеВа» 66 % моторных осей (составность 4М+2П): из шести вагонов четыре – моторные, и два – безмоторные. За счёт безмоторных вагонов масса метropоезда «НеВа» снижена на 10 т. Проектные тягово-энергетические расчёты, выполненные ООО «ТОМАК, ЛТД», показали, что и в этой облегчённой составности (с 66 % моторных осей как у «Русича») метropоезд «НеВа» может добиться таких же тягово-энергетических показателей, как у метropоездов мод. 81-760/761 из полномоторных вагонов (ускорение и замедление – 1,3 м/с², удельный расход электроэнергии на тягу – 60 Втч/ткм).

При наладке тягового электрооборудования, при подготовке и проведении тягово-энергетических испытаний метropоезда «НеВа» специалисты ООО «ТОМАК, ЛТД» обеспечивали их авторский надзор и научно-техническое сопровождение. Поэтому результаты испытаний «НеВы» полностью совпали с проектными тяговыми расчётами [4].

Конкурентная среда, возникшая в метро-вагоностроении России, сыграла большую положительную роль. В ответ на метropоезд «НеВа» ОАО «Метровагонмаш» разработало облегчённый метropоезд из вагонов мод. 81-760А/761А/763А с промежуточными безмоторными вагонами, с кондиционированием пассажирского салона и со сквозным проходом. По информации, размещённой на сайте ЗАО «Трансмашхолдинг», средняя масса тары вагона метropоезда (в составности 4М + 2П) составит 34,3 т, а его максимальное ускорение при разгоне, ввиду наличия безмоторных вагонов – 1 м/с².

На метropоездах из вагонов мод. 81-760/761/763 («Охта»), которые планируется поставить Петербургскому метрополитену, готовится дальнейшее сокращение средней массы тары вагона. По предварительным расчётам она составит около 33 т. Такому заметному сокращению массы тары вагона будет способствовать не только облегчённая составность (4М+2П). Асинхронный привод для моторных вагонов «Охта» будет поставлен фирмой «Хитачи» (Япония), которая планирует сократить массу тягового привода и при этом обеспечить ускорение метropоезда облегчённой составности на высоком уровне.

Фирма «Хитачи» является одним из ведущих мировых производителей вагонов метро. Она готовит поставку вагонов для строящегося метрополитена г. Хошимин (Вьетнам), который планируется ввести в эксплуатацию

в 2017 г. В табл. 3 представлены сравнительные показатели инновационного метropоезда «HeBa» и метropоезда, готовящегося для поставки на метрополитен г. Хошимина.

Сегодня ускорения и замедления метropоездов приблизились к максимальному уровню, ограниченному условиями комфорта и сцеплением колеса с рельсом. Рельсовая технология на «традиционном метрополитене» реализует свои предельные возможности по провозной способности и скорости перевозки пассажира на 90 % [5]. Встаёт естественный вопрос – по какому пути пойдёт дальнейшее развитие этой, насчитывающей уже более 150 лет, транспортной технологии.

Могут быть созданы метropоезда на магнитной «подушке» и проблема сцепления колеса с рельсом будет решена. Это может стать реальностью в ближайшие 10–15 лет. Может быть полностью автоматизирован процесс управления метropоездами (безлюдная технология). Это тоже реально в ближайшей перспективе [6]. Перечисленные мероприятия требуют очень больших капиталовложений. Но даже они способны увеличить скорость поездки на метро (из расчёта «от двери до двери») с сегодняшних 20–22 лишь до 25 км/ч. А в XXI веке, чтобы транспортная технология «традиционный метрополитен» могла «выжить», нужно увеличить скорость поездки на метро как минимум вдвое, до 50 км/ч.

Принципиальная невозможность в будущем существенно повысить скорость передвижения по городу на строящихся сегодня линиях метро – это глобальная проблема для строителей метрополитена во всём мире. Её надо решать, и решать сегодня. Но об этом пока не задумываются. И продолжают экстенсивно развивать подошедшую к своему пределу транспортную технологию. Она сама активно этому сопротивляется: создаёт «пробки» в тоннелях и на станциях, с каждым новым километром снижает безопасность перевозок и т. п. Поэтому уже сегодня нужно думать о будущем – о возможности модернизировать строящиеся сегодня линии и закладывать её в проекты.

«Проблема (невозможности существенно повысить скорость поездки по городу на метро) не может быть решена на том же уровне, на котором она возникла. Нужно стать выше этой проблемы, поднявшись на следующий уровень», – так учил нас А. Эйнштейн.

В нашем случае «подняться на следующий уровень» – значит перейти на новый технологический уровень. Например, заменить технологию «традиционный метрополитен» (ТМ) технологией «скоростной мобильный метрополитен» (СММ) [7].

В строительстве СММ вдвое дешевле, чем ТМ, вдвое сокращает сроки строительства и в 1,5 раза снижает эксплуатационные затраты. А значит, он может быть самоокупаемым и строиться на кредитные средства. Кроме того, СММ делает тоннели активным элементом транспортной системы и позволяет пользоваться метрополитеном даже инвалиду-колясочнику (рис. 1).



Рис. 1

Основное отличие СММ от ТМ в том, что платформы его наземной станции расположены на одном уровне с окружающим её пешеходным тротуаром. Во время остановки метropоезда пол вагонов позиционируется на уровень пешеходного тротуара. Поэтому ступеньки и эскалаторы пассажиру не нужны.

Безопасность и эффективность транспортной технологии СММ проверены во время испытаний инновационного метropоезда «HeBa» [4] с составлением протоколов проверки. Доказано, что новый принцип движения метropоезда СММ безопасен и удобен для пассажиров, вызывает в разы меньшую транспортную усталость от поездки и экономит около 50 % расхода электроэнергии на тягу.

Выводы

- К 80-летию Московского метрополитена отечественное метровагостроение подошло более чем достойно:

- на внутреннем рынке идёт жёсткая конкуренция за заказы на поставку вагонов метро;

- отечественные метropоезда превосходят метropоезда иностранных компаний и конкурентоспособны на мировом рынке;

- отечественные метropоезда приблизились к максимально реализуемым показателям по провозной способности и скорости сообщения, но почти не увеличили скорость поездки на метро из расчёта «от двери до двери».

- Скорость поездки «от двери до двери» можно увеличить на 100 %, если заменить строительную технологию «традиционный метрополитен» на технологию «скоростной мобильный метрополитен». При этом:

- сроки проектирования и строительства уменьшатся вдвое;

- стоимость строительства 1 км линии уменьшится вдвое;

- затраты электроэнергии на поездку уменьшатся вдвое;



- транспортная усталость от поездки уменьшится вдвое, а удобство поездки многократно возрастёт.

- При проектировании новых линий ТМ сегодня следует закладывать в проект необходимость и способ их модернизации в будущем.

Ключевые слова

Метropоезд, удельная пусковая мощность, тягово-энергетические испытания.

Список литературы

1. Гаврилов Я. И., Мнацаканов В. А. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. М., Транспорт, 1986, 230 с.
2. Мнацаканов В. А. Исследование тяговых параметров и регулировочных характеристик системы тягового привода вагонов метрополитена. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 1979.
3. Мнацаканов В. А. Сопротивление движению вагонов метрополитена и расход электроэнергии на тягу. // Метро, 2000, № 5–6.
4. Мнацаканов В. А. Инновационный метropоезд «HeBa». Тягово-энергетические испытания. // Метро и тоннели, 2014, № 1.
5. Мнацаканов В. А. Предельные возможности метрополитена как транспортной системы. // «Метро и тоннели», 2002, № 3.
6. Гольянский А. П. О повышении пропускной способности и привлекательности метрополитена. // «Транспорт Российской Федерации», 2013, № 4.
7. Мнацаканов В. А. Как построить метрополитен в крупном городе России. // Метро и тоннели, 2010, № 1.

Для связи с автором

Мнацаканов Валерий Александрович
kamotltd@gmail.com



ПЕРВОЙ В РОССИИ КАФЕДРЕ ТОННЕЛЕЙ И МЕТРОПОЛИТЕНОВ – 85 ЛЕТ

А. П. Ледяев, зав. кафедрой тоннелей и метрополитенов ПГУПС, д-р техн. наук, профессор

Д. М. Голицынский, д-р техн. наук, профессор

Ю. С. Фролов, д-р техн. наук, профессор, Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС)

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.

Решение об образовании такой кафедры именно в ЛИИПСе было обосновано тем, что институт являлся старейшим транспортным вузом страны, в котором создавалась и развивалась система русского инженерно-строительного высшего образования и зародились основы транспортной науки.



Александр Николаевич Пассек
(1886–1951)

Первым заведующим кафедры тоннелей был назначен известный строитель и крупный ученый Александр Николаевич Пассек.

Профессор, д-р техн. наук А. Н. Пассек – автор многочисленных научных печатных трудов и первых учебников, на которых воспитаны сотни инженеров-тоннельщиков и метростроевцев. Кроме педагогической деятельности с 1932 по 1939 г. он являлся главным консультантом и экспертом по тоннелям на строительстве трех очередей Московского метрополитена, решая сложные вопросы, связанные с тоннельными работами. Александр Николаевич принимал активное участие и при проектировании линий Ленинградского метро.

С первых лет организации кафедры тоннелей была установлена тесная связь с ведущими проектными (Ленметропроект), строительными (Ленметрострой) и эксплуатационными (Метрополитен) организациями и сформирован основной состав кафедры из наиболее талантливых специалистов, таких как Ю. А. Лиманов, О. Е. Бугаева – одна из

первых женщин-инженеров, А. А. Богородецких, которые способствовали созданию школы отечественного тоннелестроения.

В 1951 г. в связи с кончиной профессора А. Н. Пассека исполняющим обязанности заведующего кафедрой тоннелей назначается Ю. А. Лиманов, который продолжал развивать идеи отечественной школы тоннелестроения. Являясь учеником проф. А. Н. Пассека, Ю. А. Лиманов занимался проектированием, строительством и эксплуатацией тоннелей, рассматривая эти вопросы в едином комплексе, удачно сочетая теорию и практику.



Юрий Андреевич Лиманов
(1903–1996)

Разработанная Ю. А. Лимановым методика прогнозирования осадок земной поверхности при строительстве тоннелей лежит в основе современных нормативных документов и позволила успешно решать вопросы, связанные с проходкой тоннелей метро в сложных инженерно-геологических условиях.

В 1967 г. было принято решение о разделении кафедры мостов и тоннелей на две, и Ю. А. Лиманов становится во главе новой кафедры тоннелей и метрополитенов.

Будучи деканом факультета мостов и тоннелей с 1958 по 1965 г. и заведующим кафедрой тоннелей и метрополитенов с 1967 по 1980 г., Ю. А. Лиманов основной целью преподавания считал развитие у студентов и аспирантов творческого начала.

Наряду с научной и педагогической деятельностью профессор Ю. А. Лиманов вел большую общественную работу, являясь членом научно-технического совета Минтрансстроя, членом Государственной комиссии по приемке и эксплуатации транспортных сооружений, членом экспертного совета ВАК СССР. В 1980 г. Юрий Андреевич уходит на пенсию, оставаясь профессором-консультантом и членом ученого совета института.

С 1980 по 2001 г. заведующим кафедрой становится заслуженный строитель Российской Федерации, д-р техн. наук, профессор Д. М. Голицынский, который успешно продолжает научно-педагогическую работу, начатую профессором Ю. А. Лимановым.

Основное направление научной школы кафедры – экспериментально-теоретические исследования работы конструкций транспортных тоннелей и подземных сооружений метрополитена с разработкой новых конструктивно-технологических решений, обеспечивающих эксплуатационную надежность сооружений в процессе их длительной эксплуатации. В настоящее время это направление реализуется учениками профессора Ю. А. Лиманова – д. т. н., проф. Д. М. Голицынский, д. т. н., проф. А. П. Ледяевым и д. т. н., проф. Ю. С. Фроловым. Научная школа развивается по трем основным направлениям.

Первое направление – разработка концепции совершенствования городских транспортных связей на основе двухуровневой транспортной сети путем строительства автотранспортных тоннелей, которое осуществляется под руководством заслуженного работника высшей школы Российской Федерации, д. т. н., проф. А. П. Ледяева и развивается его учениками. Для выполнения работ в этом направлении при кафедре создана научно-аналитическая группа (канд. техн. наук А. Н. Коньков), в которой в последнее время выполняли исследования напряженно-деформированного состояния крепи при сооружении подземной части здания второй сцены Мариинского театра и окружающей застройки.

Второе направление – обоснование возможности и целесообразности применения эффективных набрызг-бетонных тоннельных обделок и технологии их использования в слабых породах, которое разрабатывается под



Сотрудники кафедры тоннелей и метрополитенов ПГУПС



**Дмитрий Михайлович
Голицынский**

руководством заслуженного строителя РФ, д. т. н., проф. Д. М. Голицынского на объектах Санкт-Петербургского метрополитена и строительстве станций метро в Алматы [1].

Третье направление – экспериментально-теоретические исследования работы конструкций транспортных тоннелей и подземных сооружений метрополитена с оценкой их эксплуатационной надежности, которое разрабатывается сотрудниками кафедры под руководством заслуженного строителя РФ, д. т. н., проф. Ю. С. Фролова. Это направление успешно реализовалось при строительстве тоннелей на транспортной магистрали Адлер – Красная Поляна и на обходе г. Сочи [2].

Кафедра принимала активное участие при строительстве тоннелей БАМа с участием студенческих строительных отрядов, которыми руководил аспирант А. П. Ледяев, а также в 1995 г. при ликвидации аварии на участке Санкт-Петербургского метро от станции «Лесная» до станции «Площадь Мужества», когда пришлось затопить этот участок перегонных тоннелей и запроектировать новую линию. Сотрудниками кафедры под руководством канд. техн. наук А. Н. Конькова в настоящее время

проводятся работы по обследованию первых станций Петербургского метрополитена («Автовое», «Пионерская», «Удельная», «Спортивная», «Площадь Мужества» и др.). Большой объем работ был выполнен в 2007–2008 гг. по обследованию и оценке технического состояния восьми железнодорожных тоннелей в Сирии и разработаны рекомендации их капитального ремонта и реконструкции (канд. техн. наук, доцент В. Н. Кавказский).



**Александр Петрович
Ледяев**

В настоящее время кафедра тоннелей и метрополитенов, которой руководит заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, д-р техн. наук, проф. А. П. Ледяев, является одним из ведущих научных центров в области исследований, проектирования и строительства подземных сооружений в стране.

За время своей деятельности кафедра выпустила большой отряд высококвалифицированных инженеров-тоннелильщиков, работающих во многих городах нашей страны и способных на современном уровне ставить и решать сложные технические вопросы.

Инженерный состав основных строительных (ОАО «Метрострой») и проектных органи-

заций (ОАО «Ленметрогипротранс») на 50–60 % укомплектован выпускниками кафедры.

Питомцами нашей кафедры, работающими в настоящее время, являются генеральный директор ОАО «Метрострой», почетный гражданин Санкт-Петербурга Вадим Николаевич Александров (1963), главный инженер ОАО «Метрострой» Алексей Юрьевич Старков (1994), советник Ленметрогипротранса, д-р техн. наук Николай Иванович Кулагин (1960), зам. генерального директора по науке ЛМГТ, д-р техн. наук Константин Петрович Безродный (1967), зам. начальника Петербургского метрополитена, канд. техн. наук Евгений Германович Козин (1981) и многие другие.

В настоящее время на кафедре работают три профессора д-ра техн. наук, четыре доцента канд. техн. наук, один научный сотрудник канд. техн. наук, один зав. лабораторией канд. техн. наук, два ассистента, а также инженеры и лаборанты.

Кафедра в настоящее время признана ведущей в стране, активно участвуя в работе Тоннельной ассоциации России, являясь ее коллективным членом.

Список литературы

1. Голицынский Д. М. Ещё раз о применении набрызг-бетона и Новоавстрийского метода (НАТМ) в отечественном тоннелестроении // *Метро и тоннели*. – 2011. – № 3. – С. 20–22.
2. Фролов Ю. С. и др. Опыт проходки автофрансузских тоннелей при пересечении с действующим железнодорожным тоннелем на трассе дублёра Курортного проспекта в г. Сочи // *Метро и тоннели*. – 2014. – № 1. – С. 6–10.

Для связи с авторами

Ледяев Александр Петрович
pgupstm@yandex.ru
Голицынский Дмитрий Михайлович
pgupstm@yandex.ru
Фролов Юрий Степанович
fus.frolov@yandex.ru

