

Журнал  
Тоннельной ассоциации России

## Председатель редакционной коллегии

С. Г. Елгаев, доктор техн. наук

## Зам. председателя редакционной коллегии

В. М. Абрамсон, канд. экон. 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. экон. наук  
Н. Н. Бычков, доктор техн. наук  
С. А. Жуков  
А. М. Земельман  
Б. А. Картозия, доктор техн. наук  
Е. Н. Курбацкий, 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. Шелпихо, доктор техн. наук  
Е. В. Щекудов, канд. техн. наук  
Ш. К. Эфендиев, председатель  
ТА Азербайджана

## 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

Журнал зарегистрирован  
Минпечати РФ ПИ № 77-5707

Перепечатка текста и фотоматериалов  
журнала только с письменного  
разрешения издательства  
© ООО «Метро и тоннели», 2016

## № 2 2016

### В Тоннельной ассоциации России

Освоение подземного пространства городов: преодоление  
сложных геологических и градостроительных условий **2**

### Щитовая проходка

Оснащение щита для минимизации осадки  
земной поверхности грунтопригрузом  
тоннелепроходческого механизированного комплекса **4**  
Б. И. Федунец, С. В. Мазеин

### Семинар

Современные технологии, материалы и оборудование  
для изготовления высококачественной блочной  
обделки транспортных тоннелей **7**

### Обобщая опыт

Реконструкция транспортных тоннелей  
с применением опережающих крепей **8**  
Л. В. Маковский

### Зарубежный опыт

Городские подземные сооружения в карсте **11**  
С. В. Мазеин

### Новые технологии

Стволопроходческие комплексы: практика применения  
для проходки вертикальных стволов  
Московского метрополитена за последние 10 лет **12**  
М. А. Потапов, Е. В. Потапова

### Тоннельная обделка

Сборная водонепроницаемая обделка  
из высокоточных блоков для двухпутных тоннелей  
Московского метрополитена **18**  
И. Н. Хохлов, Ю. Е. Соломатин

### В порядке обсуждения

Состояние нормативной документации  
по расчёту транспортных сооружений  
на сейсмические воздействия **24**  
Е. Н. Курбацкий, Е. А. Пестрякова

### Проектные решения

Современное решение для вестибюлей  
станций глубокого заложения **32**  
М. С. Панкратов, И. А. Бородин

### Юбилеры отрасли

«МИИТовская» глава в истории  
Московского метрополитена **35**  
Б. А. Лёвин

# СОДЕРЖАНИЕ



## ФОТО НА ОБЛОЖКЕ

Московский  
государственный  
университет путей  
сообщения  
(МИИТ)  
(с. 35)

# ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА ГОРОДОВ: ПРЕОДОЛЕНИЕ СЛОЖНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

**29** марта 2016 г. в Москве состоялся круглый стол на тему «Освоение подземного пространства городов: преодоление сложных геологических и градостроительных условий».

Организаторами мероприятия выступили Тоннельная ассоциация России и ОАО «Мосметрострой».

В работе круглого стола приняли участие ведущие специалисты научно-исследовательских, учебных, проектных, строительных организаций, работающих в области подземного строительства.

В числе участников: Московский государственный университет путей сообщения, Московский государственный строительный

университет, АО «Мосинжпроект», ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», НПКЦ «Интерсигнал», Комитет по освоению подземного пространства НОПРИЗ и др.

В ходе проведенного круглого стола специалисты ознакомились не только с новой современной информацией о передовых методах проектирования и строительства тоннелей и подземных сооружений, но и получили возможность наладить деловые контакты, подискутировать по сложным проблемам, возникающим в процессе разработки проектной документации и строительстве подземных объектов. Было заслушано 11 докладов, включающих широкий спектр проблем метро- и тоннелестроения,

начиная от актуальных задач развития городского подземного пространства до частных вопросов малоосадочной технологии при строительстве Петербургского метрополитена. Рассматривалось состояние нормативной документации по расчету транспортных сооружений на сейсмическое воздействие. Подчеркивалось, что вступившие в силу с 1 июня 2015 г. нормы не соответствуют современным знаниям по сейсмологии и современному уровню развития динамических методов расчёта сооружений.

Специальный доклад был посвящен методике ведения геотехнического мониторинга специализированными геодезическими организациями, проанализированы ошибки при его выполнении. Большой интерес у слушателей вызвал доклад о внедрении инновационных технологий при сооружении глубоких котлованов на примере крупных подземных объектов в городе Москве. Внимание участников круглого стола было привлечено к вопросу обеспечения комплексной безопасности противопожарной защиты городских автотранспортных тоннелей, разработке интегрированной системы активной противопожарной защиты для автотранспортных тоннелей.

Круглый стол вызвал большой интерес у специалистов, которые выразили благодарность организаторам за хорошее проведение мероприятия.

По окончании заседания состоялось награждение победителей конкурса им. С. Н. Власова «Инженер года Тоннельной ассоциации России – 2015».

Победителями в конкурсе по итогам 2015 г. признаны:

*в номинации Инженер года в области проектно-конструкторских работ:*

- Кондрев Роман Сергеевич, заместитель главного инженера проекта, ОАО «Метрогипротранс»;

- Дербисов Артем Маратович, заместитель главного инженера проекта, ОАО «Метрогипротранс»;

- Загитов Альберт Фатихович, главный специалист конструкторского отдела Проектного бюро № 1, ФГУП «Управление строительства № 30»;

- Евстифеева Ольга Владимировна, заместитель начальника архитектурно-строительного отдела, «ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»;

- Маринов Константин Сергеевич, руководитель группы, «ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»;

*в номинации Инженер года в области строительства метрополитенов в Российской Федерации:*

- Казаченко Сергей Андреевич, ведущий инженер, научно-инженерный центр по ос-





Докладчик к. т. н. Д. С. Конохов



Докладчик д. т. н. Н. Ф. Давыдкин



Докладчик к. т. н. С. О. Зере

воению подземного пространства АО «Мосинжпроект»;

- Дуденкова Олеся Владимировна, инженер производственно-технического отдела, СМУ-158 АО «Трансинжстрой»;

- Головин Станислав Сергеевич, заместитель начальника участка, СМУ-162 АО «Трансинжстрой»;

- Патузов Игорь Васильевич, инженер производственно-технического отдела, ООО «Тоннельный отряд № 6»;

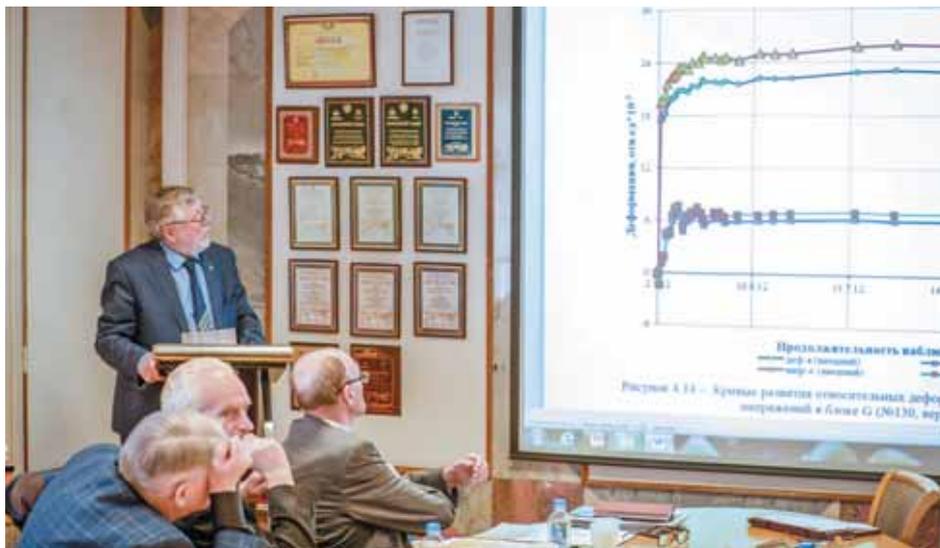
- Власов Николай Иванович, генеральный директор ЗАО «Управление-15 «Метрострой»;

- Головкин Сергей Валентинович, заместитель генерального директора по экономике, ЗАО «Управление № 10 Метростроя»;

- Мазеин Сергей Валерьевич, заместитель руководителя Исполнительной дирекции ТАР; в номинации *Инженер года молодые инженерные кадры научных, проектных, проектно-конструкторских и строительных организаций*;

- Прохоренко Вера Александровна, инженер II категории, научно-инженерный центр по освоению подземного пространства АО «Мосинжпроект»;

в номинации *Инженер года в области строительства инженерных коммуникаций и коммунальных тоннелей*;



Докладчик д. т. н. К. П. Безродный

- Масыгутов Виталий Тимурович, электромеханик подземного участка № 1 горно-капитальных работ Горностроительного комплекса в г. Уфе, ФГУП «Управление строительства № 30»;

в номинации *Инженер года в области строительства городских и горных автомобильных и железнодорожных тоннелей*;

- Голицынский Дмитрий Михайлович, профессор ПГУПС, Петербургский государственный университет путей сообщения;

- Фролов Юрий Степанович, профессор ПГУПС, Петербургский государственный университет путей сообщения.

Тоннельная ассоциация России поздравляет всех победителей и благодарит участников круглого стола за продуктивную работу.

## Памяти Владимира Павловича Самойлова



В Москве на 89-м году жизни скончался заслуженный строитель РСФСР Владимир Павлович Самойлов.

Владимир Павлович родился в 1927 г. в г. Хабаровске, окончил в 1949 г. МИИТ. В разные годы работал инженером-конструктором Метропроекта, научным сотрудником и руководителем лаборатории НИИОСП им Н. М. Герсееванова, руководителем отделения тоннелей и метрополитенов ЦНИИСа Минтрансстроя, начальником СКТБ Главмосинжстроя, генеральным директором НТЦ ПСО «Мосинжстрой» и ОАО «НТЦ». Кандидат технических наук, почёт-

ный член Тоннельной ассоциации России, автор и соавтор 140 технических публикаций и 130 изобретений.

Как участник разработки и внедрения тоннелестроительного оборудования Владимир Павлович был удостоен почетных званий лауреата Государственной премии СССР и заслуженного строителя РСФСР. Имел правительственные награды.

*Правление Тоннельной ассоциации России выражает соболезнования родным и близким.*

# ОСНАЩЕНИЕ ЩИТА ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ОСАДКИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТОПРИГРУЗОМ ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКОГО МЕХАНИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

## EQUIPPING OF SHIELD FOR SURFACE SETTLEMENT MINIMIZE USING EARTH PRESSURE BALANCE

Б. И. Федунец, проф., д. т. н.

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

B. I. Fedunets, Doctor of technical sciences, Professor

S. V. Mazein, Doctor of technical sciences, Russian Tunneling Association

Для максимального уменьшения осадки земной поверхности применяются щиты с использованием гидропригруза. В статье предлагаются мероприятия, связанные с конструкционными решениями оборудования щитового комплекса с грунтопригрузом. Приводятся рекомендации по выбору разности диаметров ротора и щита, а также по комплектации другим оснащением для минимизации осадки над щитом.

*To minimize the settlement of a terrestrial surface applied mix-shields. Proposed activities related to equipment design of EPB-shield. Provides guidelines for difference of cutterhead and a shield diameters, as well as on the choice of other equipment to minimize surface settlement over the shield.*

### Введение

В тоннелепроходческих механизированных комплексах (ТПМК) используются щиты как с гидропригрузом, так и с грунтопригрузом. В соответствии с ранее опубликованными данными, усредненные показатели средних и максимальных значений достигаемой осадки над тоннелем (во внимание не принимались единичные случаи аварий) для щитов с гидропригрузом (микс-щитов) составляют соответственно 6 и 11 мм, что в 2–2,5 раза ниже, чем для щитов с грунтопригрузом (ЕРВ-щитов) [1]. Это свидетельствует о более эффективной работе технологии гидропригруза, особенно в водонасыщенных грунтах

[2]. Поддерживаемое постоянным давлением несжимаемой суспензионной среды гидропригруза создает идеальные условия для противодействия давлению и экструзии неустойчивого грунтового массива в забойную камеру щита, а также для полноты нагнетания раствора за тоннельную обделку [3]. В щитах, использующих пригруз забойного массива пластифицированным грунтом, гораздо сложнее обеспечить поддержание обнажения забойной части массива при проходке, а тем более при остановке щита на монтаж обделки и другие работы. Актуальность обеспечения стабильности грунтового массива возрастает с применением ЕРВ-щитов

Таблица

### Мероприятия по минимизации осадки над грунтопригрузным щитом

Мероприятия по выбору конструкции щита	
1.	Уменьшение разности диаметров резания и оболочки щита (укороченные ковши/шарошки и их качество, буртики на своде внешней оболочки щита), дистанционный контроль износа резцов
2.	Датчики давления среды пригруза, рассредоточенные по высоте забоя
3.	Оборудование для закачки бентонита или сжатого воздуха в забойную камеру
4.	Шлюз и оборудование для кессонных работ
5.	Штатные уплотнения привода ротора и хвостовика щита
6.	Шнековый транспортер с выпускной задвижкой, без центрального вала (для больших кусков грунта) и с минимумом зазора между ребордой и внутренней поверхностью трубы, оснащение датчиками давления и подачей кондиционеров
7.	Оборудование для варьируемой одновременной подачи двух видов кондиционеров грунта
8.	Оборудование непрерывного нагнетания за обделку (каналы в хвостовике щита)

всё большего диаметра (более 10 м) для двухпутных тоннелей метрополитена в Москве и Санкт-Петербурге.

Для того чтобы минимизировать и приблизить показатели по осадке, которая примерно равными долями последовательно увеличивается перед, над и за щитом, при грунтопригрузе к соответствующим показателям при гидропригрузе необходимо выполнить ряд мероприятий на стадии выбора конструкции и оснащения щита.

Рассмотрим восемь основных предлагаемых направлений таких мероприятий, выработанных на основе анализа практического опыта и связанных с конструктивными решениями щитового комплекса с грунтопригрузом (табл.).

Направления совершенствования оснащения ЕРВ-щита, апробированные мировым и отечественным опытом, касаются:

- уменьшения разности диаметров резания и щита,
- контроля давления пригруза,
- замещения сред пригруза,
- кессонного оборудования,
- надежности штатных уплотнений щита,
- герметичности и пропускной способности шнека,
- вариативности добавок-кондиционеров по их типу и контролируемому расходу,
- непрерывности нагнетания раствора за обделку.

### Режущий инструмент и внешняя оболочка щита

Для щитов диаметром порядка 6-6,5 м минимальный стандартный зазор – разность диаметров ротора и щита – составляет 30 мм (при максимальном зазоре 50 мм для некоторых щитов «Роббинс»), который может быть уменьшен дополнительно навариваемыми буртиками на своде внешней оболочки щита [4], а также сокращенным выступом периферийных ковшей и шарошек по аналогии со щитом диаметром 14,2 м (в стартовом массиве Лефортовского тоннеля с  $14,22 - 14,16 = 0,06$  м до  $14,2 - 14,16 = 0,04$  м), на  $1/3$ , то есть до 20 мм. Зазор может быть уменьшен только с учетом необходимой устойчивости грунтов и больших радиусов поворота трассы. Для этого мероприятия требуется обоснование, исходя из горно-геологической обстановки и свойств грунта, во избежание застопоривания щита обжатием грунтового массива.

Уменьшение высоты упомянутого выше зазора, полностью смыкаемого подвижками грунта, гарантированно минимизирует осадку земной поверхности над щитом.

### Датчики давления пригруза

В конструкции лобовой диафрагмы щита необходимо рассредоточить по ее высоте датчики давления среды пригруза. Измерения давления среды пригруза разновысотными датчиками позволят получить

экстраполированный с помощью прямой график эпюры давления по высоте.

Точка пересечения с осью Y, соответствующей высотным уровням точек замера в забое от его подошвы и действующих напряжений массива над ним, определяет граничную высоту столба грунта H, на которой горизонтальные напряжения уже не действуют (пример интерпретации измерений при реализации проекта S-328-1 на рис. 1 [5]).

С помощью высотных эпюр давления грунта, которые строятся по усредненным показателям датчиков давления, расположенных в забое на разных уровнях, можно рассчитать коэффициент бокового давления по наклону эпюр и высоте опускающегося столба грунта. На этот коэффициент опираются расчеты рекомендуемого давления пригруза, поэтому полученное фактически значение этого коэффициента в расчетах давления пригруза позволит минимизировать осадку земной поверхности.

### Линии подачи бентонита или сжатого воздуха

Для противодействия осадке земной поверхности при длительных простоях щита необходимо иметь оснащение для подачи бентонита или сжатого воздуха в забойную камеру. Оборудование должно быть снабжено датчиками контроля давления и расхода этих технологических сред при закачке в забойную камеру щита.

Создание технологическими средами противодействия продолжительным во времени смещениям грунта позволит минимизировать осадку земной поверхности.

### Кессонное оборудование

Щит должен быть оснащен шлюзом и оборудованием для кессонных работ, необходимых для ремонтов и замены режущего инструмента ротора в забойной камере.

Как показывают неоднократные случаи на щитовых ТПМК, в результате отсутствия кессонного оборудования, когда условия неустойчивых грунтов в забое требуют их удерживания во время замены режущего инструмента, возникают длительные простои ТПМК и сверхнормативная осадка земной поверхности.

### Штатные уплотнения щита

Уплотнения между движущимися и неподвижными узлами в передней (роторной) и задней (хвостовой) части щита во избежание протечки грунтовых вод и плывунов, вызывающей дополнительную осадку земной поверхности, а

также технологических суспензий, должны быть герметичными и надежными на протяжении всего проектируемого интервала проходки.

Во избежание разгерметизации щита и связанной с ней осадки земной поверхности, необходимо применять штатные, рекомендуемые изготовителем ТПМК уплотнения щита, а также иметь противоаварийные (дублирующие) уплотнения. Актуальной разработкой является также совершенствование стартового уплотнения между щитом и стенкой монтажной камеры щита.

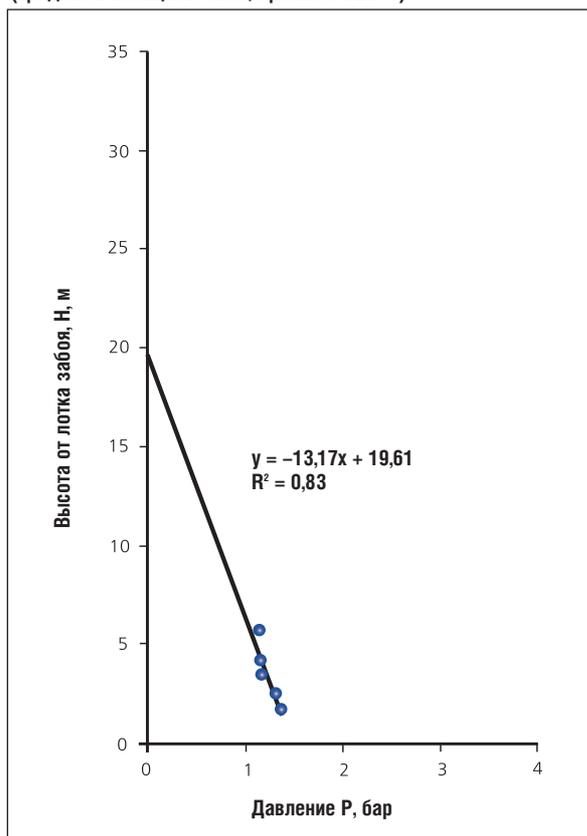
### Оснащение шнека

Шнек должен быть оснащен выходной задвижкой, надежно закрывающейся после прекращения процесса проходки. На границе с полостью шнека должны быть установлены датчики давления и форсунки для подачи добавок-кондиционеров.

Шнековый транспортер должен быть приспособлен также для пропуска больших кусков грунта, если ожидается встреча вала. Например, этому требованию более всего отвечает шнек без центрального вала – ленточный с затвором для сбора булыжников (рис. 2).

В шнеке должен быть предусмотрен минимальный зазор между ленточной ребордой и внутренней поверхностью трубы во избежание неконтролируемого пропускания плывуна. Этому обстоятельству, в отличие от оборудования на рис. 2, максимально отвечает менее деформирующийся шнек с цент-

Рис. 1. Пример высотной эпюры давления с экстраполяцией (среднее в кольце № 1803, проект S-328-1)



Двойной шнековый конвейер с затвором для сбора булыжников

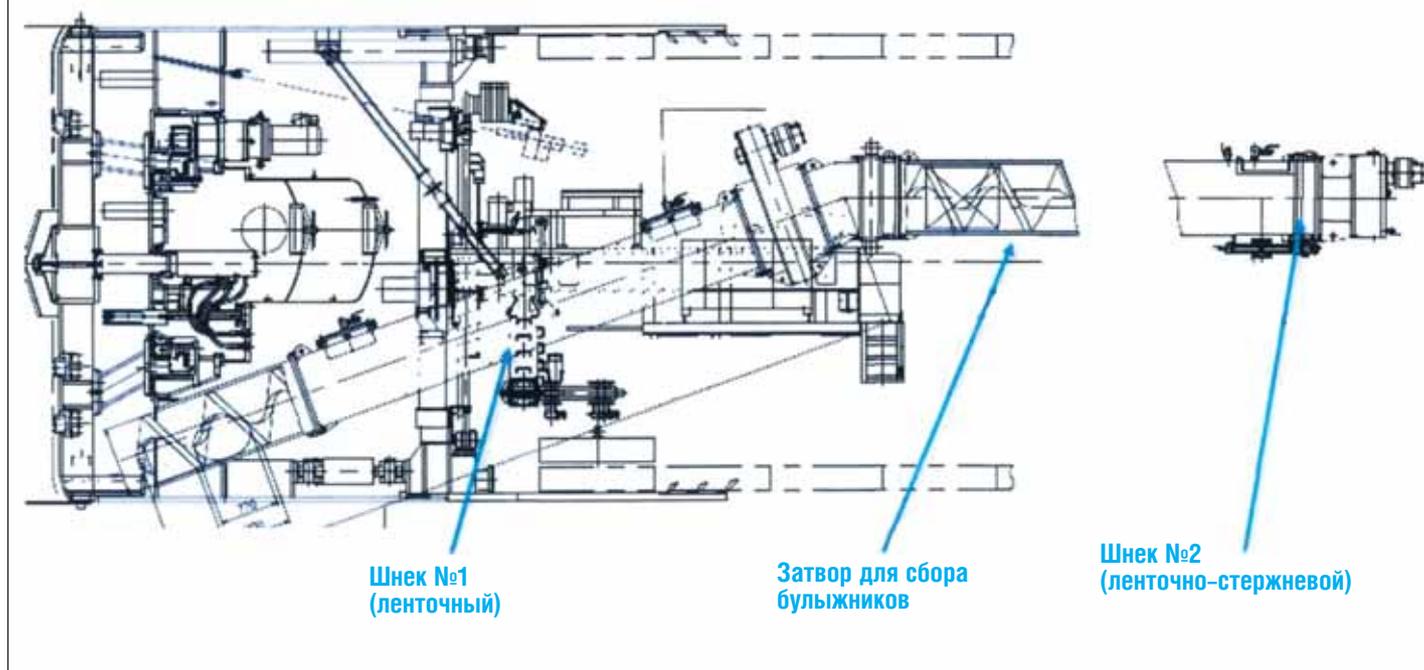


Рис. 2. Щит с ленточным шнековым транспортером

ральным валом, которым оснащены щиты «Херренкнехт».

Оптимальное для встречи валунов и проявления плывунов оснащение шнека позволит избежать переборов грунта и сверхнормативной осадки земной поверхности.

#### Линии подачи добавок-кондиционеров грунта

При разнообразии инженерно-геологических условий по трассе тоннеля необходимо предусмотреть две линии оборудования для варьируемой одновременной подачи двух видов кондиционеров грунта, соответствующих двум типам грунтов с диаметрально противоположными свойствами (например, сухим глинам и обводненным пескам).

Вариативность подачи добавок-кондиционеров во время резкой смены инженерно-геологических условий позволит создать грунтопригрузную среду, адекватную соотношениям различных типов грунтов, пластичную [6] и удерживающую грунтовый массив от осадки.

#### Линии непрерывного нагнетания раствора

Щиты, где предусмотрено оборудование для нагнетания твердеющего раствора через отверстия в блочной обделке, необходимо оснастить каналами, насосным и контрольным оборудованием непрерывного нагнетания через хвостовик щита, что обеспечивает полный объем нагнетания за обделку. Подача раствора за блоки обделки через отверстия в них, используемая на немодернизированных щитах, не обеспечивает полный объем нагнетания и противодействия осадке земной поверхности.

Как показала практика щитовой проходки тоннелей горизонтального расположения, при использовании состава твердеющего раствора преимуществом перед двухкомпонентным раствором (наполнитель + отвердитель) обладает многокомпонентный раствор на основе малоактивного вяжущего, не схватывающегося по всему тракту транспортирования и нагнетания.

Такой раствор полностью заполняет зазор за обделкой и не вызывает прихватывания и разгерметизации щеточного уплотнения, которые также могут приводить к повышенным осадкам земной поверхности.

#### Вывод

Предложенные мероприятия, которые связаны с конструкционными решениями по оснащению щита на стадии его изготовления или реконструкции, позволяют существенно снизить осадки земной поверхности над ЕРВ-щитами.

#### Ключевые слова

Щит, режущий инструмент, давление пригрузки, бентонит, уплотнение, шнековый транспортер, нагнетание.

*Shield, cutting tools, balance pressure, bentonite, seal, screw conveyor, injection.*

#### Список литературы

1. Мазеин С. В., Потапов М. А. Анализ параметров современных щитов с разным типом пригрузки, применяемых в метростроении с минимальными осадками городской поверхности // Тр. 4-й междунар. науч.-техн. конф. «Основные направления развития инновационных технологий при строи-

тельстве тоннелей и освоении подземного пространства крупных мегаполисов». – М. – 2010. – С. 128–130.

2. Соломатин Ю. Е., Потапов М. А., Мазеин С. В. Активный пригруз забоя при щитовой проходке как фактор обеспечения сохранности существующей застройки мегаполиса // Транспортное строительство. – 2013. – № 5. – С. 7–10.

3. Мазеин С. В. Контроль инъекционного давления твердеющего раствора за обделкой тоннеля и проходческим щитом // Горное оборудование и электромеханика. – М. – 2009. – № 11. – С. 41–45.

4. Механизированная проходка тоннелей в городских условиях. Методология проектирования и управления строительством / под ред. В. Гульелметти, П. Грассо, А. Махтаба, Ш. С.; «Geodata S.p.A.», Турин, Италия. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 602 с.

5. Мазеин С. В., Потапов М. А. Мониторинг грунтового давления и объема выемки обводненного массива для безопасной проходки щитом // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 11. – С. 58–63.

6. Федунец Б. И., Мазеин С. В., Потапов М. А. Обоснование применения по специально-технологическим воздействиям пеногрунтовой компенсации в щитовом забое // Метро и тоннели. – 2012. – № 5. – С. 18–21.

#### Для связи с авторами

Федунец Борис Иванович  
info@rus-tar.ru  
Мазеин Сергей Валерьевич  
mazein@rus-tar.ru

# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ БЛОЧНОЙ ОБДЕЛКИ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ



**В соответствии с планом работы Тоннельной ассоциации России на 2016 г. в Москве 15 марта 2016 г. в конференц-зале ОАО «Моспромжелезобетон» был проведён научно-практический семинар на тему: «Современные технологии, материалы и оборудование для изготовления высококачественной блочной обделки транспортных тоннелей».**

**В** работе семинара приняли участие руководители и специалисты научно-исследовательских и проектных институтов, метростроительных компаний и предприятий – изготовителей железобетонных блоков тоннельной обделки (всего 46 участников).

С докладами выступили представители ОАО «Моспромжелезобетон», НИЦ ОПП АО «Мосинжпроект» и ряда ведущих западных фирм – лидеров среди поставщиков оборудования и материалов для производства блочной обделки.

Во второй половине семинара руководители ОАО «Моспромжелезобетон» организовали для участников посещение цеха, в котором заводом изготавливаются по стендовой технологии железобетонные блоки, поставляемые на объекты Московского строительного комплекса для проходки перегонных тоннелей метро диаметром 6 м и коммунального тоннелестроения диаметром 3–4 м.

Новой продукцией Моспромжелезобетона в текущем году стало изготовление блоков для сооружения двухпутных тоннелей метрополитена на Кожуховской линии метро. В этом проекте ведётся подготовка линии для карусельной технологии. Ранее эта технологическая линия была задействована на выпуска блоков, поставлявшихся на строительство 14-метровых автодорожных тоннелей в Лефортово и Серебряный Бор.

Во всех указанных проектах использовались высокоточные формы, поставленные в Москву фирмой «Herrenknecht Formwork» – дочерним предприятием фирмы «Herrenknecht AG».

Участникам семинара также была продемонстрирована опытная отработка технологии наклейки резиновых уплотнителей фирмы «Trelleborg» для новой продукции – блоков обделки для проходки двухпутных тоннелей диаметром  $D_{нар./D_{вн.}} = 10,5/9,6$  м.

Участникам семинара были переданы проспекты этой и других фирм, доклады которых были заслушаны в первой половине семинара.

Представленные в ходе семинара доклады были заслушаны с большим интересом, а ознакомление с современной организацией на заводе изготовления блоков подтвердило высокий технический уровень российских предприятий, выпускающих железобетонные конструкции для метростроения.

По вопросу получения сборника семинара можно обращаться в Тоннельную ассоци-



Комплекты высокоточных форм для блоков  $D_{нар./D_{вн.}} = 10,5/9,6$  м



Посещение производственного цеха участниками конференции

цию России к Мазеину Сергею Валерьевичу. Контактный тел.: +7(495) 608 80 32.



# РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПЕРЕЖАЮЩИХ КРЕПЕЙ

## RECONSTRUCTION OF TRAFFIC TUNNELS WITH FOREPOILING SUPPORT

Л. В. Маковский, проф., чл.-корр. РАН, МАДИ

L. V. Makovsky, professor, corresponding member of the Russian Academy of Natural Sciences, MADi



**В статье анализируется современный опыт реконструкции автодорожных и железнодорожных тоннелей с использованием опережающих крепей. Указаны перспективы применения альтернативных технических решений в различных инженерно-геологических условиях.**

***The article analyzes the modern experience of reconstruction of road and rail tunnels with forepoiling support. The prospects of application of the alternative technical solutions have been shown in various engineering-geological condition.***

**Н**епрерывно возрастающая интенсивность транспортных потоков на автомобильных и железных дорогах вызывает необходимость увеличения пропускной способности горных тоннелей, многие из которых не удовлетворяют современным требованиям и подлежат реконструкции.

Пропускная способность большинства тоннелей, построенных до 80–90-х годов прошлого столетия, давно исчерпана, что негативно отражается на перевозочном процессе и делает их зонами повышенного риска. Об этом свидетельствует ряд серьезных аварий, происшедших за последние годы в таких крупных автодорожных тоннелях как Сен-Готард в Швейцарии, Монблан между Францией и Италией, Тауэрн в Австрии и др. [1]. В связи с этим в большинстве европейских стран на магистральных с интенсивным движением обязательным является строительство двух параллельных тоннелей для одностороннего

движения, а там, где эксплуатируются тоннели с встречным движением, – строительство вторых параллельных тоннелей.

В тех случаях, когда строительство второго тоннеля представляется затруднительным или невозможным, приходится реконструировать действующие тоннели с увеличением размеров их поперечного сечения. Уширение автодорожного тоннеля позволяет разместить в нем дополнительную полосу движения или увеличить ширину каждой полосы, создать полосу безопасности, расширить служебные проходы и пути эвакуации людей в случае аварии и пр.

Увеличение размеров поперечного сечения железнодорожных тоннелей часто связано с заменой тепловозной тяги электрической, что требует устройства контактной сети.

Увеличение высоты тоннеля может быть обусловлено также габаритами проезда или

необходимостью размещения за пределами габарита вентиляционных каналов, каналов для дымоудаления, струйных вентиляторов и другого эксплуатационного оборудования.

Реконструкция тоннелей, связанная с увеличением размеров их поперечного сечения, представляет собой сложную проблему. В тоннельной практике многие годы для расширения тоннелей применяли проходку многочисленных контурных штолен, в которых по частям бетонировали новую обделку, а затем разбирали старую [2].

При необходимости увеличения только высоты тоннеля использовали традиционный горный способ или полущиты, перемещающиеся по стенам тоннеля. Под прикрытием полущита разбирали сводовую часть старой обделки и возводили новый свод из сборного железобетона.

Упомянутые выше методы реконструкции требовали, как правило, длительного

закрытия движения транспортных средств по тоннелю и характеризовались высокой трудоемкостью и низкими темпами ведения работ.

Новая концепция уширения эксплуатируемых тоннелей без прекращения движения по ним транспортных средств основана на применении опережающей контурной крепи и, прежде всего, бетонных сводов, возводимых в предварительно устроенных прорезях глубиной от 1,5 до 5 м и высотой до 30–40 см.

Такую технологию успешно применяли и применяют при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов во Франции, Италии, Испании, Швейцарии, Венесуэле, Японии и других странах [3]. С использованием опережающей бетонной крепи сооружен участок станционного комплекса «Адмиралтейская» в Санкт-Петербурге.

Однако использование данной технологии для реконструкции тоннелей в процессе их эксплуатации потребовало разработки новых конструктивных и технологических решений, а также специализированного оборудования.

Область применения рассматриваемой технологии ограничена полускальными и мягкими грунтами, обладающими достаточной устойчивостью.

Для обеспечения непрерывного и безопасного пропуска по реконструируемому тоннелю транспортных средств с ограничением скорости движения было предложено устанавливать внутри тоннеля специальный щит – передвижную металлоконструкцию, обладающую высокой жесткостью и несущей способностью. По мере уширения тоннеля щит перемещается отдельными заходками по рельсовым направляющим.

Используя специализированные щеленарезные агрегаты, прорезают опережающую контурную щель по периметру свода и стен уширенного тоннеля, заполняя ее набрызг-бетоном. Под прикрытием бетонного свода на участке, равном глубине заходки, разрабатывают грунт и демонтируют секцию обделки существующего тоннеля, после чего возводят вторичную крепь уширенного тоннеля из монолитного бетона, железобетона или из сборных железобетонных блоков, обжимаемых в грунтовой массив ключевым блоком или гидравлическими домкратами. Блоки монтируют специальным укладчиком, перемещающимся по направляющим, закрепленным на портале щеленарезной машины.

Схема уширения тоннеля с использованием опережающей бетонной крепи представлена на рис. 1.

Современные щеленарезные машины включают жесткую раму с направляющей дугой, по которой перемещается каретка с баровым рабочим органом. Мощность гидропривода таких машин изменяется от 120 до 400 кВт; скорость нарезания щели – от 1 до 10 м/мин и более. Контроль за нарезанием

щели осуществляется лазерными геодезическими приборами.

Во Франции щеленарезные машины «Супремек» и «Перфорекс» выпускает фирма «Сершар», в Германии – фирма «Вирт», в Японии – фирма «Ниппон кокудокайхацу», в Италии – фирма «Родио».

Для реконструкции тоннелей созданы модифицированные щеленарезные машины многоцелевого назначения порталного типа, обеспечивающие нарезание и бетонирование контурной щели, а также возведение вторичной крепи (обделки).

Нарезанную щель заполняют высокопрочным набрызг-бетоном или фибронабрызг-бетоном по «сухой» или «мокрой» технологии робот-методом или подают удобоукладываемую бетонную смесь бетононасосами. Время выстойки бетона в щели до требуемой прочности (8–10 МПа) изменяется от 4–6 до 10–15 ч [4].

Первый проект уширения горного автодорожного тоннеля по рассматриваемой технологии был реализован в Италии. Необходимость реконструкции тоннеля обуславливалась увеличением его пропускной способности за счет выделения третьей полосы движения и устройства надежных эвакуационных путей на случай аварийной ситуации.

В дальнейшем с применением указанной технологии предусматривается уширение тоннелей на тех автомобильных дорогах Италии, где по две полосы в каждом направлении, а интенсивность движения превышает 25 тыс. автомобилей в сутки.

Опыт реконструкции тоннелей с применением опережающей бетонной крепи оказался успешным, однако область его применения ограничена полускальными и мягкими грунтами средней устойчивости. По-

скольку длина щели не превышает 4–5 м, темпы проходки оказываются невысокими.

В слабоустойчивых и неустойчивых грунтах для уширения транспортных тоннелей возможно применение иных видов опережающих крепей в виде экранов из труб, микросвай или стабилизированного грунта.

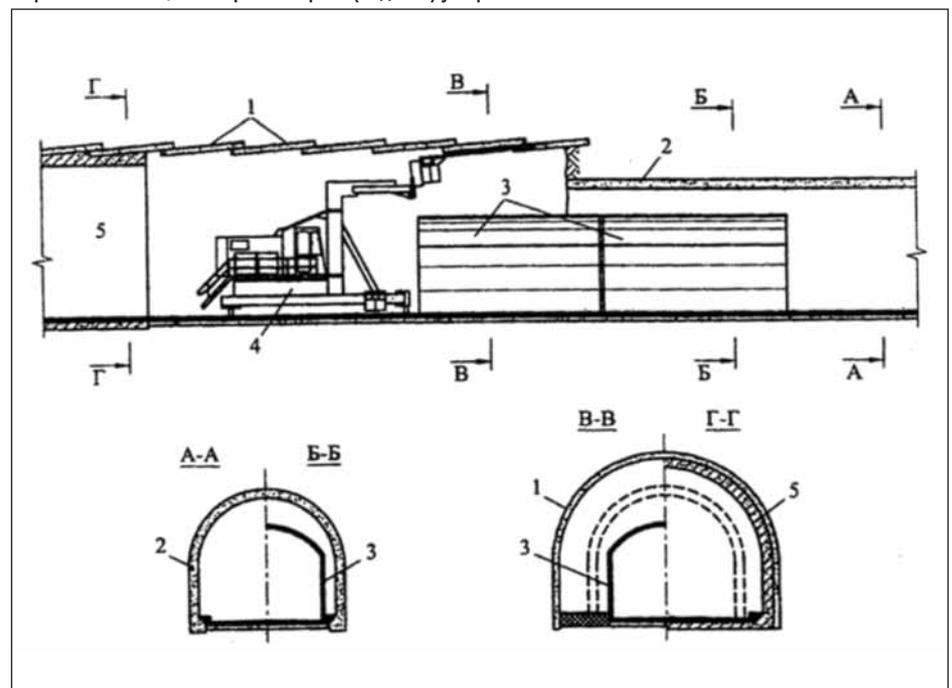
Экраны из стальных или железобетонных труб диаметром от 0,5 до 2 м могут быть устроены путем их продавливания или проталкивания в заранее пробуренные скважины по контуру свода и стен будущего тоннеля с помощью установок роторного или шнекового бурения [5].

Наиболее перспективной представляется технология проходки опережающих выработок по микротоннельной технологии. Используя механизированные и автоматизированные микрощитовые комплексы диаметром 1–2 м и мощные гидродомкратные установки для продавливания звеньев труб, можно создавать как временную, так и постоянную крепь уширенного тоннеля.

Наибольшее распространение микротоннельная технология получила в Германии, Франции, Великобритании, США и Японии, где фирмами «Херренкнехт», «Вестфалия Люнен», «Зольтау», «Евро-Исеки», «Исеки Политех» и другими созданы щитовые комплексы для проходки в широком диапазоне инженерно-геологических условий [6]. С применением таких комплексов построены тоннели в Москве, Санкт-Петербурге, Нижнем Новгороде и других городах РФ.

Используя микротоннельную технологию для реконструкции тоннелей, в первую очередь по проектному контуру уширенного тоннеля проходят систему тоннелей, заполняя их бетонной смесью. Таким образом создается первичная крепь, под защитой кото-

Рис. 1. Схема уширения тоннеля с использованием опережающей бетонной крепи: 1 – опережающая бетонная крепь; 2 – обделка реконструируемого тоннеля; 3 – секции передвижной крепи (щита); 4 – щеленарезная машина; 5 – вторичная крепь (обделка) уширенного тоннеля



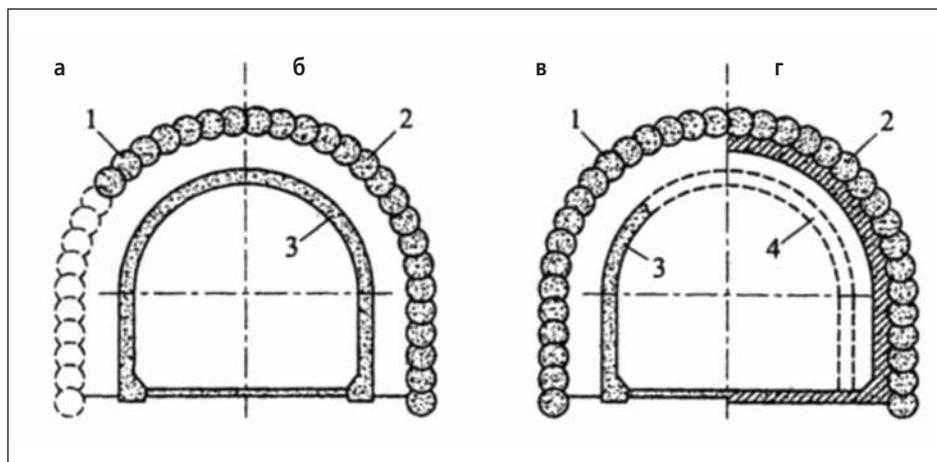


Рис. 2. Этапы (а-г) уширения тоннеля с использованием экранов из труб: 1 - трубы экрана; 2 - бетонное заполнение; 3 - обделка реконструируемого тоннеля; 4 - обделка тоннеля после уширения

рой разрабатывают грунт и демонтируют обделку эксплуатируемого тоннеля. В последнюю очередь возводят вторичную крепь из набрызг-бетона (рис. 2).

В последние годы наряду с экраном из труб начали применять экраны из микросвай в виде стальных или фиброгласовых перфорированных элементов, через которые в грунт под давлением нагнетают цементный раствор.

Микросваи могут быть выполнены также с применением струйной цементации. Для этого по контуру будущего тоннеля с определенными интервалами в грунт погружают мониторы с насадками, через которые под большим давлением подают воду и цементный раствор. Окружающий скважину грунт разрушается струей воды и интенсивно перемешивается с цементным раствором. Постепенно извлекая монитор из скважины, создают области закрепленного грунта. По такой технологии сооружали отдельные участки автодорожных тоннелей в Австралии, Швейцарии и Югославии [5].

Для образования областей закрепленного грунта в отдельных случаях используют химическое закрепление или искусственное замораживание грунтов. Такую технологию целесообразно применять в слабых водонесных грунтах, когда другие виды опережающей крепи неприемлемы.

Независимо от способа стабилизации грунта последовательность работ по реконструкции тоннеля аналогична той, которая рассмотрена выше применительно к опережающей бетонной крепи и экранам из труб.

Внедрение опережающих крепей для реконструкции горных транспортных тоннелей в отличие от традиционных методов позволяет:

- вести уширение тоннелей без прекращения их эксплуатации с ограничением скорости движения транспортных средств;
- производить работы в широком диапазоне инженерно-геологических условий – от полускальных до слабоустойчивых несвязных грунтов с использованием различных видов опережающих крепей;

• снизить трудоемкость и повысить безопасность и темпы реконструкции тоннелей.

В дальнейшем при разработке проектов реконструкции горных транспортных тоннелей в нашей стране следует рассматривать в качестве альтернативных технических решений применение опережающих контурных крепей.

#### Ключевые слова

Транспортные тоннели, реконструкция тоннелей, опережающая крепь.

*Traffic tunnels, tunnels reconstruction, forepoiling support.*

#### Список литературы

1. Власов С. Н., Маковский Л. В., Меркин В. Е. *Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей метрополитенов.* – М., ТИИР. – 2000, 197 с.
2. *Содержание и реконструкция тоннелей.* // Под ред. Ю. А. Лиманова. – М. Транспорт, 1976, 192 с.
3. Маковский Л. В. *Применение опережающей бетонной крепи в тоннелестроении* // *Метроинвест*, – 2003, – № 2. – с. 38–41.
4. Lunardi P., Calcerano G. *A New Construction Method For Widening Highway and Railway Tunnels. Proceeding of the Aites – ITA World Tunnels Congress, Milan – Italy, 2011, V III, P. 665–671.*
5. Маковский Л. В., Чеботарев С. В. *Новые технологии устройства опережающей крепи в тоннелестроении* // *Транспорт: наука, техника, управление.* – 2012, – № 6 – с. 40–45.
6. Маковский Л. В. *Применение микротоннельной технологии в подземном строительстве* // *Транспорт: наука, техника, управление.* – 2009, – № 10 – с. 13–18.

#### Для связи с автором

Маковский Лев Вениаминович  
mosti@list.ru



## Вышла из печати новая книга «Подводные транспортные тоннели из опускных секций», Л. В. Маковский, В. В. Кравченко; М.: КноРус, 2016.

В книге приведены обобщенные и систематизированные материалы по проектированию и строительству подводных транспортных тоннелей способом опускных секций. Отражены вопросы, касающиеся целесообразности применения способа, трассы тоннелей, инженерно-геологических и гидрологических условий. Рассмотрены современные конструкции опускных секций, особенности их гидроизоляции и стыковочных узлов. Представлены основные методы расчета опускных секций на стадиях строительства и эксплуатации. Содержатся сведения об организации и технологии строительства тоннелей из опускных секций, включая их изготовление,

транспортирование, опускание в проектное положение, стыковку, сопряжение с основанием и обратную засыпку. Даны наиболее характерные примеры из мирового опыта строительства, а также перспективные проекты и предложения.

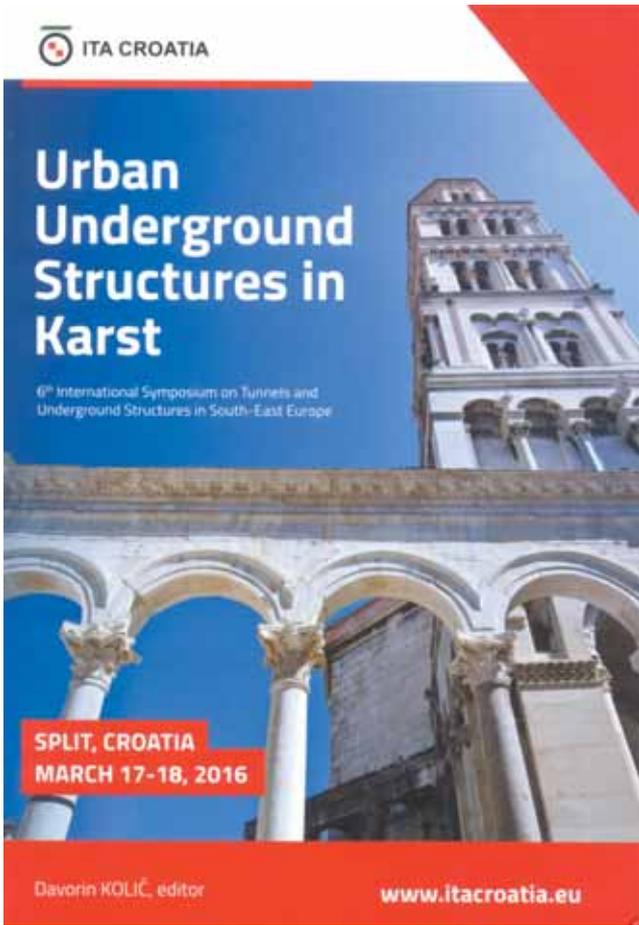
Книга будет полезна студентам, магистрантам и аспирантам строительных специальностей высших учебных заведений, а также инженерно-техническим и научным работникам.

По вопросам приобретения книги обращаться к Л. В. Маковскому tunnels@list.ru либо в Тоннельную ассоциацию России к Г. И. Будницкому по тел. +7 (499) 265 79 51.

# ГОРОДСКИЕ ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ В КАРСТЕ

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

Хорватская ассоциация тоннелей и подземных сооружений (ИТА Хорватии) организовала и провела 17–18 марта 2016 г. конференцию «Городские подземные сооружения в карсте» как симпозиум тоннельщиков Юго-Восточной Европы.



Все доклады были распределены по пяти сессиям. Ниже приведем английское название и русский перевод сессий и заголовков докладов.

*Сессия 1: UNDERGROUND ROAD TRAFFIC / ПОДЗЕМНЫЕ АВТОДОРОГИ*

1. Experience with the Kastelec tunnel construction and operation in karst area / Опыт строительства и эксплуатации Kastelec тоннеля в карстовой области.

2. Design solution of the tunnel Komorjak-north. / Проектные решения тоннеля Komorjak-north.

3. Autonomous robot for tunnel inspection and assessment. / Автономный робот для инспекции и диагностики тоннеля.

4. Conceptual design of immersed tunnel tubes of the Adriatic. / Концептуальное проектирование погружной тоннельной трубы в Адриатике.

5. Innovative waterproofing system for Rivarolo

Tunnel. / Инновационная система гидроизоляции для тоннеля Rivarolo.

6. Evaluation of the mechanical excavation methods used in underground openings in Turkey. / Оценка механических методов экскавации, используемых в подземных выработках Турции.

7. Geological Conditions and Technical Issues of Sabuncubeli Tunnel Project Located in Manisa – Izmir. / Геологические условия и технические вопросы проекта Sabuncubeli тоннеля на участке Маниса – Измир.

8. Different coating systems for road tunnels applied in different tunnels in Slovenia and Austria. / Различные системы покрытий для применения в различных автомобильных тоннелях Словении и Австрии.

*Сессия 2: UNDERGROUND RAIL TRAFFIC / ПОДЗЕМНЫЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ*

1. Design and construction of a crossover cavern. / Проектирование и строительство камер примыканий на стрелках, Лондон.

2. Influence of macro synthetic fibre on the performance of bolted segment joints. / Влияние макросинтетической фибры на эффективность болтовых соединений сегментных блоков.

3. New railway line in karstic conditions. / Новые железные дороги в карстовых условиях.

4. Innovative measures for dealing with karst while tunnelling. / Новаторские меры для борьбы с карстами при строительстве тоннелей.

5. EPBM design and operation in boulder conditions. / Проектирование и эксплуатация грунтопригрузных щитов при встрече валунов.

*Сессия 3: CONSTRUCTION IN UNDERGROUND WATER / СТРОИТЕЛЬСТВО В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД*

1. Estimating of ground water in flow into the Sabzkuh tunnel, Chaharmahal and Bakhtiari, south west Iran. / Оценка притока грунтовых вод в Sabzkuh тоннель, Чехармахаль и Бахтиярия на юго-западе Ирана.

2. TBM-monitoring of soil pressure and watered extractable volume. / Мониторинг давления и объема извлечения обводненного грунта на ТПМК.

*Сессия 4: SEWER REHABILITATION AND CONSTRUCTION METHODS / МЕТОДЫ РЕКОНСТРУКЦИИ И СТРОИТЕЛЬСТВА КАНАЛИЗАЦИИ*

1. The construction method used for the main sewer collector in the port of Split. / Метод строительства, используемый для главного канализационного коллектора в порту Сплит.

*Сессия 5: UNDERGROUND URBANISM / ПОДЗЕМНЫЙ УРБАНИЗМ*

1. Variants of entrance to the port by tunnel. / Варианты входа в портал тоннеля.

2. Underground parking facilities in rock. / Устройство подземных парковок в скальных грунтах.

3. Tunnels in the Split city area / Тоннели в городской черте Сплита

Тоннельная ассоциация России может предоставить своим членам английскую версию интересующих их докладов участников конференции. С запросом обращаться на электронную почту [Mazein@rus-tar.ru](mailto:Mazein@rus-tar.ru).



# СТВОЛОПРОХОДЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ: ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ПРОХОДКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 10 ЛЕТ

## VERTICAL SHAFT SINKING MACHINE: APPLICATION PRACTICE FOR SINKING VERTICAL SHAFTS OF THE MOSCOW METRO OVER LAST 10 YEARS

**М. А. Потапов**, заместитель генерального директора АО «Трансинжстрой»

**Е. В. Потапова**, начальник отдела инженерной подготовки производства, СМУ-162 АО «Трансинжстрой»

**M. A. Potapov**, Deputy director general «Transingstroj»

**E. V. Potapova**, SMU-162 «Transingstroj»

С каждым годом растут объёмы и темпы строительства новых линий Московского метрополитена. От того насколько быстро и качественно будут сооружаться шахтные стволы во многом зависит продолжительность строительства объектов в целом. В статье приведены обзор и обобщение результатов многолетней практики использования АО «Трансинжстрой» наиболее эффективной технологии проходки – комплекса VSM (Vertical Shaft Sinking Machine) фирмы «Herrenknecht AG».

*Each year the volumes and rates building of new lines of the Moscow metro are growing. From speed and quality of construction mine shafts, largely depends on the duration of building projects in General. The paper presents an overview and synthesis of results of long-term using practice of JSC «Transingstroj» the most efficient technology penetrations – complex VSM (Vertical Shaft Sinking Machine) of the company «Herrenknecht AG».*

### Введение

Москва, как крупный развивающийся мегаполис, не остаётся в стороне от мировых тенденций подземного градостроительства. Одним из решающих факторов здесь является постоянное увеличение пассажиропотока, которое приводит к сложной ситуации на транспорте. Использование потенциала подземного пространства для развития транспортной инфраструктуры позволяет значительно повысить мобильность движения, разгрузить наземные магистрали, снизить количество вредных выбросов и уровень шума, улучшить качество транспортного обслуживания населения. Расширение метрополитена и системы автодорожных тоннелей призвано решить проблему. Вместе с тем, подземное строительство в городах сопряжено с определёнными трудностями: это и плотная застройка, наличие зданий-памятников архитектуры, насыщенность коммуникациями, активное дорожное движение. В некоторых случаях сюда добавляются сложные горно-геологические условия, а также проявления геологических процессов.

Стратегическим направлением в решении подобных задач в транспортном подземном строительстве является использование прогрессивных технологий. Основа таких технологий – применение высокопроизводительных механизированных проходческих комплексов, позволяющих обеспечить совмещение и непрерывность основных операций по разработке, погрузке и транспорту грунта, монтажу обделки и

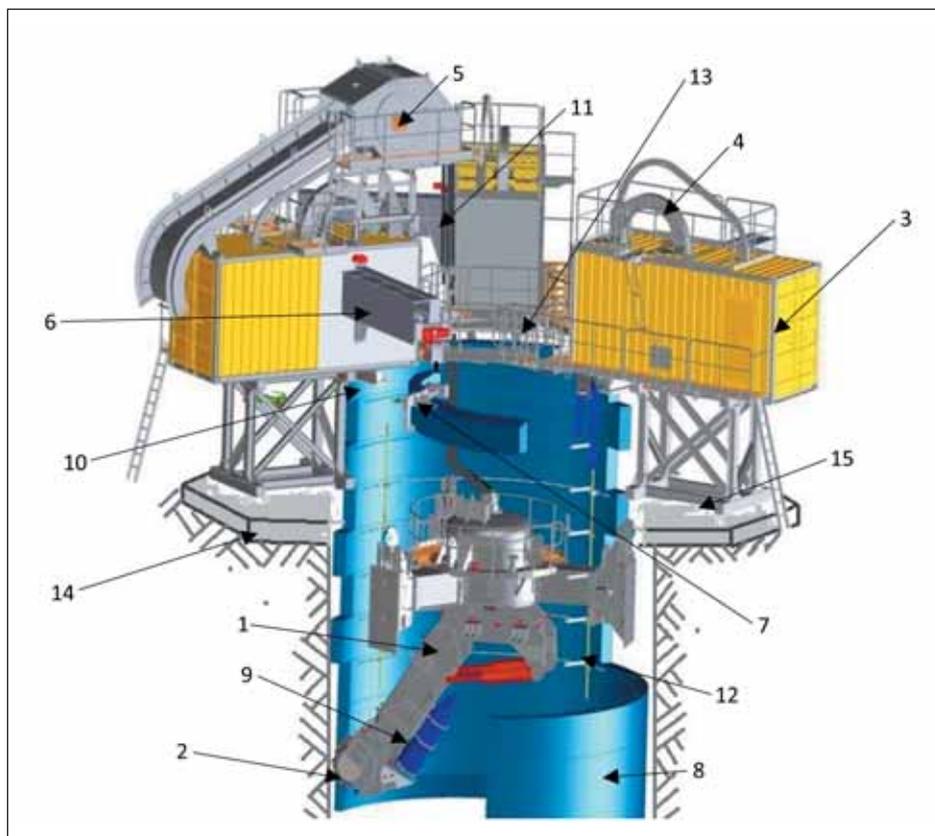


Рис. 1. Схема стволопроходческого комплекса в разрезе ствола: 1 – стволопроходческая машина бурового действия; 2 – телескопический рабочий орган с фрез-барабаном поперечного перемещения; 3 – опускающей контейнер; 4 – опускные лебёдки; 5 – лебёдка энергетических линий; 6 – крановая консольная балка; 7 – блок обделки с траверсой; 8 – обделка ствола; 9 – погружной шламовый насос; 10 – домкрат для задавливания обделки; 11 – трубопроводы выдачи пульпы, подачи воды, гидравлические шланги; 12 – трубы геодезической системы; 13 – технологические мостки; 14 – свайные фундаменты; 15 – опорные стапели

Таблица 1

Основные характеристики комплекса

Максимальный диаметр ствола (вчерне), м	8,5/6,3
Максимальная глубина ствола, м	80
Прочность вмещающих грунтов, МПа	до 100
Установленная мощность, кВт	965
Производительность по грунту погружного насоса, м <sup>3</sup> /ч	до 400

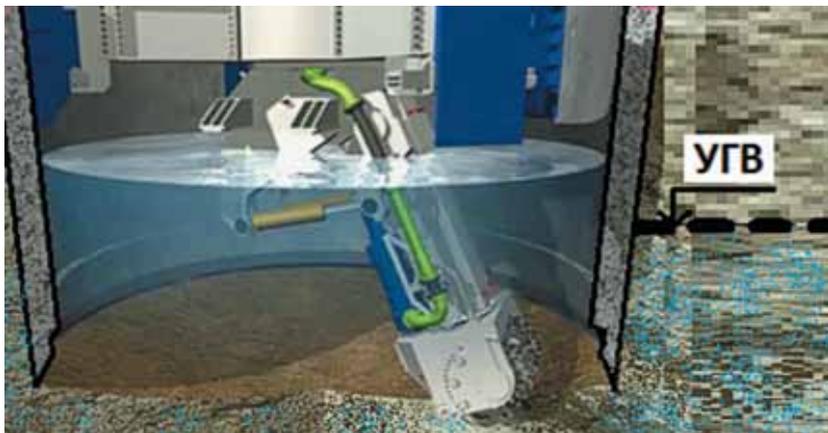


Рис. 2. Схема разработки грунта стволотехнологической машиной под водой (начальный этап проходки с заполнением ствола водой выше уровня грунтовых вод)



Рис. 3. Вид сверху на машину в стволе. Проходка под гидропригрузом

ее гидроизоляции. Новые технологии и оборудование являются как совершенно новыми разработками, так и модернизированными вариантами проверенных способов. Они позволяют снизить продолжительность и стоимость строительства, повысить производительность труда и качество продукции, эффективность использования ресурсов, снизить риски. Одним из главных факторов является обеспечение безопасности труда рабочих.

При строительстве метрополитена проходка вертикальных стволов традиционно является одной из самых сложных задач. В первую очередь речь идет о высоких затратах, связанных с необходимостью применения ручного труда при разработке грунта и возведения обделки, низких темпах проходки, сложности обеспечения безопасности рабочих. Продолжительное время именно этот сегмент остро нуждался в создании эффективных, универсальных, доступных и рентабельных технологий.

**Технология проходки VSM**

Так как инженерно-геологические и гидрогеологические условия Москвы всегда характеризовались как сложные, строительство объектов метрополитена невозможно было произвести без специальных способов (искусственное замораживание, химическое закрепление и тампонаж грунтов, водопонижение и т. д.). Применение спецметодов увеличивало сроки работ, ухудшало экологию участка строительства, а недостаточный контроль нередко приводил к аварийным ситуациям. Отказ от спецметодов при строительстве тоннелей стал возможен с появлением тоннелестроительских механизированных комплексов (ТПМК). После освоения

ТПМК строители получили значительный выигрыш по всем параметрам проходки. А вот технический уровень проходки вертикальных выработок долгое время оставался практически неизменным. Создавалась ситуация, при которой эффективность и темпы строительства подземного объекта в целом тормозила технологическая отсталость в сооружении стволов.

Анализ зарубежного и российского опыта показал, что с трудностями проходки стволов успешно справляются механизированные комплексы. Впервые в отечественной практике комплекс VSM (Vertical Shaft Sinking Machine) фирмы «Herrenknecht AG» был применен компанией «СТИС» в 2006 г. в Санкт-Петербурге при проходке стволов на строительстве главного канализационного коллектора северной части города [5]. В Москве АО «Трансинжстрой» приобрело комплекс «Herrenknecht AG» VSM 7800/5600 для строительства стволов Митинско-Строгинской линии Московского метрополитена.

Комплекс VSM 7800/5600 создавался для проходки стволов способом опускной крепи в водонасыщенных неустойчивых, глинистых и крепких грунтах с прочностью до 100 МПа (табл. 1). Состоит из следующих основных элементов (рис. 1):

- буровая стволотехнологическая машина;
- обделка ствола (железобетонные блоки);
- опускной блок с подъемными лебедками, домкратной системой и крановыми балками;
- система транспортировки и сепарации грунта;
- бентонитная система;
- блок управления и навигации;
- система геодезического контроля.

Сущность технологии заключается в модернизации метода опускной крепи в тиксотропной рубашке путём механизации и автоматизации процессов разработки грунта, выдачи его на поверхность и крепления шахты.

До начала проходки ствол заполняется водой выше уровня грунтовых вод на 1 м для создания гидропригруза в зоне обводнённых неустойчивых грунтов и облегчения их разработки (рис. 2, 3). Уровень воды в стволе необходимо поддерживать в соответствии с диаграммой гидропригруза. Грунт разрабатывается стволотехнологической машиной бурового действия, оснащённой рабочим органом в виде телескопической стрелы с фрез-барабаном поперечного перемещения (рис. 4). Машина может производить разработку под ножевым кольцом опускной кре-

Рис. 4. Стволотехнологическая машина





Рис. 5. Оборудование для сепарации грунта



Рис. 6. Опускные контейнеры с лебёдками, готовая обделка ствола, крановый блок, домкраты задавливания обделки

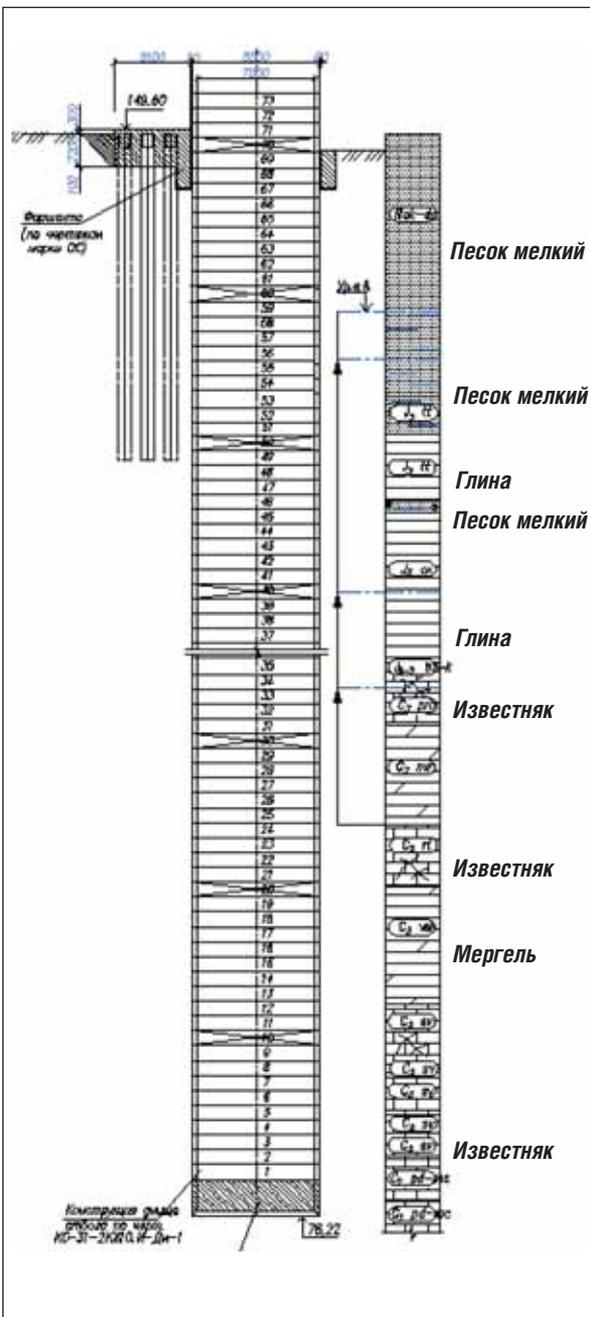


Рис. 7. Профиль ствола ш. 752бис, диаметр 8,5 м, глубина 73 м

пи, что позволяет осуществлять проходку в крепких грунтах.

Одновременно с разработкой осуществляется гидротранспорт грунта из шахты в виде пульпы для последующей сепарации (рис. 5). Вода после очистки снова подводится по трубопроводам в ствол. Грунт сбрасывается в породоприёмник для последующей транспортировки в отвал.

На поверхности на свайные фундаменты устанавливаются три опускных контейнера. В каждом контейнере размещены: две лебёдки (для удержания ствола и машины), гидравлические домкраты, крановый блок с тубинговой балкой, лебёдка энергетических линий (рис. 6).

Обделка ствола – сборная железобетонная. Кольцо высотой 1 м состоит из трёх высокоточных блоков с внутренней металлической гидроизоляцией и резиновыми уплотнителями типа «Лесотто». Блоки обделки устанавливаются при помощи крановых блоков с тубинговыми балками. С 2014 г. обделка изготавливается на заводе АО «Трансинжстрой». Погружение крепи производится посредством давления на неё гидравлических домкратов. Проходка ведётся с применением бентонитовой тиксотропной рубашки. Бентонитовый раствор нагнетается в зазор между стенкой шахты и прилегающим массивом через отверстия в каждом 10-м кольце.

Управление всеми операциями проходческого цикла осу-

ществляется с пульта в блоке управления и навигации на поверхности. Во время всей проходки присутствие персонала в забое не требуется.

#### Применение комплекса при строительстве Московского метрополитена

АО «Трансинжстрой» впервые применило комплекс в 2007 г. для строительства вертикального ствола № 463а диаметром 8,5 м, глубиной 67 м на участке Митинско-Строгинской линии Московского метрополитена от станции «Парк Победы» до реконструируемой станции «Кунцевская» [1, 2]. Технология продемонстрировала значительные преимущества в скорости по сравнению с традиционными методами проходки стволов.

Руководствуясь опытом дебютной проходки, АО «Трансинжстрой» совместно с фирмой «Херренкнехт АГ» произвело работы по усовершенствованию узлов крепления стволопроходческой машины к стволу, систем сепарации, геодезического контроля и навигации.

В 2012–2013 гг. стволопроходческий комплекс был повторно применён при сооружении рабочих и вентиляционных вертикальных стволов ш. № 752 (диаметром 8,5 м, глубиной 73 м) и ш. № 754 (диаметром 6,3 м, глубиной 34 м) на участке Калининско-Солнцевской линии Московского метрополитена от станции «Парк Победы» до станции «Раменки» [4]. Вмещающий массив был представлен слоями неустойчивых, пластичных грунтов, крепких известняков и мергелей. Последние составляли до 50 % от всего массива и располагались неравномерно по длине ствола (рис. 7). Технология продемонстрировала многократное повышение скорости проходки по сравнению с традиционными способами (табл. 2). Рекомендации по основным параметрам проходки разрабатывались Тоннельной ассоциацией России [6].

В 2014–2015 гг. комплексом осуществлялась проходка рабочих и вентиляционных вертикальных стволов ш. № 748 (диамет-

Таблица 2

Технико-экономические показатели проходки стволов (2007–2015 гг.)

Наименование показателей	Комплекс "Herrenknecht AG" VSM 7800/5600					Способ опускной крепи
	Ствол ш. № 463а2007 г.	Ствол ш. № 7522012 г.	Ствол ш. №7542013 г.	Ствол ш. № 7482014 г.	Ствол ш. № 7492015 г.	Ствол ш. № 463 Митинско-Строгинской линии Московского метрополитена 2004–2005 гг.
Глубина, м	67	73	34	68,5	71,5	63
Диаметр, м	8,5	8,5	6,3	8,5	6,3	8,5
Скорость проходки, м/месяц	32	30	35	30	34	11,5
Продолжительность проходки, месяцы	2	2,5	1	1,7*	2,1	5,5
Численность рабочих в смену	20	15	12	12	12	31

\* – проходка 52 м стволопроходческим комплексом

ром 8,5 м, глубиной 68,5 м) и ш. № 749 (диаметром 6,3 м, глубиной 71,5 м) на участке Калининско-Солнцевской линии Московского метрополитена от станции «Третьяковская» до станции «Деловой центр». Стройплощадки находились между р. Москвой и Кутузовским проспектом, со стороны надпойменных террас р. Москвы. В непосредственной близости (36 м) от ствола ш. № 748 располагалась «сталинская высотка» – здание гостиницы «Украина» (рис. 8). Вмещающий массив по глубине стволов распределялся следующим образом: верхняя половина разреза была представлена мелкими песками и глинами; нижняя – среднечными известняками с различной степенью трещиноватости и, глав-

ное, наличием связанных карстовых полостей (рис. 9).

При проходке первого ствола ш. № 748 проявились специфические особенности геологии данного участка г. Москвы, создавшие неожиданные и значительные сложности при проходке. Структурная нарушенность и наличие карста в массиве известняков стали причиной снижения уровня гидропригруза. Потребовалось уточнение инженерно-геологических параметров и адаптация комплекса к данным условиям.

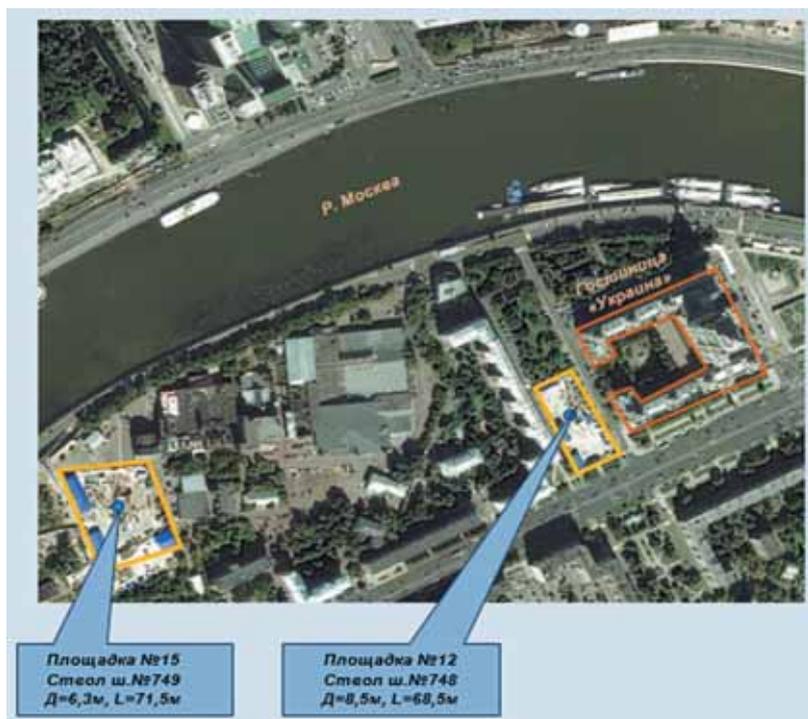


Рис. 8. Расположение строительных площадок ш. № 748 и 749

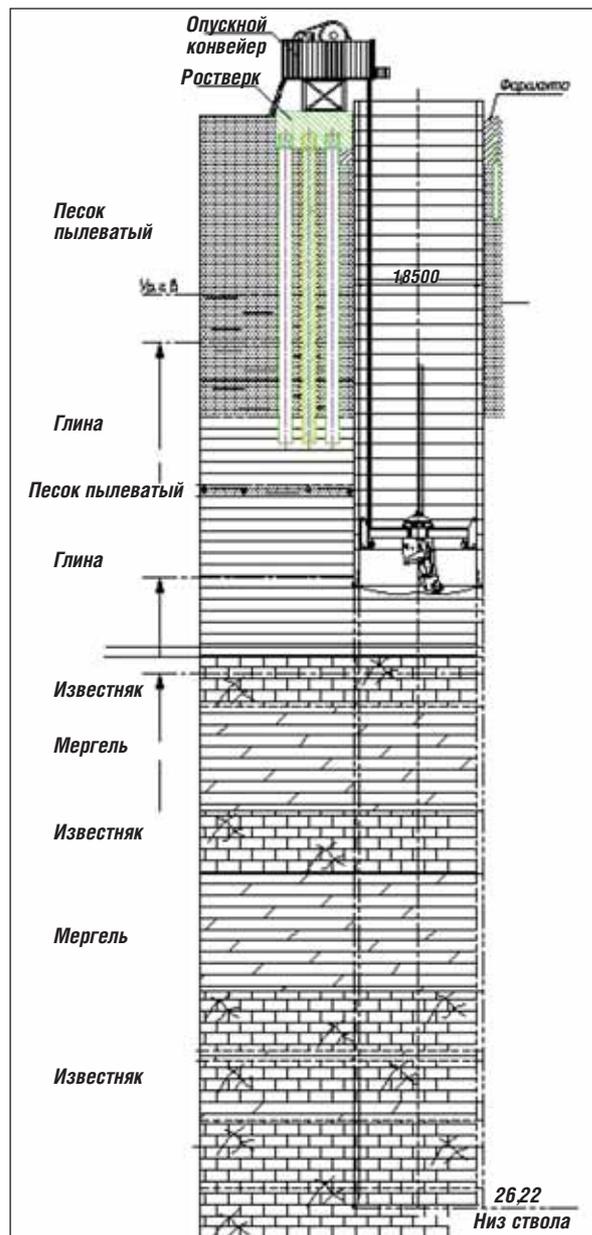


Рис. 9. Профиль ствола ш. № 748, диаметр 8,5 м, глубина 68,5

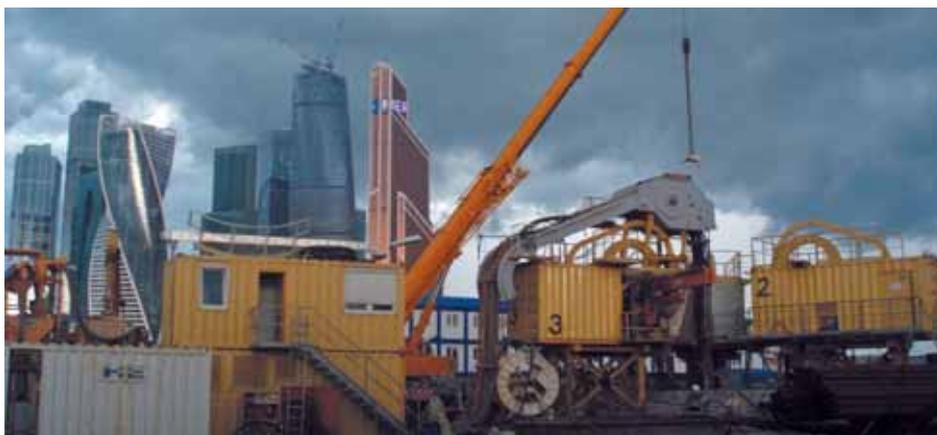


Рис. 10. Комплекс VSM на строительной площадке № 15 ствола ш. № 749

Более детальное изучение и оценка геологии участка на стадии проектирования проходческих работ на втором стволе ш. № 749 (рис. 10) позволили составить прогноз развития ситуации и разработать организационно-технологические мероприятия по усовершенствованию составляющих технологии VSM. В частности, выполнено увеличение площади уплотнительной манжеты ножевого кольца для её раскрытия при входе в зону нарушенных грунтов, повышение вязкости бентонитового раствора специальными химическими добавками, изменение конструкции свайных ростверков. Важным фактом явилось то, что даже в таких сложных условиях комплекс продемонстрировал универсальность и возможности к адаптации в кратчайшие сроки с минимальными затратами. Мероприятия коснулись только «периферийных» составляющих технологии. Изменять машину, оборудование и системы комплекса не потребовалось.

### Результаты практики использования технологии VSM

В ходе использования комплекса в 2007–2015 гг. были достигнуты показатели (в сравнении с традиционной технологией опускной крепи), указанные в табл. 2.

Следующие преимущества технологии проходки шахтных стволов с помощью технологии VSM получили подтверждение на практике.

1. Механизация работ обеспечивает максимальный уровень безопасности за счёт отсутствия персонала в призабойной зоне.

2. Многократный рост темпов сооружения ствола достигается с помощью отказа от спецметодов, экономии времени на подготовительные работы, общим ростом производительности труда за счёт механизации основных работ. Как следствие, в 2–3 раза сокращаются сроки строительства ствола.

3. Нет необходимости менять способы проходки при изменении горно-геологических условий (универсальность технологии).

4. Количество необходимого обслуживающего персонала сведено к минимуму.

5. Сооружение объекта проходит без всякого влияния на экологическую обстановку и гидрогеологический режим участка. Экологическая безопасность также связана с отказом от специальных способов закрепления грунтов.

6. Компактность элементов комплекса позволяет применять его в условиях плотной городской застройки.

7. Снижается стоимость строительства за счёт сокращения общего времени сооружения объекта.

### Выводы

По результатам применения технологии следует сделать следующие важные выводы.

1. Многолетняя практика использования стволопроходческих комплексов позволяет говорить о достижении значительного прогресса в развитии технологии проходки стволов, где ранее господствовали только традиционные методы.

2. Технология должна внедряться и получать развитие на всех уровнях строительства подземных сооружений (проектирование и изыскания, нормативное обеспечение, ценообразование, контроль качества, выпуск комплектующих) с целью создания комплексного подхода к сопровождению проходки и дальнейшего усовершенствования.

3. На стадии проектирования необходимо уделять особое внимание анализу инженерно-геологических условий и процессов и составлению прогноза влияния их на проходческие работы. Это позволит успешно адаптировать технологию, а также значительно снизить геотехнические риски.

4. Непрерывное овладение строительными организациями современными технологиями и практическое применение их на постоянной основе стали неотъемлемыми составляющими освоения подземного пространства мегаполисов.

### Заключение

В настоящее время в мире построено более 90 стволов с помощью технологии VSM. Только в Москве с 2007 г. пройдено 12 стволов в различных горно-геологических условиях, общей глубиной порядка 800 м, со скоростью до 3 м/сут. И темпы строительства постоянно возрастают (11 стволов были сооружены в период с 2012 по 2015 г.).

В практике отечественного метростроения технология не осталась на уровне однократного опытного применения. Помимо компании «СТИС» (Санкт-Петербург) и АО «Транс-

инжстрой» (Москва), комплекс VSM поставлен на вооружение ОАО «Мосметрострой».

Комплекс обладает неоспоримыми преимуществами перед традиционными технологиями. А широкое его использование свидетельствует о стремлении отечественных подземных строителей к внедрению прогрессивной, эффективной и производительной техники. Спрос на технологию позволяет говорить о сформировавшемся качественно новом подходе к решению проблем проходки вертикальных шахтных стволов.

### Ключевые слова

Шахтный ствол, стволопроходческий комплекс с опускной крепью.

*Mine shaft, vertical shaft sinking machine.*

### Список литературы

1. Елгаев С. Г., Гончаров А. А., Бычков Н. Н., Ломоносов С. М. *Прогрессивные технологии сооружения вертикальных шахтных стволов // Метро и тоннели. – 2009. – № 1, – С. 33–35.*
2. Елгаев С. Г., Гончаров А. А., Бычков Н. Н., Ломоносов С. М. *Опыт строительства вентиляционного ствола участка Митинской Строгинской линии Московского метрополитена с применением стволопроходческого комплекса // Тр. Межд. науч.-техн. конф. «Современная механизация работ при строительстве тоннелей и освоения подземного пространства крупных городов». – М. – 2009. – С. 27–28.*
3. Синицкий Г. М., Мазин С. В., Ломоносов С. М. *Стволопроходческие комплексы: перспективы внедрения в практику подземного строительства городов // Метро и тоннели. – 2012. – № 1. – С. 26–27.*
4. Потапов М. А., Потапова Е. В. *Сооружение вертикальных стволов № 752 Ø 8,5 м и № 754 Ø 6,3 м с применением стволопроходческого комплекса на участке Калининско-Солнцевской линии Московского метрополитена // Тр. Межд. науч.-техн. конф. «Основные направления развития инновационных технологий при строительстве подземных сооружений на современном уровне. Тенденции. Проблемы. Перспективы». – М.: ТАР – 2013. – С. 180–186.*
5. VSM: доступ на заданную глубину. Опыт компании «СТИС» в проходке шахтных стволов в сложных горно-геологических условиях с использованием современной технологии VSM // РОБТ. – 2010. – № 6. – С. 4–11.
6. *Технологический регламент на сооружение рабоче-вентиляционного ствола № 752-бис Калининско-Солнцевской линии Московского метрополитена стволопроходческим комплексом СПК «Херренкнехт» // Тоннельная ассоциация России. – 2013. – 70 с.*

### Для связи с авторами

Потапов Михаил Анатольевич  
Potapov\_ma@mail.ru  
Потапова Елена Владимировна  
Elka23sp@yandex.ru  
Potapova@smu-162.tinso.ru



# С НАМИ СТРОИТЬ ЛЕГКО!



**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО подземных частей технически сложных и уникальных объектов:**

подземные автостоянки;  
транспортные развязки;  
гидротехнические сооружения

**ОГРАЖДЕНИЕ КОТЛОВАНОВ**

**ЗАКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ**

**УСИЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТОВ**

**ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ на памятниках истории и архитектуры**



реклама



реклама

г. Пермь, ул. Кронштадтская, 35 тел.факс: (342) 236 90-70

ИЖЕВСК ::::: (3412) 56-62-11	САМАРА ::::: (846) 922-56-36
КРАСНОДАР ::::: (861) 240-90-82	САНКТ-ПЕТЕРБУРГ :: (812) 923-48-15
КРАСНОЯРСК ::::: (391) 208-17-15	ТЮМЕНЬ ::::: (3452) 74-49-75
КАЗАНЬ ::::: (843) 296-66-61	УФА ::::: (917) 378-07-48
МОСКВА ::::: (495) 643-78-54	ЧЕЛЯБИНСК ::::: (351) 223-24-53



**ОАО «НЬЮ ГРАУНД»**

[www.new-ground.ru](http://www.new-ground.ru)

[info@new-ground.ru](mailto:info@new-ground.ru)



# СБОРНАЯ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМАЯ ОБДЕЛКА ИЗ ВЫСОКОТОЧНЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ДВУХПУТНЫХ ТОННЕЛЕЙ МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

## WATERPROOF HIGH-PRECISION SEGMENT LINING FOR DOUBLE TRACK TUNNELS OF THE MOSCOW SUBWAY

И. Н. Хохлов, Ю. Е. Соломатин, НИЦ ОПП АО «Мосинжпроект», Москва

I. N. Hohlov, Y. E. Solomatin, Mosingproekt, Moscow

Выделены этапы подготовки к массовому производству высокоточных блоков обделки для двухпутных тоннелей. После анализа исходных данных произведено конструирование блоков обделки с выполнением опалубочных чертежей, с расчетом обделки на проектные нагрузки и с выпуском чертежей армирования. Подготавливаются статические испытания для сертификации конструкции обделки.

*Highlighted preparations for mass production of high-precision segment lining for double-track tunnels. After analyzing the source data was design lining segments with the execution of the formwork drawings, with calculation of segments project load and with the release of reinforcement drawings. Static tests are prepared for certification of lining construction.*

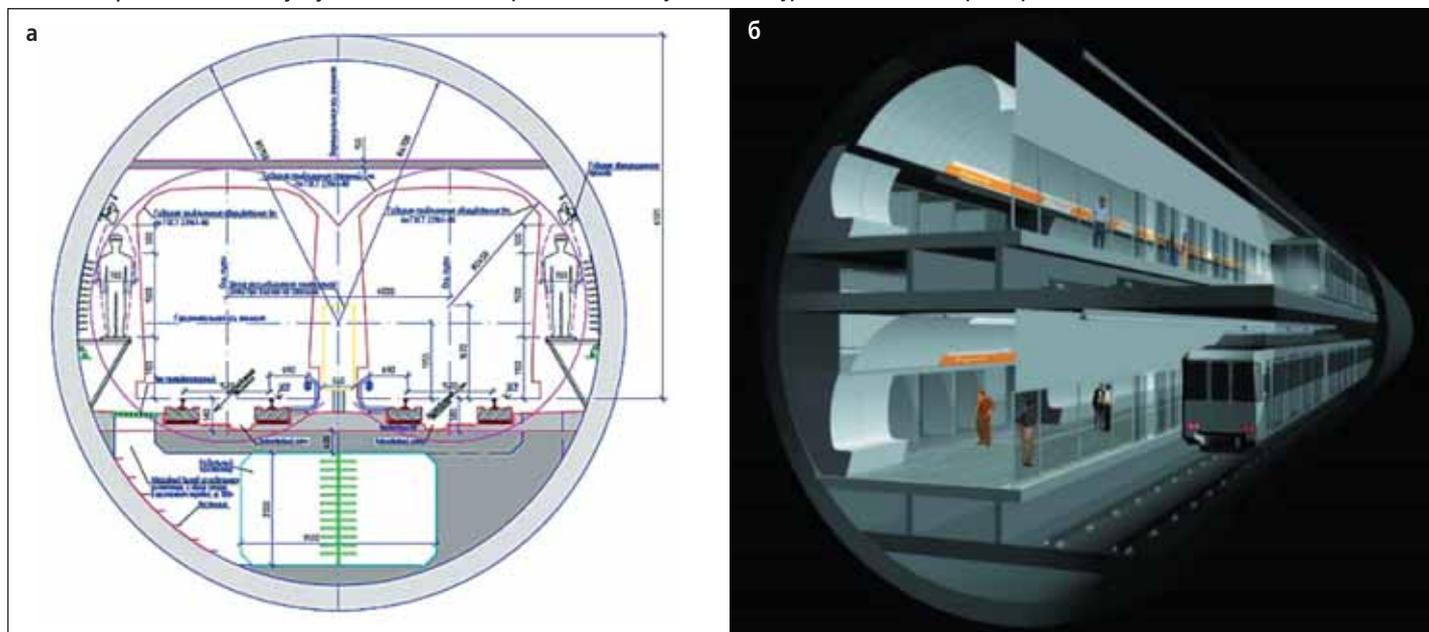
В последние десятилетия, и особенно в настоящее время, происходит бурное развитие транспортной инфраструктуры крупных городов. При этом осуществляется интенсивное строительство транспортных сооружений, в том числе сооружений метрополитена. Постоянное сокращение свободных территорий для строительства метрополитена в условиях окружающей застройки, а также необходимость устройства пересадочных узлов между существующими и вновь возводимыми линиями приводит к необходимости устройства участков новых линий закры-

тым способом. Принятая в Москве программа развития метрополитена предусматривает сооружение отдельных участков линий с двухпутными тоннелями (рис. 1). Из опыта строительства и эксплуатации метрополитенов за рубежом в таких городах как Дюссельдорф, София, Порто, Сан-Паулу, Мадрид, Рим, Барселона, известно, что двухпутные тоннели имеют выигрыш по скорости возведения и занимают меньший объем в плане, что особенно важно при развитии метрополитена в застроенной части города Москвы на Кожуховской линии и Третьем пересадочном контуре,

где большая часть тоннелей планируется в двухпутном варианте.

Одной из ответственных задач является проектирование конструкций сборной водонепроницаемой железобетонной обделки из высокоточных блоков заводского изготовления. С одной стороны, такие конструкции применяются в Москве впервые, с другой – не смотря на имеющийся опыт сооружения тоннелей большого сечения ТПМК (Лефортовский и Серебряноборский тоннели, наклонный эскалаторный тоннель станции «Марьино Роща»), проектирование опалубочных и арматурных

Рис. 1. Поперечное сечение двухпутных тоннелей: а – с расположением путей в одном уровне; б – «винчестерное» расположение



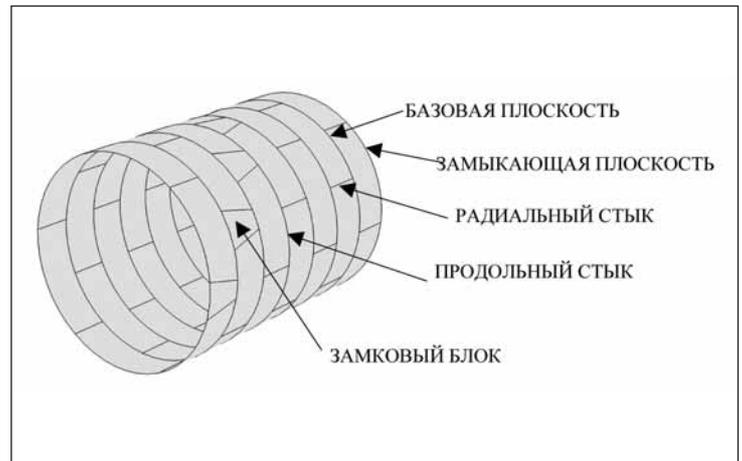
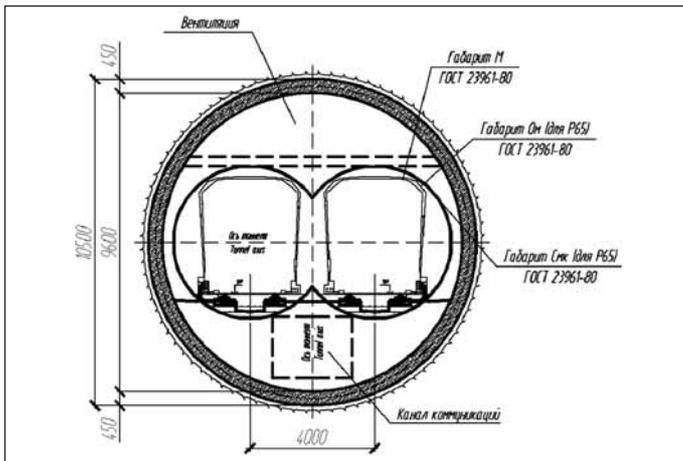


Рис. 2. Поперечное сечение двухпутного тоннеля с внутренним диаметром 9,6 м

Рис. 3. Принципиальная схема геометрии кольца обделки

чертежей блоков обделок такого типа выполнялось всегда зарубежными фирмами, такими как «PSP» (Германия), «Hatch Mott MacDonald» (Канада) и др. АО «Мосинжпроект» был приобретен ТПМК диаметром 10,82 м для строительства двухпутных тоннелей. Опалубочные и арматурные чертежи блоков высокоточной обделки, на основании которых были изготовлены формы для блоков и ведется уже сейчас изготовление блоков на заводе «Моспромжелезобетон», были выполнены НИЦ ОПП АО «Мосинжпроект» (руководитель д. т. н., проф. В. Е. Меркин).

Разработка технической документации на блоки высокоточной тоннельной обделки – многоэтапный процесс, включающий в себя:

- анализ исходных данных (плана, профиля участка трассы, геологических условий заложения тоннеля, определение оптимальных размеров поперечного сечения по условиям размещения оборудования, вентиляции и т. д.);
- определение списка нормативных и специальных источников для учета в проектировании и обоснования конструкции;
- назначение толщины блоков, внутренне-го и наружного диаметров тоннеля исходя из геологических условий и функционального назначения тоннеля;
- дизайн кольца обделки и выпуск опалубочных чертежей;
- выбор расчетной модели, назначение расчетных сечений и статический расчет конструкции тоннеля, проверку сечений по предельным состояниям первой и второй групп;
- проектирование арматурных чертежей;
- подготовку к сертификации и выпуск опытной партии блоков;
- сертификацию конструкций;
- серийный выпуск блоков на заводе ЖБИ.

На первом этапе работы были рассмотрены геологические и гидрогеологические условия расположения тоннеля. Трасса первоочередного участка, относящегося к Кожуховской линии, проходит по застроенной городской территории от переходной камеры за станцией «Косино» до стан-

ции «Авиамоторная». Глубина заложения тоннелей переменная на разных участках и изменяется в пределах от 10 до 40 м. Геологические условия участков сооружения тоннелей характеризуются высокой сложностью, вызванной залеганием неустойчивых текучепластичных и водонасыщенных грунтов (четвертичных песков, супесей и суглинков), в наиболее глубоких участках сечение тоннеля частично расположено в плотных юрских глинах.

Внутренний диаметр двухпутного тоннеля был принят равным 9,6 м исходя из возможности движения в нем двух составов, а также размещения необходимого технологического оборудования (рис. 2).

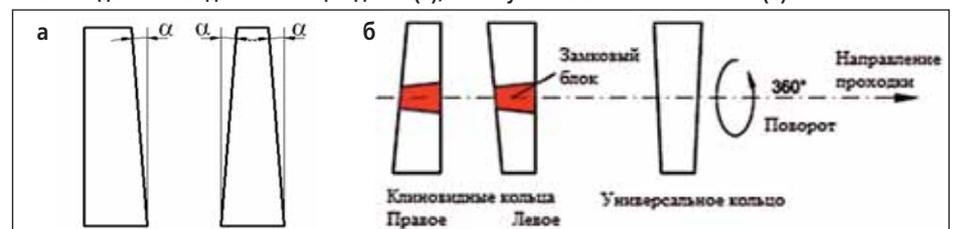
Согласно имеющемуся опыту проектирования и рекомендациям, приводимым в различных источниках, толщину блоков сборной водонепроницаемой высокоточной обделки следует принимать от 1/20 до 1/22 от внутреннего диаметра. При этом данную величину надо проверять на предварительной стадии расчетом, чтобы убедиться в том, что она будет удовлетворять условиям прочности и рационального конструирования арматурных каркасов блоков в конкретных геологических условиях, так как при недостаточной толщине блоков будет иметь место перерасход рабочей арматуры. Для данных условий толщина блоков была принята с некоторым запасом равной 450 мм. Исходя из предварительных расчетов, при такой толщине обделки относительное содержание арматуры не будет превышать 1,5–2 %, что считается удовлетворительным для данного типа конструкций. Наружный диаметр кольца обделки при этом составил  $10,5 \text{ м} = D_{\text{вн}} + 2T_{\text{блоков}}$ . Ширина блоков об-

делки выбирается таким образом, чтобы она обеспечивала необходимые радиусы кривизны трассы, а также удобство монтажа и скорость проходки тоннеля. Большая ширина кольца выгодна исходя из скорости возведения тоннеля. С другой стороны, слишком большая ширина кольца приводит к увеличению массы блоков и возможности вписывания тоннеля в радиусы кривых малых величин. Ширина блоков в данном случае была принята равной 1,8 м, что обеспечивало строительство тоннеля на кривых в плане радиусом не менее 400 м, вертикальных кривых не менее 3000 м. Величина 1,8 м хорошо согласуется с уже имеющимися сооруженными тоннелями большого сечения, где ширина блоков составляла в разных случаях 1,7–2 м.

Следующим этапом проектирования является непосредственно конструирование блоков обделки и выпуск опалубочных чертежей блоков – так называемый «дизайн кольца». В данном проекте принципиальным вопросом являлось также определение схемы геометрии кольца (рис. 3): с односторонней клиновидностью (т. н. «правое – левое») или двухсторонней (т. н. «универсальное» кольцо), рис. 4а.

Каждый из двух вариантов имеет свои недостатки и преимущества. Основным достоинством «универсального» кольца является наличие одного комплекта форм, так как положение замкового блока в таком кольце может изменяться в пределах от 0 до 360° (рис. 4б). Стоит учитывать, что при сооружении тоннеля на сложных участках трассы, а также на кривых это может ухудшить качество монтажа обделки. Геометрическая схема колец с односторонней клиновидностью «правое – левое» в этом пла-

Рис. 4. Виды клиновидности колец обделки (а); схема установки замкового блока (б)



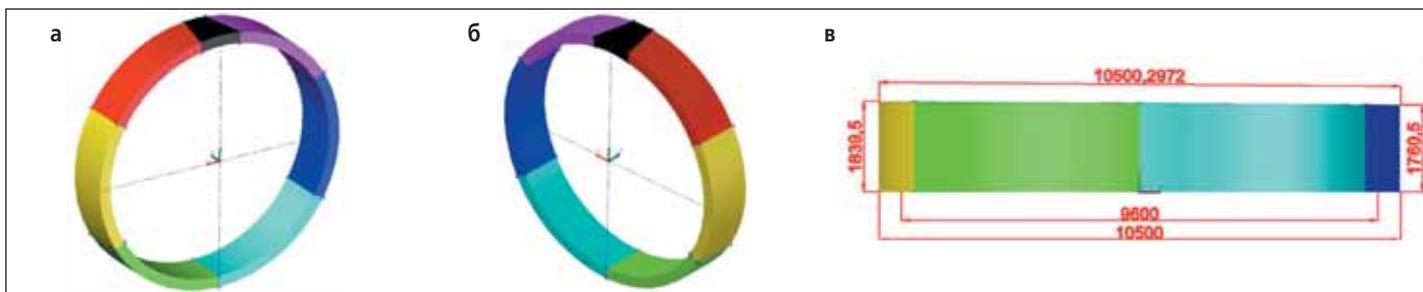


Рис. 5. Трехмерная модель клиновидного кольца: а – правое кольцо; б – левое кольцо; в – вид сбоку

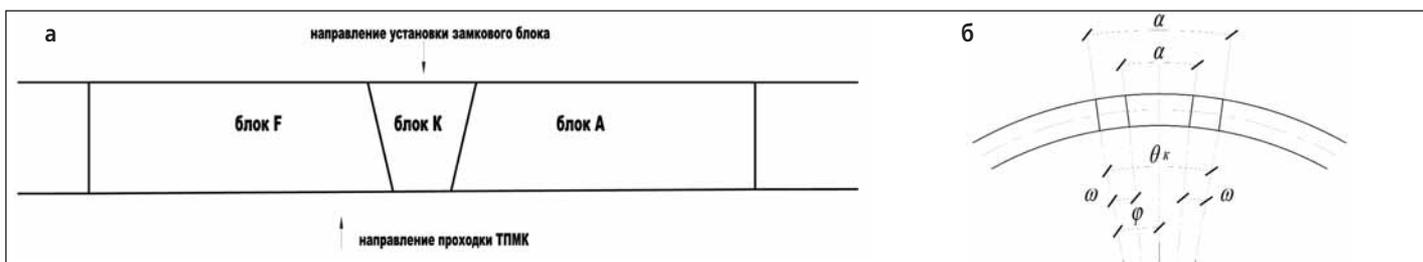


Рис. 6. Схема установки замкового блока (а); схема скоса плоскостей замкового блока (б)

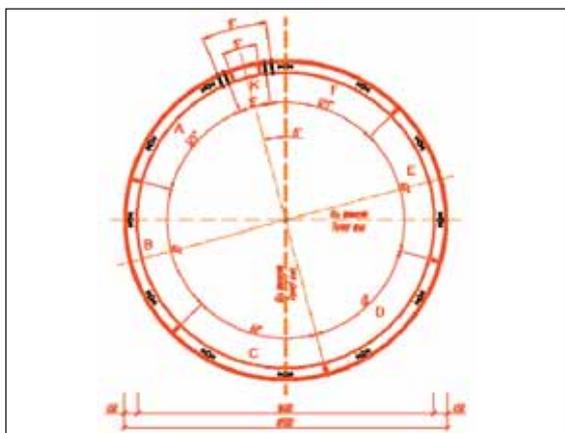


Рис. 7. Схема разбивки кольца обделки на блоки

не более выгодна с точки зрения качества и удобства монтажа блоков, так как замковый блок всегда расположен выше горизонтального диаметра, однако существует необходимость изготовления не менее двух комплектов форм. В данном случае предпочтение было отдано, прежде всего, качеству и удобству монтажа колец, поэтому проектировались два кольца: правое и левое.

При расчете клиновидности кольца следует учитывать возможность отклонения ТПМК от проектной трассы и последую-

щую корректировку его положения с выходом на проектную ось (рис. 5). В данном случае величина кривой может быть предельной –  $R = 240$  м.

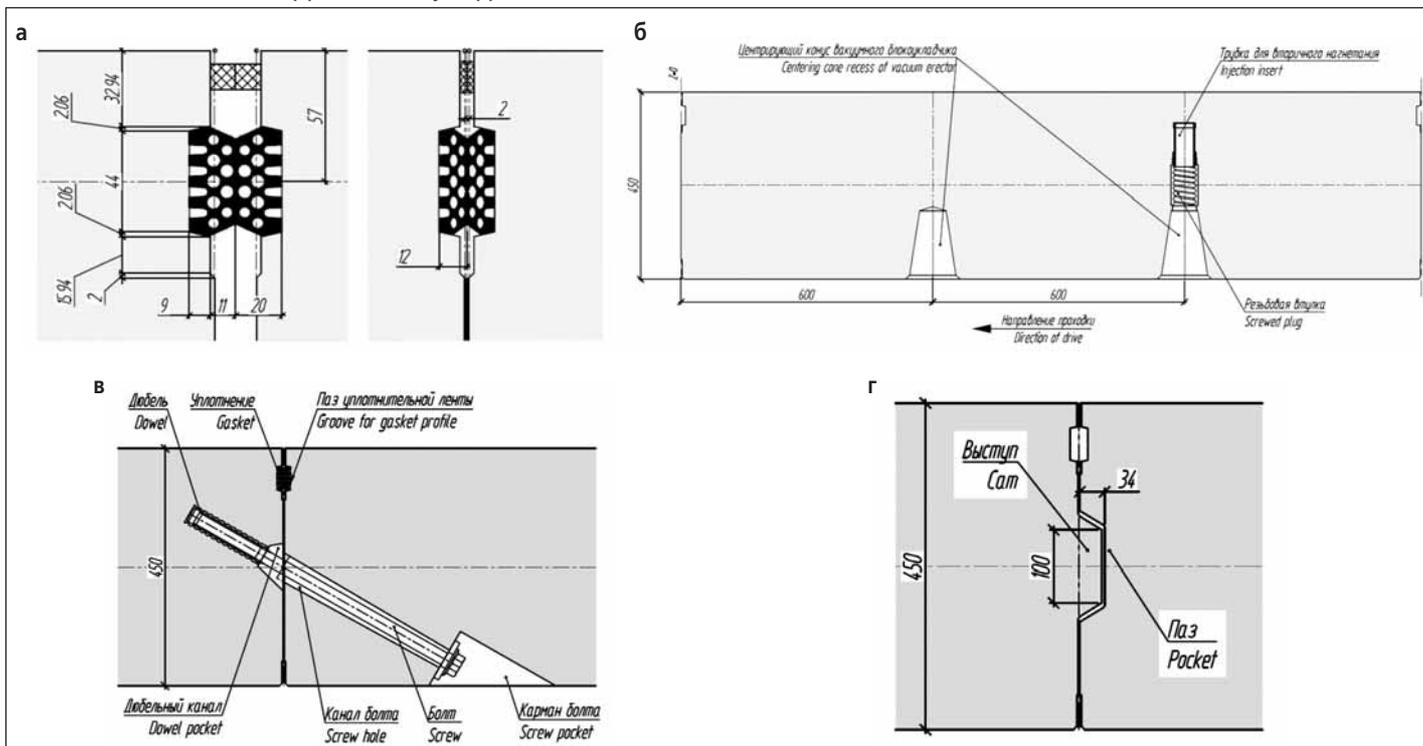
Учитывая принятые диаметры кольца, его ширину и радиус кривизны тоннеля в плане, был выполнен следующий расчет клиновидности.

Исходные параметры:  $R = 240$  м;  $W = 1,8$  м;  $D = 10,5$  м.

Клиновидность кольца:  $C = 79$  мм.

Убедившись, что выбранная клиновидность полностью удовлетворяет требованиям построения трассы в плане и профиле, приступают к построению трехмерной модели кольца (см. рис. 5), разделенного на

Рис. 8. Размещение уплотнительных рамок и лент в стыках блоков (а); закладные конусы центрирования вакуумного захвата (б); каналы и выемки под болтовое соединение, дюбели (в); пазы и выступы (г)



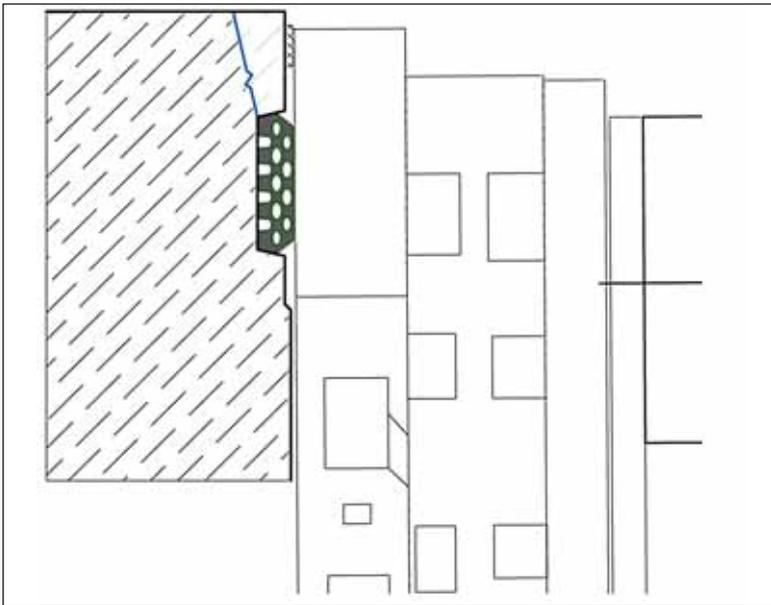


Рис. 9. Схема скалывания блока при давлении щитовых домкратов

блоки, и определяют координаты характерных точек блоков в пространстве.

Следующим важным шагом является разбивка кольца на блоки, выбор угла установки замкового блока, выбор угла и шага установки болтовых связей и выступов, конструирование стыков.

Замковые блоки, устанавливаемые при монтаже в продольном направлении, должны иметь углы скоса, обеспечивающие наименьшее влияние продольной силы, возникающей в кольце под действием собственного веса (рис. 6).

Разбивка на блоки в кольце производится с учетом размеров замкового блока таким образом, чтобы при повороте на 1/2 блока (30°) соседние кольца имели «перевязку» стыков, которая обеспечивает геометрическую неизменяемость системы колец и более равномерное распределение внутренних усилий в конструкции. В кольце было выделено четыре нормальных блока, два предзамковых и один замковый блок – такое деление (6+1) весьма распространено для колец с односторонней клиновидностью (рис. 7).

Особенностью конструкции сборной высокоточной водонепроницаемой обделки является наличие упругих уплотнений в стыках блоков, выемок и каналов для установки болтов, закладные детали для центрирования вакуумного захвата и дюбелей, а также наличие пазов и выступов, служащих для точного совмещения блоков соседних колец в процессе монтажа (рис. 8). Расположение этих элементов выбирается таким образом, чтобы они четко совпадали при изменении положения замковых блоков в соседних кольцах.

Особое внимание уделяется свойствам упругих уплотнений стыков, обеспечивающих водонепроницаемость колец. Следует учитывать также, что особую роль играет жесткость уплотнительного профиля. В случае если он имеет слишком

большую жесткость, могут иметь место сколы краев блоков при давлении щитовых домкратов (рис. 9). Выбранный профиль специальным расчетом проверяется на возможность образования сколов краев блоков.

Давление от действия щитовых домкратов стараются максимально распределить по торцевым поверхностям колец обделки, для чего в замыкающих плоскостях устанавливают специальные распределяющие давление прокладки из ДВП (рис. 10), располагаемые таким образом, чтобы они строго совпадали с местами приложения нагрузок от щитовых домкратов.

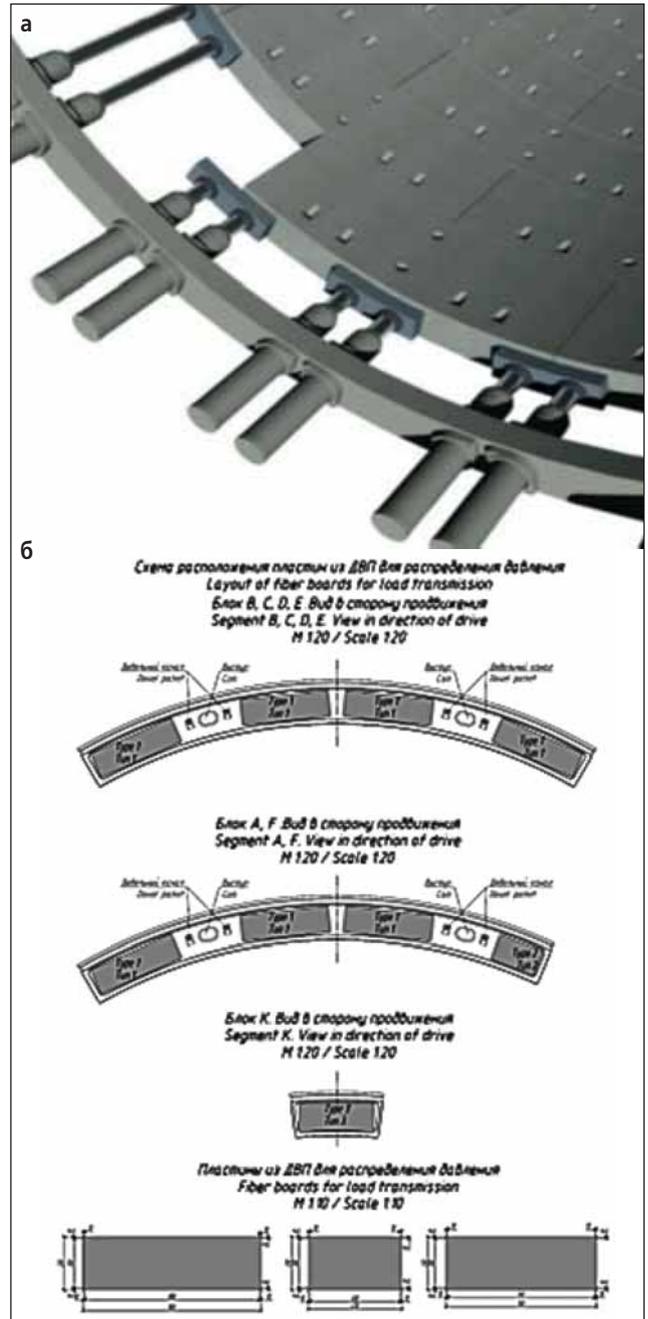


Рис. 10. Расположение домкратов при монтаже кольца (а); установка упругих распределяющих прокладок в замыкающих плоскостях блоков (б)

Рис. 11. Формы блоков обделки, выполненные на основании опалубочных чертежей НИЦ ОПП (завод МПЖБ, октябрь 2015 г.)



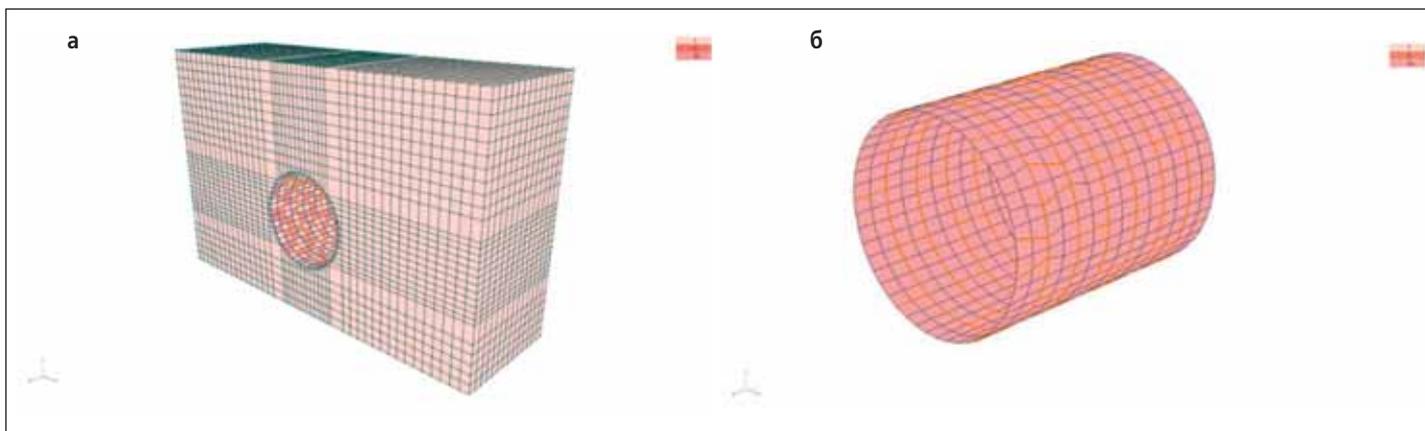


Рис. 12. Конечноэлементная модель системы «обделка тоннеля – вмещающий массив»

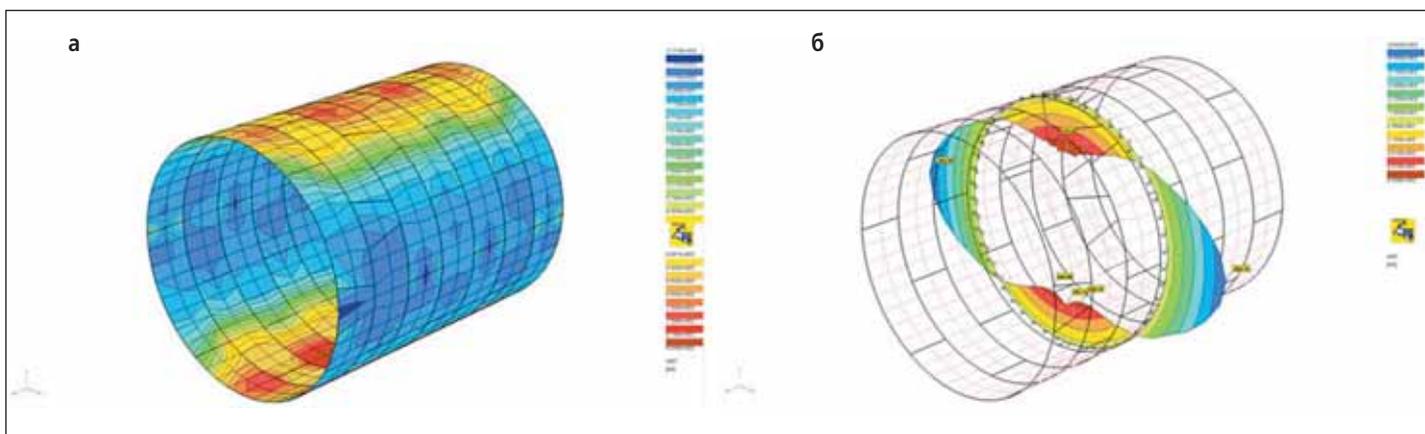


Рис. 13. Распределение внутренних усилий в сечениях обделки: а – изополя; б – изгибающие моменты в характерном сечении по длине тоннеля

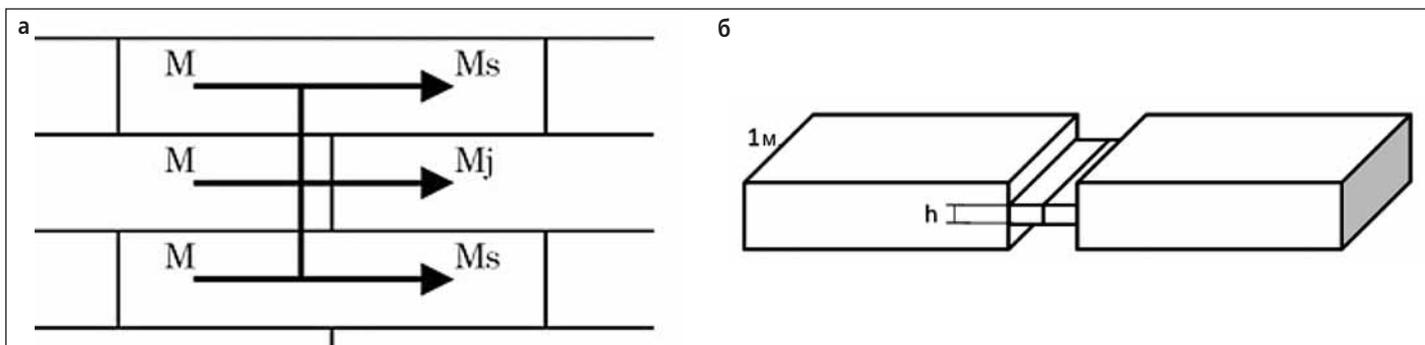


Рис. 14. Схема передачи изгибающего момента на соседние кольца (а); схема расчета стыка по Янсену (б)

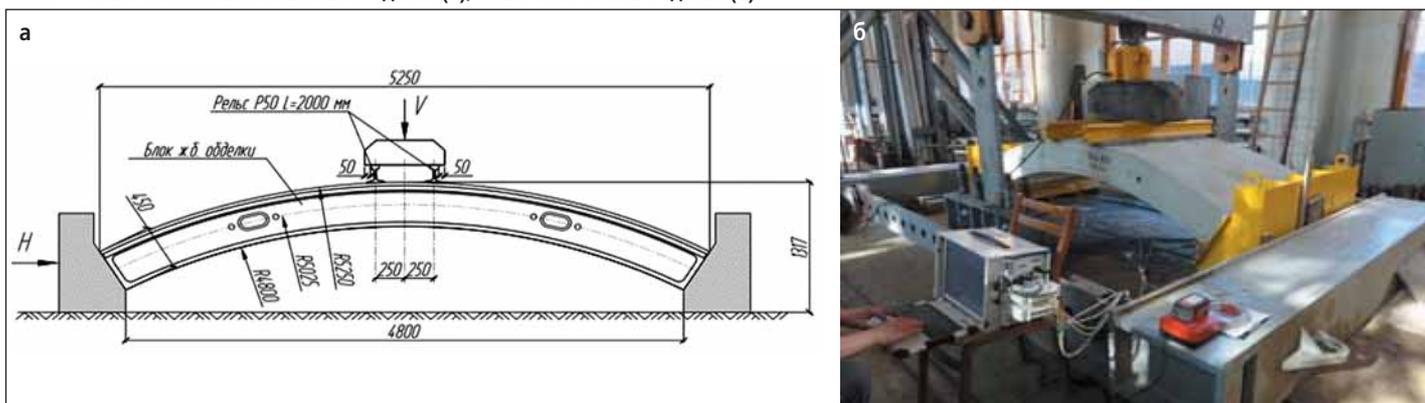
Учет вышеперечисленных особенностей проектирования данного типа конструкции позволяет выполнить опалубочные чертежи блоков обделки, которые пе-

редаются заводу-изготовителю форм блоков. В данном случае эти работы были поручены фирме Herrenknecht Formwork, результатом работы которой были изго-

товленные формы обделки диаметром 10,5/9,6 м (рис. 11).

Наряду с разработкой геометрии блоков и дизайном кольца наиболее ответствен-

Рис. 15. Схема статических испытаний обделки (а); испытание блоков обделки (б)



ной процедурой является также расчет обделки на проектные нагрузки и разработка пространственных арматурных каркасов. Для этого в наиболее характерных с точки зрения нагрузок (горного и гидростатического давления) местах трассы намечаются расчетные сечения. По имеющимся характеристикам грунтов и материалов конструкции выполняется построение пространственной расчетной модели по методу конечных элементов (рис. 12).

Результаты статических расчетов (рис. 13) позволяют выполнить подбор армирования сечений железобетонных элементов обделки на основании действующих в РФ норм и правил проектирования.

Стоит отметить важную особенность выполняемого расчета конструкций – учет упругости стыков, имеющих пониженную изгибную жесткость (рис. 14а). Для учета жесткости стыков применяется модель стыка с переменной жесткостью по Янсену (Janssen joint) (рис. 14б). Изгибающий момент, который не может быть в полной мере воспринят стыком, передается на соседние кольца, где стык в данном уровне отсутствует (что обусловлено перевязкой стыков), см. рис. 14. Передача изгибающего момента на соседние кольца реализуется благодаря сохраняющимся усилиям сжатия тоннеля в продольном направлении от щитовых домкратов, наличием пазов и выступов в обделке, а также благодаря наличию болтовых связей и их предварительному напряжению при затяжке болтов.

Результатом данного этапа работ является выпуск чертежей армирования блоков и передача их на завод-изготовитель блоков обделки. Следующим шагом является подготовка к сертификации конструкций, в ходе которой выпущенная опытная партия блоков подвергается статическим испытаниям (рис. 15) и испытаниям на огнестойкость. На завод перед изготовлением опытной партии передаются временные технические условия и регламенты изготовления блоков, в которых содержатся рекомендации и основные требования к технологическим процессам изготовления блоков по конвейерной технологии.

В ходе статических испытаний конструкций моделируется фактическое напряженное состояние, то есть нагрузки прикладываются таким образом, чтобы момент и продольная сила, возникающие в блоке при испытаниях, соответствовали внутренним усилиям по расчету. Нагружение блока при испытаниях проводится до его разрушения с фиксацией перемещений и раскрытия трещин на каждом из этапов изменения нагрузок. В случае если блок разрушается при нагрузках больших, чем заявлено в программе испытаний, сертификация считается успешной. После выдачи сертификатов на конструкцию блоков завод вправе приступить к серийному выпуску продукции.



Рис. 16. Установка датчиков измерения напряжений бетона и арматуры в блоках обделки

Учитывая высокую степень ответственности сооружения, а также новизну принимаемых технических решений, принято решение также оснастить блоки измерительными датчиками, которые будут фиксировать напряжения в бетоне и арматуре. Данные датчики, изготавливаемые специализированной фирмой, будут монтироваться на арматурном каркасе (датчики измерения напряжения арматуры) и устанавливаться в формах (датчики измерения напряжений в бетоне) перед бетонированием блоков (рис. 16). По трассе тоннеля в самых неблагоприятных с точки зрения НДС обделки участках планируется устройство замерных станций, где мониторинг состояния конструкций будет вестись регулярно на протяжении всего периода эксплуатации, начиная с момента монтажа кольца. Данный подход позволит внести корректировку в проект в случае необходимости в процессе строительства, как в сторону облегчения, так и в сторону усиления конструкций в зависимости от результатов мониторинга. Полученные данные позволят также оптимизировать конструктивные решения обделок на других участках метрополитена в схожих условиях.

В настоящее время работа по созданию сборной железобетонной обделки из высокоточных блоков заводского изготовления прошла практически все стадии подготовки к массовому производству. В ближайшее время данная конструкция будет сертифицирована и первая партия серийных блоков, предназначенная для установки в тоннеле, будет оснащена измерительной аппаратурой.

#### Ключевые слова

Конструкция обделки, расчет нагрузок на блок.

*Lining construction, calculation of segments project load.*

#### Список литературы

1. СП 120.13330.2012 «Метрополитены».
2. ГОСТ Р 54257-2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования.
3. СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
4. СП 28.13330.2012 «Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция».
5. СТО НОСТРОЙ 2.27.19-2012 «Сооружение тоннелей тоннелепроходческими механизированными комплексами с использованием высокоточной обделки».
6. В. В. Чеботаев, А. А. Кубышкин. Расчетное моделирование статической работы сборных железобетонных обделок с перевязкой швов, Труды ЦНИИС, Вып. 207 (Москва 2002).
7. В. Е. Меркин, В. П. Самойлов. Руководство по проектированию и строительству тоннелей щитовым методом. Перевод с английского с дополнениями и комментариями (Москва 2009 г.).
8. Инструкция пользователя Z SoilPC 2012 manual. Zace Services Ltd Report 1985–2008. Lausanne: Elmeppress International.
9. Maidl B., Herrenknecht M., Anbeuser L. Mechanised Shield Tunneling, Ernst & Sohn, 1996.
10. Maidl B., Herrenknecht M., Maidl U., Webrmeyer G. Mechanised Shield Tunneling, 2nd Edition. Ernst & Sohn, 2012.
11. Wittke W. Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling, WBI, 2007.
12. Guidelines for the design of shield tunnel lining. Official report of international tunneling association.

#### Для связи с авторами

Хохлов Иван Николаевич  
nizta@inbox.ru  
Соломатин Юрий Евгеньевич  
work.solomatin@gmail.com

# СОСТОЯНИЕ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ПО РАСЧЁТУ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

## STATUS OF NORMATIVE DOCUMENTS ON THE CALCULATION OF TRANSPORT STRUCTURES ON SEISMIC EFFECTS

**Е. Н. Курбацкий**, д. т. н., профессор кафедры мостов и тоннелей Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), член экспертной комиссии по сейсмостойкому строительству, член экспертного совета ВАК  
**Е. А. Пестрякова**, ассистент кафедры мостов и тоннелей Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ)

**E. N. Kurbatskiy**, professor, Doctor of Engineering, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)  
**E. A. Pestriakova**, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)

Представлен критический анализ документов «Свод правил СП 14.13330.2014 Строительство в сейсмических районах СНиП II–7–81\*» и «Свод правил. Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования. Проект. СП 14.13330.2014 «СНиП II–7–81\*». Отмечается, что в представленных нормативных документах содержится устаревшая информация, соответствующая середине прошлого века. Не учитывается современный уровень развития науки и знаний в области расчёта сооружений на сейсмостойкость. В рецензируемых документах задаётся устаревшая исходная информация, которая была получена при использовании небольшого количества акселерограмм землетрясений, часть из которых была записана в аналоговой форме на фотоплёнке. Констатируется, что в настоящее время проектировщики не обеспечены нормативными документами, позволяющими проектировать сейсмостойкие сооружения в районах с повышенной сейсмической активностью.

*A critical analysis of the document «Code SP 14.13330.2014 Construction in seismic areas SNIP II–7–81\*» and «Set of Rules. Traffic construction in seismic areas. Design Rules. Project. SP 14.13330.2014 «SNIP II–7–81\*». It is noted that the presented normative documents contain outdated information corresponding to the middle of the last century. Documents do not match the current level of development of science and knowledge in the field of calculation of structures for seismic stability. In the analyzed papers old seismic input information is used. This information has been obtained by using a small number of earthquakes accelerograms recorded in analog forms. At present the designers are not provided Regulations for the design of earthquake-proof structures in areas with high seismic activity.*

### Введение

В соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 30 декабря 2009 г. N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» национальные стандарты и своды правил, включенные в перечень, указанный в статье 6, подлежат ревизии и, в необходимых случаях, пересмотру и (или) актуализации, не реже, чем каждые пять лет.

Вступившие в силу с 1 июля 2015 г. нормы СП 14.13330.2014 «СНиП II–7–81\* «Строительство в сейсмических районах» являются неудачной актуализацией устаревшего свода правил СНиП II–7–81\* (Минстрой России. Москва, 1995). Кроме устаревших положений, которые были включены в прежние редакции СНиПов ещё 1969 г., в актуализированной редакции появились ошибочные рекомендации, использование которых в мосто- и тоннелестроении может привести к катастрофам. Проектирова-

ние транспортных сооружений в настоящее время не обеспечено нормативными документами, соответствующими современному уровню развития динамических методов расчёта сооружений.

В новом существующем своде правил СП 143330.2014 «Строительство в сейсмических районах» раздел 7.9 «Тоннели» содержит семь пунктов (всего 0,5 страницы текста) и ни одной формулы. Из семи пунктов раздела два пункта 7.9.3 и 7.9.4 содержат ошибочные рекомендации. Документ не содержит необходимую и достаточную информацию для проектировщиков.

Для сравнения отметим, что тринадцатая глава «Руководства по проектированию тоннелей» США «Расчёты на сейсмостойкость» [1] содержит 48 страниц текста с описанием сейсмических воздействий, расчётных моделей тоннелей мелкого и глубокого заложения, рекоменда-

ций по расчёту тоннелей, пересекающих зоны разломов. Представлены как упрощённые аналитические методы, так и уточнённые.

В новом существующем своде правил СП 143330.2014 «Строительство в сейсмических районах» (разделы 7.5 «Мосты» и 7.6 «Расчёты мостов на сейсмостойкость») содержится всего четыре страницы текста и всего одна формула, и та с грубыми ошибками. Этот документ также не содержит необходимую и достаточную информацию для проектировщиков. Для сравнения отметим, что документ такого же типа Еврокод 8 «Проектирование сейсмостойких конструкций» Часть 2 Мосты, содержит 150 страниц.

### Состояние вопроса

Ещё в 2012 г. в работе [2] отмечалось, что величины ускорений смещений грунта при землетрясениях определяются по кар-

там в ОСР путём пересчёта из баллов актуализированной макросейсмической шкалы, а не на основе инструментальных измерений, как это принято во многих странах мира. Приведём цитату из этого документа. «И хотя в отечественной строительной практике до сих пор используется простой пересчёт баллов в ускорения по шкале МСК-64, необходимо отметить, что такой пересчёт не учитывает спектральный состав сейсмического воздействия и, в силу этого, должен очень осторожно применяться для инженерных расчётов без должного обоснования».

Отметим, что и в 2016 г. и, похоже, в ближайшие несколько лет проектировщикам придётся пользоваться такими плохо обоснованными перерасчётами.

В дополнение приведём выдержку из письма В. И. Уломова председателю Научного Совета РАН по проблемам сейсмологии Г. А. Соболеву. Так как письмо было роздано участникам Форума, полагаю, что оно не содержит секретной информации. «На основе карт ОСР-2016 планируется разработать и создать карты спектров реакций на сейсмические воздействия, представленные в ускорения, и которые более профессионально по сравнению с баллами, могут использоваться проектировщиками для обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений. Такие карты широко распространены в США и в других странах, где карты в баллах уже не составляются».

В РФ воздействия многочисленных землетрясений от источников разных типов, расположенных на различных глубинах и удалённых на разных расстояниях от района, классифицируются по баллам, а грунты с разнообразными свойствами объединяются в категории. Такое соответствие между сейсмическими воздействиями и свойствами грунтов представляется очень грубым, тем более, что деление грунтов на категории весьма условно. Изменение одной категории грунтов на другую соответствует изменению сейсмической интенсивности на 1 балл, что означает увеличение (уменьшение) пикового ускорения при сейсмическом воздействии в 2 раза. Такое грубое задание сейсмических воздействий в настоящее время не соответствует современному уровню развития науки и не удовлетворяет требованиям ни проектировщиков, ни эксплуатационников. Ввиду того, что для расчётов сооружений, в конечном счёте, проектировщикам нужны пиковые ускорения, пиковые скорости и пиковые перемещения – необходимость в таком промежуточном параметре как балл отпадает. Поэтому во многих технически развитых странах, начиная с середины прошлого века, при картировании сейсмической опасности перешли на использование в качестве характеристик сейсмических воздействий от баллов к пиковым ускорениям и продолжительностям воздействий.

### **Некоторые факты из истории разработки норм РФ**

При расчёте наземных сооружений на сейсмические воздействия одним из основных и используемых параметров является коэффициент динамичности (более правильно спектр максимальных реакций). График коэффициентов динамичности  $\beta(T)$ , разработанный И. Л. Корчинским в условиях ограниченного количества инструментальных данных, был включен в СН 8-57 «Нормы и правила строительства в сейсмических районах». Позднее после некоторой корректировки этот график был включён в СНиП II-A.12-69. В последующие годы в документе СНиП II-7-81 график был заменен тремя графиками, каждый из которых соответствовал определённым категориям грунтов по сейсмическим свойствам.

Отметим такой факт: выборки инструментальных записей, используемые для обоснования параметров трёх графиков  $\beta(T)$  динамических коэффициентов (правильнее, спектров реакций), включённых в СНиП II-7-81, содержали всего 55 акселерограмм, из которых 30 имели максимальные амплитуды от 0,004 до 0,03 и только одна – более 0,2g [3].

Параметры динамических коэффициентов (спектров реакций), включённых в СНиП II-7-81, основывались не на данных реальных землетрясений, а на необходимости сохранения преемственности между старыми (СНиП II-A.12-69) и новыми нормами, для минимизации затрат на перепроектирование и антисейсмическое усиление.

В то время большинство акселерограмм было зарегистрировано приборами аналогового типа. При обработке таких акселерограмм необходимо было устранять низкочастотные искажения, вызванные дрейфом нуля при протяжке плёнки, её короблением при проявке, а так же при корректировке, при определении скоростей и смещений. Для подавления низкочастотных шумов, возникающих при обработке таких данных, эти акселерограммы подвергались фильтрации, что искажало действительную картину колебаний.

Определение модели сейсмического воздействия для региона, ещё лучше для строительной площадки, возможно в тех случаях, когда достаточно надёжно выявлены возможные основные источники землетрясений, спроектированы магнитуды и механизмы ожидаемых землетрясений. Важную роль играют инженерно-геологические условия. Для получения исходных расчётных данных желательно иметь записи реальных сильных землетрясений, зарегистрированных на данной площадке.

В тех случаях, когда в сейсмоопасных районах до настоящего времени инструментально не зарегистрировано сильных движений грунта, можно воспользоваться данными, полученными в других районах земного шара, при условии близкого совпадения ин-

женерно-геологических и сейсмологических условий.

По мнению многих исследователей, такой подход даёт более реальные результаты, чем прогноз параметров сильных колебаний по записям слабых землетрясений.

### **Особенности реакций подземных сооружений на сейсмические воздействия**

Подземные сооружения не входят в резонанс, а реагируют на землетрясения таким же образом, как окружающий их массив грунта.

Масса тоннелей не оказывает влияния на параметры сейсмических волн, так как погонная масса тоннеля мало отличается от замещённой им погонной массы грунта.

Подземные сооружения обладают большим коэффициентом демпфирования, так как энергия рассеивается в окружающий массив грунта, что существенно уменьшает колебания.

Демпфирование в подземных сооружениях в пересчёте на вязкое трение может достигать 20 % от критического значения, в то время как в наземных строительных конструкциях (стальных и железобетонных) этот коэффициент не превышает 2–4 %.

Интенсивность сейсмических воздействий уменьшается с глубиной, так как наиболее разрушительные волны Рэлея и Лява распространяются только в поверхностных слоях.

Тоннели в меньшей мере разрушаются при землетрясениях. Тем не менее, при сильных землетрясениях повреждаются и разрушаются и тоннели.

### **Задание исходной сейсмической информации для расчёта тоннелей в нормах РФ**

Наиболее часто используемым параметром, характеризующим сейсмическое воздействие, является пиковое ускорение грунта (PGA) в горизонтальном направлении.

Значения PGA, как правило, получают, используя карты общего сейсмического районирования. Эти же значения можно уточнить, принимая во внимание расстояния от источников возмущения, магнитуды возможных землетрясений и затухание колебаний.

Повреждения подземных сооружений при землетрясениях в большей мере коррелируются с пиковыми скоростями движения грунта PGV и пиковыми перемещениями PGD, чем с пиковыми ускорениями PGV. Поэтому предлагается пересчитывать пиковые ускорения в пиковые скорости. На этом этапе допускается серьёзный произвол, так как предлагается использовать какой-то преобладающий период колебаний грунта  $T_0$ . Колебания поверхности грунта при землетрясении не представляют собой простой гармонический процесс.

Можно выделить три различные доминирующие гармоники: для функции ускорений, скоростей и перемещений, причём они существенно отличаются. Для этой це-

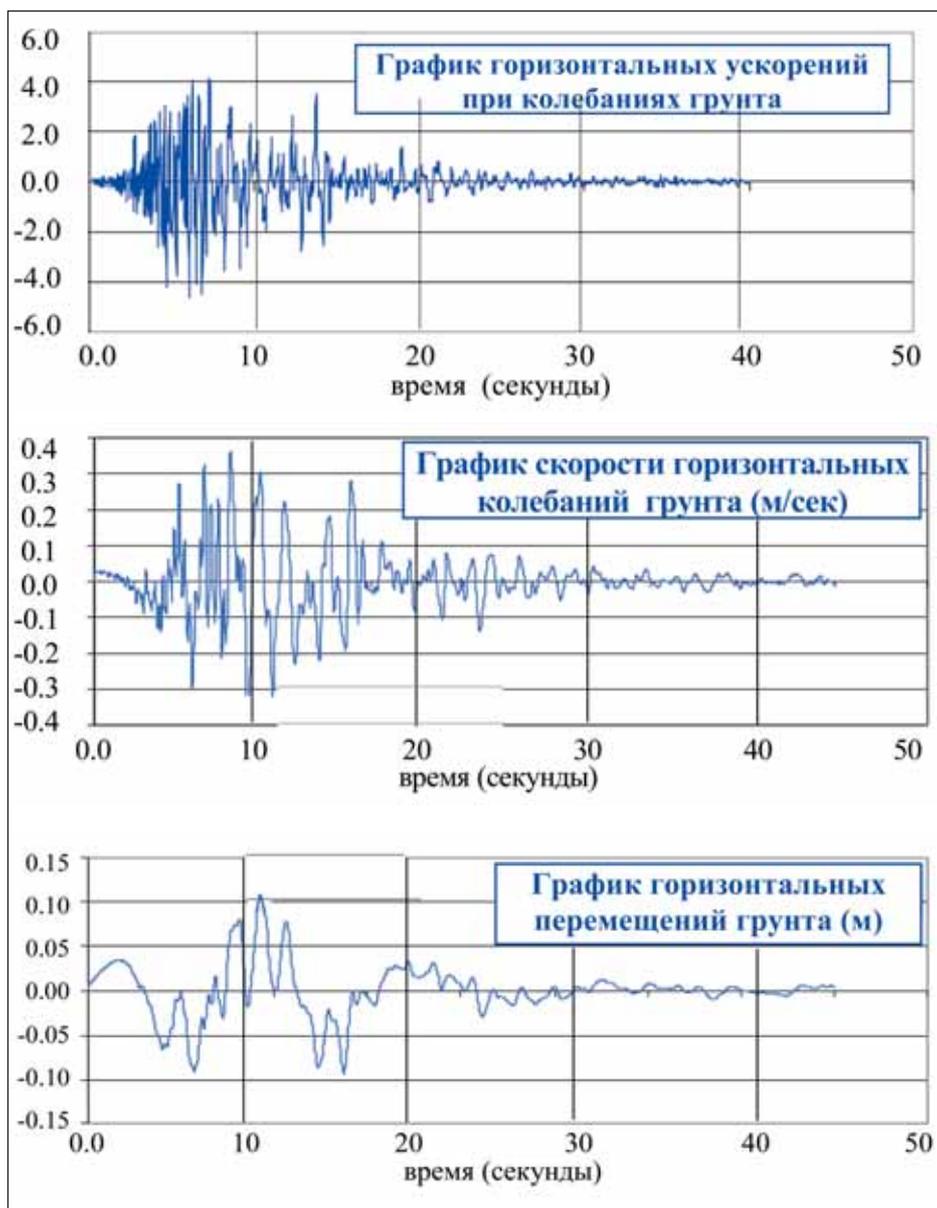


Рис. 1. Функции ускорений, скоростей

ли выполняется преобразование Фурье этих функций.

На рис. 1 и 2 представлены графики ускорений, скоростей и перемещений горизонтальных колебаний грунта при землетрясении Loma Prieta и соответствующие им спектры Фурье.

Учитывая, что дифференцированию функций во временной области соответствует умножение на множитель  $(-i\omega)$  в частотной области, между изображениями Фурье ускорения, скорости и перемещения, можно записать следующее соотношение:

$$\ddot{u}(w) = (-i\omega)\dot{u}(w) = (-i\omega)^2\tilde{u}(w).$$

Поэтому функция ускорений состоит из более высоких частотных составляющих, по сравнению с функцией скоростей и перемещений. Возникает вопрос: какую из доминирующих гармоник принимать в расчёте для определения пиковой скорости через пиковое ускорение.

Даже невооружённым глазом, не глядя на спектры функций, видно, что все три функ-

ции характеризуются разными доминирующими гармониками.

Как уже отмечалось выше, повреждения подземных сооружений при землетрясениях определяются пиковыми скоростями движения грунта PGV и пиковыми перемещениями PGD, поэтому при расчётах используются именно эти параметры.

Нормальные и касательные напряжения в грунте определяются формулами:

$$\sigma = \rho C_1 v(t) \quad (1)$$

при распространении плоских продольных волн и

$$\tau = \rho C_2 v(t) \quad (2)$$

при распространении плоских поперечных волн,

где  $C_1$  и  $C_2$  – скорости распространения продольных и поперечных волн в грунте;

$\rho$  – плотность грунта;

$v(t)$  – скорости колебаний частиц грунта при прохождении сейсмических волн.

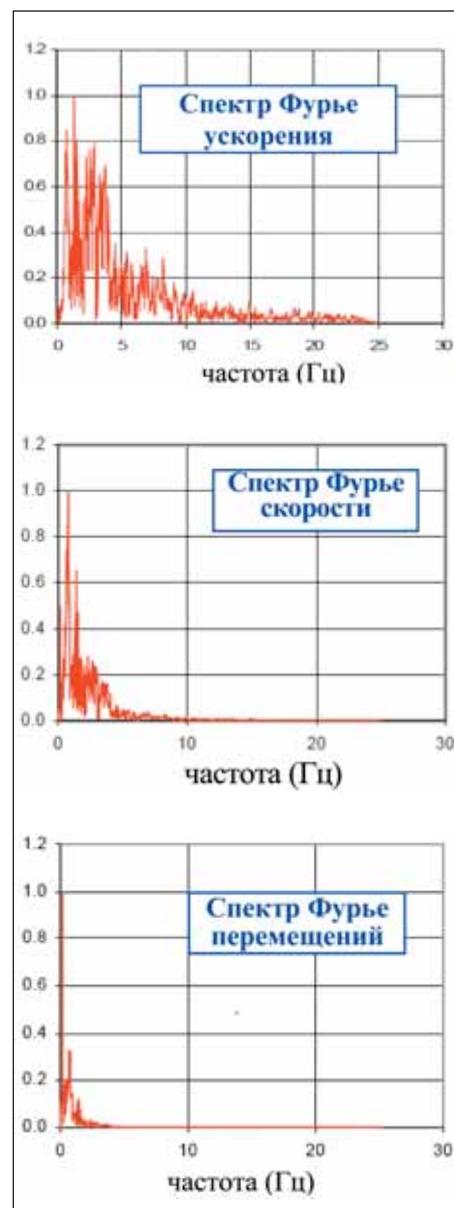


Рис. 2. Спектры Фурье

Максимальные напряжения в окрестности тоннельной обделки определяются пиковыми скоростями по формулам:

$$\sigma = \rho C_1 V_{\text{pik}} \quad (3)$$

при распространении плоских продольных волн и

$$\tau = \rho C_2 V_{\text{pik}} \quad (4)$$

при распространении плоских поперечных волн,

где  $V_{\text{pik}}$  – пиковая скорость частиц грунта при прохождении сейсмической волны.

В СП «Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования» и более ранних нормативных документах [3, 4] формула (3) преобразуется к виду:

$$\sigma = \rho C_1 V_{\text{pik}} = \frac{\gamma}{g} C_1 \frac{a_{\text{pik}} T_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} A C_1 \gamma T_0 \quad (5)$$

(Ускорение  $A$  задаётся в долях ускорения свободного падения  $g$ ).

Для определения значений пиковых скоростей  $V_{пик}$  рекомендуется использовать преобладающий период колебаний  $T_0$  по формуле:

$$V_{пик} = \frac{a_{пик} T_0}{2\pi}, \quad (6)$$

где  $a_{пик}$  – пиковое значение ускорения, которое определяется по общей карте сейсмического районирования, либо полученного при микросейсморайонировании.

Напряжения, определяемые с использованием «доминирующих гармоник», могут в разы отличаться от напряжений, создаваемых реальными землетрясениями. На кафедре подземных сооружений (в настоящее время мостов и тоннелей) МИИТа было проанализировано около ста записей ускорений, скоростей и перемещений различных землетрясений для разных грунтовых условий. Практически в редких случаях получался результат, близкий к результату, вычисленному по формуле (6).

Приведём один из типичных примеров, доказывающих этот факт. Определим доминирующие гармоники землетрясения NORTHRIDGE 02/01/1994 (рис. 3).

Зная пиковое ускорение  $a_{пик} = 578 \text{ см/с}^2$ , хотелось бы, используя предлагаемую формулу, получить пиковую скорость  $V_{пик} = 94,7 \text{ см/с}$ . Возникает вопрос: какую из трёх гармоник считать доминирующей. В любом случае, при вычислении пиковых скоростей с использованием этих трёх периодов, полученные результаты существенно отличаются от реального, равного  $V_{пик} = 94,7 \text{ см/с}$  значения:

$$\begin{aligned} V_{пик} &= \frac{a_{пик} T_0}{2\pi} = \frac{578 \cdot 0,68}{2\pi} = 62 \text{ см/с} \\ V_{пик} &= \frac{a_{пик} T_0}{2\pi} = \frac{578 \cdot 3,2}{2\pi} = 294 \text{ см/с} \quad (7) \\ V_{пик} &= \frac{a_{пик} T_0}{2\pi} = \frac{578 \cdot 4,8}{2\pi} = 442 \text{ см/с} \end{aligned}$$

Если при определении сейсмических нагрузок использовать пиковые значения ускорений по шкале ОСР, как это рекомендуется в работах [5, 6], можно ошибиться в несколько как в большую, так и в меньшую стороны, так как сейсмичность района определяется с точностью до одного балла, что соответствует изменению ускорения в два раза. Кроме того, не учитываются усиления колебаний в верхних слоях грунта вследствие резонансных явлений.

Таким образом, для правильного расчёта тоннелей на землетрясения необходимо использовать формулы:

$$\sigma = \rho C_1 V_{пик} \text{ и } \tau = \rho C_2 V_{пик}. \quad (8)$$

Пиковые скорости необходимо получать, используя микрорайонирование, а не перерасчёты пиковых ускорений в скорости и, тем более, нельзя использовать при этом баллы.

Вызывает опасения и применение коэффициента  $K_1$ , учитывающего допускаемые

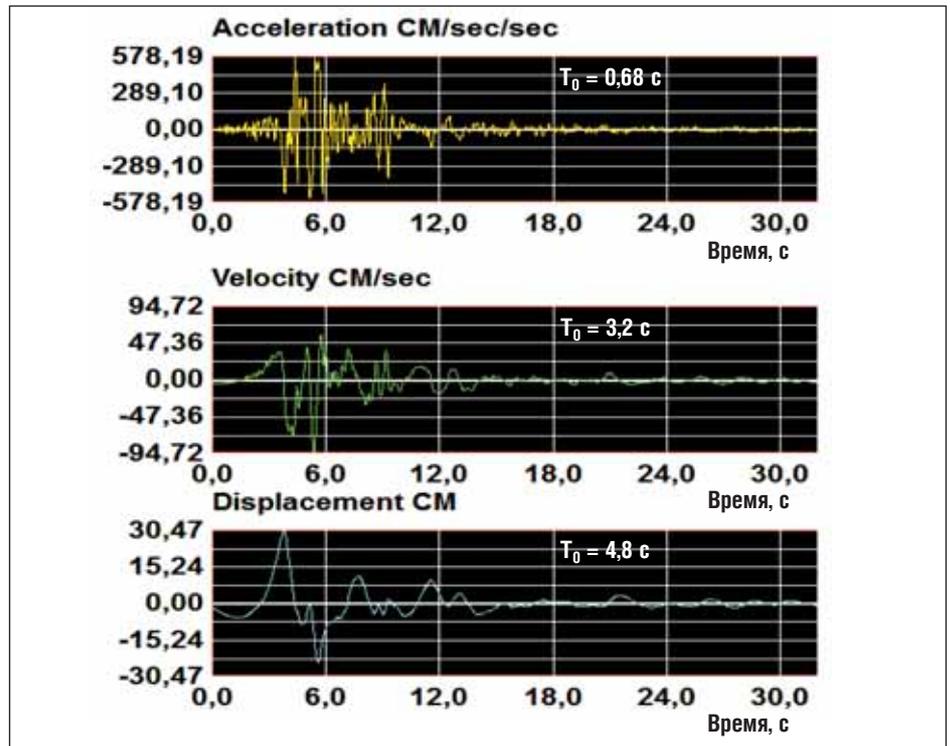


Рис. 3. Функции, характеризующие колебания грунта при землетрясении NORTHRIDGE 02/01/1994, и периоды доминирующих гармоник функций, ускорений, скоростей и перемещений

повреждения (трещины и пластические деформации) в конструкции обделки и в окружающем массиве грунта):

$$\sigma = \frac{1}{2\pi} AC_1 K_1 \gamma T_0. \quad (9)$$

Напряжённое состояние грунта в окрестности тоннельной обделки определяется выражениями (8). Если сейсмические волны достигли строительной площадки, пройдя сотни километров от источника землетрясений, неясно, почему на контакте с обделкой появятся и трещины, и пластические деформации грунта.

Подобные вопросы возникают и у студентов на лекциях по сейсмостойкости тоннелей.

При выполнении расчётов тоннелей с коэффициентом  $K_1 = 0,25$  сейсмическая нагрузка уменьшается в четыре раза. Это значит, что тоннели, расположенные в зонах, соответствующих 9 баллам, рассчитываются как тоннели, в зонах 7 баллов. Не опасно ли это?

Какие повреждения получит тоннельная обделка при реальном сейсмическом воздействии, в четыре раза превышающем нагрузки, на которые выполнялся расчёт? Появятся трещины или произойдут обрушения?

Почему бы не рассчитывать несколько вариантов тоннелей на предполагаемые реальные сейсмические воздействия с помощью современных программных комплексов, которые позволяют учесть и трещины, и пластические деформации? Выполняя такие расчёты, можно запроектировать безопасные и экономичные соору-

жения, а также учесть и повреждения. При таких расчётах можно учесть, чтобы разрушения были ограниченными и происходили в тех местах, в которых их легко обнаружить и отремонтировать. При неконтролируемом разрушениях какие появятся повреждения, в каких местах и в какой мере заранее не известно.

Вторая немаловажная проблема: на картах общего сейсмического районирования балльность определяется для средних грунтов, сейсмическая жёсткости которых изменяются в широких пределах (от 350 до 1500 г/см<sup>3</sup>·м/с). При микрорайонировании для уточнения сейсмичности в баллах вдруг появляется референтный грунт с сейсмической жёсткостью 655 г/см<sup>3</sup>·м/с. Такой грунт можно было бы использовать при уточнении сейсмичности, если бы именно для таких грунтов строились карты ОСР. Используемая приближённая формула приращения балльности имеет ограниченную область применения. Кроме того, следует добавить: вряд ли тоннель или мост будет рассчитываться на сейсмостойкость на основании данных ОСР (общего сейсмического районирования). При проектировании таких сооружений обязательно проводится микрорайонирование и детальное сейсмическое районирование.

Ещё один факт, на который следовало бы обратить внимание: напряжённое состояние, соответствующее пиковой скорости, не распространяется до бесконечности, а реализуется вблизи тоннеля. Причём, для определения напряжений и деформаций в области полости и подкреплённой полости достаточно рассматривать напряжения на

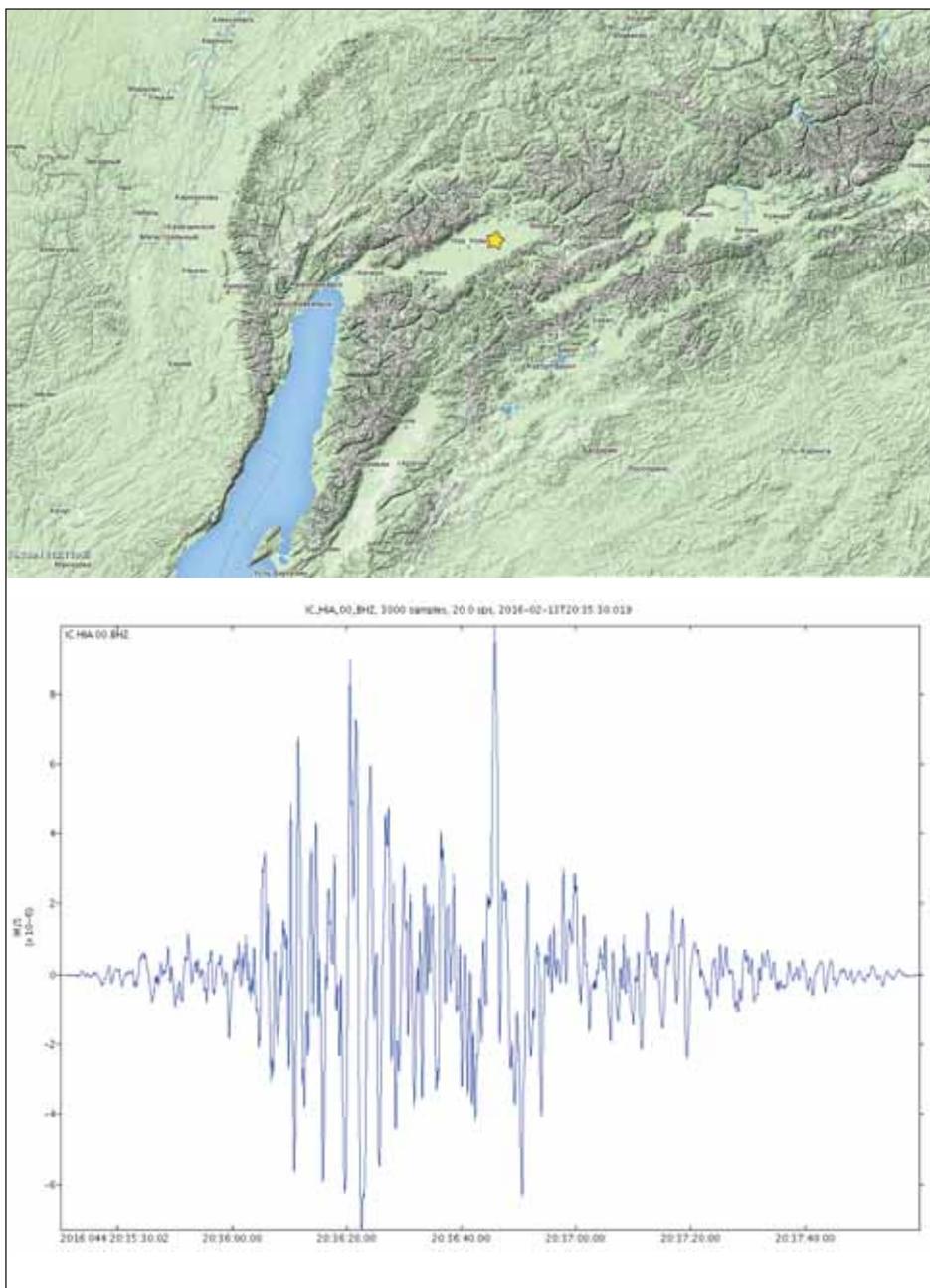


Рис. 4. Эпицентр землетрясения, произошедшего в районе озера Байкал 13.02.2016 г. в 20 ч 31 мин 46 с, и велосигграмма. Звёздочка жёлтого цвета – эпицентр

расстоянии, равном 3–5 диаметрам от центра тоннеля [7].

Следует ли упоминать напряжения на бесконечности, так как на расстоянии четверти волны от тоннеля они равны нулю. Как известно, скорости распространения поперечных волн значительно меньше скорости распространения продольных, поэтому поперечные волны достигают сооружения на несколько секунд позже. Вследствие большой скорости распространения волн, максимальные воздействия на тоннели делятся сотые доли секунды, поэтому одновременные, да ещё и максимальные воздействия продольных и поперечных невозможны. Поэтому нет никакой необходимости выполнять расчёты тоннелей на совместное воздействие продольных и поперечных волн. Можно рассмотреть тысячи акселерограмм,

на которых отмечены времена прихода разных типов волн. На всех этих кривых видно, что пиковые значения, соответствующие приходу продольных волн, и пиковые значения, соответствующие поперечным волнам, возникают в различные моменты времени (отличающиеся на несколько, а иногда и на десятки секунд).

В настоящее время существуют обширные базы инструментальных записей колебаний грунта, описывающие сейсмические воздействия. В качестве этих баз отметим наиболее популярные и информативные: «European Strong Motion Database», «ISNM», «K-NET», «KIK-NET» и др. Используя эти базы данных, можно получить информацию о более чем 50 тысячах землетрясений, которые произошли за последние 30 лет в различных точках земного шара, в том

числе и на территории Российской Федерации. Кроме характеристик, описывающих источники землетрясений (магнитуды, глубины и типа очага, координаты), приводятся данные об инженерно-геологических условиях и скорости распространения поперечных волн в слоях грунтов на глубину до 30 м. Распределение инструментальных данных о сейсмических колебаниях грунтов при землетрясениях по регионам мира крайне неравномерно. Наибольшее число записей зарегистрировано при землетрясениях, произошедших на территории США, Японии, Тайваня и Турции. Пока, к сожалению, записей землетрясений, произошедших на территории РФ, немного из-за недостаточного количества сейсмостанций. В качестве примера приведём информацию, полученную из банка данных IRIS, касающуюся землетрясения, произошедшего вблизи озера Байкал 13 февраля 2016 г. (рис. 4).

Широта 56.169° N. Долгота 112.1106° E. Глубина гипоцентра 16,4 км. Магнитуда 5,0. Кроме этих данных приводятся акселерограммы горизонтальных колебаний грунта, соответствующие разным направлениям с отметками времён прихода разных типов волн: продольных, поперечных и поверхностных. В настоящей статье эта информация не приводится.

При разработке рекомендаций по определению сейсмических нагрузок, соответствующих геологическим и сейсмологическим условиям республики Казахстан, ввиду отсутствия собственных записей сильных землетрясений, успешно использовались многочисленные базы данных зарубежных стран. Такой опыт заслуживает изучения и внимания, тем более что в работах принимали участие и российские учёные Ф. Ф. Аптикаев и Н. Н. Михайлова.

Большой объём информации можно получить, используя сайт IRIS. IRIS представляет собой консорциум из более 120 американских университетов, посвящённых работе научных объектов для приобретения, управления и распределения сейсмологических данных. Кроме университетов в работе консорциума участвуют ещё более 500 организаций. Информация, которую можно безвозмездно получить, используя IRIS:

- характеристики более 20 тыс. землетрясений в различных регионах мира, включая РФ, начиная с 1970 г. по настоящее число;
- для получения информации можно задать регион земного шара и интервал времени, в течение которого происходили землетрясения;
- если не указывать необходимость интегрирования и дифференцирования уравнения движения, будет выдаваться график скоростей колебаний поверхности грунта, пиковое значение которого и необходимо для расчёта подземных сооружений;
- можно также получить акселерограммы и функции перемещений грунта;

• для удовлетворения любопытства, запросить параметры максимальных землетрясений, например, за последние пять дней или за несколько лет и многое другое.

Учитывая такое большое количество информации о сейсмических воздействиях, вызывает удивление использование в разрабатываемых актуализированных нормативных документах устаревшей информации сорокалетней давности. Таким примером является Приложение Ж (справочное) «Нормальные и касательные напряжения в массиве пород (грунтов) при землетрясении». Во-первых, неверное название таблицы. Наверное, следовало бы уточнить, что имеются в виду пиковые значения напряжений при распространении сейсмических волн. Во-вторых, для получения такой таблицы необходимо было обработать большое количество акселерограмм для разных типов грунтов, что вряд ли было сделано, так как в то время, когда создавалась таблица, такая информация отсутствовала.

Следует отметить и такой факт, что, похоже, разработчикам норм не известны нормативные документы, методики и современные достижения зарубежных коллег в области расчёта подземных сооружений на землетрясения. В работах [1, 10] представлены и методики расчёта, и сноски (около двухсот) на статьи, и исследования в этой области.

### Задание исходной сейсмической информации для расчёта мостов в нормах РФ

На многочисленных рабочих совещаниях по согласованию исследований по сейсмическому районированию и сейсмостойкому строительству, в которых принимали участие ведущие специалисты ИФЗ РАН, ИЗКСО РАН, Геофизической службы РАН, Геофизической службы СО РАН, Института геоэкологии РАН, ПНИИИС, ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко было принято много полезных решений. Перечислим некоторые из них.

1. Признать назревшей модернизацию руководящих документов по нормативным сейсмическим нагрузкам по следующим группам направлений: ОСР-СНиП и СНиП – СМР с учетом достижений инженерной сейсмологии за последние десятилетия.

2. Отказаться от использования в качестве основного амплитудного параметра колебаний значения максимального ускорения на среднем грунте (категория 2) и впредь использовать в этих целях максимальное ускорение на скальном грунте (категория 1) (ОСР, СМР, СНиП).

3. Отказаться от характеристики грунтов через частотно-независимый параметр «приращение балльности» и перейти к принципу спектральной характеристики грунтов. Коэффициент, учитывающий эффект грунтовой толщи (грунтовой коэффициент), должен приниматься в зависимости от пери-

ода колебаний (собственной частоты) сооружения (СМР, СНиП).

4. Отказаться от нормировки безразмерных спектров реакции на значение максимального ускорения на данном грунте. Следуя принципам Еврокод-8, перейти к нормировке спектров реакции на значение максимального ускорения на скальном грунте (категория 1). В связи с чем признать устаревшим термин «коэффициент динамичности» и использовать вместо него термин «нормированный спектр реакции» (СНиП, СМР).

5. Признать необходимость принятия решения о выборе общего подхода к учету нелинейности поведения грунта в строительных нормах для массового строительства. Могут просматриваться следующие варианты:

- отказ от учета нелинейности;
- учет нелинейных эффектов «в среднем» для определенного уровня ускорений (подход Еврокод-8);
- явный учет зависимости нелинейных эффектов от амплитуды (подход норм США) (ИС, СНиП, СМР).

Кроме представленных выше, были приняты и другие полезные решения.

Отметим, что в СП 143330.2014 [8] и в документах «Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования» [9] и «Правила уточнения исходной сейсмичности и сейсмического районирования» нет и попытки использования этих решений. Многие положения норм противоречат представленным выше предложениям.

Для уточнения сейсмичности в СП 143330.2014 используются формулы приращения балльности, от которых следует от-

казаться вследствие ошибочного и некорректного представления параметров сейсмических воздействий при использовании этих формул.

Из названия таблицы 8.1 СП [9] следует, что разработчики не понимают физической сущности представленных в ней кривых. «Спектры реакций на сейсмические воздействия» называются «Спектрами сейсмических воздействий». Поясним: «спектры реакций на сейсмические воздействия» – это спектры максимальных реакций систем с одной степенью свободы на землетрясение, а «спектры сейсмических воздействий» – это амплитудные спектры Фурье колебаний грунта.

Категории грунтов, представленные в документе [8] взамен категорий, представленных в СП 143330.2014, у многих вызывают недоумение.

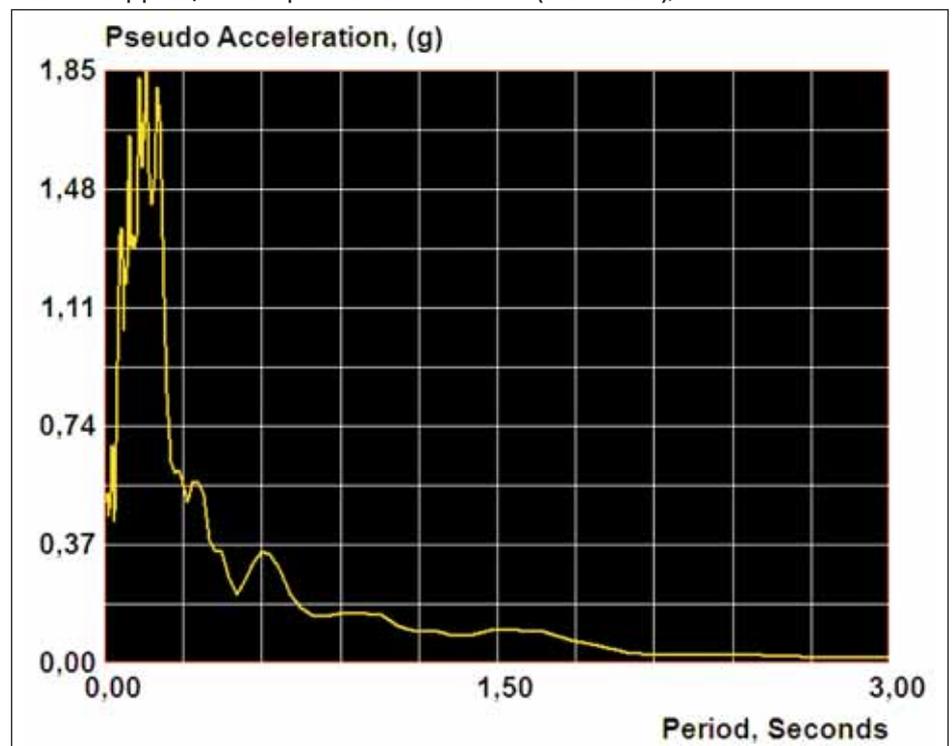
Непонятно, какие исходные данные использовали авторы СП при получении спектров реакций на сейсмические воздействия. Приведем спектр, построенный по акселерограмме реального землетрясения (SANTA CRUZ MTNS LOMA PRIETA 1989 17:04). Ордinаты гипоцентра: 37.037N, 121.883W, глубина Н = 18 км. Магнитуда М = 7,0 (рис. 5).

Параметры, используемые для построения спектра реакций акселерограммы:

- интервал дискретизации 0,02 с;
- число отсчетов – 2000;
- значение пикового ускорения 500,053 см/с<sup>2</sup> при t = 5,220 с;
- значение пиковой скорости 18,829 см/с при t = 7,700 с;
- значение максимального смещения 4,448 см при 8,000 с.

Отметим, что самая левая точка на графике, которая называется «ускорением

Рис. 5. Спектр реакций землетрясения SANTA CRUZ MTNS (LOMA PRIETA), 1989 17:04



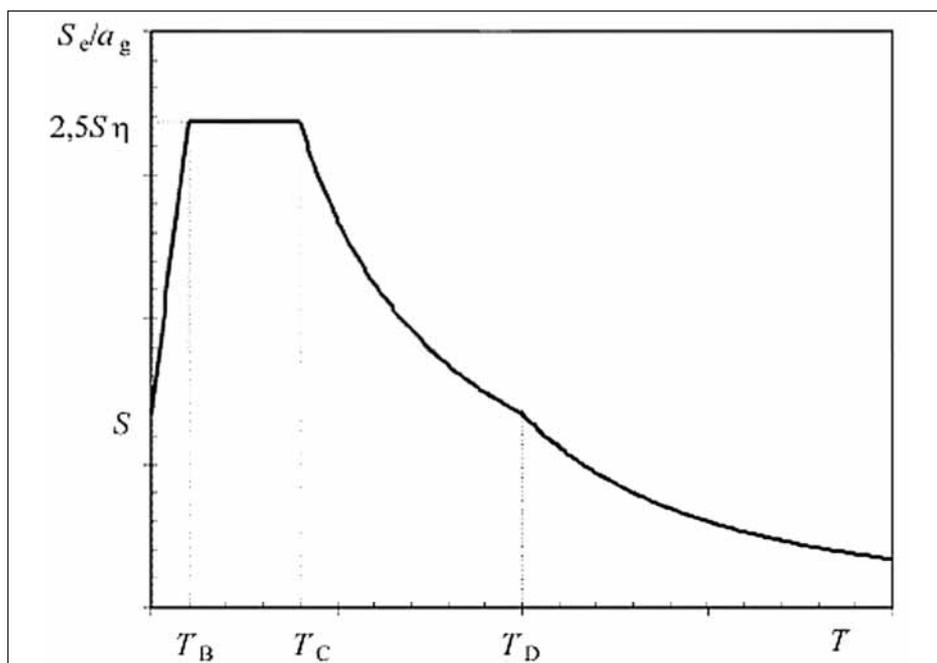


Рис. 6. Спектры откликов, принятые в Еврокоде

нулевого периода» соответствует пиковому ускорению грунта. В настоящее время построено большое количество спектров реакций и огибающих спектров, и все они показывают, что ординаты спектров убывают при возрастании периодов (при  $T > 1$  с) и становятся в несколько раз меньше «ускорения нулевого периода». Представленные в таблице 8.1 спектры не соответствуют ни спектрам отдельных землетрясений, ни огибающим спектрам, построенных при обработке большого количества акселерограмм. Непонятно как рассчитывать большепролётные сейсмоизолированные мосты, если периоды превышают 1,8 с? Разве могут спектры ответов описываться разрывными функциями? Если для построения спектров реакций использовать функции, представленные в таблице 8.1, все графики будут иметь разрывы при  $T = 1,8$  с.

При построении спектров авторами СП используются придуманные категории грунтов, которые нигде раньше не использовались. Для построения спектров необходимо обработать сотни акселерограмм для соответствующих разных типов грунтов. Авторы не имели такой возможности, поэтому использовать для расчётов такие спектры нельзя.

В качестве примера спектров, построенных для разных типов грунтов в результате обработки большого количества акселерограмм реальных землетрясений, представим график спектра, используемого в Еврокоде EN 1998-1:2004:E (рис. 6).

#### Замечания по содержанию параграфа 7.6. СП 143330.2014

Наибольшее количество замечаний возникает при чтении этого параграфа.

Можно подумать, что Свод правил написан для проектировщиков середины

прошлого века, когда мосты и тоннели рассчитывали, используя логарифмические линейки и арифмометры. Когда не было мощных программных комплексов, не были разработаны методы расчёта сооружений с учётом нелинейного поведения, с учётом образования пластических зон, когда для исходной информации имелось небольшое количество акселерограмм землетрясений, записанных в аналоговой форме на фотоплёнке. Раздел изобилует безграмотными с точки зрения механики фразами.

Все мосты предлагается рассчитывать по одной формуле (13), к которой во многих случаях невозможно свести расчёты и которая содержит большое количество опасных рекомендаций. Эта формула вызывает насмешки наших коллег за рубежом. Один из участников Международной конференции в Тайпее, организованной National Center for Research on Earthquake Engineering, спросил меня: «Вы действительно рассчитываете мосты всех типов по одной сомнительной формуле?» Он имел ввиду именно формулу (13).

Кратко опишем, что должно быть в разделе «Расчёты мостов на сейсмостойкость».

Сейсмическое воздействие — это не воздействие масс, а кинематическое воздействие на фундаменты и основание моста, поэтому в расчётных схемах в правой части уравнений входит переносное ускорение. Инерционные силы могут возникнуть, а могут и не проявиться. Например, мост на высоких тонких опорах может сохранить состояние покоя, в то время как опоры могут разрушиться вследствие больших деформаций.

Если поведение моста описывается линейной моделью с конечным числом степеней свободы, подверженной сейсмическому воздействию, реакция конструкции определяет-

ся следующим дифференциальным уравнением движения:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = -[M]\{U_b\}\ddot{u}_g, \quad (10)$$

где  $[M]$  — матрица масс ( $n \times n$ );

$[C]$  — матрица демпфирования ( $n \times n$ );

$[K]$  — матрица жесткости ( $n \times n$ );

$\{X\}$  — вектор столбец относительных смещений ( $n \times 1$ );

$\{\dot{X}\}$  — вектор столбец относительных скоростей ( $n \times 1$ );

$\{\ddot{X}\}$  — вектор столбец относительных ускорений ( $n \times 1$ );

$\{U_b\}$  — вектор влияния; вектор смещения точек конструкции при перемещении опоры на единицу длины в направлении сейсмического движения ( $n \times 1$ );

$n$  — число динамических степеней свободы;

$\ddot{u}_g$  — ускорение грунта.

Для большепролётных мостов, подверженных отличающимся воздействиям в различных опорах, система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \sum_{s=1}^{ns} [M]\{U_{bs}\}\ddot{u}_s, \quad (11)$$

где  $s$  — номер опоры;

$ns$  — общее число опор;

$\{U_{bs}\}$  — вектор влияния для опоры  $s$ ; вектор смещения точек конструкции, при единичном перемещении опоры  $s$  в направлении движения опоры, в то время как другие опоры остаются неподвижными.

Уравнения (10) и (11) могут быть решены методом разложения по собственным векторам или методом прямого интегрирования уравнений движения.

Преобразование системы уравнений  $\{X\} = [\Phi]\{X\}$  разделит уравнение движения только в тех случаях, когда величины  $\{\Phi\}^T [C]\{\Phi\}$ ,  $i \neq j$ , являются малыми и ими можно пренебречь.

Большинство мостов состоит из элементов, выполненных из разных материалов, таких как сталь, бетон, железобетон, и элементов, взаимодействующих с грунтом, поэтому необходимо использовать специальные преобразования матриц демпфирования, позволяющие разложить уравнения по собственным формам. В частности, может быть использовано пропорциональное (рэлеевское) демпфирование.

Поэтому предлагать для расчёта любых мостов формулу (13) документа [8] не только неправильно, но и опасно.

Ошибочная рекомендация по использованию спектров ответов (динамических коэффициентов). В любых нормах исходная сейсмическая информация определена для

поверхностей грунта, контактирующих с сооружением, в виде сейсмического движения «свободного поля». Поэтому во всех случаях необходимо учитывать эффекты взаимодействия фундаментов конструкций с грунтом для всех сооружений, если они не сооружаются на скалистых грунтах, которые полностью передают колебания фундаментам. Отождествлять характеристики движения «свободного поля» с характеристиками движения фундаментов сооружений для любых грунтов является грубой ошибкой, которая часто допускается проектировщиками. Именно такая неправильная рекомендация излагается в СП 14.13330.2014 [8].

### Замечания по содержанию пункта 7.9

Раздел 7.9 «Тоннели» содержит семь пунктов (всего 0,5 страницы текста) и ни одной формулы.

Не содержится ни слова о расчётных моделях, которые необходимо использовать при расчете сооружений на сейсмостойкость.

Непонятно как рассчитывать тоннели, если неизвестно как определять сейсмическую нагрузку.

Из семи пунктов раздела два пункта 7.9.3 и 7.9.4 содержат ошибочные рекомендации.

При расчёте подземных сооружений на сейсмические воздействия не используются ускорения и акселерограммы. Напряжённо деформированное состояние подземных сооружений определяется пиковыми скоростями и пиковыми перемещениями.

Поэтому рекомендовать, как выполнять расчёты при сейсмичности с интенсивностью 8 баллов не имеет никакого смысла.

Нет рекомендаций по расчету тоннелей глубокого и мелкого заложения.

Нет рекомендаций по расчёту тоннелей в мягких грунтах, расположенных на жёстких коренных породах. В мягких породах, вследствие резонансных явлений, сейсмические воздействия могут существенно возрасти.

Как учитывать несущую способность рыхлых грунтов, которые даже при слабых землетрясениях могут потерять несущую способность?

Отсутствует методика расчёта тоннелей из опускных секций, которые обычно располагаются на границе или вблизи грунта и водной среды. Напряжённо деформированное состояние придонного массива при падении волн на границу раздела сильно отличается от напряжённого состояния однородного массива, вследствие отражения от границы раздела

### Заключение

В СП 14.13330.2014 [8] с одной стороны содержится ненужная информация и рекомендации, которые любой инженер выполнит бы без учёта нормативных требо-

ваний. С другой стороны, отсутствует такая информация, без которой нельзя рассчитывать сооружения на сейсмостойкость.

Отсутствует информация о моделях подземных сооружений и информация о сейсмических воздействиях на эти сооружения.

При расчёте мостов также возникает большое количество вопросов.

Сколько форм собственных колебаний необходимо учитывать при расчёте, и каким образом их необходимо суммировать?

Как учитывать опирания сооружений в нескольких точках, и каким образом учитывать запаздывание сейсмических воздействий на разные опоры?

Каким образом учитывать разные коэффициенты демпфирования, сооружений, состоящих из разных материалов?

Интенсивность сейсмических воздействий в баллах в динамических расчётах не используется. Поэтому рекомендации Приложения Г, в которых предлагается методика оценки исходной информации, выглядят, по меньшей мере, нелогичной, когда механическое воздействие, представляющее собой распространение волн в среде, преобразуется в баллы, а затем, чтобы уже рассчитать сооружение, снова преобразуется в ускорение. При этом при каждом преобразовании возникают неопределённости, которые вносят дополнительные погрешности.

Учитывая, что в будущем необходима гармонизация российских норм с европейскими другими международными нормами, необходимо существенно переработать отечественные нормы.

Можно констатировать, что в настоящее время в Российской Федерации отсутствует современная нормативно-техническая документация, необходимая для проектирования, строительства и эксплуатации транспортных сооружений в сейсмических районах.

К сожалению, в настоящее время опять разрабатываются на том же самом уровне и теми же специалистами своды правил «Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования» и «Правила уточнения исходной сейсмичности и сейсмического районирования», в которых можно отметить те же самые ошибки и неточности.

В последние годы в МИИТе на кафедре подземных сооружений был проведён анализ зарубежных нормативных документов и многочисленных исследований по сейсмостойкости сооружений. Защищено несколько диссертаций, в которых представлен анализ существующих методов расчёта и новые методики расчёта сооружений на сейсмостойкость. Более пяти лет на кафедре читаются лекции: «Моделирование и расчет мостов на сейсмическое воздействие» и «Моделирование и расчет тоннелей на сейсмическое воздей-

ствие». Сотрудники кафедры подземных сооружений принимали участие в разработке свода правил республики Казахстан «Подземные сооружения в сейсмических районах».

В настоящее время сотрудники кафедры мостов и тоннелей работают над документом «Моделирование и расчет подземных сооружений на сейсмические воздействия». В ближайшие месяцы этот документ будет представлен в президиум Тоннельной ассоциации России.

### Список литературы

1. *Technical manual for Design and construction of road tunnels. Civil elements U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Publication 2009.*
2. Уломов В. И. *Актуализация нормативно-сейсмического районирования в составе единой информационной системы «Сейсмобезопасность России». Вопросы инженерной сейсмологии ISSN0132-28262012.T. 3 9. № 1, с. 5–38.*
3. Поляков С. В., Кахновский А. М. *Зависимость коэффициента динамичности от грунтовых условий площадки строительства. – В кн. Анализ последствий землетрясений. М., ЦНИИСК им. Кучеренко, 1982, 1982, с. 5–11.*
4. ВСН 193-81 *Инструкция по учету сейсмических воздействий при проектировании горных транспортных тоннелей.*
5. *Руководство по проектированию подземных сооружений в сейсмических районах. Москва 1996.*
6. Бульчѐв Н. С. *Механика подземных сооружений: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра. – 1994. –382 с.: ил. ISBN 5-247-01963-6.*
7. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. *Теория упругости. Москва. «Наука». 1979. с. 105–112.*
8. *Свод правил СП 14.13330.2014 Строительство в сейсмических районах СНиП II-7-81\*.*
9. *Свод правил. Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования. Проект. Вторая редакция. Москва 2016.*
10. Youssef M. A. Hasbash M. A. *Hasbash Seismic design and analysis of underground structures Tunnelling and Underground Space Technology 2001. 247–293.*

### Ключевые слова

Акселерограммы землетрясений, пиковые ускорения, пиковые скорости, пиковые перемещения, тоннели, мосты, нормативные документы.

*Earthquake accelerograms, peak acceleration, peak velocity, peak displacement, tunnels, bridges, normative documents.*

### Для связи с авторами

Курбачкий Евгений Николаевич  
dynamic.miiit@gmail.com  
Пестрякова Екатерина Алексеевна  
usd.miiit@gmail.com



# СОВРЕМЕННОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ВЕСТИБЮЛЕЙ СТАНЦИЙ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

## MODERN SOLUTION FOR TICKET HALLS OF DEEP MINED STATIONS

**М. С. Панкратов**, заместитель директора ООО «Синапс» по проектированию (ранее зам директора ООО «СМУ-19 Мосметростроя»)

**И. А. Бородин**, генеральный директор ООО «Синапс» (ранее директор ООО «СМУ-19 Мосметростроя»)

**M. S. Pankratov**, Deputy director «Sinaps» on design (formerly deputy director SMU-19 Mosmetrostroya)

**I. A. Borodin**, General director «Sinaps» (formerly general director SMU-19 Mosmetrostroya)

**В статье предлагается новый подход к строительству вестибюлей станций глубокого заложения. Рассматриваются преимущества и недостатки в сравнении с традиционным способом.**

**In given article is proposed a new approach to access tunnel and ticket hall construction for deep mined stations. Analyzed advantages and disadvantages of methods proposed.**

Начиная с пуска первой очереди, в составе Московского метрополитена эксплуатируются станции глубокого заложения. Особенностью станций такого рода является наличие вестибюля (наземного или подземного) и наклонного хода, связывающего вестибюль со станцией. Наклонный ход представляет собой тоннель, в котором устанавливаются три или четыре ленты эскалаторов. Подземный вестибюль, получивший в последнее время наибольшее распространение, это сооружение, возводимое открытым способом в котловане длиной примерно 60 м и шириной 25 м. По большей части площади вестибюль имеет два подземных этажа, и разработка грунта ведется на глубину порядка 11 м. Также непосредственно в месте примыкания наклонного хода имеется минус третий этаж, и глубина разработки составляет около 16 м.

Общепринятая технология строительства состоит из следующих этапов.

*Этап 1.* Заморозка грунтов по наклонному ходу при помощи наклонных скважин, пробуренных с поверхности. Бурение при этом производится не на всю длину тоннеля, а до достижения водоупора.

*Этап 2.* Проходка наклонного хода с использованием, как правило, чугунной обделки и укладчика наклонного хода (рис. 1а).

*Этап 3.* Выполнение ограждающей конструкции котлована вестибюля. На современном этапе, как правило, используется «стена в грунте», которая выполняется до водоупора (что гораздо глубже дна котлована).

*Этап 4.* Разработка грунта котлована (с демонтажем части наклонного хода) и устроением постоянной конструкции (рис. 1б).

Данная технология имеет ряд существенных недостатков:

- водонепроницаемое ограждение котлована и заморозка, по сути, дублируют друг друга. Существенная часть (или даже почти вся) области заморозки оказывается внутри контура «стены в грунте», то есть находится в пространстве, разработка которого могла бы быть выполнена под защитой «стены в грунте» без применения заморозки;

- существенная часть наклонного хода, выполненного на этапе 2, демонтируется на этапе 3. В классической конструкции временная

часть наклонного хода может составлять порядка 15 полных колец и 30 полуколец.

На современном этапе можно предложить новое решение, которое предполагает следующие этапы.

*Этап 1.* Выполнение герметичного ограждения котлована до уровня водоупора (с необходимым защемлением края стены). Этот этап выполняется так же, как и в традиционном методе, но в качестве первого, а не предпоследнего этапа.

*Этап 2.* Разработка грунта до уровня водоупора.

*Этап 3.* Выполнение наклонного хода в устойчивых грунтах со дна котлована.

Преимуществом способа является то, что отпадает необходимость выполнять замораживание или другие методы укрепления грунтов. Стоит отметить, что весьма похожее решение принято для вестибюлей станций глубокого заложения проекта Кроссрейл в Лондоне (например, для станции глубокого заложения «Бонд Стрит», расположенной в историческом центре города на глубине 23 м (рис. 2)). Также возникают побочные преимущества:

Рис. 1. Классический метод технологии строительства





Рис. 2. Станция глубокого заложения «Бонд Стрит», Лондон

- поскольку разработка грунта ведется до водоупора, возникает «лишнее пространство», которое не требуется для размещения инфраструктуры вестибюля и может быть использовано для любых целей;

- «стена в грунте» по контуру вестибюля может выполнять функцию фундамента для развития вестибюля вверх, над поверхностью земли.

Рассмотрим предлагаемую конструкцию более подробно на примере перспективного северного выхода станции «Окружная» (строящейся Люблинско-Дмитровской линии Московского метрополитена). Станция находится на пересечении Малого кольца Московской железной дороги и железной дороги Савеловского направления. После пуска три станции будут обслуживать громадный пересадочный поток пассажиров. На рис. 3 и 4 показана предлагаемая схема пассажиропотоков.

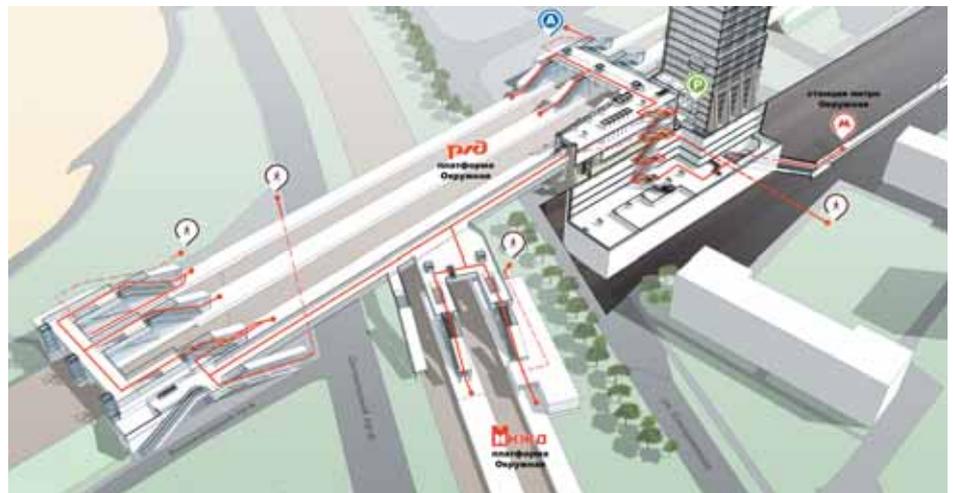
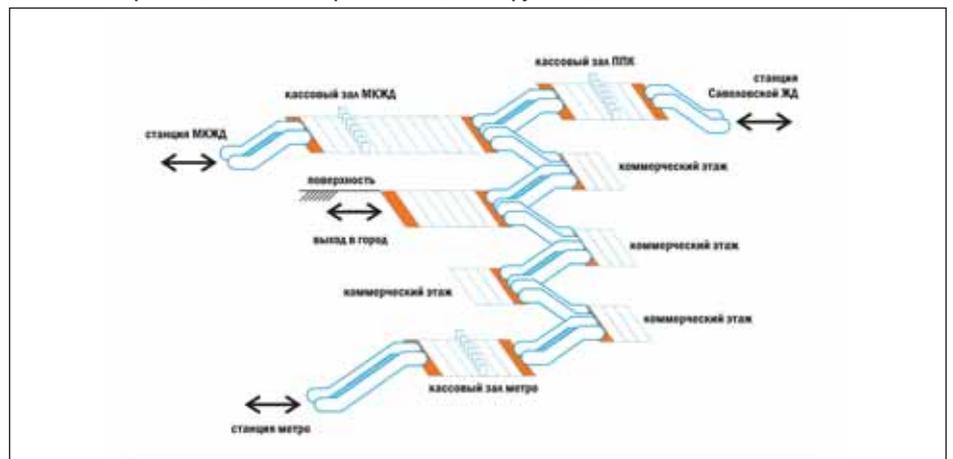


Рис. 3. Схема пассажиропотоков на станции «Окружная», Москва

Рис. 4. Схема размещения эскалаторов на станции «Окружная», Москва



Пассажиры, прибывший на метро, поднимаются по короткому наклонному ходу длиной 69 м и выходит на этаж кассового зала, расположенного на глубине 26 м (отметка уровня пола). На этом этаже пассажир проходит через турникеты и выходит из зоны метрополитена. Далее он следует через коммерческие этажи, поднимаясь при помощи каскада эскалаторов. Применение каскадов эскалаторов на станциях метро не является чем-то радикально новым, и используется на многих станциях (рис. 5). На коммерческих этажах возможно размещение предприятий попутного обслуживания пассажиров различной на-

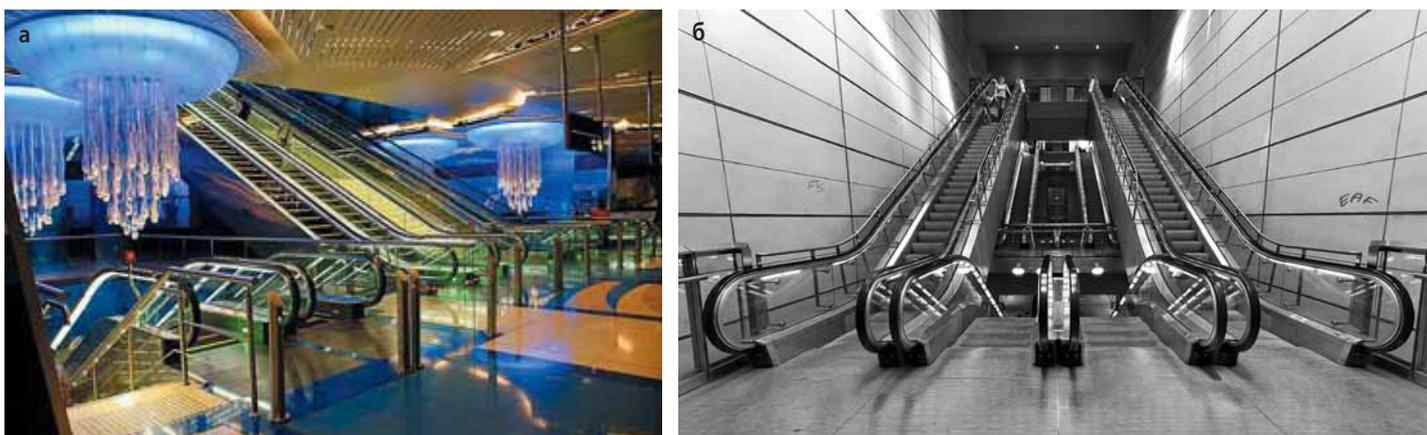


Рис. 5. Каскады эскалаторов: а – Бурджуман Дануб, в г. Дубай, ОАЭ; б – в г. Копенгагене, Дания



Рис. 6. Архитектурный облик транспортно-пересадочного узла

правленности (магазинов формата стрит ритейл, отделений банков, аптек, предприятий общепита). Пересадочный поток между подземным и наземным транспортом обеспечит коммерческим этажам проходимость сравнимую с самыми популярными торговыми центрами мира. В данном примере полезная площадь каждого коммерческого этажа составляет 3000 м<sup>2</sup>.

Поднявшись на уровень поверхности земли, пассажир имеет возможность выйти и пересесть на автотранспорт либо следовать далее вверх. Проследовав через еще один коммерческий этаж (полезная площадь 720 м<sup>2</sup>), пассажир попадает на уровень кассового зала МКМЖД. На этом уровне имеется выход на пассажирскую галерею, ведущую к платформам кольцевой железной дороги. Еще на один уровень выше размещается кассовый зал Савеловского направления железной дороги, также позволяющий перейти по пешеходной галерее к эскалаторам, осуществляющим связь с платформами.

В данном примере при устройстве вестибюля требуется выполнить «стену в грунте»

на глубину 35 м, что лишь немногим больше, чем при классическом методе строительства.

Как уже говорилось ранее, «стену в грунте» и всю подземную часть вестибюля в целом можно использовать как опорное основание для многофункционального здания на поверхности (рис. 6). В этом здании можно разместить отель, офисы, жилье, а также автоматизированную парковку для автомобилей. В данном примере полезная площадь каждого надземного этажа составляет 1600 м<sup>2</sup>.

Вопрос строительства второго выхода представляется актуальным для 17 действующих станций Московского метрополитена, имеющих только один выход. Среди них следует особо выделить станции:

- «Шоссе энтузиастов» и «Дубровка», расположенные в непосредственной близости от соответствующих станций МКЖД;
- «Сухаревская», «Шаболовская» и «Полянка», находящиеся в районах с высокой плотностью застройки и дорогой недвижимостью;
- «Тимирязевская», являющуюся загруженным пересадочным узлом с Савеловским направлением железной дороги, и при этом

оснащенную только одним наклонным ходом на три эскалатора.

Еще более актуален этот вопрос для метрополитена Санкт-Петербурга, там второго выхода не имеют 39 станций глубокого заложения. Из них три («Балтийская», «Приморская» и «Василеостровская») нуждаются во втором наклонном ходе особенно остро.

Данная компоновка обладает большим потенциалом для реализации в формате проектов государственно-частного партнерства, так как обладает очевидным коммерческим потенциалом.

#### Ключевые слова

Станция глубокого заложения, наклонный ход, вестибюль станции глубокого заложения, эскалаторный тоннель.

*Deep mined station, inclined escalator tunnel, mined station ticket hall, mined station access.*

#### Для связи с авторами

Панкратов Михаил Сергеевич  
pankratov@sinaps.su  
Бородин Илья Александрович  
borodin@sinaps.su

# «МИИТОВСКАЯ» ГЛАВА В ИСТОРИИ МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Б. А. Лёвин, д. т. н., проф., ректор Московского государственного университета путей сообщения



**В этом году МИИТ отмечает своё 120-летие, и более 80 лет деятельность вуза связана с созданием и развитием крупнейшего ныне транспортного предприятия столицы.**

Первенца среди отечественных подземок – столичное метро – ударными темпами строила вся страна при участии ведущих учёных и инженеров государства. На первых ролях, что вполне естественно, были представители вузовской науки, имеющие большой опыт в проектировании и строительстве путей, мостов, тоннелей, а также эксплуатации транспортной инфраструктуры.

Союз Московского метро и МИИТа был предопределён исторически (что характерно и для метрополитенов некоторых других городов, «крёстными отцами» которых были отраслевые вузы).

В 2015 г. столичный метрополитен отметил 80-летие, но фактически «миитовский период» в его истории начался с первого дня строительства в 1931 г. Ударная комсомольская стройка проходила при самом активном участии студентов МИИТа. Университет, накопивший к этому времени солидный опыт в сфере кадрового обеспечения железнодорожной отрасли, приступил к подготовке квалифицированных кадров для столичного метрополитена.

Отметим, что многие выпускники вуза впоследствии возглавляли столичный метрополитен, руководили его подразделениями как эксплуатационно-технологического, так и управленческого и финансово-экономического направлений.

При этом руководители и ведущие специалисты метрополитена принимали активное

участие в образовательном процессе: выступали с лекциями перед студентами вуза, успешно работали на его профильных кафедрах.

За прошедшие годы десятки тысяч выпускников вуза – рабочих, техников, инженеров, управленческих кадров – обеспечивали эффективную работу крупнейшего транспортного предприятия столицы. Разработки миитовских учёных постоянно способствовали научно-техническому прогрессу стратегического партнёра. Стройотряды МИИТа, начиная с 30-х годов прошлого века, были в авангарде строительства новых очередей Московского метро.

Сегодня университет является одним из главных поставщиков квалифицированных кадров всех уровней и направлений деятельности для столичного метро, центром переподготовки и повышения квалификации его персонала. Ежегодно системой дополнительного профессионального образования МИИТа охвачено около двух тысяч руководителей и специалистов метрополитена, в том числе по разработанным вузом программам в сфере транспортной безопасности.

Университет ведёт активную профориентационную деятельность среди молодёжи с прицелом на её работу в структуре Московского метрополитена. Старшеклассники московских школ в ходе проводимых на базе вуза «университетских суббот» подробно знакомятся с историей, задачами развития и основными направлениями деятельности легендар-

ного предприятия, перспективами достойного трудоустройства и успешной карьеры.

Особо стоит остановиться на взаимодействии вуза с Московским метрополитеном в области транспортного строительства.

С момента создания в 1896 г. Московский государственный университет путей сообщения является головным вузом по подготовке инженеров-тоннельщиков и имеет большой опыт подготовки специалистов и научных кадров в области проектирования, строительства и эксплуатации транспортных сооружений, в том числе и по такой актуальной специализации, как «Тоннели и метрополитены».

Факультет «Мостостроение» и выпускающая кафедра тоннелей и метрополитенов были созданы в МИИТе в 1933 г., то есть за два года до пуска первой линии метро. Кафедру всегда возглавляли известные в России и за рубежом учёные. И сегодня трудно переоценить значительный вклад кафедры в проектирование и строительство Московского метрополитена, а также транспортных, коммунальных и гидротехнических тоннелей СССР и России. За время существования кафедры подготовлено более 2500 высококвалифицированных специалистов, работающих в крупных проектных и строительных организациях, в том числе и на Московском метрополитене. Примечательно, что руководителями и ведущими специалистами этих предприятий являются, в основном, выпускники МИИТа. В

2008 г. кафедра переименована и получила название «Подземные сооружения».

По прочной и многолетней традиции подготовка инженеров-тоннелищиков в МИИТе ведётся в тесном контакте с ведущими предприятиями и организациями подземного строительства: АО «Трансинжстрой», АО «Метрогипротранс», ОАО «Московский Метрострой».

Эти предприятия являются надёжными партнёрами вуза и работодателями для его выпускников.

В ходе обучения наши партнёры:

- принимают студентов на производственную (преддипломную) практику;
- предоставляют необходимую информацию о деятельности компаний, которая используется в образовательном процессе, а также при выполнении по заказам предприятий научных тем в рамках курсового и дипломного проектирования;
- принимают участие в ежегодном мониторинге качества подготовки специалистов;
- способствуют трудоустройству выпускников, наилучшим образом проявивших себя в учебном процессе и в ходе производственной практики.

В 2014 г. на базе Института пути, строительства и сооружений (ИПСС) МИИТ при Тоннельной ассоциации России была создана кафедра тоннелей и метрополитенов, которая за короткий срок стала сообществом профессорско-преподавательского состава высших и средних учебных заведений в области метро- и тоннелестроения и освоения подземного пространства.

Повышение квалификации в вузе проходят инженерно-технические работники 15 организаций, в том числе ГУП «Московский метрополитен», ОАО «Мосметрострой», ОАО «Мосинжпроект», ОАО «Метрогипротранс».

Слушатели постоянно отмечают высокий уровень обучающих программ, высокую квалификацию преподавателей, обеспечивающих изучение: конструкций подземных сооружений; инженерных систем; основ проектирования тоннелей и метрополитенов; современной тоннелепроходческой и горно-строительной техники; основ организации строительства тоннелей и метрополитенов; строительства подземных сооружений открытым и закрытым способами; вертикальных стволов; подземных сооружений в неустойчивых грунтах с изучением вопросов охраны окружающей среды.

В 2014 г. заместитель мэра Москвы М. Ш. Хуснуллин и ректор МИИТа подписали соглашение о сотрудничестве, предусматривающее использование научно-образовательного потенциала вуза в развитии транспортно-строительного комплекса столицы. Реализация соглашения обеспечивает, в том числе, прохождение производственной практики студентами МИИТа на объектах Московского метрополитена на оплачиваемых рабочих местах по специальностям:

- «Мосты и транспортные тоннели»;
- «Управление техническим состоянием железнодорожного пути»;
- «Промышленное и гражданское строительство».

Миитовская наука постоянно востребована на Московском метрополитене.

Интеллектуальный потенциал МИИТа нашёл эффективное применение при обеспечении виброзащиты Большого театра в тоннеле на участке метрополитена от станции «Тверская» до станции «Театральная», прокладке безбалластного пути в тоннелях, различных испытаниях не только на Московском, но и на Екатеринбургском и Петербургском метрополитенах и т. д.

Под руководством профессора Е. Н. Курбацкого разработан проект нормативного документа «Оценка и защита от воздействий на окружающую среду при строительстве и эксплуатации тоннелей метрополитена».

Эта научная разработка является весьма актуальной в связи с тем, что в настоящее время в Москве интенсивно проектируются и строятся новые линии метрополитена, в зону влияния которых попадает значительное количество жилых и общественных зданий, сооружений, среди которых немало важных в социальном плане и представляющих историческую и мемориальную ценность объектов.

Кафедра интеллектуальных транспортных систем МИИТа ведёт исследовательские работы в интересах метрополитена, обеспечивающие повышение безопасности пассажиров; комфортности пользования услугами метрополитена; пропускной способности метрополитена; эффективности работы пересадочных узлов; надёжности и устойчивости их работы.

Работа ведётся на основе применения современных компьютерных технологий и имитационного моделирования. С этой целью на кафедре впервые в мире была разработана оригинальная теория транспортных процессов на базе описания логики поведения интеллектуальных объектов.

В образовательном процессе широко используются результаты научных исследований: разработан и реализуется учебный курс для подготовки специалистов как эксплуатационного, так и информационного профиля.

На основе созданной методической базы построен ряд интеллектуальных моделей, в частности модель пассажирского потока в наземном вестибюле станции метро «Тимирязевская». На её базе разработаны механизмы оптимального формирования пассажиропотоков: у билетных касс, турникетов, при входе на эскалатор. Также проведён анализ пассажиропотоков на пересадочном узле станции метро «Киевская».

Учёными МИИТа для метрополитена предложено несколько вариантов конструкций с анкерным рельсовым скреплением (АРС), предназначенным как для укладки новых участков пути, так и замены устаревших:

- АРС, собранное на шпале-коротыше типа КР-65А из композиционного материала марки АБВ;
- АРС, собранное на железобетонных блоках LVT;
- опытная конструкция подкладочного рельсового скрепления типа АРС для деревянных шпал.

В настоящее время на строящихся линиях метрополитена используется свыше 130 тыс. блоков LVT с АРС (более чем на 40 км пути).

Учёные МИИТа продуктивно работают над задачами повышения безопасности движения и ресурсосбережения. Московскому метрополитену предложены для внедрения разработки, обеспечивающие упрочнение метизов за счёт объёмно-поверхностной закалки; устранение ожогов рельсовых стыков в зонах изолирующих накладок; создание клеёболтового стыка новой конструкции.

Очередным этапом в развитии сотрудничества Московского метрополитена и МИИТа стало совместное проведение в декабре 2015 г. I Международной конференции «Интерметро». Конференция собрала более 120 участников из 12 стран, которые представляли российские и зарубежные метрополитены, другие транспортные компании, ведущие вузы. На актуальные темы развития метрополитена было прослушано 57 докладов. Конференция прошла в пяти секциях: «Верхнее строение пути», «Тоннельные сооружения», «Тяговое электрооборудование», «Сигнализация, централизация и блокировка» и «Подвижной состав метрополитена». Работу секций возглавляли руководители соответствующих служб метрополитена.

Наиболее актуальными темами следует называть повышение надёжности работы инфраструктуры в целом и подвижного состава; снижение шумового и вибрационного воздействия на городскую среду; внедрение новейших достижений в области верхнего строения пути, строительства и расчёта тоннелей; применение энергосберегающих технологий в тяговом электроснабжении; прогрессивные системы сигнализации в устройствах автоматики и телемеханики движения поездов; новшества подвижного состава метрополитена.

Ещё одним направлением сотрудничества университета и Московского метрополитена является работа по созданию полигона для испытания элементов инфраструктуры в реальных условиях метро до их применения на главных путях. Одним из вариантов создания полигона рассматривается применение для этой цели малодеятельной соединительной ветки, на которой можно было бы организовать челночное движение испытательного поезда.

Значимым итогом работы конференции следует считать подписание руководителями Московского метрополитена и МИИТа меморандума о разработке технического регламента «О безопасности метрополитена». В настоящее время проект соответствующего соглашения о сотрудничестве находится в стадии окончательного утверждения.

Масштабы дальнейшего развития столичного метрополитена, который должен прийти и в Новую Москву, впечатляют. Уверен, что соразмерно этим масштабам будет укрепляться партнёрство Московского метрополитена и МИИТа.

#### Для связи с автором

Лёвин Борис Алексеевич  
tu@miit.ru

