

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ВИДА ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКОГО МЕХАНИЗИРОВАННОГО ЩИТОВОГО КОМПЛЕКСА С АКТИВНЫМ ПРИГРУЗОМ ЗАБОЯ

ON THE CHOICE OF THE TYPE OF TUNNEL MECHANICAL SHIELD COMPLEX WITH ACTIVE ADDITION OF STALLS

Г. П. Пастушков, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Мосты и тоннели» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь

В. А. Кузьмицкий, кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты и тоннели» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь

Строительство тоннелей в сложных инженерно-геологических условиях может быть эффективным только с использованием тоннелепроходческих механизированных щитовых комплексов (ТПМК) с активным пригрузом забоя.

В Республике Беларусь нет опыта строительства тоннелей с использованием ТПМК (не учитывая применяемого микротоннелирования), поэтому при выборе вида ТПМК целесообразно проанализировать особенности широко применяемых в настоящее время в мировой практике тоннелепроходческих щитовых комплексов и технологий проходки тоннелей с их использованием.

Tunnel construction in challenging engineering and geological conditions can only be effective with the use of mechanised tunnel-boring shield complexes (TPMK) with active additions to the stall.

In the Republic of Belarus there is no experience of tunnel construction using TPMK (not including applied microtunneling), so when choosing the type of TPMK it is appropriate to analyze the features of commonly used worldwide tunnelling shield complexes and the technology of tunnel boring with its help.

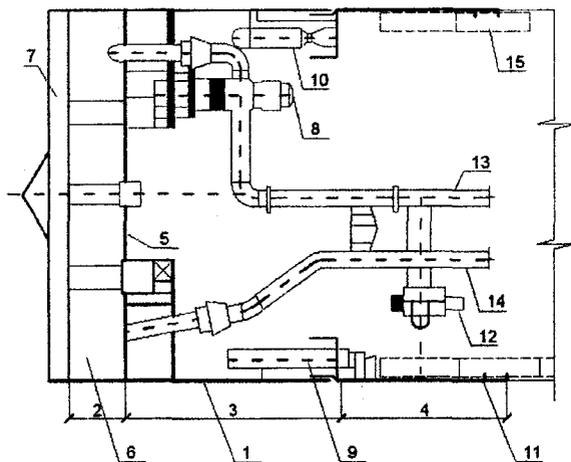
ВВЕДЕНИЕ

Как свидетельствуют проектные проработки ОАО «Минскметропроект», дальнейшее развитие линий Минского метрополитена связано с необходимостью проходки перегонных тоннелей в резко неоднородных инженерно-геологических условиях – от неустойчивых пылевато-глинистых обводненных и гравийно-галечниковых до плотных глинистых отложений, а также в сложных городских условиях и частично на большой глубине заложения. Анализ зарубежного опыта щитовой проходки показывает, что строительство тоннелей в таких сложных условиях может быть эффективным только с использованием тоннелепроходческих механизированных щитовых комплексов с активным пригрузом забоя.

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ ЩИТОВ С АКТИВНЫМ ПРИГРУЗОМ ЗАБОЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОХОДКИ С ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ

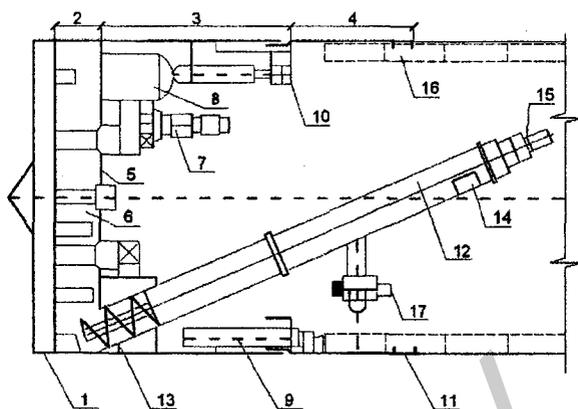
Активный пригруз забоя при проходке создается для обеспечения состояния его равновесия. Для этого на механизированных щитах ТПМК имеется герметическая призабойная камера, в которой формируется и активно поддерживается специальная опорная среда, противодействующая горизонтальному давлению грунта и давлению грунтовой воды на забой. По виду материала опорной среды различают тоннелепроходческие комплексы со щитами с гидропригрузом (сuspensionным пригрузом) и щитами с грунтовым пригрузом забоя [1, 2]. Принципиальные схемы механизированных щитов с активным пригрузом забоя приведены на рисунках 1 и 2.





1 – корпус щита; 2 – ножевая секция; 3 – опорная секция; 4 – хвостовая секция; 5 – лобовая диафрагма; 6 – призабойная камера; 7 – режущая головка; 8 – привод рабочего органа; 9 – щитовой домкрат; 10 – артикуляционный домкрат; 11 – хвостовое уплотнение; 12 – укладчик обделки; 13 – трубопровод подачи суспензии; 14 – трубопровод транспортирования пульпы; 15 – сегменты обделки тоннеля

Рисунок 1 – Механизированный щит ТПМК с гидропригрузом



1 – режущая головка; 2 – ножевая секция; 3 – опорная секция; 4 – хвостовая секция; 5 – лобовая диафрагма; 6 – призабойная камера; 7 – привод рабочего органа; 8 – шлюзовая камера; 9 – щитовой домкрат; 10 – артикуляционный домкрат; 11 – хвостовое уплотнение; 12 – шнековый конвейер; 13 – приемная часть шнека; 14 – выходное отверстие шнекового конвейера; 15 – привод конвейера; 16 – тоннельная обделка; 17 – укладчик сегментов тоннельной обделки

Рисунок 2 – Механизированный щит ТПМК с грунтопригрузом

На щитах с гидропригрузом (рис. 1) в качестве опорной среды действует бентонитовая суспензия, подаваемая в призабойную камеру 6 щита. Под действием давления, создаваемого в камере сжатым воздухом, суспензия проникает в поры грунта в забое, одновременно образуя на его поверхности «корку», которая равномерно распределяет давление опорной среды по всей поверхности забоя. Разработанный в забое грунт, поступающий через прорезы режущей головки ротора 7 в призабойную камеру щита, смешивается и перемешивается в ней с бентонитовой суспензией и переходит во взвешенное состояние, образуя пульпу. Последняя выдается на поверхность системой гидротранспорта (рис. 3), то есть с помощью грязевых насосов 13 и 14 пульпа из призабойной камеры по трубопроводу 21 подается на поверхность в наземную часть проходческого комплекса для сепарации пульпы и регенерации глинистой суспензии.

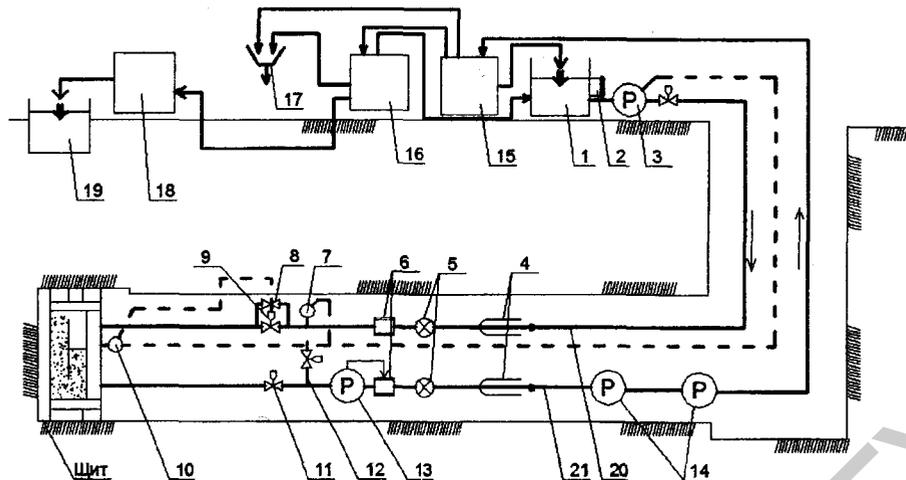
В наземной части комплекса на установках первичной 15 и вторичной 16 обработки пульпы происходит удаление из нее крупных и мелких фракций грунта, а очищенная суспензия подается в отстойник 19, из которого выдается в емкости для приготовления рабочей суспензии требуемого качества [2].

В процессе проходки тоннеля необходимо сохранять заданное давление опорной среды на забой выработки, что обеспечит стабильность забоя. Для этого объем выдачи грунта из призабойной камеры должен быть эквивалентен

объему разработки грунта в забое. Давление опорной среды контролируется с помощью датчиков давления воды, установленных на лобовой диафрагме камеры, и регулируется воздушным пузырем, создаваемым во втором отделении призабойной камеры. Объем выдачи грунта контролируется с помощью плотномеров и расходомеров, установленных на питающем и транспортном трубопроводах (рис. 3). Показания измерительных приборов выводятся на компьютеры управления технологическими процессами и на центральный компьютер тоннелепроходческого комплекса, где принимаются соответствующие решения.

Кроме того, для сохранения устойчивости забоя важно, чтобы на его поверхности образовывалась глинистая мембрана («корка») достаточной толщины. Если грунт на трассе проходки с большой проницаемостью (пески, гравий и др.), то глинистой суспензии необходимо придать требуемые показатели таких свойств, как удельный вес, вязкость и фильтрационные характеристики, чтобы исключить проникновение суспензии в грунт без образования мембраны требуемой толщины. Для придания суспензии таких свойств используют специальные бентонитовые порошки и добавки агента вязкости. Оптимальные значения параметров указанных свойств глинистой суспензии определяют экспериментально в лабораторных условиях отдельно для каждого вида грунта и бентонитового порошка.





1 – регуляционный бак; 2 – плотномер; 3 – насос для нагнетания суспензии в щит; 4 – измеритель хода телескопа; 5 – плотномер; 6 – расходомер; 7 – измеритель давления воды; 8 – контрольный измеритель давления; 9 – измеритель подачи суспензии; 10 – измеритель давления воды; 11 – измеритель выдачи пульпы; 12 – измеритель байпаса; 13 – насос выдачи пульпы; 14 – дополнительные насосы выдачи пульпы; 15 – установка первичной обработки пульпы; 16 – установка вторичной обработки пульпы; 17 – грунт, удаленный из суспензии; 18 – установка третичной обработки; 19 – отстойник обработанной глинистой суспензии; 20 – трубопровод подачи суспензии; 21 – транспортный трубопровод для выдачи пульпы

Рисунок 3 – Принципиальная схема тоннелепроходческого щитового комплекса с гидропригрузом

При проходке в глинистых грунтах необходимо в лабораторных условиях определять также вид и количество коагулирующего вещества, смешиваемого с пульпой на последнем этапе обработки ее на установке наземной части тоннелепроходческого комплекса. Введение в пульпу коагулятора необходимо для агрегирования мелких глинистых частиц грунта и ила, что способствует отделению их от бентонитовой суспензии.

Следовательно, при проходке тоннелей щитами с гидропригрузом забоя требуется создание на строительной площадке мощного сепарационного комплекса, резервуаров для отстоя суспензии, что требует больших площадей для обустройства строительной площадки. В городских условиях с плотной застройкой это требование не всегда выполнимо.

На щитах с грунтопригрузом (рис. 2) в качестве опорной среды действует разработанный ротором щита грунт, который через прорези в режущей головке 1 ротора поступает в призабойную камеру 6 щита. Первичной частью системы транспортирования грунта является шнековый конвейер 12 с приемной частью 13, закрепленной на нижней части лобовой диафрагмы 5 призабойной камеры 6. Через выходное отверстие 14 шнекового конвейера грунт передается во вторичные элементы системы транспортирования – рельсовую или конвейерную откатку – для выдачи на дневную поверхность.

Для поддержания постоянного давления опорной среды на забой в процессе проходки тонне-

ля шнековый конвейер должен выдавать грунт в объеме, эквивалентном объему грунта, входящего в призабойную камеру. Выполнение этого условия обеспечивает устойчивость забоя и безосадочную проходку.

На щитах с грунтопригрузом старого поколения поддержание заданного давления опорной среды на забой осуществляется машинистом щита путем регулирования входа разработанного грунта в призабойную камеру, интенсивности выдачи грунта по шнековому конвейеру и величины давления на щитовых домкратах. На щитах нового поколения предусмотрено автоматическое регулирование отбора грунта из призабойной камеры, что уменьшает зависимость качества проходки от человеческого фактора.

Особенностью проходки тоннелей с использованием щитов с грунтопригрузом является необходимость кондиционирования разработанного в забое грунта – придания ему требуемых свойств.

Так, при проходке в глинистых грунтах естественного физического состояния происходит налипание глины на режущую головку, что приводит к повышению износа механизмов, увеличению крутящего момента на роторе с риском полного его заклинивания. В случае сыпучих несвязных грунтов увеличивается износ режущей головки и износ шнека, а также возможны неравномерное давление опорной среды на забой и вывалы грунта в забое.

В случае обводненных смешанных грунтов возможен подъем грунтовой воды по шнеку,

создающей проблемы при транспортировании грунта.

Кондиционирование позволяет изменять физико-механические характеристики грунтов: повышать пластичность; снижать абразивные, когезионные и водопроницаемые характеристики; улучшать реструктурирование обводненных несвязных грунтов, переводя их в легко транспортируемое состояние.

Эффективным способом кондиционирования грунта является введение в призабойную камеру технической пены путем инъецирования водного раствора пенообразующего реагента и сжатого воздуха через специальные насадки, расположенные на режущей головке и лобовой диафрагме призабойной камеры.

В качестве реагента пены применяются специальные химические экологически чистые и биологически разлагаемые жидкие полимеры [3]. Для эффективного использования пенообразователя решающее значение имеют следующие параметры кондиционирования:

- концентрация реагента пены в рабочем водном растворе C_f , %;
- кратность пены (содержание воздуха в пене) по международной терминологии – параметр FER ;
- отношение объема пены к объему разработанного грунта – параметр FIR ;
- отношение объема рабочего водного раствора реагента пены к объему разработанного грунта – параметр PIR ;
- время жизни пенообразователя – параметр T_{50} .

На первом этапе освоения технологии строительства тоннелей с применением ТПМК с грунтопригрузом в России кондиционеры грунта с подобранными параметрами кондиционирования для конкретных инженерно-геологических условий на трассе тоннеля поставлялись по контракту поставщиком тоннелепроходческого оборудования. Однако в процессе проходки в резко неоднородных геологических условиях встретился ряд трудностей экономического и организационно-технологического характера [3]. Данное обстоятельство способствовало разработке целого спектра российских кондиционеров, которые были успешно использованы на строительстве тоннельных объектов в гг. Москве и Нижнем Новгороде.

Достоинством технологии с грунтовым пригрузом забоя является то, что для вывоза разработанного в забое грунта не требуется его обработка и, следовательно, нет необходимости в размещении на строительной площадке энергоемкого оборудования, как в случае технологии с гидропригрузом забоя.

ОБЛАСТЬ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВИДОВ ТПМК

Область рационального применения каждого вида ТПМК определяется многими факторами. Основным фактором являются инженерно-геологические условия на трассе строительства тоннеля. Опыт проходки тоннелей в России с применением ТПМК показал, что в случае проходки в несвязных водонасыщенных грунтах меньше проблем возникает с гидропригрузом забоя. Однако при наличии гравелистых грунтов, обладающих большой проникающей способностью, не всегда возможно создать на забое несущую бентонитовую «корку» и при этом в десятки раз увеличивается расход бентонитового порошка. Появляется угроза вывала грунта и, как следствие, потери устойчивости всего забоя и просадки поверхности земли.

При проходке тоннелей щитами с гидропригрузом в глинистых (особенно плотных) грунтах возникают проблемы при сепарации пульпы, а также возможно заиливание ротора щита, заштыбовывание всасывающего патрубка системы гидротранспорта грунта. Особые проблемы возникают при назначении величины давления пригруза забоя при проходке на малых глубинах и под различными подземными коммуникациями или подвалами зданий. В этих случаях, чтобы избежать выброса бентонитовой суспензии на поверхность или в возможные пустоты в массиве, необходимо выполнять тщательный расчет задаваемого давления пригруза или необходимо предусматривать специальные технические мероприятия, например, устройство «тюфяков» [1]. Кроме того, энергоемкость проходческого комплекса с гидропригрузом почти в два раза превышает энергоемкость комплекса с грунтопригрузом, а также для размещения наземной части комплекса с гидропригрузом требуются большие площади строительной площадки.

Одним из основных требований при строительстве тоннелей щитовым способом является необходимость обеспечения полной сохранности окружающей природной и городской среды, что может быть достигнуто в том случае, если деформации грунтового массива (осадки поверхности земли) при проходке не будут превышать допустимых величин для конкретных зданий и подземных коммуникаций, расположенных по трассе тоннеля. На рисунке 4 приведены, по данным [4], величины замеренных осадок поверхности земли при строительстве тоннелей разных диаметров с применением ТПМК с различным видом пригруза забоя. Из приведенных данных следует, что при про-

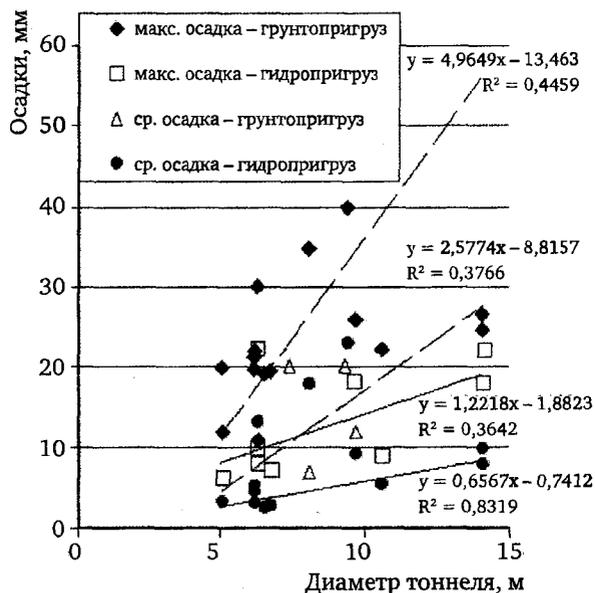


Рисунок 4 – Осадки поверхности земли при проходке тоннелей разного диаметра с помощью ТПМК

ходке тоннелей диаметром 5–7 м щитами с гидропригрузом усредненные показатели средних и максимальных значений осадок составляют, соответственно, 5 мм и 12 мм, а щитами с грунтопригрузом такие показатели осадок в 2–3 раза больше.

При выборе типа ТПМК могут оказаться полезными данные о применении ТПМК в мировом тоннелестроении. Приведенные на рисунке 5 диаграммы, взятые из [4], свидетельствуют о том, что до 2004 г. тоннели диаметром более 8 м (железнодорожные и автодорожные) сооружались преимущественно щитами с гидропригрузом забоя. Тоннели метрополитена, диаметр которых составляет порядка 6 м, в подавляющем количестве построены щитами с грунтопригрузом забоя.

Приведем некоторые примеры строительства тоннелей метрополитенов в России с применением ТПМК с активным пригрузом забоя. Так, при проходке перегонных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена в зоне «Размыва» (при восстановлении движения поездов Кировско-Выборгской линии) в неоднородном массиве, сложенном обводненными глинистыми и песчаными грунтами с гидростатическим давлением до 0,5 МПа, был применен ТПМК с суспензионным пригрузом забоя.

Основанием для принятия решения в пользу тоннелепроходческого комплекса с гидропригрузом послужили следующие факторы: возможность свести к минимуму осадки поверхности земли при большом гидростатическом давлении на глубине тоннелей, повышенная безопасность ведения проходческих работ, улучшение гидроизоляционных свойств тоннельной обделки за счет остающегося за обделкой бентонитового слоя [5].

При строительстве перегонных тоннелей мелкого заложения (расстояние от поверхности земли до верха обделки от 0,6 до 15,0 м) на участке Арбатско-Покровской линии Московского метрополитена было отдано предпочтение ТПМК с грунтовым пригрузом забоя [6]. Участок линии проложен в геологических отложениях четвертичного возраста, представленных водонасыщенными супесями и суглинками различной консистенции с включением гравия и гальки (иногда валунов) с прослойками песка. Экспериментально выполненный подбор химического состава пенного реагента и параметров кондиционирования для каждого вида грунта, а также расчетное обоснование давления пригруза забоя, выполненное ОАО ЦНИИС, обеспечили безопасную проходку тоннелей на небольшой глубине под крупными инженерными коммуникациями, городской автомагистралью и железнодорожными путями.

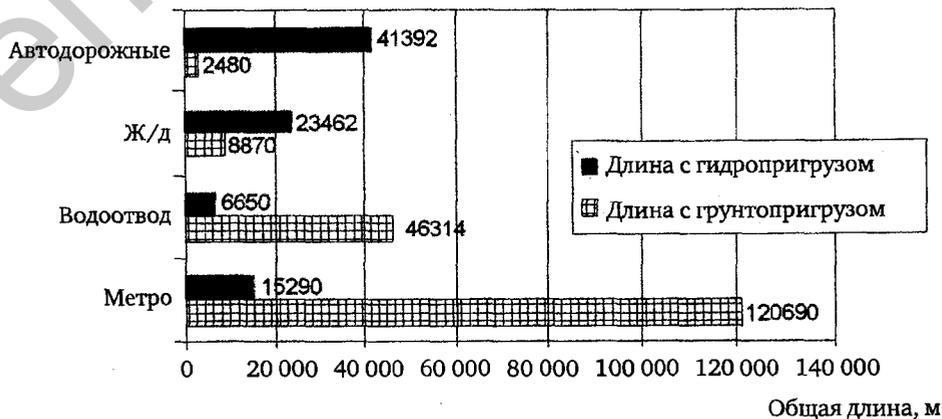


Рисунок 5 – Общая длина тоннелей, построенных к 2004 г. щитами «Херренкнехт» с активным пригрузом забоя



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании изучения и анализа опубликованного зарубежного опыта строительства тоннелей с использованием ТПМК с различным видом пригруза забоя можно сделать вывод, что для проходки тоннелей метрополитена в инженерно-геологических и городских условиях г. Минска более эффективным может оказаться применение тоннелепроходческого механизированного щитового комплекса с грунтовым пригрузом забоя при всестороннем обосновании решения вопроса о поставке кондиционеров и подборе параметров

кондиционирования грунта. В конкретных условиях заложения трассы тоннелей надежное обеспечение сохранности городской среды, возможно, потребует выполнения предварительного теоретического прогноза пессимистических осадок грунта в случае нештатных ситуаций и сравнения их с допустимыми осадками для каждого объекта на трассе, чтобы при необходимости предусмотреть соответствующие технические защитные мероприятия. Теоретический расчет деформаций грунта и осадок поверхности земли может быть выполнен с применением имеющихся комплексов компьютерных программ. □

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаревич, Г. В. Щиты с грунто- и гидропригрузом. Преимущества и недостатки работы на ТПМК с различными пригрузами забоя // *Метро и тоннели*. – 2004. – № 1. – С. 22–25.
2. *Руководство по проектированию и строительству тоннелей щитовым способом* / пер. с англ. В. Е. Меркина, В. П. Самойлова. – М.: Метро и тоннели, 2009. – 448 с.
3. Закошменный, А. Н., Немков, С. А., Файзрахманов, Н. Г. Опыт применения отечественных кондиционеров грунта при проходке тоннеля метрополитена в изменяющихся горно-гидрогеологических условиях // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2010. – № 1. – С. 37–40.
4. Мазеин, С. В., Потапов, М. А. Анализ параметров современных щитов с разным типом пригруза, применяемых в метростроении с минимальными осадками городской поверхности // *Сборник докладов научно-технических конференций Тоннельной ассоциации России*. – 2010–2011. – С. 58–59.
5. Кулагин, Н. И. «Размыв». История преодоления // под ред. д-ра техн. наук Н. И. Кулагина. – М.: ООО «ТА Инжиниринг», 2005. – 220 с.
6. Гончаров, А. А. Строительство Строгинского участка Арбатско-Покровской линии Московского метрополитена с использованием ТПМК фирмы «Херренкнехт» // *Метро и тоннели*. – 2009. – № 3. – С. 18–21.

Статья поступила в редакцию 04.03.13.

