Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2019, №3, Том 6 / 2019, No 3, Vol 6 <https://t-s.today/issue-3-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/07SATS319.pdf>

DOI: 10.15862/07SATS319 (<http://dx.doi.org/10.15862/07SATS319>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Ледяев А.П., Бойцов Д.А., Ледяева Н.Я. Теоретическое обоснование компоновочных решений станционных комплексов метрополитена средней глубины заложения (до 40 м) в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №3, <https://t-s.today/PDF/07SATS319.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/07SATS319

For citation:

Ledyayev A.P., Boytsov D.A., Ledyayeva N.Ya. (2019). Theoretical substantiation of the layout decisions of station complexes of the underground of medium depth (up to 40 m) in the engineering and geological conditions of Saint Petersburg. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/07SATS319.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/07SATS319

УДК 625.42

ГРНТИ 67.11

Ледяев Александр Петрович

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»
Санкт-Петербург, Россия
Заведующий кафедрой «Тоннели и метрополитены»
Доктор технических наук, профессор

Бойцов Дмитрий Анатольевич

ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, Россия
Начальник архитектурно-строительного отдела
Кандидат архитектуры

Ледяева Наталия Яковлевна

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»
Санкт-Петербург, Россия
Аспирант кафедры «Тоннели и метрополитены»

**Теоретическое обоснование компоновочных
решений станционных комплексов метрополитена средней
глубины заложения (до 40 м) в инженерно-геологических
условиях Санкт-Петербурга**

Аннотация. Развитие современного города и увеличение занимаемой территории предполагает также усовершенствование его транспортной инфраструктуры. В соответствии с отраслевой схемой развития метрополитена г. Санкт-Петербурга и текущем отставании его выполнения требуется новый подход к осуществлению плана строительства сети метрополитена. В данной статье предложена концепция объемно-планировочных, конструктивных и строительных решений для станций метрополитена кольцевой линии, а также для периферийных районов города.

За последние 10 лет наблюдается стремительный прирост населения и активная высотная застройка всех районов города, увеличивается загруженность как городских, так и пригородных дорог, что приводит к неэффективности общественного и индивидуального

транспорта. Давно существует проблема разгрузки действующих линий метрополитена и превышение неохваченных территорий доступными видами городского пассажирского транспорта, основным из которых является метрополитен. Для удовлетворения потребностей населения в комфортных перевозках с минимальными затратами времени требуется масштабный подход к реализации перспективного плана развития метрополитена.

Инженерно-геологические условия г. Санкт-Петербурга характеризуются большой сложностью при проектировании и строительстве подземных сооружений. Вмещающей средой для объектов метрополитена малой и средней глубины заложения служат водонасыщенные неустойчивые песчано-глинистые грунты, часто ленточной структуры. Мощность четвертичных отложений в пределах города имеет большой перепад абсолютных отметок и характеризуется большой разнородностью. Относительно благоприятными условиями для строительства подземных сооружений являются слои кембрийских глин, полная мощность которых варьируется от 12–20 м до 95–126 м относительно земной поверхности. Коренные грунты характеризуются достаточной плотностью и однородностью с незначительными водопритоками и увлажненностью, что обусловило глубокое заложение подавляющего количества станционных комплексов и перегонных тоннелей петербургского метрополитена.

Ключевые слова: метрополитен; станция средней глубины заложения; кольцевая линия; полузакрытый способ; двухпутные перегонные тоннели; объемно-планировочное решение; шахтный ствол; колонная станция; одноводчатая станция

Введение

Ориентация на сокращение сроков строительства, материальных затрат и времени доступа пассажиров на платформу диктуют тенденции расположения объектов мелкого заложения. На наш взгляд для решения этих задач перспективным является вариант сочетания открытого и закрытого способа работ при сооружении станционных комплексов совместно с щитовой проходкой двухпутных перегонных тоннелей. Опыт проектирования, строительства и эксплуатации двухпутных тоннелей на примере Фрунзенского радиуса и продолжении Невско-Василеостровской линии имеет положительный экономический эффект и значительно сокращает сроки производства работ. Станции мелкого заложения «Дунайский пр.», «Новокрестовская», «Беговая», сооружаемые методом «top-down» с ограждающим временным креплением из стен в грунте и возведением несущих конструкций из монолитного железобетона с замкнутой наружной гидроизоляцией в полной мере отвечают требованиям надежности конструкций, удобства пользования пассажирами и отличаются удачным объемно-планировочным решением. Станции кольцевой линии подразумевают расположение их на средней глубине, так как неизбежно их пересечение в плане с существующими станциями и устройство пересадочных коридоров по наикратчайшему расстоянию. Также периферийные районы города в большей мере предоставляют возможности размещения станций мелкого заложения. Таким образом прослеживается необходимость формирования концепции для новых пусковых линий с использованием непрерывной проходки двухпутных перегонных тоннелей и возведением станционных комплексов открытым или полузакрытым способом.

Компоновочные решения станционных комплексов

Инженерно-геологические условия, характер рельефа, градостроительные особенности и определение пассажиропотоков обуславливают объемно-планировочные и конструктивно-технологические решения будущих станционных комплексов метрополитена. Суть предлагаемой компоновочной схемы станционного комплекса средней глубины заложения состоит в следующем:

- перегонные тоннели – двухпутные $\varnothing 10,3$ м;
- станция с боковыми платформами, сооружаемая открытым и закрытым способом;
- для связи с поверхностью – вертикальный ствол большого диаметра 30...45 м, глубиной заложения до 40 м для размещения вестибюля, эскалаторов, лифтов, аванзала и спуска на платформу, в том же объеме ТПП (СТП) и сопутствующие технические, служебные помещения;
- второй вертикальный $\varnothing 25...30$ м для вентиляции, эвакуации, служебных и технических помещений (рисунки 1–5) [1].

В отношении производства работ важно выдержать следующую последовательность:

- проходка вертикальных стволов в месте расположения будущей станции на поверхности, над проектируемой трассой в зоне расположения платформенного участка;
- проходка ТПМК (тоннеле проходческий механизированный комплекс) через всю станцию, в зоне пройденных стволов – сквозной пропуск щита;
- сооружение платформенного участка с раскрытием выработки из пройденных стволов закрытым способом с применением специальных способов сооружения временного крепления.

Расположение станции определяется в соответствии с градостроительным планом и наличием свободной от застройки рабочей зоны. Размеры этой зоны зависят от компоновочной схемы комплекса. Предлагаемый вариант размещения обеспечивает минимальное стеснение сложившихся условий жизни города на период строительства за счет уменьшенных размеров стройплощадки для открытого способа и отсутствием занимаемых территорий на поверхности при закрытом способе, а также отсутствием мертвых зон на период эксплуатации в этих же пределах платформенного участка.

При проектировании станции один из главных вопросов – это сообщение платформенного участка с поверхностью. Традиционно на станциях глубокого заложения устраиваются длинные эскалаторные наклонные ходы, а на мелком заложении лестничные марши или эскалаторы в едином объеме станции.

1 – платформенный участок; 2 – лестничный подъем к эскалаторам; 3 – лифтовые подъемники; 4 – служебные помещения; 5 – эвакуационные выходы; 6 – лестничный спуск к переходу на пересадочную станцию; 7 – двухпутный перегонный тоннель

Рисунок 1. План в уровне платформы (разработано автором)

1 – аванзал; 2 – эскалаторы; 3 – лестничный спуск на платформу; 4 – лифтовые подъемники; 5 – служебные помещения; 6 – венткамеры и технические помещения; 7 – эвакуационные выходы; 8 – служебные и бытовые помещения

Рисунок 2. План в уровне аванзала (разработано автором)

1 – кассовый зал; 2 – эскалаторы; 3 – лифтовые подъемники; 4 – служебные помещения; 5 – двери входа в метро; 6 – двери выхода из метро; 7 – подуличный переход

Рисунок 3. План в уровне вестибюля (разработано автором)

1 – вестибюль; 2 – эскалаторы; 3 – ТПП и технические помещения; 4 – служебные помещения; 5 – аванзал и спуск на платформу; 6 – платформенный участок; 7 – лестничный спуск к переходу на пересадочную станцию; 8 – венткамеры и технические помещения; 9 – служебные и бытовые помещения; 10 – двухпутный перегонный тоннель

Рисунок 4. Продольный разрез по станции (разработано автором)

1 – вестибюль; 2 – эскалаторы; 3 – ТПП, технические и служебные помещения; 4 – лифтовые подъемники; 5 – аванзал и спуск на платформу; 6 – платформенный участок; 7 – односводчатая станция, возводимая закрытым способом с использованием обделки перегонного тоннеля

Рисунок 5. Поперечный разрез по станции (разработано автором)

В зависимости от сложившейся застройки расположение вестибюля и эскалаторного тоннеля не всегда обеспечивает быстрый доступ пассажира на платформу, часто необходимо сооружать дополнительные переходные коридоры, повороты и локальные перепады высот, что значительно влияет на удобство пользования пассажирами, увеличивает материальные затраты и усложняет процессы производства работ. Особенностью объемно-планировочного решения предлагаемого варианта является расположение всех сооружений, устройств и сопутствующих помещений, а также части платформы в едином пространственном объеме вертикального ствола. Круговой ствол большого диаметра позволяет расположить 4 ленты эскалаторов в 2–3 уровня друг над другом и обеспечить быстрый доступ пассажира на платформу. Вестибюль может быть наземным или подземным с подуличными переходами. Для доступа маломобильных групп населения в зону вестибюля предусматриваются пандусы или траволаторы, для доступа на платформу из вестибюля – лифты. Шахтный ствол уменьшенного диаметра предназначен для размещения систем вентиляции, эвакуационного выхода, служебных и технических помещений. Также для этой выработки предполагается увеличить глубину заложения в случае сооружения пересадочного коридора со станцией другой линии [2; 4].

Исходя из опыта строительства московского метрополитена весьма успешно применение подобных вертикальных стволов большого диаметра. Шахтный ствол глубиной более 47 м, диаметром 31 м (между проспектом Мира, эстакадой автомобильного третьего транспортного кольца (ТТК) и железнодорожными путями Октябрьской железной дороги) был выполнен с обделкой из буросекущихся свай диаметром 1,2 м, без внутреннего распорного крепления с внутренними железобетонными круговыми поясами размером 1,2×1,0 м, расположенными на семи ярусах по глубине [3]. В инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга возможно также устройство котлована из буросекущихся свай или из стен в грунте. Окончательный выбор типа и параметров конструкции требует предварительного научного сопровождения – проведение исследований напряженно-деформированного состояния на моделях из эквивалентных материалов и методами математического моделирования в объемной постановке задачи. Результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований служат необходимым и единственным обоснованием для внедрения в производство данной конструкции.

Особыми преимуществами обладает двухплатформенная станция: исключает пересечение встречных потоков и имеет уменьшенную ширину платформ, которая назначается по расчету или должна быть принята минимальной в соответствии с СП 120.13330.2012 таблица 5.6. Для объединения платформ устраиваются лестничные марши и переходные мостики над путями с выходом в аванзал к эскалаторам. В отношении выбора конструкции для платформенного участка, возводимого закрытым способом, являются модификации односводчатых и колонных станций (рисунки 6–8) из монолитного или сборно-монолитного железобетона. Возведение станции после проходки ТПМК подразумевает вскрытие забоя из вертикальных стволов с применением специальных способов крепления кровли, стен и подошвы выработки. В качестве специальных способов может быть принята опережающая крепь (разработка грунта ведется заходками, как правило до 6 м) или с применением грунтоцементных свай (jet-grouting) в зависимости от состава пересекаемых грунтов или экрана из труб по типу возведения буронабивной сваи в обсадной трубе. Параметры, вид и максимальная длина заходки временного крепления определяется расчетом и инженерно-геологическими, гидрогеологическими условиями. Уменьшенные размеры станции и значительные объемы предварительно разработанного грунта механизированным комплексом снижают объемы доработки грунта до проектного положения станции. Двухпутный тоннель в некоторой степени облегчает работу временной крепи и может служить опорной конструкцией в случае необходимости при производстве работ. Так как основную площадь поперечного сечения забоя занимает обделка пройденного тоннеля, а временное крепление замыкает контур выработки, то вполне можно предположить, что давление со стороны забоя будет минимальным или отсутствовать. После всех земляных работ, выполняемых на заходку, возводятся несущие конструкции попеременно с разборкой временных блоков обделки и включением лотковых в обделку станции. Весь цикл производственных процессов по сооружению односводчатой конструкции или станции колонного типа требует проведение научных исследований напряженно-деформированного состояния на моделях из эквивалентных материалов и методами математического моделирования.

Благодаря уменьшенным габаритам станции в пределах платформенного участка и круговому сечению стволов в отличие от протяженных станционных комплексов конструкции воспринимают относительно более равномерные нагрузки, вступая в работу с окружающим массивом с формированием упругого отпора.

Поперечный разрез односводчатой станции,
возводимой закрытым способом

Рисунок 6. Поперечный разрез односводчатой станции,
возводимой закрытым способом (разработано автором)

Рисунок 7. Поперечный разрез двухпролетной колонной станции, возводимой закрытым способом (разработано автором)

Рисунок 8. Поперечный разрез трехпролетной колонной станции, возводимой закрытым способом (разработано автором)

На момент строительства не требуется немедленное возведение внутренних несущих конструкций ствола или временных распорок внутри котлована, тем самым такое временное крепление обеспечивает необходимый фронт работ на весь период строительства. Усиление стен котлована производится железобетонными поясами и по необходимости анкерным креплением.

При планировании организации работ важнейшим вопросом является увязка строительно-монтажных работ по сооружению станционного комплекса и перегонных тоннелей. Как правило, в зависимости от принятой схемы производства работ требуются значительные затраты людских ресурсов, материальных средств и времени на монтаж и демонтаж щитовых комплексов в пределах станции [10]. Двухпутные тоннели в этом отношении имеют существенное преимущество – одинаковое междупутье на всей линии,

поэтому нет необходимости сооружать раструбы и камеры съездов, все путевое хозяйство располагается в едином объеме. Предлагаемый вариант объемно-планировочных решений обеспечивает непрерывность строительных процессов, так как щит включается в работу и по сооружению станции. Предполагаются две принципиальных схемы пропуска ТПМК через станцию: при открытом способе работ щит продвигается сквозь готовую станцию на холостом ходу; при закрытом способе ТПМК выполняет разработку грунта и монтаж блоков обделки без перевязки швов. В состав обделки входят специальные временные блоки с применением полимерной арматуры и постоянные, включаемые в состав основных несущих конструкций станции в уровне подошвы.

Заключение

Возможности компоновочного решения, конструктивной схемы и методов строительства, изложенного в данной статье, позволяют в большой мере вписаться в сложившиеся градостроительные и инженерно-геологические условия, а также обеспечить сохранность существующей застройки. При данной схеме размещения всех сооружений и устройств коэффициент использования выработки равен единице, т. е. отношение объема подземного сооружения равен объему извлеченного грунта для его размещения. Минимальные объемы земляных работ обеспечивают достижение высоких экономических показателей и исключают необходимость размещения грунта в отвалы. Комбинирование открытого и закрытого способов работ в пределах платформенного участка и сооружение вертикальных выработок вместо наклонных гарантируют достижение высокой степени экономичности, надежности и долговечности конструкций за счет компактности станционного комплекса и применения эффективных конструктивных решений, следовательно, улучшения показателей напряженно-деформирования состояния конструкций и окружающего массива. Односводчатая конструкция участка платформы и внушительные размеры вертикальных стволов позволяют разместить необходимое станционное оснащение в едином пространственном объеме и обеспечить широкие возможности для оформления интерьеров, следовательно, создания благоприятной среды для пассажиров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов Ю.С., Голицынский Д.М., Ледяев А.П. Метрополитены. Учебник для вузов / Под ред. Ю.С. Фролова. – М.: «Желдориздат», 2001. – 528 с.
2. Е.В. Щекудов. Перспектива и актуальные проблемы строительства транспортных тоннелей и метрополитенов в России (по материалам круглого стола) // Метро и тоннели. 2018. №2. С. 2–6.
3. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. №13. С. 25–71.
4. Ледяев А.П. Автотранспортные тоннели в дельте реки Невы: Автореф. дисс. д-ра техн. наук / А.П. Ледяев. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 1996.
5. Туренский Н.Г. Строительство тоннелей и метрополитенов. Организация, планирование, управление: Учебник для вузов / Н.Г. Туренский, А.П. Ледяев; ред. Н.Г. Туренский. – Москва: Транспорт, 1992.
6. Голубых А.Б. Тоннели под Невой – объективная потребность / А.Б. Голубых, А.П. Ледяев, Я.В. Мельник // КИПС инфо: Издание Корпуса инженеров путей сообщения. – СПб., 2003. – N1. – С. 52–53.
7. Демешко Е.А., Ходош В.А. Прогнозирование осадок поверхности при щитовой проходке тоннеля в песчаных грунтах. Метрострой, 1963, № 3–4, с. 50–53.
8. Кандауров И.И. Моделирование при определении параметров городских транспортных тоннелей / И.И. Кандауров, А.П. Ледяев, И.Н. Спицина // Транспортное строительство: Науч.-техн. и произв. журн. – 1984. – N12. – С. 45.
9. Королев А.И., Овчинников Ф.Е., Лебедев М.А. Технический прогресс и экономика метрополитенов. М.: Транспорт, 1982. С. 3–20.
10. John, O. Bickel, Thomas R. Keusel, and Elwyn H. King, Tunnel Engineering Handbook, Chapman and Hall, 1996, 544 p.

Ledyaev Alexander Petrovich

Saint Petersburg railway transport university of emperor Alexander I, Saint Petersburg, Russia

Boytsov Dmitry Anatolyevich

JSC «Lenmetrogiprotrans», Saint Petersburg, Russia

Ledyaeva Natalia Yakovlevna

Saint Petersburg railway transport university of emperor Alexander I, Saint Petersburg, Russia

Theoretical substantiation of the layout decisions of station complexes of the underground of medium depth (up to 40 m) in the engineering and geological conditions of Saint Petersburg

Abstract. The development of a modern city and the increase in the occupied territory also involves the improvement of its transport infrastructure. In accordance with the sectoral scheme of development of the subway of St. Petersburg and the current backlog of its implementation requires a new approach to the implementation of the plan for the construction of the subway network. This article proposes the concept of space-planning, structural and construction solutions for metro stations of the ring line, as well as for the peripheral areas of the city.

Over the past 10 years, there has been a rapid increase in population and active high-rise development of all areas of the city, increasing congestion of both urban and suburban roads, which leads to inefficiency of public and individual transport. For a long time there has been a problem of unloading the existing subway lines and exceeding the uncovered areas by available types of urban passenger transport, the main of which is the subway. To meet the needs of the population in comfortable transportation with minimal time required a large-scale approach to the implementation of the long-term plan for the development of the subway.

Engineering-geological conditions of St. Petersburg are characterized by great complexity in the design and construction of underground structures. Water-saturated unstable sandy-clay soils, often of a belt structure, serve as the host medium for the objects of the underground of small and medium depth. The thickness of Quaternary deposits within the city has a large difference of absolute marks and is characterized by great heterogeneity. Relatively favorable conditions for the construction of underground structures are the layers of Cambrian clays, the full capacity of which varies from 12–20 m to 95–126 m relative to the earth's surface. The root soils are characterized by sufficient density and uniformity with low water flows and moisture, which led to the deep laying of the vast number of station complexes and distillation tunnels of the St. Petersburg metro.

Keywords: metropolitan; medium depth station; circular line; half-closed way; double-track main line tunnels; space planning solution; shaft; column station; vaulted station

REFERENCES

1. Frolov Yu.S., Golitsynskiy D.M., Ledyayev A.P. (2001). *Metropoliteny. Uchebnik dlya vuzov. [Subways. Textbook for high schools.]* Moscow: Zheldorizdat, p. 528.
2. Shchekudov E.V. (2018). Perspective and current problems of the construction of transport tunnels and subways in Russia (based on the materials of the round table). *Metro and tunnels*, 2, pp. 2–6 (in Russian).
3. Dashko R.Eh., Aleksandrova O.Yu., Kotyukov P.V., Shidlovskaya A.V. (2011). Features of engineering and geological conditions of St. Petersburg. *Urban development and geotechnical construction*, 13, pp. 25–71 (in Russian).
4. Ledyayev A.P. (1996). *Avtotransportnye tonneli v del'te reki Nevy. [Road transport tunnels in the Neva River Delta.]* Saint Petersburg: Petersburg State University of Railway Engineering.
5. Turenskiy N.G., Ledyayev A.P. (1992). *Stroitel'stvo tonneley i metropolitenov. Organizatsiya, planirovanie, upravlenie. [Tunnel and subway construction. Organization, Planning, Management.]* Moscow: Transport.
6. Golubykh A.B., Ledyayev A.P., Mel'nik Ya.V. (2003). Tunnels under the Neva – an objective need. *Edition of the Corps of Railway Engineers*, 1, pp. 52–53 (in Russian).
7. Demeshko E.A., Khodosh V.A. (1963). Prediction of surface sediment during shield tunneling in sandy soils. *Metrostroy*, 3–4, pp. 50–53 (in Russian).
8. Kandaurov I.I., Ledyayev A.P., Spitsina I.N. (1984). Modeling in determining the parameters of urban transport tunnels. *Transport construction*, 12, p. 45 (in Russian).
9. Korolev A.I., Ovchinnikov F.E., Lebedev M.A. (1982). *Tekhnicheskii progress i ehkonomika metropolitenov. [Technological Progress and Metro Economics.]* Moscow: Transport, p. 3–20.
10. John O. Bickel, Thomas R. Keusel, Elwyn H. King (1996). *Tunnel Engineering Handbook*. Chapman and Hall, p. 544.