

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-413-420>

УДК 69.057

Конструкция одноуровневого станционного комплекса для применения технологии сквозной проходки

Асп. А. О. Коликов¹⁾, докт. техн. наук, проф. Г. П. Пастушков¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Метрополитен оказывает огромное влияние на развитие городской транспортной инфраструктуры. Необходимость увеличения эффективности пассажирских перевозок вызвана стремительным ростом пассажирооборота, а также увеличением расстояния от окраин города до центра. В связи с необходимостью развития сети метрополитена в Минске, которая подтверждается исследованиями в области пассажиропотоков основных направлений города, приобретен механизированный тоннелепроходческий щит CSM Bessac, позволяющий значительно увеличить скорость проходки перегонных тоннелей. Использование механизированного тоннелепроходческого комплекса в традиционной концепции строительства метрополитена, при которой проходка перегонных тоннелей осуществляется после сооружения станционного комплекса, не позволяет применять щит с максимальной экономической эффективностью ввиду небольшой протяженности перегонных тоннелей, необходимости сооружения монтажно-щитовых камер и проведения работ по разборке и сборке щита. В условиях использования механизированного тоннелепроходческого щитового комплекса актуально применение новой концепции, разработанной Ю. С. Фроловым и получившей название сквозной проходки. Суть ее заключается в непрерывной проходке перегонных тоннелей на пусковом участке строящейся линии и последовательном сооружении каждого станционного комплекса по мере продвижения через него проходческих щитов. Для реализации концепции сквозной проходки актуально применение полузакрытого способа строительства, при котором конструкция перекрытия сооружается открытым способом, а остальные элементы – закрытым. Проанализированы имеющиеся решения станций метрополитена полузакрытого способа работ. Произведены детальный анализ с учетом адаптации к условиям строительства в Минске и разработка конструктивных элементов и узлов платформенного участка станции, представляющего собой двухконсольный свод с развитой ригельной частью, опирающийся на сваи-колонны круглого сечения. Усилия от разомкнутого кольца гибкой обделки путевых тоннелей воспринимаются консольной частью свода и лотковой плитой. Рассмотрены конструкция станции метрополитена, основные ее элементы, их назначения и специфика работы, а также вопросы оптимизации и результаты технико-экономического обоснования конструкции.

Ключевые слова: метрополитен, проходческий щит, сквозная проходка, станция мелкого заложения, строительство, оптимизация, технико-экономическое обоснование

Для цитирования: Коликов, А. О. Конструкция одноуровневого станционного комплекса для применения технологии сквозной проходки / А. О. Коликов, Г. П. Пастушков // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 413–420. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-413-420>

Single-Level Station Complex Structure for Application of Through Driving Construction Method

A. O. Kolikov¹⁾, G. P. Pastushkov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Metro Service has a huge impact on the development of urban transport infrastructure. The need to increase the efficiency of passenger transportation is caused by the rapid growth in passenger turnover as well as an increase in the distance from the outskirts of the city to the center. In connection with the need to develop a metro service network in Minsk city, which is confirmed by research in the area of passenger traffic in the main areas of the city, the CSM Bessac tunnel boring machine was purchased, which allows significantly to increase the speed of tunnel driving. The use of a mechanized tunnel boring machine in the traditional concept of the metro network construction, in which driving of tunnels is carried out after construction of stations, does not allow to use a shield with maximum economic efficiency due to the small extent of tunnels. There is also a need to build assembly-shield chambers and carry out works on disassembling and assembling the shield.

Адрес для переписки

Пастушков Геннадий Павлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 146а,
220014, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-95-97
mit_ftk@bntu.by

Address for correspondence

Pastushkov Gennady P.
Belarusian National Technical University
146a, Nezavisimosty Ave.,
220014, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-95-97
mit_ftk@bntu.by

The application of the new concept developed by Yu. S. Frolov and called “through driving” is actual in the conditions of the use of a mechanized tunnel boring machine. Its essence lies in the continuous driving of tunnels on the line section under construction and the consecutive construction of each station complex as the tunnel boring machine passes through it. To implement the concept of “through driving”, it is relevant to use a semi-closed construction method, in which the floor structure is constructed in an open way, and the other elements are closed. The available solutions of the metro stations constructed while using a semi-closed method of work have been analyzed in the paper. A detailed analysis has been carried out with due account of the adaptation to the construction conditions in Minsk, and the development of structural elements and assemblies of the platform area of the station, which is a two-cantilever vault with a developed transom part, resting on pile-columns of a circular cross section. Forces from the open ring of flexible tunnels lining are supported by a cantilever part of an arch and a bottom plate. The paper considers a design of a metro station, its main elements, their purpose and specificity of work, as well as optimization issues and the results of the design feasibility study.

Keywords: metro, tunnel boring machine, through driving, shallow metro station, construction process, optimization, feasibility study

For citation: Kolikov A. O., Pastushkov G. P. (2020) Single-Level Station Complex Structure for Application of Through Driving Construction Method. *Science and Technique*. 19 (5). 413–420. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-413-420> (in Russian)

Объемно-планировочные решения

Концепция сквозной проходки, разработанная Ю. С. Фроловым [1], представляет большой интерес для строительства Минского метрополитена в связи с приобретением механизированного тоннелепроходческого щитового комплекса CSM Bessac. Суть концепции заключается в непрерывной (сквозной) проходке перегонных тоннелей на всем протяжении пускового участка строящейся линии (3–4 км) и последовательном сооружении каждого станционного комплекса по мере продвижения через него проходческих щитов. Работы по сооружению всех станций на новом пусковом участке выполняет одно специализированное подразделение. К строительству очередной станции приступают только после того, как перегонные щитовые комплексы пройдут часть трассы в пределах этой станции [2].

В результате анализа известных конструктивных решений [1–5] для применения концепции сквозной проходки была произведена детальная разработка элементов и узлов варианта станции с двухконсольным железобетонным монолитным сводом, опирающимся на сталежелезобетонные сваи-колонны круглого сечения.

Станционный комплекс включает вестибюли, входы и выходы из них, платформенный участок, служебные помещения, а также все необходимые для эксплуатации сооружения в соответствии с нормативной документацией [6–8]. Вид станционного комплекса в плане приведен на рис. 1.

В состав каждого вестибюльного блока входят кассовый зал с двумя кассами, пассажирские лифты, служебные помещения и другие вспомогательные элементы. Общий вид вестибюлей представлен на рис. 2.

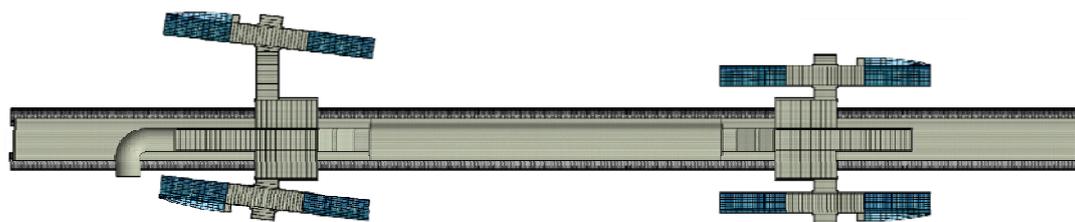


Рис. 1. Станционный комплекс

Fig. 1. Station complex

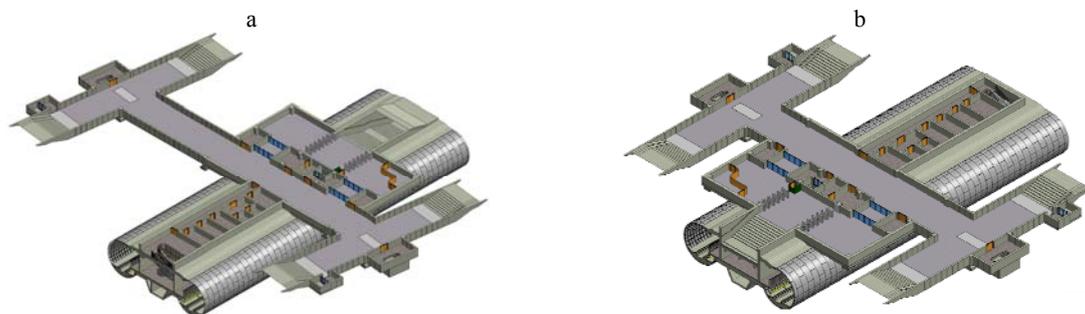


Рис. 2. Вестибюль 1 (а), вестибюль 2 (б)

Fig. 2. Lobby 1 (a), lobby 2 (b)

Кассовый зал связан с платформой лестничным сходом. Вестибюли примыкают к пешеходным тоннелям, объединяющим входы и выходы на поверхность. К пешеходным тоннелям примыкают блоки служебных помещений. Разрезы станции по вестибюлям приведены на рис. 3.

Платформенный участок предусмотрен в данном варианте с размерами, необходимыми для обеспечения пропускной способности промежуточной станции в центральных районах города. К платформенному участку примыкают служебные проходы путевых тоннелей, связывающие служебные помещения, пассажирские лифты и платформенный зал. На платформенном участке располагаются два ряда колонн с шагом 6 м и пролетом 6 м. Высота по центру зала составляет 5,0 м, минимальная высота прохода по станции 2,8 м. Общий вид и разрез платформенного участка представлены на рис. 4.

Для разделения пассажирской зоны и путевых тоннелей на станции предложено поли-

карбонатное платформенное ограждение с автоматическими дверями. В конструкции платформенного участка предусмотрен технологический проход. Станционный комплекс имеет служебные помещения, размещенные в уровне как платформы, так и вестибюлей. Путевые служебные проходы имеют перильное ограждение.

Вдоль служебных помещений пролегают вентиляционные каналы, обеспечивающие продольную вентиляцию платформенного участка. В конструкции предусмотрен лестничный спуск в технологический проход под платформенным залом. Общий вид и разрез служебных помещений показаны на рис. 5.

Конструкция противодутьевых сбоек сходна с конструкцией платформенного участка. К ним также примыкают путевые служебные проходы, оборудованные перильным ограждением. Конструкции перекрытия и лотковой плиты выполнены плоскими с развитой ригельной частью. Общий вид и разрез противодутьевой сбойки приведены на рис. 6.

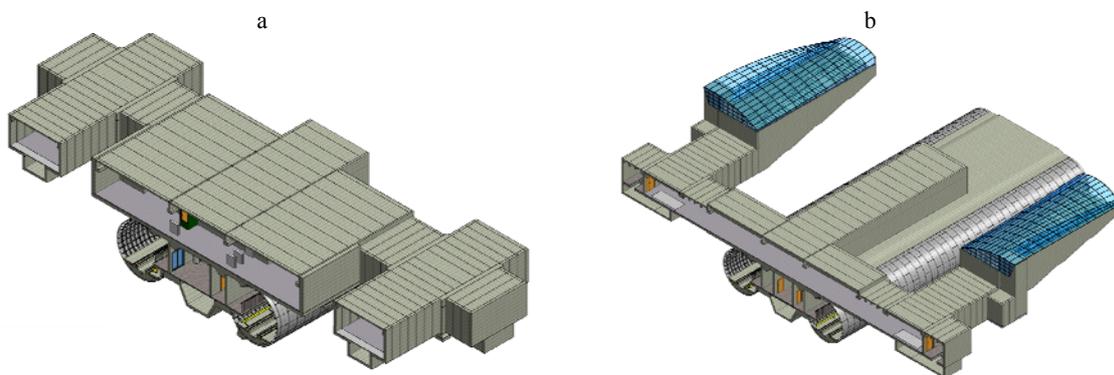


Рис. 3. Разрезы станции по вестибюлю 2 (а) и по пешеходному тоннелю у вестибюля 2 (б)

Fig. 3. Stations section along the lobby 2 (a) and pedestrian tunnel at the lobby 2 (b)

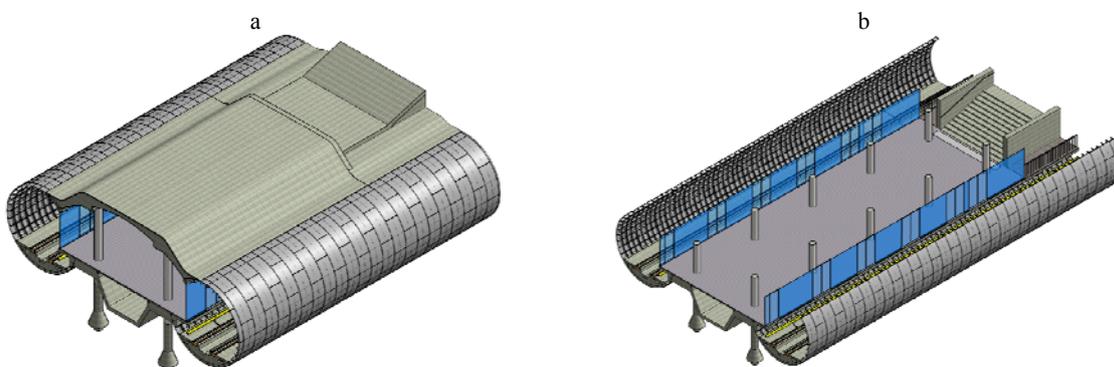


Рис. 4. Платформенный участок (а) и разрез платформенного участка (б)

Fig. 4. Platform area (a) and platform area section (b)

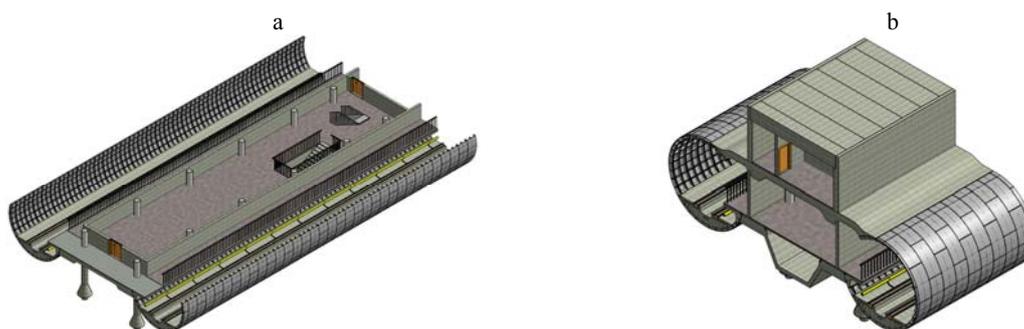


Рис. 5. Служебные помещения (а) и разрез по служебным помещениям в уровне вестибюлей (b)

Fig. 5. Service premises (a) and section of service areas at the lobby level (b)

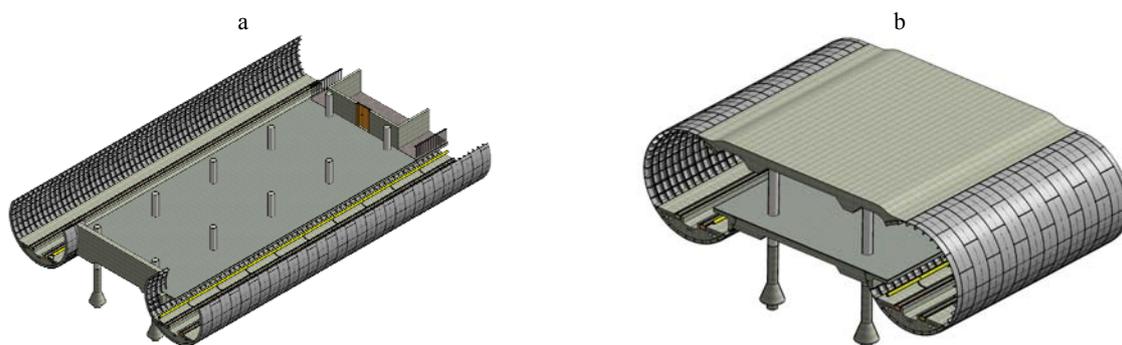


Рис. 6. Противодутьевая сбойка (а) и разрез по противодутьевой сбойке (b)

Fig. 6. Anti-blowing area (a) and anti-blowing area section (b)

Конструктивные решения

Конструкция платформенного участка (рис. 7) включает в себя чугунную тьюбинговую обделку путевых тоннелей, сталежелезобетонные сваи-колонны, монолитный свод, монолитную лотковую плиту, платформенные плиты, монолитные участки, платформенное ограждение и проч.

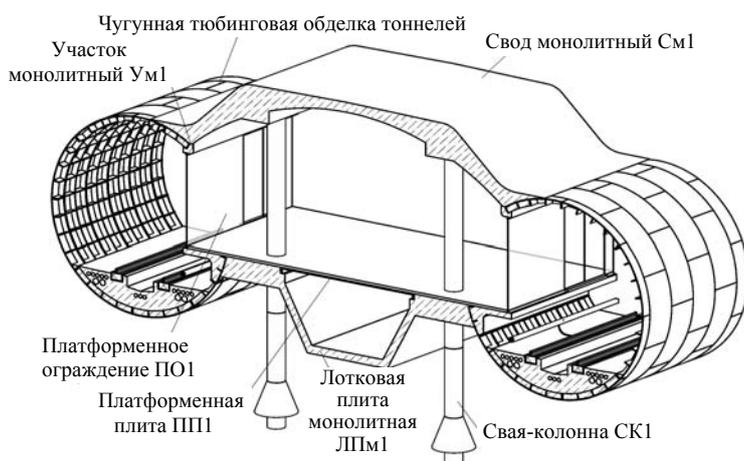


Рис. 7. Конструкция платформенного участка

Fig. 7. Platform area design

За счет повышенной жесткости конструкции свода изгибающий момент в чугунной

тьюбинговой обделке путевых тоннелей существенно снижается. Продольные и поперечные усилия, приходящиеся от обделки тоннелей, воспринимаются сводом и лотковой плитой.

Нагрузки в лотковой плите возникают вследствие передачи усилия от обделки путевых тоннелей после разборки временных тьюбингов на последних стадиях строительства. Также лотковая монолитная плита участвует в статической работе конструкции на временную нагрузку. Горизонтально направленное усилие от обделки воспринимается лотковой плитой за счет развитой ригельной части, опирающейся на сваи-колонны. Таким образом, напряжения в части конструкции лотковой плиты, находящейся в месте служебного прохода под платформенными плитами, относительно небольшие, что позволило уменьшить толщину плиты до 250 мм. Объединение лотковой плиты и обделки путевых тоннелей осуществляется при помощи арматурных стержней, пропущенных через отверстия в тьюбингах.

Выполнение свай-колонн в сталежелезобетонном варианте позволило повысить несущую способность колонны в пре-

делах платформенного зала и упростить технологию производства работ. Нижняя часть свай-колонны представляет собой железобетонную буронабивную сваю с уширением.

Для восприятия нагрузки в продольном направлении монолитный свод имеет развитую ригельную часть. В связи с тем, что деформации свода в вертикальном направлении ведут к увеличению нагрузки в тубинговой обделке, расчет в стадии строительства и эксплуатации производился в упругой стадии работы железобетонной конструкции без перераспределения усилий, что связано с необходимостью обеспечения жесткости конструкции свода и недопущения деформаций, связанных с образованием пластических шарниров.

Обделка путевых тоннелей объединяется в жесткий узел со сводом при помощи изготовленных по эскизу арматурных стержней (с приваренными стальными упорами), пропущенных через отверстия в ключевых тубингах.

Конструкция вестибюлей и служебных помещений в уровне платформы приведена на рис. 8.

Станция в пределах вестибюлей представляет собой двухуровневую конструкцию. Так же, как и в пределах платформенного участка, усилия от тубинговой обделки путевых тоннелей передаются на монолитное перекрытие и монолитную лотковую плиту. Нагрузка от веса вышележащих конструкций, а также от собственного веса перекрытия, в значительной степени воспринимается сваями-колоннами.

Конструкция вестибюлей включает монолитные лоток и стены, фундаменты, колонны, моно-

литные ригели и сборное балочное перекрытие. В поперечном направлении конструкция состоит из трех пролетов. Нагрузка от центрального пролета передается на монолитное перекрытие нижнего уровня станции, а от крайних пролетов – через ригели и колонны на фундаменты, расположенные на расстоянии от путевых тоннелей для исключения передачи нагрузки на конструкцию обделки путевых тоннелей.

Служебные помещения верхнего уровня опираются на монолитное перекрытие, которое передает нагрузку непосредственно на свай-колонны. Конструкция служебных помещений выполнена сборно-монолитной: сборное балочное перекрытие опирается на монолитные стены толщиной 400 мм.

В служебных проходах, находящихся в уровне платформенного участка, нагрузка от путевых тоннелей передается на монолитное перекрытие и на монолитную лотковую плиту. По обе стороны от тягово-понижительной подстанции (рис. 9) предусмотрены служебные проходы в путевых тоннелях, которые для обеспечения требований безопасности оборудованы перильным ограждением.

Конструкция противодутьевой сбойки (рис. 10) состоит из чугунной тубинговой обделки путевых тоннелей, сталежелезобетонных свай-колонн, монолитного перекрытия и монолитной лотковой плиты. В связи с отсутствием необходимости в служебном проходе лотковая плита выполнена плоской с развитой ригельной частью. Перекрытие также выполнено плоским.

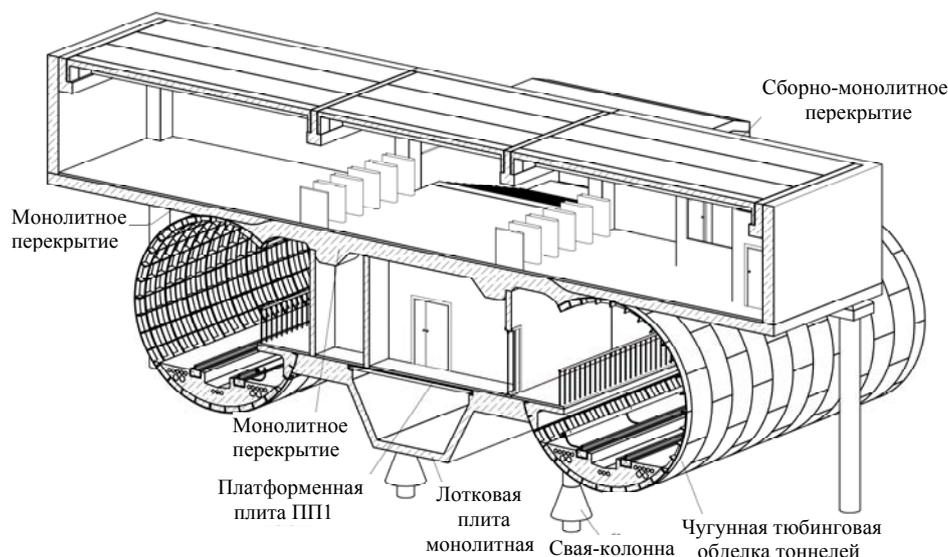


Рис. 8. Конструкция вестибюлей и служебных помещений в уровне платформы

Fig. 8. Design of platform-level lobbies and service premises

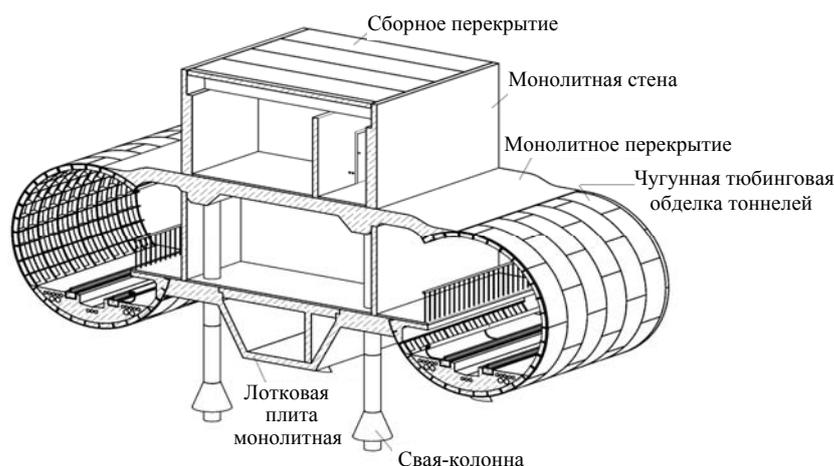


Рис. 9. Конструкция тягово-понижительной подстанции и служебных помещений в уровне вестибюлей

Fig. 9. Design of traction-step-down substation and service premises in the lobby level

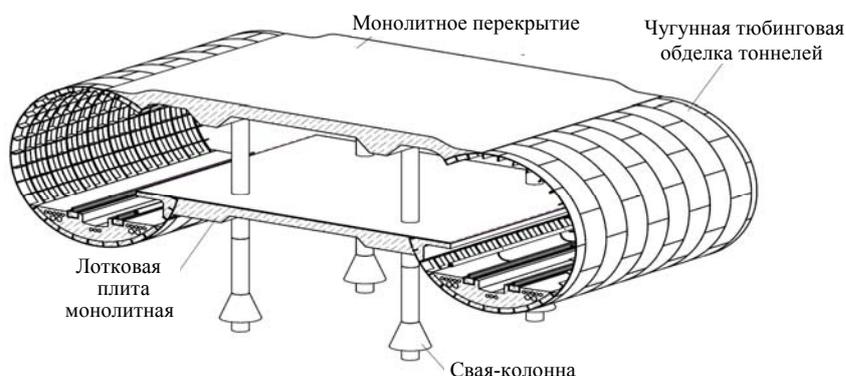


Рис. 10. Конструкция противодутьевой сбойки

Fig. 10. Design of anti-blowing area

Оптимизация

В процессе разработки большое внимание уделялось оптимизации конструкции станционного комплекса. По мнению Ю. С. Фролова, наиболее ответственным участком конструкции в отношении ее статической работы является консольная часть перекрытия. Под действием нагрузки от разомкнутого кольца обделки путевого тоннеля в ней возникает значительная растягивающая продольная сила. Величина этой силы с изменением параметров конструкции колеблется в широком диапазоне значений, вплоть до изменения направления действия от растяжения к сжатию [1].

В процессе оптимизации конструкции станции исследован ряд вариантов с различными параметрами. Расчет выполняли с применением метода конечных элементов. В качестве функциональных ограничений принимали диаметр

обделки путевых тоннелей, шаг колонн и пролет перекрытия, в качестве варьируемых параметров – конструкции свода и лотковой плиты, сваи-колонны, сечение обделки путевых тоннелей, материалы, конструктивные особенности узлов.

За счет выбора расстояния между осями путевых тоннелей и формы конструкции свода растягивающие напряжения в консольной части перекрытия были сведены к минимуму. Эпюра продольных сил N приведена на рис. 11. Следует отметить, что на статическую работу конструкции оказало влияние изменение диаметра обделки путевых тоннелей, так как диаметр обделки для механизированного тоннелепроходческого щита CSM Bessac составляет 6000 мм.

В связи с тем, что напряжения в консольной части свода сведены к минимуму, рассматриваемой конструкции станционного комплекса самой ответственной частью является обделка путевых тоннелей.

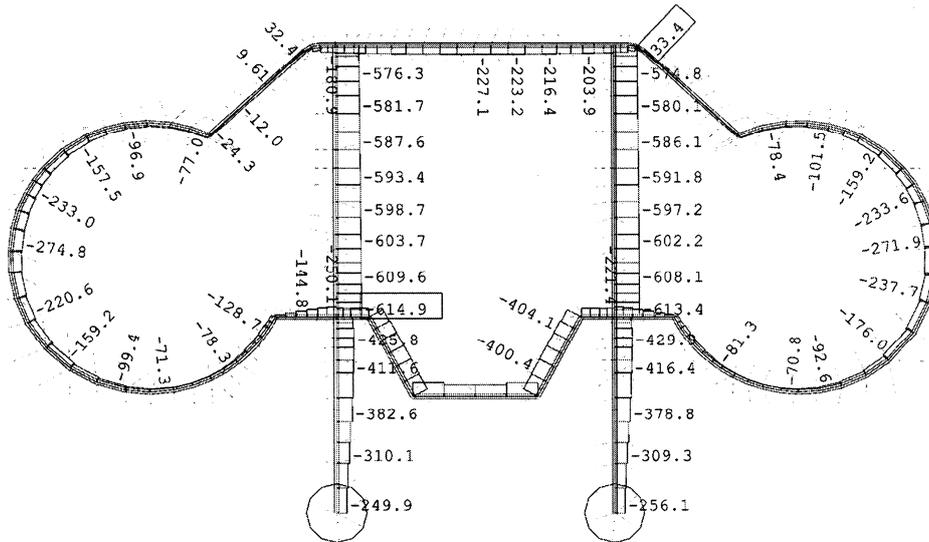


Рис. 11. Эпюра N , кН, на стадии эксплуатации при нагрузке А-14
 Fig. 11. Diagram N , kN, at the stage of operation under load A-14

Напряженно-деформированное состояние обделки в значительной степени зависит от жесткости конструкции свода и от конструкции узла опирания на сваи-колонны, поэтому в качестве проверки проводили расчет конструкции с шарнирным опиранием.

Технико-экономическое обоснование

Технико-экономическое обоснование проводилось с целью показать эффективность новой концепции строительства метрополитена в сравнении с традиционной как в плане уменьшения стоимости, так и в плане сокращения сроков строительных работ (рис. 12).

В структуру проведения технико-экономического обоснования входят оценка стоимости и продолжительности строительства линии метрополитена с применением традиционной технологии и технологии сквозной проходки.

Для оценки стоимости строительства линии метрополитена необходимо учесть стоимость сооружения станционных комплексов, перегонных тоннелей, стоимость строительства монтажно-щитовых камер, затраты на сборку и разборку щита и подготовительные работы. Для оценки использовалась линия метрополитена, состоящая из 15 станций. В результате сравнения получено 16 % уменьшения стоимости при использовании новой концепции строительства.

Продолжительность строительства линии метрополитена оценивается исходя из продолжительности сооружения станций, монтажно-щитовых камер, продолжительности проходки тоннелей, а также сборки и разборки тоннелепроходческого щита. С учетом поточного способа организации работ [9, 10] и одновременного сооружения трех станций продолжительность строительства линии метрополитена с применением концепции сквозной проходки составила на 33 % меньше продолжительности строительства при использовании традиционной технологии.



Рис. 12. Структура проведения технико-экономического обоснования
 Fig. 12. Structure of feasibility study

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы имеющиеся решения станций метрополитена полузакрытого способа

работ и разработаны конструктивные элементы и узлы платформенного участка станции для применения сквозной проходки в Минске. Основное внимание уделено разработке конструкции платформенного участка – наиболее ответственной части станционного комплекса – с учетом технологических, конструктивных, архитектурных и других требований [11, 12].

2. Большое внимание уделено вопросу оптимизации железобетонных конструкций станционного комплекса, в частности оптимизации конструкций монолитного свода и лотковой плиты.

3. Важным разделом работы является технико-экономическое обоснование строительства с применением концепции сквозной проходки. Показаны преимущества технологии сквозной проходки как в плане уменьшения стоимости, так и сокращения сроков строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов, Ю. С. Метрополитены на линиях мелкого заложения: новая концепция строительства / Ю. С. Фролов, Ю. Е. Крук. М.: ТИМП, 1994. 244 с.
2. Фролов, Ю. С. Основы проектирования и строительства метрополитена методом сквозной проходки на линиях метрополитена / Ю. С. Фролов. СПб.: Петербургский ун-т путей сообщения, 1995. 45 с.
3. Проектирование тоннелей, сооружаемых горным способом / Г. П. Пастушков [и др.]. Минск: БНТУ, 2005. 187 с.
4. Кузьмицкий, В. А. Проектирование тоннелей, сооружаемых щитовым способом / В. А. Кузьмицкий, В. Г. Пастушков. Минск: БНТУ, 2009. 187 с.
5. Тоннели и метрополитены / В. П. Волков [и др.]. М.: Транспорт, 1975. 551 с.
6. Метрополитены. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.03-115–2008 (02250). Введ. 01.07.2009. Минск: Минстройархитектуры, 2009. 64 с.
7. Тоннели и метрополитены. Правила устройства: ТКП 45-3.03-238–2011 (02250). Введ. 01.11.2011. Минск: Минстройархитектуры, 2011. 156 с.
8. Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.03-227–2010 (02250). Введ. 01.07.2011. Минск: Минстройархитектуры, 2011. 49 с.
9. Безопасность труда в строительстве. Общие требования: ТКП 45-1.03-40–2006 (02250). Введ. 01.07.2007. Минск: Минстройархитектуры, 2007. 58 с.
10. Нормы продолжительности строительства объектов транспорта и транспортной инфраструктуры: ТКП 45-1.03-213–2010 (02250). Введ. 01.01.2011. Минск: Минстройархитектуры, 2014. 52 с.

11. Защита от шума. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-154–2009 (02250). Введ. 01.01.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2009. 50 с.
12. Организация строительного производства: ТКП 45-1.03-161–2009* (02250). Введ. 01.05.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2014. 51 с.

Поступила 24.03.2020

Подписана в печать 02.06.2020

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. Frolov Yu. S., Kruk Yu. E. (1994) *Subways on Shallow Lines: a New Construction Concept*. Moscow, TIMP Publ. 244 (in Russian).
2. Frolov Yu. S. (1995) *Fundamentals of the Design and Construction of the Subway by Through-Penetration Method on Subway Lines*. Saint-Petersburg, Publishing House of Petersburg State Transport University. 45 (in Russian).
3. Pastushkov G. P., Pastushkov V. G., Ollyak V. Yu., Kuz'mitskii V. A., Kuz'mitskii D. V. (2005) *Design of Tunnels Constructed by Mining Method*. Minsk, Belarusian National Technical University. 187 (in Russian).
4. Kuz'mitskii V. A., Pastushkov V. G. (2009) *Shield Tunnel Design*. Minsk, Belarusian National Technical University. 187 (in Russian).
5. Volkov V. P., Naumov S. N., Pirozhkova A. N., Khrapov V. G. (1975) *Tunnels and Subways*. Moscow, Transport Publ. 551 (in Russian).
6. ТКП 45-3.03-115–2008 (02250) *Subways. Structural Design Codes*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2009. 64 (in Russian).
7. ТКП 45-3.03-238–2011 (02250). *Tunnels and Subways. Device Rules*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2011. 156 (in Russian).
8. ТКП 45-3.03-227–2010 (02250). *Streets of Settlements. Structural Design Codes*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2011. 49 (in Russian).
9. ТКП 45-1.03-40–2006 (02250). *Labour Safety in Construction. General Requirements*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2007. 58 (in Russian).
10. ТКП 45-1.03-213–2010 (02250). *Standards for Duration of Construction of Transport Facilities and Transport Infrastructure*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2014. 52 (in Russian).
11. ТКП 45-2.04-154–2009 (02250). *Noise Protection. Structural Design Codes*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2009. 50 (in Russian).
12. ТКП 45-1.03-161–2009* (02250). *Organization of Construction Production*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2014. 51 (in Russian).

Received: 24.03.2020

Accepted: 02.06.2020

Published online: 30.09.2020