

УДК 624.191.22

© А. Н. Гайдо, канд. техн. наук, доцент
© В. В. Верстов, д-р техн. наук, профессор
© С. А. Евтюков, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: gaidoan@mail.ru, tsp@spbgasu.ru, s.a.evt@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-1-55-65

© A. N. Gaido, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© V. V. Verstov, Dr. Sci. Tech., Professor
© S. A. Evtuikov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: gaidoan@mail.ru, tsp@spbgasu.ru, s.a.evt@mail.ru

ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УСТРОЙСТВА ПОДЗЕМНЫХ ПЕШЕХОДНЫХ ТОННЕЛЕЙ ПОД ДЕЙСТВУЮЩИМИ МАГИСТРАЛЯМИ

EFFECTIVE TECHNOLOGY FOR THE CONSTRUCTION OF UNDERPASS PEDESTRIAN TUNNELS UNDER EXISTING HIGHWAYS

Рассмотрены современные технологии устройства подземных пешеходных тоннелей (ППТ) неглубокого заложения под действующими транспортными магистралями. Предложена технология устройства ППТ, при которой сначала поперек проезжей части по захваткам погружают шпунтовое ограждение, которое будет служить ограждающей конструкцией тоннеля. Затем по его торцам устраивают опорные балки и монолитное покрытие, по которому после набора прочности можно возобновлять движение транспорта. Обоснованы эффективные режимы погружения стального шпунта и системы его крепления, позволяющие обеспечить устойчивость конструкций тоннеля и снизить технологические воздействия на покрытие проезжей части. При этом работы по разработке грунта, устройству основания тоннеля, гидроизоляции и дренажной системы, а также отделочные работы будут выполняться под перекрытием тоннеля без остановки движения транспорта. Предлагаемая технология по сравнению с традиционной, реализуемой в открытом котловане, позволяет сократить продолжительность остановки движения транспорта в 2 раза, а при использовании готовых элементов тоннеля — в 1,18 раза. Общая продолжительность работ сокращается в 1,38 раза. Приводятся технологические схемы производства работ, ведомости машин и механизмов, необходимые для практической реализации способа.

Ключевые слова: пешеходный тоннель, шпунт, вдавливание шпунта, подземные сооружения, полузакрытый способ строительства.

The article discusses modern technologies for the construction of shallow underpass pedestrian tunnels (UPTs) built under existing transport highways. A technology for building such tunnels is proposed, in which, at the first stage, a tongue-and-groove fence is indented across the carriageway along the grapples, which will serve as the enclosing structure of the tunnel. Then, support beams and a monolithic cladding are arranged along its ends, along which, after gaining strength, traffic can be allowed to resume its motion. The effective modes of steel sheet piling immersion and its fastening systems are substantiated, which allows ensuring the stability of tunnel structures and reducing technological impacts on the roadway surface. The works on the soil development, the installation of the tunnel foundation, waterproofing and drainage system, as well as finishing works will be carried out under the tunnel floor without traffic having to be stopped. Based on the performed technical and economic calculations, it was found out that the proposed technology, compared with the traditional one implemented in an open pit, allows reducing the duration of traffic stops by 2 times, and, when using prefabricated tunnel elements, it will be by 1.18 times. The total duration of work is reduced by 1.38 times. The article presents the technological schemes of work production, lists of machines and equipment necessary for the practical implementation of the method.

Keywords: pedestrian tunnel, tongue-and-groove, tongue-and-groove indentation, underground structures, semi-closed construction method.

При проектировании мероприятий по обеспечению доступа населения, в том числе маломобильных групп, к объектам дорожного хозяйства, а также при реконструкции эксплуатируемых автомобильных дорог зачастую требуется устраивать пешеходные переходы мелкого заложения на глубине до 10 м [1–4].

Это требует устраивать подземные или надземные пешеходные переходы вне проезжей части, причем в условиях плотной городской застройки не всегда удастся возводить надземные пешеходные переходы. Поэтому для указанных условий применяют различные способы устройства подземных пешеходных тоннелей (ППТ) [5–8].

Для их устройства применяют подземные (закрытые) и открытые способы. Способы первого типа используют в основном для устройства ППТ глубокого заложения. Для этого применяют механизированные щиты, в которых грунт разрушают роторным механизмом и погружают для удаления на транспортер [6]. Постоянную обделку тоннеля также выполняют под защитой щита. Пространство между обделкой и породой тампонируют цементным раствором через специальные отверстия. Для этого способа существуют разнообразные технологические модификации

рабочего оборудования, которые позволяют создавать пригруз для уравнивания давления породы для исключения ее неконтролируемого прорыва в полость щита. Этим исключаются дополнительные технологические деформации поверхности грунта и покрытия автомобильных дорог [9].

К недостаткам способа следует отнести повышенные затраты при устройстве тоннелей, связанные с увеличением глубины их проходки, а также высокую стоимость работы и обслуживания применяемого оборудования.

Для устройства тоннелей преимущественно под железнодорожными насыпями или транспортными развязками применяют способ продавливания секций тоннеля (рис. 1) [10, 11]. Сущность способа состоит в том, что секции тоннеля последовательно монтируют в специальной камере, удаленной от забоя. В ней же находятся домкраты, посредством которых осуществляют вдавливание секций по мере разработки грунта в забое. Для уменьшения трения крепи о массив грунта применяют глинистый раствор.

Для исключения просадок покрытия проезжей части конструкции тоннеля следует заглублять значительно ниже уровня поверхности

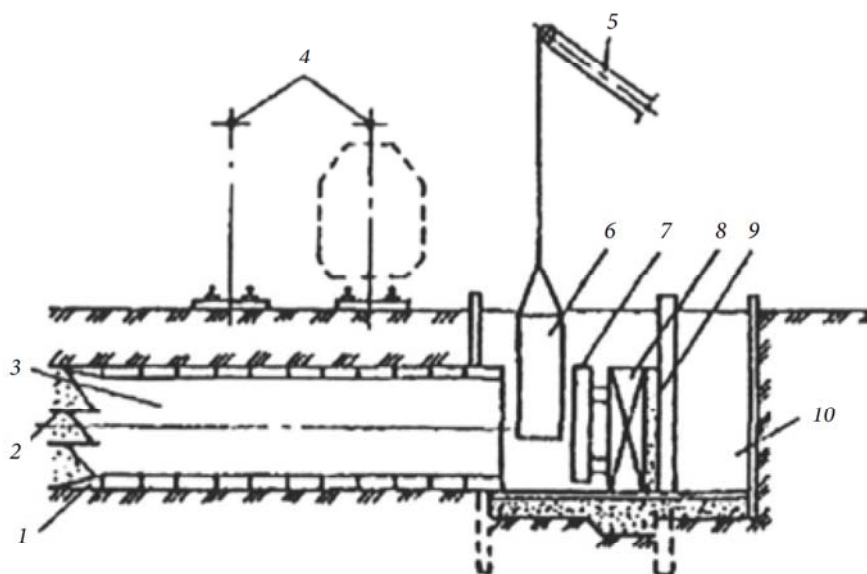


Рис. 1. Схема реализации способа продавливания¹: 1 — ножевая секция; 2 — горизонтальные полки; 3 — задавливаемый тоннель; 4 — контактный провод электросети; 5 — кран; 6 — секции обделки тоннеля; 7 — распределительная рама; 8 — домкрат; 9 — опорная стена; 10 — котлован

¹ URL: <http://офинс.пф/храпов/p100.html>

грунта, что приводит к увеличению затрат на строительство. Из этого следует, что для целей устройства ППТ малого заглубления до 3–4 м указанные способы малоэффективны [10, 12].

Открытые способы устройства ППТ аналогичны способам, применяемым для целей подземного строительства в условиях городской застройки. По контуру возводимого сооружения устраивают ограждения по технологии «стена в грунте» или из стального шпунта. По мере разработки котлована выполняют системы его крепления преимущественно из горизонтальных стальных балок-распоров или грунтовых анкеров для предотвращения перемещений ограждений (рис. 2). После устройства конструкций тоннеля шпунт извлекают из грунта, а балки последовательно демонтируют.

После разработки котлована приступают к возведению монолитных конструкций тоннеля: днища, стен перекрытия и т. п.

К недостаткам указанных способов следует отнести необходимость полной остановки движения при перекрытии автомобильной дороги на период возведения тоннеля. Для сокращения продолжительности работ применяют сборные объемные конструкции тоннеля типа ПТ-Р2М с размерами 4320 × 3140 × 2600 мм, массой 17,1 т (рис. 3). Но при этом все равно необходимо полное перекрытие движения по автомобильной дороге на период производства работ.



Рис. 2. Возведение ППТ открытым способом с применением стального шпунта в качестве ограждающих конструкций котлована и его креплением стальными балками²

² URL: <http://zempodryad.ru/the-fence-pit-pile/>



Рис. 3. Возведение ППТ из сборных железобетонных элементов³

³ URL: <http://www.macrete.co.uk/gallery-civils/>

Существуют различные технологические решения, направленные на устранение указанного недостатка и изложенные в изобретении Р. А. Мангушева, Е. В. Городновой и А. И. Осокина (2009) [13]. Способ предусматривает устройство стен тоннеля за счет погружения горизонтальных стальных обсадных труб (рис. 4). Их устраивают под основанием дороги без остановки движения следующим образом. Выполняют бурение лидирующих скважин малого диаметра. После окончания конец бура малого диаметра соединяют с концом бура большого диаметра, помещенного в обсадную трубу. Его перемещают в лидирующей скважине за буром малого диаметра совместно с обсадной трубой, которую после окончания бурения оставляют в скважине. После фиксации по контуру порталных рам необходимого количества обсадных труб из их полости извлекают грунт и заполняют их бетонной смесью. Затем выполняют пандусы, обеспечивающие доступ для организации работ по сооружению тоннеля под основной магистралью. Устанавливают верхнее перекрытие тоннеля. Указанная последовательность работ обеспечивает снижение затрат времени на остановку движения транспорта в процессе строительства и трудозатрат при производстве работ [13].

При всех плюсах предложенного способа следует отметить его недостаток в виде технической сложности обеспечения горизонтальности и устойчивости ствола проходки при бурении сла-

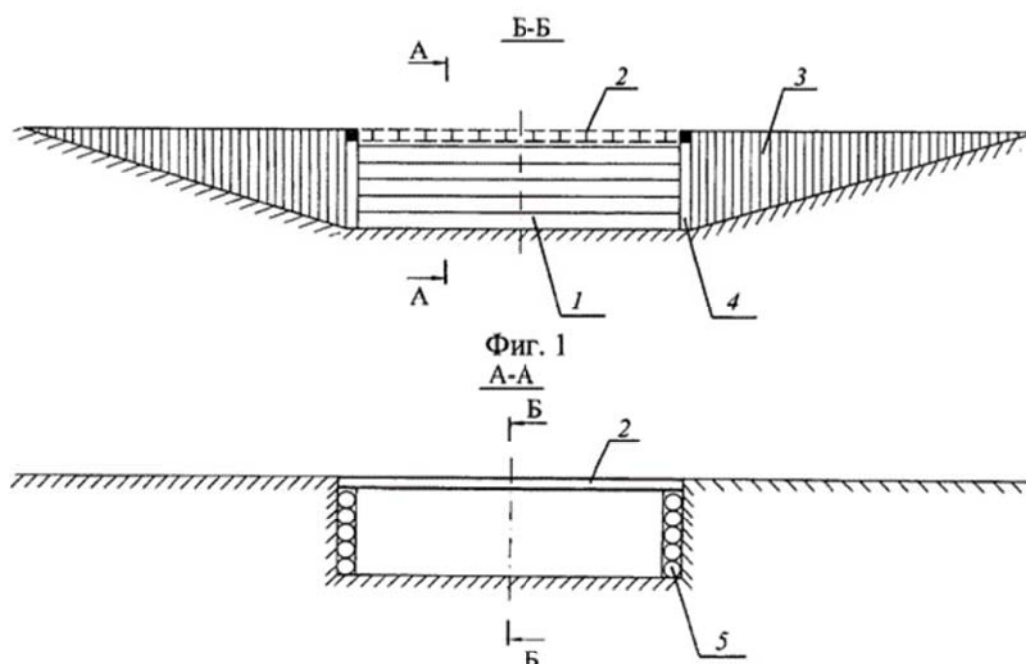


Рис. 4. Способ устройства тоннеля с устройством его ограждающих конструкций посредством горизонтальных скважин⁴: 1 — вертикальные стены тоннеля; 2 — плита покрытия; 3 — стена в грунте; 4 — временная подпорная стенка; 5 — кондуктор

⁴ URL: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

бых, неустойчивых грунтов, а также снижение устойчивости выполненных ограждающих конструкций при действии динамических нагрузок от перемещающегося транспорта. Кроме того, через контактные зоны труб будет происходить приток грунтовых вод, что потребует дополнительных затрат на их тампонаж инъекционными растворами или устройством сплошных водонепроницаемых ограждений. Для таких целей преимущественно используют стальные листы, что значительно удорожает строительство.

Указанный анализ позволяет сделать практически важные выводы о том, что существующие способы для устройства ППТ мелкого заложения являются дорогостоящими в связи с применением горнопроходческих щитов, а при производстве работ в открытых котлованах приводят к полной остановке движения автотранспорта на длительный срок, свыше 3–4 месяцев. Имеющиеся предложения по устранению указанных недостатков в виде способов устройства ограждений тоннеля при горизонтальном бурении в должной мере не обеспечат необходимого качества и вызовут деформации поверхности проезжей части.

Решение поставленной проблемы авторы видят в применении технологий полузакрытого способа, как это принято в практике подземного строительства в условиях городской застройки. Суть способа заключается в следующем. По периметру подземных конструкций сооружения выполняют ограждения котлована, преимущественно по технологии «стена в грунте». Затем по грунту устраивают монолитные перекрытия, через которые удаляют грунт, и по достижении проектной отметки делают покрытие подземного этажа. Грунт при этом удаляют на поверхность через технологические проемы. Преимуществом технологии является возможность одновременно с выполнением подземных работ возводить надземные конструкции. Следует отметить, что такой способ для целей возведения ППТ без соответствующих технологических усовершенствований применять неэффективно. Например, для устройства траншейной стены в грунте потребуются полная остановка движения автотранспорта, а устройство технологических проемов на проезжей части приведет к образованию дополнительных препятствий.

Вследствие этого автором обоснованы и предложены технологические параметры устройства ППТ, позволяющие сократить сроки полной остановки движения автотранспорта и обеспечить достаточное качество и устойчивость возводимых конструкций. Новые предложения заключаются в следующем:

- ограждения тоннеля выполняют из стального шпунта, что сокращает сроки строительства. Его используют как несущие конструкции, на которые через балки опирают предварительно напрягаемое монолитное перекрытие — основание проезжей части;

- работы ведут по захваткам, ширину которых принимают равной ширине возводимого тоннеля, а длину — равной соответствующей ширине полосы движения. Это позволяет на период производства работ перекрывать движение автотранспорта частично, только в одном направлении;

- грунт извлекают за пределами дороги с торцевых участков будущих лестничных сходов.

Одним из источников новой технологии стали разработки японской фирмы *Giken* — метод устройства транспортных развязок с использованием шпунта как постоянной конструкции (*Eco underpass method*, <https://www.giken.com>). Также в европейских стандартах имеются ссылки на положительный опыт использования шпунта в качестве постоянных ограждений подземных сооружений различного назначения: подземных паркингов, транспортных сооружений и т. п. [14].

Преимущества применения стального шпунта вместо традиционно выполняемых монолитных стен в грунте состоят в следующем:

- гарантируемое качество конструкций ППТ. Дополнительная водонепроницаемость замковых соединений элементов обеспечивается на поверхности при установке в полости замков специальных полимерных прокладок;

- сокращение трудозатрат и сроков устройства ограждений из элементов заводской готовности;

- при погружении шпунта вдавливанием обеспечиваются минимальные технологические воздействия на прилегающие к участку работ конструкции. При дополнительном опытно обосновании эффективно применять вибрационный режим погружения шпунта с приме-

нением высокочастотных вибропогружателей. В геологических разрезах со слабыми водонасыщенными грунтами необходимо снижение интенсивности динамических воздействий, распространяющихся в массиве грунта при погружении шпунта в условиях его «срыва» — проскальзывания при колебаниях относительно прилегающего массива грунта [14]. Такие технологические режимы реализуются при погружении шпунта вибрационными машинами типа *MS-24HFva* с частотой колебаний 2350 об./мин, статическим моментом дебалансов, изменяемым в пределах от 0 до 24 кг·м, и вынуждающей силой 1453 кН при массе без наголовника 5050 кг.

На этапе проектирования при строительстве в слабых грунтах необходимо обеспечить равномерность осадок конструкции ППТ, что потребует конструктивных решений по устройству свайного основания, улучшению грунтов основания, а также предусмотреть известные мероприятия, исключающие всплытие конструкции тоннеля. Эти решения в рамках настоящей статьи не рассматриваются.

Устройство ППТ предлагается выполнять в технологической последовательности, этапы которой представлены на рис. 5.

Работы подготовительного периода

- Создание геодезической разбивочной сети;
- вынос оси подземного сооружения в натуру;
- согласование условий работ с владельцами коммуникаций и всеми заинтересованными сторонами;

- обустройство строительной площадки;
- организация объезда автотранспорта участка производства работ по утвержденной органами ГИБДД схеме;
- транспортировка и монтаж оборудования.

Работы основного периода

Работы начинают с первой захватки (рис. 5, а). Устанавливают сигнальное ограждение и знаки безопасности для организации объезда автотранспортом участка работ. Производят монтаж дорожного покрытия в пределах контура возводимого тоннеля. Выполняют вдавливание шпунта в створе ограждений тоннеля и лестничных сходов пандуса.

Для вдавливания рекомендуется применять специализированные установки типа *Giken UP150* с усилением вдавливания и извлечения

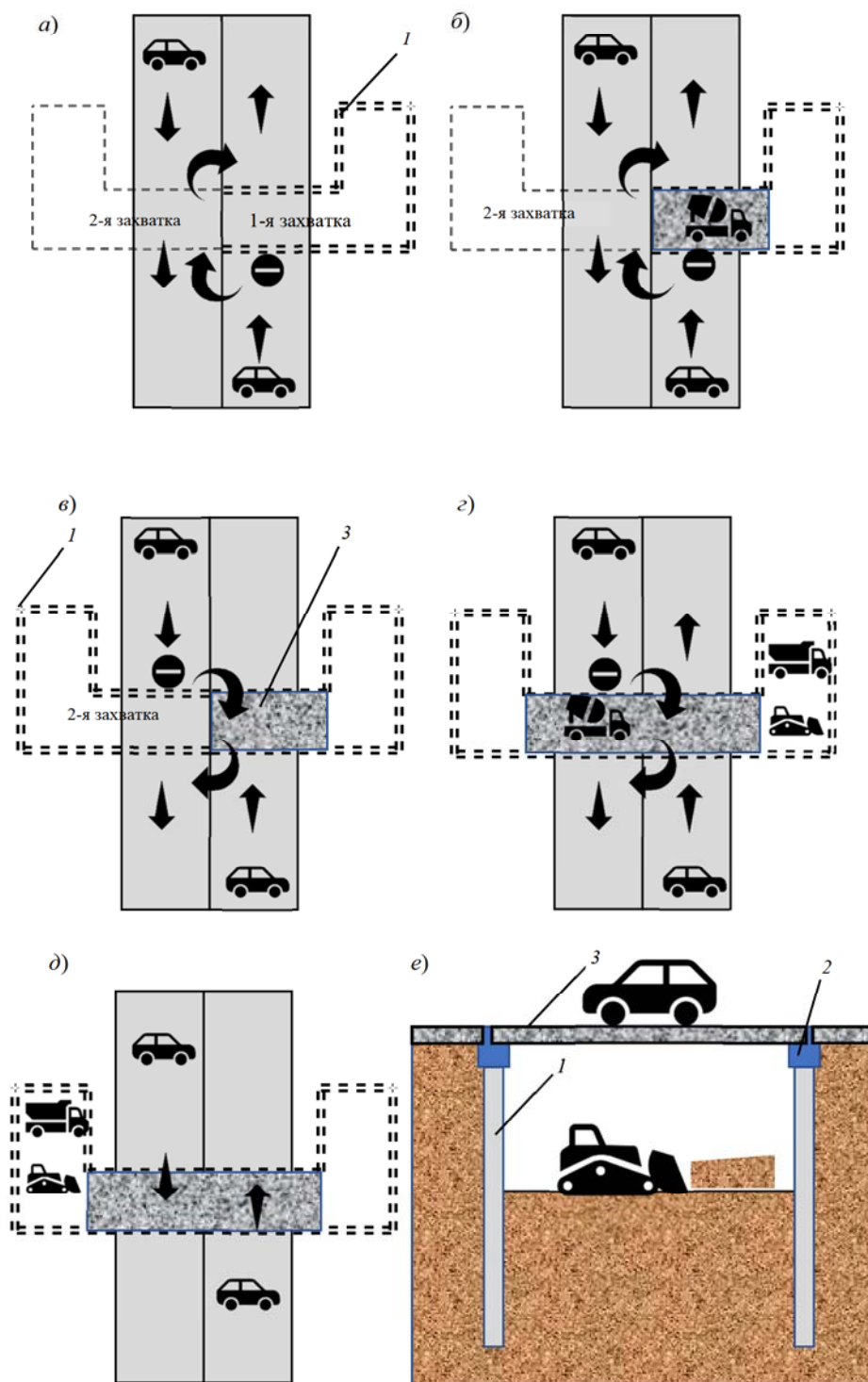


Рис. 5. Технологический план-схема устройства ППТ с применением шпунта в качестве ограждающих конструкций: а — погружение шпунта на 1-й захватке; б — производство земляных работ, формирование опорного узла и устройство монолитной армированной плиты покрытия на 1-й захватке; в — погружение шпунта на 2-й захватке; г — производство земляных работ, формирование опорного узла и устройство монолитной армированной плиты покрытия на 2-й захватке. После набора проектной прочности бетона возобновляют движение автотранспорта по проезжей части. Разработка и вывоз грунта из контура ограждения 1-й захватки; д — разработка и вывоз грунта из контура ограждения 2-й захватки. Устройство основания ППТ и отделка стен тоннеля; е — поперечный разрез тоннеля на этапе разработки грунта под плитой дорожного покрытия: 1 — шпунтовое ограждение; 2 — балки опирания плиты по торцу шпунта; 3 — монолитная плита

соответственно в 1500 и 1600 кН. Они хорошо зарекомендовали себя при вдавливании шпунта в геологических разрезах, характерных для Санкт-Петербурга.

Затем производят разработку грунта в пределах образованного контура до нижней отметки плиты перекрытия. При необходимости выполняют срезку шпунта до проектной отметки на 400–500 мм.

Выполняют монолитные опорные балки по контуру шпунтового ограждения и плиту перекрытия согласно схеме (рис. 6) [14].

В зависимости от проектного решения плиту бетонируют по грунту или устанавливают опалубку для формирования дополнительных ребер жесткости. Преимущественно такие конструкции выполняют с их предварительным напряжением, для этого при армировании в тело плиты закладывают специальные каналы для укладки стальных канатов.

После набора бетоном соответствующей прочности по плите устраивают дорожное покрытие и восстанавливают движение транспорта на первой захватке (рис. 7).

Аналогично указанные работы ведут на второй захватке, после чего восстанавливают движение автотранспорта в пределах всей проезжей части с прежней интенсивностью.

Затем начинают разработку грунта в тоннеле мини-экскаваторами и удаляют его с забоя (рис. 8). Для этого необходимо выполнить пандус для их спуска на забой. Имеется положительный опыт транспортирования грунта на поверхность

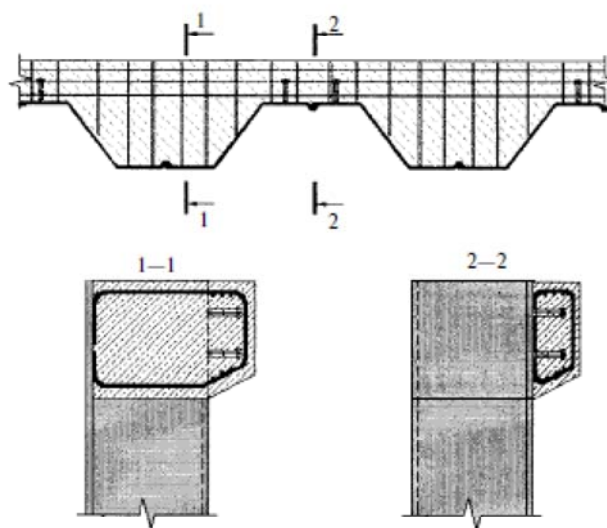


Рис. 6. Узел опирания монолитных железобетонных балок по торцу шпунта для дальнейшего устройства плиты перекрытия тоннеля [14]

по последовательно установленным ленточным конвейерам.

При необходимом расчетном основании для обеспечения устойчивости шпунтового ограждения его крепят грунтовыми анкерами, которые устанавливают параллельно с разработкой грунта буровыми установками, с уровня отметки забоя внутри тоннеля.

Важным этапом производства работ является устройство гидроизоляции ограждающих конструкций тоннеля и его основания (рис. 9). На завершающем этапе работ устраивают лестнич-

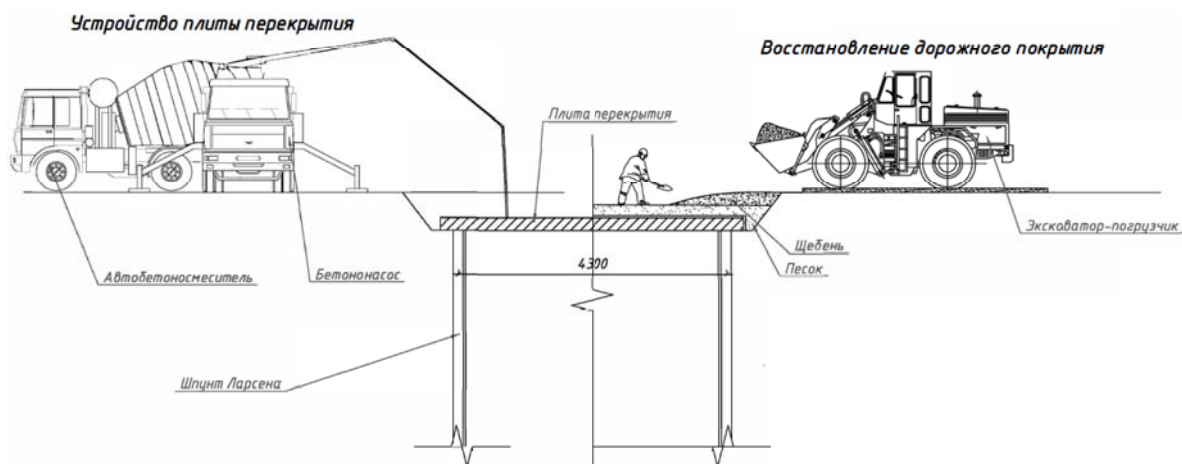


Рис. 7. Устройство плиты перекрытия тоннеля



Рис. 8. Разработка грунта в тоннеле⁵

⁵ URL: <https://undergroundexpert.info>



Рис. 9. Устройство соединения шпунтового ограждения с арматурными изделиями плиты основания ППТ [14]

ные марши входных групп и выполняют чистовую отделку.

Номенклатура технических средств, необходимых для устройства ППТ по описанной технологии, представлена в табл. 1.

Для обоснования технико-экономической эффективности применения предлагаемой технологии авторами выполнены соответствующие расчеты, результаты которых представлены в табл. 2. Рассмотрены способы устройства тоннеля в открытом котловане с возведением монолитных конструкций и с применением железобетонных блок-секций заводского изготовления.

Совместный анализ данных табл. 1, 2 и рис. 1 позволяет заключить, что стоимость реализации предлагаемого технологического решения на 3,57 % меньше стоимости варианта производства работ в открытом котловане и на 1,07 % больше стоимости способа с применением блоков заводского изготовления. При этом для предлагаемого решения 39 % в формировании удельной стоимости приходится на конструкцию шпунта.

Однако новое решение позволяет отказаться от полной остановки движения автотранспорта. Частичное ограничение движения по отдельной полосе происходит на 46 дней, а при способах, реализуемых в открытых котлованах, полное перекрытие движения происходит на срок до 3,5 месяца и более.

При технико-экономическом обосновании следует учитывать марку шпунта, так как при использовании изделий AZ фирмы *ThyssenKrupp AG*,

ArselorMittal увеличатся стоимостные показатели по сравнению с отечественными шпунтами.

Представленные выводы подтверждают эффективность применения технологии устройства ППТ под действующими автомобильными дорогами с применением стального шпунта в качестве постоянных ограждающих конструкций. Разработку грунта следует выполнять под монолитным покрытием при одновременном возобновлении движения автотранспорта с прежней интенсивностью.

Работы следует вести по захваткам, ширину которых принимают равной ширине тоннеля, а длину — равной ширине соответствующей полосы движения. Выполненные расчеты показывают, что, в отличие от традиционных способов производства работ в открытых котлованах, предлагаемая технология позволяет почти в два раза сократить сроки остановки движения автотранспорта без значительного увеличения стоимости работ.

Для практической реализации предлагаемого способа имеются соответствующее технологическое оборудование и организации, специализирующиеся в области подземного строительства.

Авторы благодарят магистра кафедры технологии строительного производства СПбГАСУ А. С. Белоглазову, выполнившую технико-экономическое обоснование возможности реализации нового способа возведения ППТ.

Таблица 1

Номенклатура машин и механизмов, применяемых при строительстве ППТ

Наименование технологических операций	Машины и механизмы	Применяемые строительные материалы и изделия
Подготовительные работы	Компрессор, пневмомолот, экскаватор, автосамосвалы. Дорожная фреза	–
Устройство шпунтового ограждения	Автокран грузоподъемностью 50 т (КС-6476), вдавливающая установка (<i>Giken UP150</i>), сварочный аппарат, дизельная станция	Шпунт. Электроды
Устройство плиты покрытия	Бетононасос, автобетоносмеситель, вибраторы погружные. Гидравлические домкраты для натяжения арматуры, насосная станция. Инъекционная установка. Автомобильный кран	Бетонная смесь, опалубка, арматура, цемент, инъекционные трубки, каналобразователи
Земляные работы	Мини-экскаваторы массой до 6 т типа <i>Bobcat 430G</i> , автосамосвалы, ленточные конвейеры	–
Устройство анкерных креплений шпунтового ограждения (при необходимости)	Буровая установка типа МБГУ-100, МБГУ-200, растворомешалка и растворонасос	Буровые штанги и коронки типа МГТС <i>GEOIZOL-MP</i>
Устройство основания тоннеля, гидроизоляции и дренажной системы	Автокран грузоподъемностью 25 т, экскаватор-погрузчик (<i>JBC 3CX 15FT</i>), бетононасос, автобетоносмеситель	Бетонная смесь, песок. Щебень фр. 20–40. Арматура А500С. Опалубка (фанера). Оклеечная гидроизоляция. Цементно-песчаный раствор
Устройство лестниц схода, отделочные работы	Автокран грузоподъемностью 25 т, бетононасос, автобетоносмеситель, растворонасос	Бетон В25. Арматура А500С. Опалубка. Оклеечная гидроизоляция. Теплоизоляция. Песок строительный, цемент
Устройство (восстановление) асфальтного покрытия	Дорожный каток, асфальтоукладчик, автосамосвалы	Песок, щебень фр. 20–40. Асфальтобетонная смесь

Таблица 2

Технико-экономические показатели эффективности устройства пешеходных тоннелей по различным технологиям

№ п/п	Способ устройства подземного сооружения	Общая трудоемкость, чел.-дн.	Продолжительность, дни		Сметная стоимость работ, приведенная к длине тоннеля, млн руб./м
			работ	остановки движения	
1	Открытый с монолитным каркасом	432,1	105	94 (полная)	1,496
2	Открытый с готовыми блоками	316,9	92	80 (полная)	1,429
3	Предлагаемый, с погружением шпунта	458,3	76	46 (частичн.)	1,445

Примечания: Расчеты выполнены для устройства ППТ под проезжей частью шириной 32 м; расчеты выполнены для проектных решений с применением шпунта типа Ларсен — Л5.

Библиографический список

1. Yang Z., Wang X. Influence of Metro Tunnel Excavation on Deformation of Existing Pedestrian Underpass in Changzhou Railway Station Platform // IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 55860–55871.
2. Zhang D., Liu B., Qin Y. Construction of a large-section long pedestrian underpass using pipe jacking in muddy silty clay: A case study // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Vol. 60. Pp. 151–164.
3. Boivin D. J. Montreal's underground network: A study of the downtown pedestrian system // Tunnelling and Underground Space Technology. 1991. Vol. 6. № 1. Pp. 83–91.
4. Maidl B., Thewes M., Maidl U. Handbook of Tunnel Engineering II: Basics and Additional Services for Design and Construction. John Wiley & Sons, 2014. 458 p.
5. Sun Y. et al. Two underground pedestrian passages using pipe jacking: case study // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2018. Vol. 145. № 2. 05018004.
6. Cui J., Nelson J. D. Underground transport: An overview // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 87. Pp. 122–126.
7. Qiao Y. K., Peng F. L. Lessons learnt from urban underground space use in Shanghai—from Lujiazui business district to Hongqiao central business district // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Vol. 55. Pp. 308–319.
8. Тимофеева М. А., Романевич К. В., Поцешковская И. В. Тенденции освоения подземного пространства городов в связи с растущей автомобилизацией // Метро и тоннели. 2021. № 2. С. 38–42.
9. Кашапова К. Р., Клевеко В. И., Моисеева О. В. Экономическое обоснование технологии устройства котлована для сооружения подземного пешеходного перехода // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология, Урбанистика. 2014. № 4 (16). С. 59–70.
10. Маковский Л. В., Кравченко В. В., Нгуен Нгок Хан, Чан Ван Лой. Влияние инженерно-геологических факторов на деформации поверхности земли при строительстве городских тоннелей методом продавливания // Вестник МАДИ. 2021. № 1 (64). С. 46–52.
11. Маковский Л. В., Чан Ван Лой. Современная технология строительства тоннелей методом продавливания // Вестник МАДИ. 2018. № 2 (53). С. 98–103.
12. Мангушев Р. А., Гурский А. В., Полушин В. М. Учет влияния технологических осадок зданий окружающей застройки при устройстве шпунтовых ограждений соседних котлованов // Жилищное строительство. 2020. № 9. С. 9–19.
13. Пат. 2375522, Российская Федерация, МПК E02D 29/045. Способ сооружения тоннеля под транс-

портными магистралями для организации транспортных развязок на перекрестках / Р. А. Мангушев, Е. В. Городнова, А. И. Осокин; СПбГАСУ. № 2008117965/03, заявл. 04.05.2008, опубл. 10.12.2009.

14. Верстов В. В., Гайдо А. Н., Иванов Я. В. Технологии устройства ограждений котлованов в условиях городской застройки и акваторий. СПб.: Лань, 2014. 368 с.

References

1. Yang Z., Wang X. Influence of metro tunnel excavation on deformation of existing pedestrian underpass in Changzhou railway station platform. *IEEE Access.*, 2020, vol. 8, pp. 55860–55871.
2. Zhang D., Liu B., Qin Y. Construction of a large-section long pedestrian underpass using pipe jacking in muddy silty clay: A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, vol. 60, pp. 151–164.
3. Boivin D. J. Montreal's underground network: A study of the downtown pedestrian system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1991, vol. 6, no. 1, pp. 83–91.
4. Maidl B., Thewes M., Maidl U. *Handbook of tunnel engineering II: Basics and additional services for design and construction*. John Wiley & Sons Publ., 2014, 458 p.
5. Sun Y. et al. Two underground pedestrian passages using pipe jacking: case study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, vol. 145, no. 2.05018004.
6. Cui J., Nelson J. D. Underground transport: An overview. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, vol. 87, pp. 122–126.
7. Qiao Y. K., Peng F. L. Lessons learnt from urban underground space use in Shanghai—from Lujiazui business district to Hongqiao central business district. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, vol. 55, pp. 308–319.
8. Timofeeva M. A., Romanovich K. V., Potseshkovskaya I. V. *Tendentsii osvoeniya podzemnogo prostranstvagorodov v svyazi rastushchey avtomobilizatsiey* [Tendencies of developing the underground space of cities in connection with the growing motorization]. *Metro i tonneli – Subway and Tunnels*, 2021, no. 2, pp. 38–42.
9. Kashapova K. R., Kleveko V. I., Moiseeva O. V. *Ekonomicheskoe obosnovanie tekhnologii ustroystva kotlovana dlya sooruzheniya podzemnogo peshekhodnogo perekhoda* [Economic substantiation of the excavation technology for the construction of an underground crosswalk]. *Vestnik PNIPU. Prikladnaya ekologiya, Urbanistika – Bulletin of PNRPU. Applied Ecology, Urbanistics*, 2014, no. 4 (16), pp. 59–70.
10. Makovskiy L. V., Kravchenko V. V., Nguen Ngok Khan, Chan Van Loy. *Vliyanie inzhenerno-geologicheskikh*

faktorov na deformatsii poverkhnosti zemli pri stroitel'stve gorodskikh tonneley metodom prodavlivaniya [The influence of engineering-geological factors on land surface deformations during construction of urban tunnels by indentation method]. *Vestnik MADI – Bulletin of MADI*, 2021, no. 1 (64), pp. 46–52.

11. Makovskiy L. V., Chan Van Loy. *Sovremennaya tekhnologiya stroitel'stva tonneley metodom prodavlivaniya* [Modern technology of tunnel construction by indentation method]. *Vestnik MADI – Bulletin of MADI*, 2018, no. 2 (53), pp. 98–103.

12. Mangushev R. A., Gurskiy A. V., Polunin V. M. *Uchet vliyaniya tekhnologicheskikh osadok zdaniy okruzhayushchey zastroйки pri ustroystve shpuntovykh ograzhdeniy sosednikh kotlovanov* [Taking account of technological settlements of buildings of the surrounding

development in the arrangement of sheet piling of adjacent excavations]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing Construction*, 2020, no. 9, pp. 9–19.

13. Mangushev R. A., Gorodnova E. V., Osokin A. I. *Sposob sooruzheniya tonnelya pod transportnymi magistralyami dlya organizatsii transportnykh razvyazok na perekrestkakh* [Method of underpass tunnel construction under traffic arteries for interchanges at the junctions]. Patent RF, no. 2375522, St. Petersburg, 2009.

14. Verstov V. V., Gaydo A. N., Ivanov Ya. V. *Tekhnologii ustroystva ograzhdeniy kotlovanov v usloviyakh gorodskoy zastroйки i akvatoriy* [Technologies of designing the enclosing structures around excavation pits in the conditions of dense urban development and water areas]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2014, 368 p.