

УДК 624.19.034.5
УДК 69.04

Оценка возможности применения нового способа сооружения подводных городских тоннелей в несвязных илистых грунтах

Я. В. Мельник¹, А. Э. Федоров²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² ООО «СК «Мостотрест», Россия, 236006, Калининград, Правая наб., 10

Для цитирования: Мельник Я. В., Федоров А. Э. Оценка возможности применения нового способа сооружения подводных городских тоннелей в несвязных илистых грунтах // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 427–435. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-427-435

Аннотация

Цель: обосновать возможность применения нового способа сооружения подводных городских тоннелей в несвязных илистых грунтах. Предложенная технология — это сооружение подруслового части подводных городских тоннелей (различного назначения) способом вдавливания секций из заранее подготовленного стартового котлована под дном водотока (на незначительной глубине) без разработки грунта, не имеющее аналогов в отечественном тоннелестроении. Для этого необходимо рассчитать и проанализировать напряженно-деформированное состояние методами численного моделирования системы «грунтовый массив — продавливаемые секции» и разработать мероприятия по снижению сопротивления трения наружной поверхности секции по грунту и лобового сопротивления грунта в забое при производстве работ по продавливанию. **Методы:** для достижения поставленной цели в специализированном геотехническом программном комплексе MIDAS GTS NX была построена численная модель грунтового массива, вмещающего всю конструкцию подруслового участка подводного тоннеля: продавливаемые тоннельные секции, экран из труб в основании, фундаменты. **Результаты:** по данным геотехнического расчета, для обеспечения надежности конструкции необходимо применить устройство ростверка свайного фундамента под трубы диаметром 1020 мм, что позволяет уменьшить осадки тоннеля и обеспечить устойчивость в процессе эксплуатации. Разработаны мероприятия по снижению сопротивления трения наружной поверхности продавливаемых секций и лобового сопротивления грунта в забое. Предложена конструкция клиновидной ножевой секции в сочетании с металлической опалубкой, которая на этапе строительства выполняет функцию внешней металлической гидроизоляции. **Практическая значимость:** проведенное исследование подтверждает возможность использования предложенного способа для строительства городских подводных тоннелей небольшой длины в несвязных илистых грунтах с обеспечением минимальной глубины заложения тоннеля, что значительно сокращает его длину. Способ может быть рекомендован к практическому использованию после проведения серии исследований на базе испытательной (аналитической) лаборатории и целого ряда натурных испытаний.

Ключевые слова: подводный городской тоннель, слабые илистые грунты, продавливание без разработки грунта, клиновидная конструкция, лобовое сопротивление, основание из труб, свайное основание

Введение

В выпуске №4 этого журнала за 2024 год в статье «Способ сооружения подводных городских тоннелей в несвязанных илистых грунтах»

авторами был разработан новый способ строительства подводных городских тоннелей небольшой длины в сильнодеформируемых, несвязных обводненных илистых грунтах.

Предложенная технология — это сооружение подрусловой части подводных городских тоннелей способом вдавливания секций из заранее подготовленного стартового котлована под дном водотока (на незначительной глубине) без разработки грунта, аналогов которому нами не найдено ни на территории Российской Федерации, ни за рубежом.

Город Калининград, имеющий три административных района, разделен рекой Преголей, что значительно усложняет транспортные связи между ними. Из Московского района города существуют четыре выезда в другие районы. Один из таких выездов — двухпутный двухъярусный мост, который выполняет функции как железнодорожного, так и автодорожного. Из-за больших транспортных потоков в часы пик данное сооружение является местом скопления огромного количества легковых автомобилей, что увеличивает время на выезд и въезд в Московский район, а также не обеспечивает проезд грузовых автомобилей, так как расстояние между проезжей частью и вторым ярусом моста не соответствует действующим нормам. Кроме этого, мост является разводным, в опущенном состоянии подмостовой габарит мал. Пропуск крупных морских судов возможен только после подъема пролетного строения,

из-за чего проезд автомобилей в ночное время невозможен.

В данном пересечении и был запроектирован подводный автодорожный тоннель, который обеспечит бесперебойное движение с повышенной пропускной способностью и возможностью пропуска грузовых автомобилей, поскольку существующий мост является негабаритным сооружением. Обеспечение проезда грузового транспорта влечет за собой разгрузку главных проспектов города, а также уменьшение его количества в центре, что обуславливает улучшение транспортной ситуации в целом.

Учитывая назначение тоннеля (а это при существующих нагрузках на магистральные дороги минимум четыре полосы движения: две в одну сторону и две в другую), поперечное сечение тоннеля, запроектированное в соответствии с заданной категорией автодороги и с учетом всех требований СП 122.1333.2023, представлено на рис. 1. По бокам проектируемой конструкции располагаются сервисные отсеки, которые отделены от транспортной зоны стеной. Лотковая плита секции имеет специальные углубления для расположения в них направляющих труб экрана. Нами были рассмотрены несколько вариантов конструкции лотковой

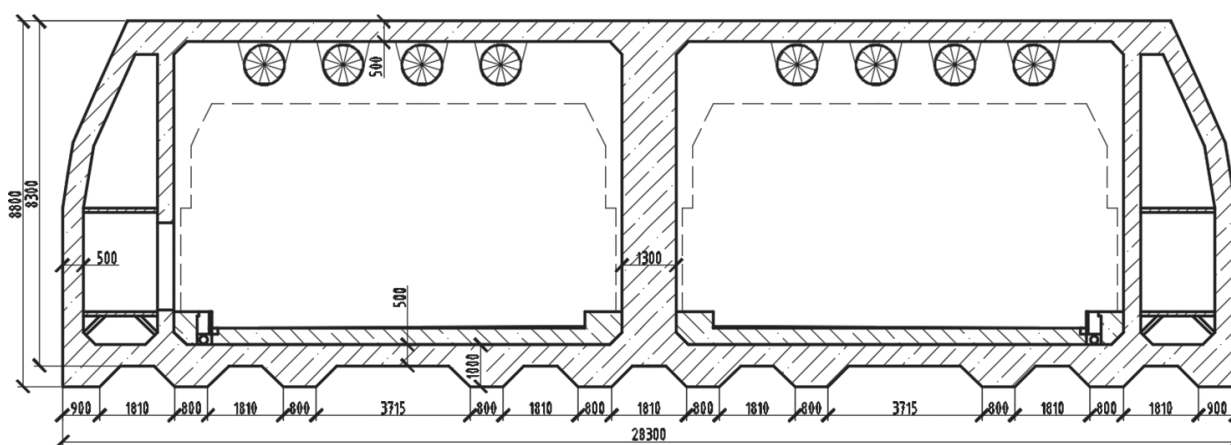


Рис. 1. Проектное поперечное сечение секции

плиты. Мы предлагаем тот, что обеспечивает наиболее стабильное положение. На основе запроектированного поперечного сечения вес секции длиной 53 м составляет более 10 тыс. т, что влечет за собой необходимость проектирования основания для тоннеля, чтобы предотвратить осадку конструкции, так как грунты, на которые опирается тоннель, очень сильно деформируемые. Однако надо отметить, что размеры секции можно изменять в зависимости от назначения, необходимости в сервисных помещениях и длины тоннеля. Общая длина участков тоннеля, которые необходимо продавить, составляет 151 м, учитывая ширину створа в предполагаемом месте строительства.

Обоснование применения разработанного способа требует решения следующих задач:

1. Рассчитать и проанализировать напряженно-деформированное состояние методами численного моделирования системы «грунтовый массив — продавливаемые секции».

2. Разработать мероприятия по снижению сопротивления трения наружной поверхности секции по грунту и лобового сопротивления грунта в забое при производстве работ по продавливанию.

Расчет параметров, определяющих возможность применения нового способа

Учитывая новизну разработанных решений проходки тоннеля в несвязных илистых грунтах, нами в качестве наиболее значимых параметров, которые влияют на оценку возможности применения данного способа, были выбраны следующие: сопротивление трения наружной поверхности продавливаемых секций и лобовое сопротивление грунта в забое.

Сопротивление трения наружной поверхности секции по грунту можно определить аналогично способу расчета при продавливании труб по формуле:

$$W_{mp} = \{ [2 \cdot (q \cdot B + p_a \cdot H) + g] \cdot f_0 + (B + H) \cdot c_0 \} \cdot L, \quad (1)$$

где B и H — ширина и высота прямоугольной продавливаемой секции, м;

q — вертикальное, равномерно распределенное давление грунта, kH/m^2 ;

p_a — интенсивность активного горизонтального горного давления грунта, kH/m^2 ;

g — вес одного погонного метра обделки, kH/m ;

f_0 — коэффициенты трения окружающего грунта по обделке;

L — длина продавливаемого участка, м;

c_0 — адгезия обделки с окружающим грунтом, kH/m^2 .

Ввиду отсутствия исследований в области продавливания в грунт крупногабаритных конструкций без предварительной разработки грунта считаем возможным производить расчет лобового сопротивления аналогично расчету при проходке методом вдавливания в грунт щитов с закрытой головной частью по формуле:

$$W_{лс} = p_n \cdot A, \quad (2)$$

где p_n — интенсивность пассивного горизонтального горного давления грунта, kH/m^2 ;

A — площадь лобовой части продавливаемой секции, m^2 .

На основе данных формул можно сделать вывод, что форма и размеры поперечного сечения секции будут значительно влиять на лобовое сопротивление и сопротивление трения наружной поверхности. Так как проектируемый тоннель должен соответствовать современным нормам и требованиям, а также обеспечивать необходимую интенсивность движения, в нем должны размещаться минимум четыре полосы движения автомобилей. При таких габаритах оптимальная форма сечения тоннельных

секций — прямоугольная. Разработка наиболее рациональных соотношений размеров и форм секций требует дополнительных исследований.

При анализе формулы 1 можно выделить основной показатель, который будет влиять на сопротивление по боковой поверхности — коэффициент трения окружающего грунта по обделке (f_0).

Коэффициент трения грунта по поверхности секции (бетон — грунт) составляет порядка 0,3. Если обшить бетонную секцию металлическим листом, тем самым уменьшив коэффициент трения до 0,2, а также обеспечив конструкцию внешней металлической гидроизоляцией, то сопротивление уменьшится на 27%.

Так как грунты, в которых будут вестись работы, являются обводненными, содержащими свободную (несвязанную) воду и их средний коэффициент пористости составляет 2,63, то можно сделать вывод, что проектируемый тоннель будет находиться полностью в воде, что уменьшит нормативное давление на грунтовое основание от собственного веса. Кроме того, применение современных специальных растворов и смазок для уменьшения трения грунта по секции также может значительно уменьшать возникающее сопротивление.

Для снижения лобового сопротивления грунта в забое запроектирована конструкция ножевой секции. Она устанавливается в торец первой секции и имеет клиновидную форму (заимствованную у снегоуборочной железнодорожной техники), которая врезается в грунт, тем самым рассекая его. Возможный вид такой конструкции изображен на рис. 2. Кроме того, данная конструкция позволит убирать грунт в стороны во время продавливания, тем самым грунты в забое не будут переуплотняться.

Все вышеизложенные меры по снижению сопротивления по боковой поверхности и лобового сопротивления секций тоннеля позво-

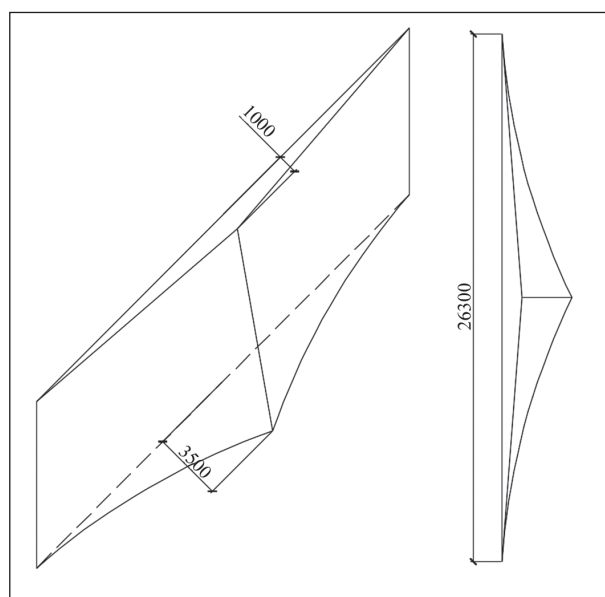


Рис. 2. Клиновидная конструкция для первой секции

ляют нам перейти к следующему этапу исследования.

Для определения необходимого усилия, чтобы вдавить последний участок секции, нужно произвести расчет постоянных нагрузок и рассчитать сопротивление трению и лобовое сопротивление. Расчет постоянных нагрузок будет производиться для трех сечений: в начале участка продавливания, в середине и в конце.

Общее сопротивление продавливанию определяется по формуле:

$$W = W_{\text{тр}} + W_{\text{лс}}, \quad (3)$$

где $W_{\text{тр}}$ — сопротивление трения наружной поверхности обделки по грунту;

$W_{\text{лс}}$ — лобовое сопротивление продавливанию ножевой секции в грунт.

Постоянные нагрузки, действующие на сооружение, будут определены на весь столб грунта и воды над тоннелем.

Первое и второе расчетные сечения тоннеля взяты по торцам первой и второй секции, третье — по границе приемного котлована.

Для расчета приняты физико-механические характеристики грунтов в месте предполагаемого строительства подводного тоннеля.

Расчеты нагрузок приведены в таблице.

Суммарное сопротивление на всю длину продавливания:

$$W = 143\,384 + 151\,070 + 127\,277 = \\ = 421\,732 \text{ кН} = 42\,990 \text{ т.}$$

Полученное значение сопротивления позволяет нам подобрать различные типы домкратных установок, используемых в строительстве. Это количество может меняться в случае выбора домкратов с различными характеристиками. Они устанавливаются в стартовом котловане на специально подготовленных для этого упорных конструкциях (см. статью «Способ сооружения подводных городских тоннелей в несвязанных илистых грунтах» в выпуске №4 этого журнала за 2024 год).

Проектирование основания под секциями

Так как сооружение тоннеля будет производиться без предварительных работ с грунтом, то в качестве основания был рассмотрен вариант буронабивных свай длиной 30–40 м (длина обусловлена глубиной несущих пород под дном водотока). Данный вариант основания является трудоемким и существенно снизит

скорость и увеличит стоимость строительства, поэтому далее рассмотрен вариант устройства экрана из труб. Учитывая, что грунты, в которых будет вестись продавливание, несвязные и водонасыщенные, а также для контроля секции в пространстве необходимо устройство специальные направляющие из стальных труб, для которых в нижней части секции сделаны специальные углубления. Эти трубы обеспечат устойчивое пространственное положение секции и будут служить в качестве надежного основания, предотвращая осадки конструкции в период эксплуатации. Для стальных труб будет необходимо устройство ростверков, в которые они будут заанкерены, тем самым обеспечивая их проектное положение (рис. 3.1, а). В случае необходимости для данных ростверков можно выполнить собственное основание из забивных или вдавливаемых свай (рис. 3.1, б).

Для расчетного подтверждения возможности применения такого основания был выбран специализированный геотехнический программный комплекс MIDAS GTS NX. Целями расчета в программе являются:

- анализ возможности использования экрана из труб с устройством ростверков, в которые будут заанкерены трубы;
- обоснование устройства собственного свайного основания для ростверков.

ТАБЛИЦА. Расчет нагрузок

	Мощность ила, м	Мощность воды, м	q , кН/м	p , кН/м	$W_{\text{тр}}^0$, кН	$W_{\text{ле}}$, кН	Длина продавли- ваемого участка	Суммарное сопротивление на участок
1	1,34	4,94	69,57	113,89	2148,9	29 492,7	53	$\frac{143\,384}{(14\,616)}$
2	0,5	6,54	76,56	121,64	2255,4	31 537	53	$\frac{151\,070}{(15\,400)}$
3	6,4	0	74,23	110,47	2190,1	28 723,8	45	$\frac{127\,277}{(12\,974)}$

Примечание. Значения в числителе — в кН, в знаменателе — в т.

Для этого была создана численная модель грунтового массива, который включает в себя три продавливаемые секции (две из них длиной 53 м и одна — 45 м), экран из семи стальных труб в основании секций, а также ростверки, в которые заанкерены трубы [1].

В данном расчете трубы имеют диаметр 1020 мм и толщину стенки 9 мм. Эти показатели и количество труб подбирались серией расчетов, поперечное сечение секций смоделировано в соответствии с рис. 1.

Конечные элементы, моделирующие основные несущие конструкции (класс бетона — В40, марка по морозостойкости — F200, марка по водонепроницаемости — не ниже W12), за-

моделированы элементами Elastic (учитывают упругую работу бетона).

Сваи моделируются одномерными балочными элементами. Взаимодействие свай и грунтового массива моделируется интерфейсными элементами, позволяющими корректно учитывать трение по боковой поверхности, а также отпор под пятой свай. Параметры свайных интерфейсов вычисляются утилитой MIDAS GTS NX «Свайный интерфейс v. 2.0».

Модель конструкции секции, экрана из труб под основанием секции, выполняющего функцию несущего основания, и направляющих для продавливаемых секций, а также свайное основание для фундаментов, в которые будут заанкерены трубы, представлены на рис. 3.2.

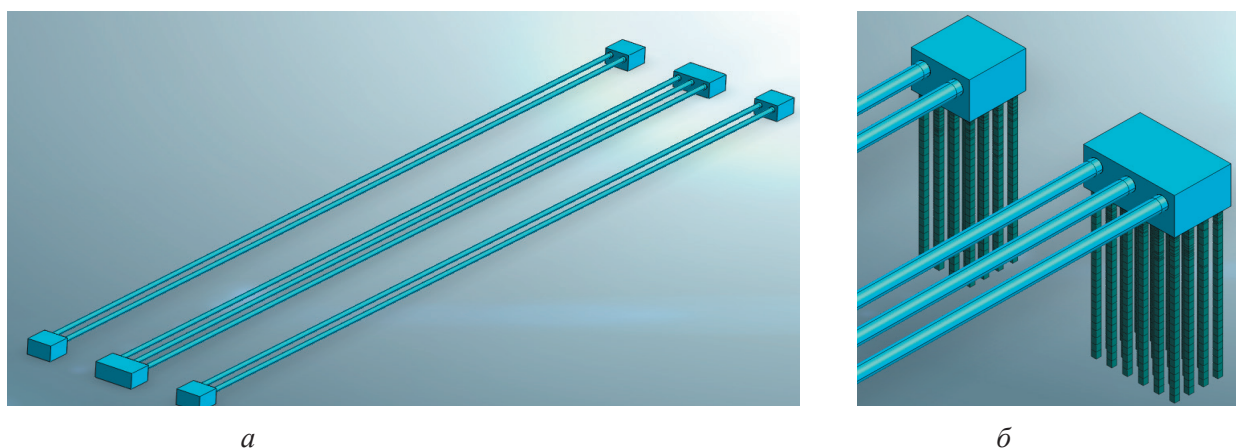


Рис. 3.1. *а* — общий вид основания из труб; *б* — ростверки со свайным основанием

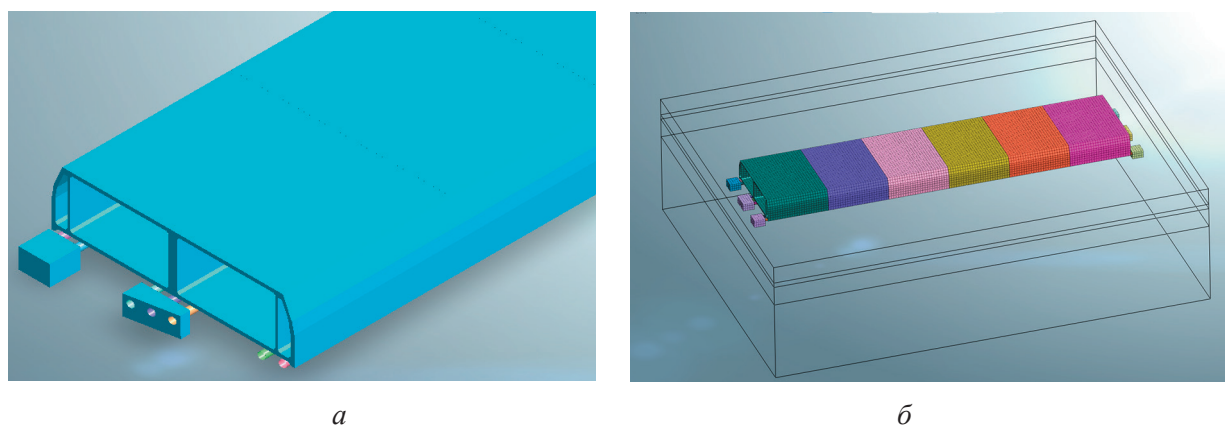


Рис. 3.2. *а* — модель тоннеля в ПК; *б* — общий вид конечно-элементной модели

Выполненный расчет системы «грунтовый массив — продавливаемые секции» с применением модели Мора — Кулона подтвердил возможность использования труб диаметром 1020 мм при длине 150 м, поскольку максимальные вертикальные перемещения не превысили предельные (рис. 3.3). На стадии оценки дополнительных перемещений ростверков был выполнен расчет модели без учета свайного основания, который показал их возможное опрокидывание во время эксплуатации. Поэтому с целью предотвращения опрокидывания и уменьшения осадок ростверков за проектировано свайное основание под ними (рис. 3.4).

Результаты работы

1. Выполнена оценка напряженно-деформированного состояния системы «грунтовый массив — продавливаемые секции» по результатам расчета в специализированной геотехнической программе. Для обеспечения надежности конструкции предусмотрено устройство ростверка со свайным фундаментом под трубы диаметром 1020 мм, что позволяет уменьшить осадки тоннеля и обеспечить устойчивость в процессе эксплуатации. Максимальные значения перемещений направляющих труб (при диаметре 1020 мм) составляют 4,6 см, что ниже допустимого значения 6 см при пролете труб длиной 150 м.

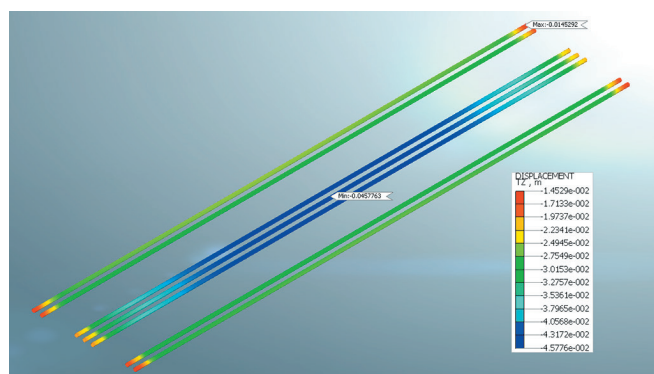


Рис. 3.3. Изополя вертикальных перемещений основания из труб

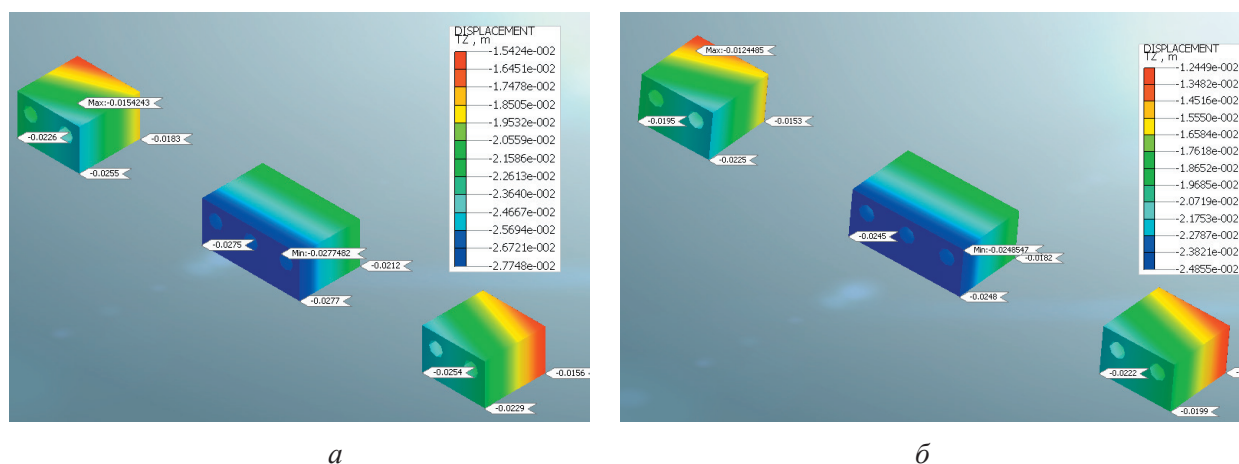


Рис. 3.4. а — изополя перемещений с использованием свайного основания;
б — изополя перемещений без использования свайного основания

2. Разработаны мероприятия по снижению сопротивления трения наружной поверхности продавливаемых секций и лобового сопротивления грунта в забое. Предложена конструкция клиновидной ножевой секции в сочетании с металлической опалубкой, которая на этапе строительства выполняет функцию внешней металлической гидроизоляции. Данная конструкция позволяет снизить сопротивление на 27% при продавливании секций и обеспечивает надежную гидроизоляцию в процессе эксплуатации.

Вывод

Выполненная оценка напряженно-деформированного состояния системы «грунтовый массив — продавливаемые секции» по результатам расчета в специализированной геотехнической программе, а также разработанные меры по уменьшению сопротивления трения наружной поверхности продавливаемых секций и лобового сопротивления грунта в забое при продавливании подтвердили возможность применения данного способа. Однако решение о его использовании при строительстве можно принять только после проведения исследований на базе испытательной (аналитической) лаборатории и целого ряда натурных испытаний, требующих значительных материальных, интеллектуальных и временных вложений.

Список источников

1. Сокорнов А. А., Коньков А. Н. Моделирование проходки тоннеля глубокого заложения в методе конечных элементов // Путь навигатор. 2022. № 50 (76). С. 36–44.
2. Транспортный переход через пролив Невельского — мост или тоннель? / Е. Б. Шестакова [и др.] // Путь навигатор. 2019. № 39 (65). С. 46–59.
3. Королько С. Н. Технологии и обеспечение безопасности ведения подземных работ при проходке тоннелей на совмещенной дороге Адлер — горно-климатический курорт «Альпика-Сервис» // Метро и тоннели. 2010. № 4. С. 30–33.
4. Курбацкий Е. Н., Сеницын А. С. Конструктивно-технологические решения протяженных переходов через проливы, сложенные слабыми грунтами по дну на территориях расчлененных ландшафтов // Перспективы развития строительного комплекса. 2015. № 1. С. 248–254.

Дата поступления: 11.02.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Контактная информация:

МЕЛЬНИК Яна Владленовна —

кандидат техн. наук, доцент;

melnik-yana@yandex.ru

ФЕДОРОВ Андрей Эдуардович — инженер;

rtut199922@mai.ru

Assessment of the Possibility of Using a New Method for Constructing Underwater Urban Tunnels in Unrelated Silty Soils

Ia. V. Mel'nik¹, A. E. Fiodorov²

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

²SK “Mostotrest” LLC, 10 Pravaya nab., Kaliningrad, 236006, Russia

For citation: *Mel'nik Ia. V., Fiodorov A. E. Assessment of the Possibility of Using a New Method for Constructing Underwater Urban Tunnels in Unrelated Silty Soils // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 427–435. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-427-435 (In Russian)*

Abstract

Objective: to substantiate the possibility of using a new method of constructing underwater urban tunnels in unrelated muddy soils. The proposed technology is the construction of the subsurface of underwater urban tunnels (for various purposes) by pressing sections from a pre-prepared launch pit under the bottom of a watercourse (at an insignificant depth) without excavation, which has no analogues in the domestic tunneling industry. It is necessary to calculate and analyze the stress-strain state using numerical modeling methods of the “soil massive-pressed sections” system and develop measures to reduce the friction resistance of the outer surface of the section on the ground and the frontal resistance of the soil in the face during the production of punching operations. **Methods:** to achieve this goal, a numerical model was built in the specialized geotechnical software complex MIDAS GTS NX a soil massive containing the entire structure of the subsurface section of the underwater tunnel: pressed tunnel sections, a screen of pipes in the base, foundations. **Results:** according to geotechnical calculations, to ensure the reliability of the structure, it is necessary to use a grillage device for a pile foundation for pipes D1020 mm, which reduces tunnel precipitation and ensures stability during operation. Measures have been developed to reduce the friction resistance of the outer surface of the pressed sections and the frontal resistance of the soil in the face. The design of a wedge-shaped knife section in combination with a metal formwork is proposed, which performs the function of external metal waterproofing at the construction stage. **Practical significance:** the conducted research confirms the possibility of using the proposed method for the construction of urban underwater tunnels of short length in unrelated muddy soils with a minimum depth of tunnel laying, which significantly reduces its length and can be recommended for practical use after conducting a series of studies based on a testing (analytical) laboratory and a number of field tests.

Keywords: underwater urban tunnel, weak silty soils, penetration without excavation, wedge-shaped structure, frontal resistance, pipe foundation, pile foundation

References

1. Sokornov A.A., Kon'kov A.N. Modelirovanie prokhodki tonnelya glubokogo zalozheniya v metode konechnykh elementov [Modeling of a Deep Shallow Tunnel Driving in the Finite Element Method], *Putevoj navigator [Travel Navigator]*, 2022, no. 50 (76), pp. 36–44. (In Russian)

2. Shestakova E.B., et al. Transportnyj perekhod cherez proliv Nevel'skogo — most ili tunnel'? [Transport Crossing over the Nevelsky Strait — Bridge or Tunnel?], *Putevoj navigator [Travel Navigator]*, 2019, no. 39 (65), pp. 46–59. (In Russian)

3. Korol'ko S.N. Tekhnologii i obespechenie bezopasnosti vedeniya podzemnykh rabot pri prokhodke tonnelej na sovmeshchennoj doroge Adler — Gornoklimaticheskij kurort “Al'pika-Servis” [Technologies and Safety of Underground Work During Tunneling on the Combined Road Adler — Mountain Climatic Resort Alpika-Service], *Metro i tunneli [Metro and tunnels]*, 2010, no. 4, pp. 30–33. (In Russian)

4. Kurbatskij E.N., Sinitsyn A.S. Konstruktivno-tekhnologicheskie resheniya protyazhennykh perekhodov cherez prolivy, slozhennye slabymi gruntami po dnu na territoriyakh raschlenennykh landshaftov [Constructive and Technological Solutions for Extended Crossings Through Straits Composed of Weak Soils Along the Bottom in the Territories of Dissected Landscapes], *Perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa [Prospects for the Development of the Construction Complex]*, 2015, no. 1, pp. 248–254. (In Russian)

Received: February 11, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Iana V. MEL'NIK — PhD in Engineering, Associate Professor; melnik-yana@yandex.ru
Andrey E. FIODOROV — engineer; rtut199922@mai.ru