



Research Article

Received: January 2, 2024

Accepted: January 18, 2024

Published: January 25, 2024

ISSN 2304-6295

Metal shields and method of its construction from guide pipes and basic elements

Pribylskaya, Natalya Mikhailovna^{1*} 
Grechukhin, Vladimir Alexandrovich¹ 

¹ Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus; natalyapribylskaya@gmail.com (P.N.M); vag_ftk@bntu.by (G.V.A)

Correspondence:* email natalyapribylskaya@gmail.com; contact phone [+375291731995](tel:+375291731995)

Keywords:

Underground transportation facilities; Shields; Make concave; Overlying strata fracture; Deformation and subsidence of the bearing stratum

Abstract:

The object of research is an engineering solution for the design and technology of pipe canopies used in underground structures, which lie at a relatively shallow depth below the surface, pass through soft ground, and have a small length. This paper describes a finite-element method for modeling a pipe canopy using SolidWorks. The authors analyzed the stress-strain behavior of the load-bearing structural elements of the pipe canopy. The pipe canopies prevent deformation and subsidence of the bearing layer, minimize the impact of civil engineering work on city and traffic infrastructure, and ensure building safety. Constructing underground structures using pipe canopies does not require traffic congestion on existing railroads and major roads, thus avoiding financial losses, discomfort for people, and negative impacts on aboveground buildings and structures. The main research objectives are to show that the proposed design of the pipe canopy is viable and can reduce the cost of constructing the pipe canopy by using less powerful equipment for pushing structural elements. **Method.** One of the key issues when installing underground transport communications is to keep the same high-altitude position (soil body), which pipe canopies can ensure. The authors studied the stress-strain behavior of the proposed pipe canopies using a computational model developed based on the finite-element method. The authors used Romberg's method to increase the accuracy of calculating the internal forces for pushing individual structural elements of the pipe canopy. **Results.** The most widely used and available options for pipe canopies and presents the main reasons why they are not appropriate. The proposed design and technology of the pipe canopy keep the advantages of pipe canopies and technologies currently used while reducing the costs of constructing the pipe canopy using less powerful equipment. The calculations showed that the maximum stress sustained by some elements of the top part, namely, section-cut pipes at the points of joining the guide pipes along the U-shaped edges of the round, does not exceed the yield strength of the steel chosen. This confirms the efficiency of the proposed pipe canopy.

1 Introduction/ Введение

В настоящее время при строительстве подземных транспортных сооружений под автомобильными дорогами или железнодорожными путями при невозможности остановки движения по ним используются различные технические решения. Применение данных решений позволяет сохранить целостность полотна автомобильной дороги или верхнего строения железнодорожного пути.

Каждое из этих решений имеет свои преимущества и недостатки с точки зрения его применения для строительства того или иного объекта. Учитывая, что для заказчика важными факторами являются стоимость и сроки строительства объекта, то изначально возникает вопрос, какое из существующих технических решений лучше применить, поскольку вариантов существует

Pribylskaya, N.; Grechukhin, V.

Metal shields and method of its construction from guide pipes and basic elements;

2024; Construction of Unique Buildings and Structures; **110** Article No 11004. doi: 10.4123/CUBS.110.4



не так уж и много. Представляется, что выходом из сложившейся ситуации должно служить расширение альтернативных способов строительства, а также придание данным способам универсальности с целью возможности их применения в качестве готового решения.

Так одним из решений является метод снижения осадок земной поверхности с применением опережающих бетонных крепей, которые создают путем нагнетания быстротвердеющих составов в предварительно устроенные в забое выработки щелевые прорези [1]. При строительстве выработок метрополитена выполняют работы по опережающему креплению забоя фиброглассовыми анкерами и опережающему креплению кровли анкерами из труб [2]-[4].

Известна двухстадийная технология создания контурного ограждения эскалаторного тоннеля: закрепление грунтов методом струйной цементации через вертикальные скважины с дневной поверхности до границы кембрийских глин. При наличии препятствий на поверхности (инженерные сети, капитальные строения и т.п.) возможно использование наклонных скважин под углом до 60 градусов, на второй стадии осуществляется рассольное замораживание закрепленного грунтоцементного массива с целью создания противодиффузионного ограждения [5]-[6].

В основном данные решения используются при строительстве метрополитенов. Однако их применение высокочрезмерно и требует применения сложной техники и дорогостоящих материалов [7]-[9].

Одним из наиболее распространенных методов является устройство металлического защитного экрана, состоящего из труб или других элементов, устраиваемых по контуру будущего подземного сооружения. Данный способ позволяет проводить работы без нарушения несущего слоя, что особенно актуально при наличии слабых грунтов [10]-[12].

При строительстве подземных транспортных коммуникаций, которые залегают на относительно небольшой глубине от земной поверхности, проходят в слабых грунтах и имеют небольшую длину целесообразно применение защитного экрана [13]-[16].

Защитный экран используют либо как временную крепь, либо его включают в работу постоянной конструкции в качестве несущего элемента. Его применение позволяет предотвратить деформации и просадки поверхности несущего слоя, а также свести к минимуму влияние проводимых строительно-монтажных работ на городскую и транспортную инфраструктуру, обеспечить безопасность проведения строительных работ, предотвратить перерывы движения и какие-либо ограничения движения железнодорожного и автомобильного транспорта на участке строительства объекта [17], [18].

Широко применяется способ сооружения защитного экрана с помощью полых металлических элементов, в частности стальных, железобетонных труб, возможно изготовление труб из других материалов. Эти трубы вдавливают в грунт домкратной установкой, расположенной на поверхности земли или в котловане, при помощи замково-направляющего соединения трубы объединяются в защитный экран, полости внутри труб заполняют бетоном, затем из образовавшегося под защитным экраном контура извлекают грунт, и создают монолитную или сборную обделку. Данный способ имеет следующие недостатки:

1. при бетонировании полости трубы, внутри трубы может образоваться пространство свободное от бетона, со временем происходит коррозия металлического элемента экрана, и его разрушение, что может привести к проседанию грунта и разрушительным последствиям;
2. полые металлические элементы объединяют в защитный экран при помощи замково-направляющего соединения, выполненного в виде образующих замок, приваренных на обращенных друг к другу поверхностях смежных металлических элементов экрана, один из которых выполнен С-образным в поперечном сечении, а другой выполнен в виде заведенной в него стенки с расположенным на свободной кромке уширением шириной, превышающей ширину створа С-образного элемента. При продавливании внутрь С-образного элемента замкового соединения могут попасть камни или другие твердые тела, при заведении в него второго элемента замково-направляющего соединения между ними может застрять камень или другое твердое тело и мешать или препятствовать дальнейшему продавливанию.

При строительстве транспортных сооружений, под автомобильными и железными дорогами применяют защитный экран, который создают путем ступенчатого продавливания труб, с последующей выемкой породы из продавленной секции и вырезки из нее продольной полосы на величину ступени продавливания очередной секции. Вырез осуществляют в пределах сектора 90÷120 градусов [19]. Для предотвращения деформаций в месте вырезанной продольной полосы приваривают ребра жесткости. Перед продавливанием очередную секцию заводят в упомянутый



выше вырез. Каждая секция состоит из двух-трех труб с вырезанными секторами, соединенными друг с другом.

Данному защитному экрану не присущи недостатки предыдущего защитного экрана, основным недостатком данного варианта является работа человека в трубе, заключающаяся в удалении из нее породы, вырезку сектора трубы и осуществление сварочных работ [20]. Требованиями техники безопасности для таких случаев установлено ограничение минимального диаметра трубы, не менее 1.2 метров, что ведет к увеличению металлоемкости защитного экрана, а также к необходимости применения более мощного оборудования при производстве работ.

Известен способ возведения подземного туннеля с использованием защитного экрана и подземный туннель. При таком способе строительства защитный экран выполняется из желобообразных элементов, преимущественно в виде шпунтовых свай с открытыми полостями корытного, полукруглого или секторального (радиальный угол раскрытия от 90 до 180 градусов) поперечных сечений, направленными внутрь туннеля и размещением в них монолитной железобетонной обделки, работающих совместно как единый несущий элемент, при этом к нижним граням желобообразных элементов защитного экрана перпендикулярно их оси с требуемым шагом по длине туннеля привариваются анкерные балки и устанавливаются боковые вертикальные стойки, что позволяет достичь поставленной технической задачи упрощения способа изготовления и конструкции подземного туннеля (защитного экрана, обделки), а также повышения экономической эффективности без снижения его прочности, деформативности [21].

Данный способ позволяет отказаться от использования труда человека в стесненном пространстве трубы, поэтому отпадает необходимость использовать трубы диаметра больше чем 1.2 метра, как следствие идет снижение металлоемкости процесса и появляется возможность применять менее мощное оборудование для выполнения продавливания.

Однако данный способ имеет следующие недостатки:

1. геометрия полутруб, используемых в конструкции защитного экрана, а также секций из полутруб проигрывает геометрии труб. За счет уменьшения момента инерции конструкция становится менее устойчива к изгибам в продольном и поперечном направлении;
2. секции из полутруб также недостаточно устойчивы к деформации кручения в поперечном направлении;
3. не понятно, каким образом секции из полутруб будут крепиться между собой.

В качестве альтернативы, предлагается решение, техническим результатом которого является повышение устойчивости конструкции экрана к деформациям, что облегчает сооружение защитного экрана и увеличивает эксплуатационные нагрузки на защитный экран. Данный способ сооружения металлического защитного экрана позволяет максимально приблизиться к объекту строительства, обеспечить экономический эффект и безопасность строительно-монтажных работ при возведении подземного сооружения.

Указанный результат достигается за счет использования при сооружении защитного экрана направляющих труб и базовых элементов конструкции защитного экрана.

Базовый элемент сконструирован следующим образом: по бокам секции, сваренной из полутруб, с обеих сторон вдоль образующей приваривают трубы с вырезанным сектором своей внешней боковой поверхностью. Угол вырезанного сектора определяется расстоянием, на котором приварены направляющие уголки на направляющей трубе. Поверх данной конструкции с выпуклой стороны полутруб приваривают стальные полосы. Полоски приваривают зигзагообразно, количество полос и угол, под которым они приварены к направлению продавливания, зависят от длины секции защитного экрана. Ширину, на которую приваривают полосы, определяют таким образом, чтобы точка их сварки с боковыми трубами соответствовала их точке касания с этими трубами и была конечной точкой полосы.

Базовые элементы соединяют друг с другом при помощи замково-направляющего соединения. В замково-направляющее соединение входит направляющая труба с приваренными направляющими уголками и приваренные к секциям защитного экрана вдоль образующей с обеих сторон трубы с вырезанным сектором. Элементами замково-направляющего соединения могут быть полутрубы, которые привариваются вдоль направления продавливания, своей выпуклой боковой поверхностью вдоль образующей или вдоль разреза полутрубы, входящей в секцию защитного экрана. Диаметр полутруб составляющих замково-направляющее соединение должен быть больше диаметра направляющей трубы. Как вариант элементами замково-направляющего соединения могут выступать трубы кольцевого сечения. В последнем варианте с одной стороны секции защитного экрана приваривается труба кольцевого сечения с другой стороны труба

Pribylskaya, N.; Grechukhin, V.

Metal shields and method of its construction from guide pipes and basic elements;

2024; Construction of Unique Buildings and Structures; 110 Article No 11004. doi: 10.4123/CUBS.110.4

кольцевого сечения с вырезанным сектором. Диаметр трубы кольцевого сечения с вырезанным сектором должен быть больше диаметра трубы кольцевого сечения, чтобы данная конструкция могла выступать замково-направляющим соединением.

При формировании защитного экрана, изображенного на рисунке 1, сначала продавливаются две направляющие трубы с технологическими окнами с возможностью продавить между ними базовый элемент, после чего добавляется следующая направляющая труба с технологическими окнами и следующий базовый элемент, этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет выстроена одна из секций защитного экрана, из которых сооружается защитный экран прямоугольной или сводчатой формы; затем из пространства под защитным экраном поэтапно извлекается грунт; по мере освобождения пространства под экраном, конструкция экрана укрепляется временными стальными опорами, в освобождающихся технологических окнах прокладывается арматура и ведутся сварочные работы; металлический каркас защитного экрана посредством арматуры объединяется с бетонной обделкой тоннеля, и по мере проходки тоннеля, поэтапно создается монолитная железобетонная обделка тоннеля [22].

Объект исследования – новое конструктивное решение металлического защитного экрана.

Предмет исследования – проверка надежности новой конструкции металлического защитного экрана.

Цель работы – предложить альтернативное инженерное решение по проектированию и технологии сооружения металлического защитного экрана при строительстве подземных транспортных сооружений.

Задача – на основе проведенных расчетов напряженно-деформированного состояния защитного экрана показать, что предлагаемая конструкция имеет достаточный запас прочности, устойчива к деформациям и ее использование при строительстве, например, подземных транспортных сооружений под железной дорогой, не повлечет просадок железнодорожного пути, требующих ограничения движения транспорта. Для сооружения экрана требуется менее мощное задавливающее оборудование, что, в том числе повлияет на стоимость и сроки строительства объекта.



Рис. 1 – Металлический защитный экран
Fig. 1 – Metal shields

2 Materials and Methods / Материалы и Методы

В качестве основного критерия проверки работоспособности предложенного металлического защитного экрана принято напряженно-деформированное состояние, что показывает его жизнеспособность.

В расчете, проведенном с использованием программного продукта SolidWorks (<https://www.solidworks.com/>), была произведена проверка напряженно-деформированного состояния, вышеописанного решения [23], [24].

Расчеты показали, что максимальное напряжение, которое испытывают отдельные части верха конструкции, а именно, трубы с вырезанным сектором в местах соединения с направляющими трубами, по «П»-образным краям заходки, не превышает предел текучести:

$2.45 \cdot 10^8 \frac{H}{m^2}$ выбранной нами стали. Результаты исследования показаны на рисунке 2.

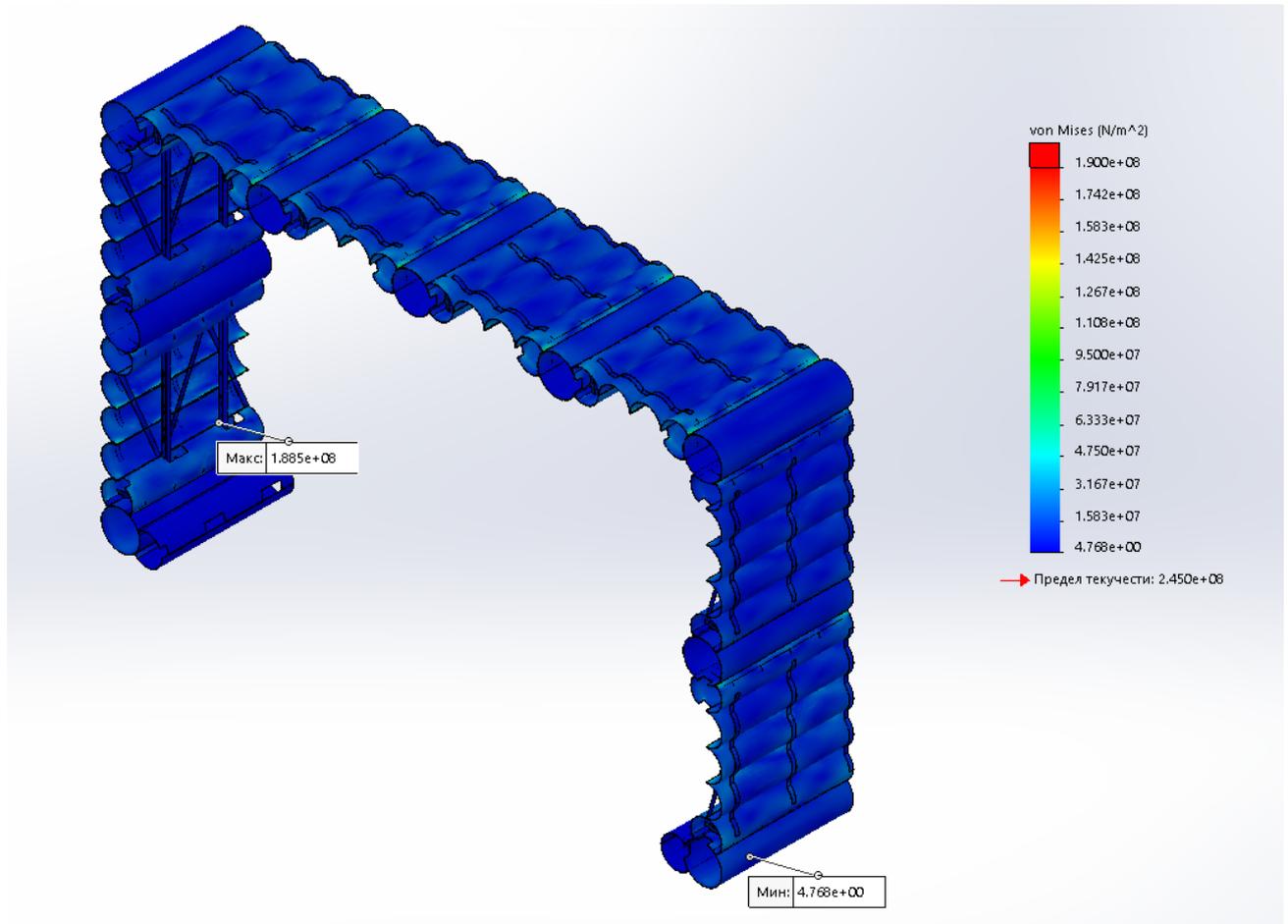


Рис. 2 – Результаты исследования напряженного состояния МЗЭ

Fig. 2 – Results of the study of the stress-strain behavior of pipe canopy elements

Максимальное вертикальное перемещение, которому подвержены отдельные части конструкции, а точнее, трубы с вырезанным сектором по середине продольного направления заходки, соответствует требованиям Правил технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь, утвержденными постановлением Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь 25 ноября 2015 г. № 52, [25] и Инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути, утвержденной распоряжением ОТКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ», Москва, Россия от 14.11.2016 г. № 2288р [26], в части организации непрерывного движения поездов при проведении строительных работ. Ограничений скорости движения поездов на участке дороги, где ведутся строительные работы, не требуется. Результаты исследования показаны на рисунке 3.

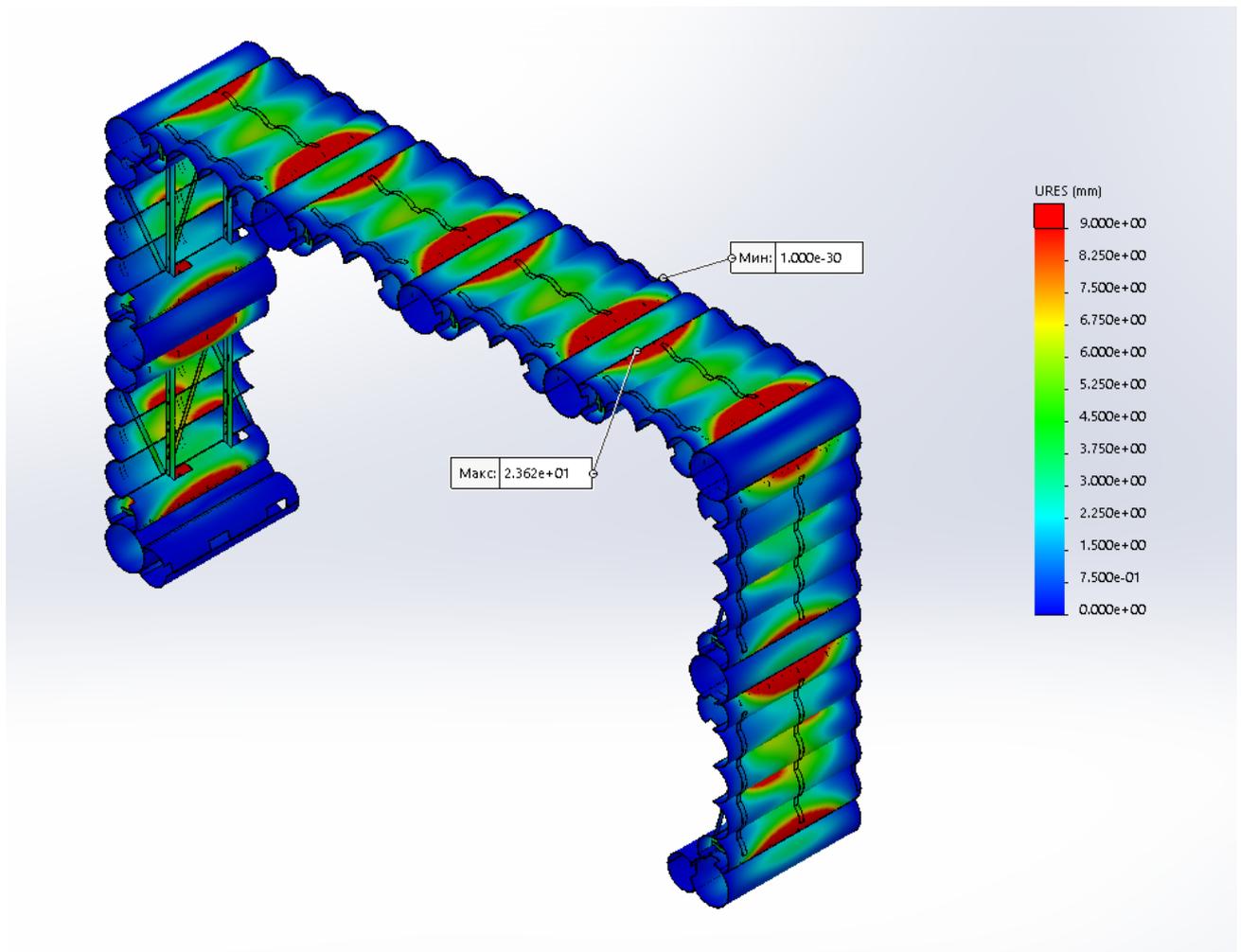


Рис. 3 – Результаты исследования перемещений, возникающих в МЗЭ
Fig. 3 – Results of the study of movements in the pipe canopy

Размеры защитного экрана в сравнении с его размерами до нагружения изменились в допустимых пределах [27].

Для определения усилий продавливания были использованы методические указания Строительных норм Республики Беларусь СН 3.03.01-2019 [28] и Строительных правил СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные России [29].

Были получены уравнения для определения расчетной нагрузки на верхнюю и боковые секции защитного экрана, которые складываются из давления грунта от веса насыпи и от подвижного состава железных дорог.

Уравнение для расчетной нагрузки на верхнюю секцию защитного экрана:

$$P_p^g = 23470 \cdot (2.51 - y) + \frac{230050}{5.21 - y} \quad (1)$$

Уравнение для расчетной нагрузки на боковые секции защитного экрана:

$$P_p^g = 7669 \cdot (2.51 - y) + \frac{\left(9807 + \frac{10787}{e^{0.1004 - 0.04 \cdot y}} + \frac{43149}{(2.51 - y)^2} \right) \cdot 4.8995}{5.21 - y} \quad (2)$$

где y – глубина, на которой рассчитывается расчетная нагрузка на верхнюю и боковые секции защитного экрана.



При продавливании было учтено предельно допустимое давление на грунт. Чтобы начался процесс продавливания, давление на грунт должно превышать предельно допустимое. Так же необходимо преодолеть силу трения:

$F_{mp} = \mu \cdot N$, где N – сила нормального давления, μ – коэффициент трения.

В нашем случае сила нормального давления – это расчетная нагрузка на верхнюю и боковые секции защитного экрана соответственно. Так как расчетная нагрузка на верхнюю и боковые секции защитного экрана зависит от глубины, на которой продавливают элемент защитного экрана, силу нормального давления находим, интегрируя расчетную нагрузку по глубине заложения h .

$$N^e = \int_{h_2}^{h_1} P_p^e(h) ds \quad (3)$$

$$N^{\bar{e}} = \int_{h_2}^{h_1} P_p^{\bar{e}}(h) ds \quad (4)$$

Получаем формулы для расчета силы трения:

$$F_{mp}^e = \mu \cdot \int_{h_2}^{h_1} P_p^e(h) ds \quad (5)$$

$$F_{mp}^{\bar{e}} = \mu \cdot \int_{h_2}^{h_1} P_p^{\bar{e}}(h) ds \quad (6)$$

Параметры секции защитного экрана:

Секция защитного экрана состоит из полутруб диаметром $D = 820 \text{ мм}$ с толщиной стенок $S = 12 \text{ мм}$.

К секции с обеих сторон выпуклой боковой поверхностью приварены трубы с вырезанным сектором. Диаметр труб $D = 820 \text{ мм}$ с толщиной стенок $S = 12 \text{ мм}$.

Параметры направляющей трубы и уголков:

Диаметр направляющей трубы $D = 1020 \text{ мм}$, толщина стенки $S = 12 \text{ мм}$, к ней приварены прокатные уголки: ширина полки уголка $b = 100 \text{ мм}$, толщина полки $l = 12 \text{ мм}$. Для сооружения металлического защитного экрана используются материалы и изделия, отвечающие требованиям технических нормативных правовых актов.

Удельный вес грунта: $\gamma_n = 17.7 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$.

Металл: Сталь С245, предел текучести: $2.45 \cdot 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

Глубина заходки: $L = 3.5 \text{ м}$.

3 Results and Discussion / Результаты и Обсуждение

Усилия по продавливанию элементов защитного экрана были рассчитаны, используя программный продукт Mathcad (<https://www.mathcad.com/>).

Предельно допустимое давление на грунт: $P_{np} = 1 \text{ Па}$;

коэффициент трения стали о грунт: $k = 0.4$

$$P_z^e(y, dh) = 18054 \cdot (2.51 - y - dh) \quad (7)$$



$$P_{nc}^e(y, dh) = \frac{176962}{(5.21 - y - dh)}, \quad (8)$$

$$P_2^{\bar{o}}(y, dh) = 5899 \cdot (2.51 - y - dh), \quad (9)$$

$$P_{nc}^{\bar{o}}(y, dh) = \frac{\left(9807 + \frac{10787}{e^{0.1004 - 0.04 \cdot (y + dh)}} + \frac{43149}{(2.51 - y - dh)^2} \right) \cdot 4.0829}{(5.21 - y - dh)} \quad (10)$$

$P_2^e(y, dh)$ – давление на верх экрана со стороны грунта, Па;

$P_{nc}^e(y, dh)$ – давление на верх экрана со стороны подвижного состава, Па;

$P_2^{\bar{o}}(y, dh)$ – давление на боковую поверхность экрана со стороны грунта, Па;

$P_{nc}^{\bar{o}}(y, dh)$ – давление на боковую поверхность экрана со стороны подвижного состава, Па;

dh – глубина относительно точки, м.

$$F_{n1}(r_1, r_2, \varphi_1, \varphi_2, dh) = k \cdot r_1 \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} P_2^e(r_1 \cdot \sin(\varphi), dh) d\varphi + k \cdot r_2 \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} P_2^e(r_2 \cdot \sin(\varphi), dh) d\varphi \quad (11)$$

$F_{n1}(r_1, r_2, \varphi_1, \varphi_2, dh)$ – трение на внешнюю и внутреннюю боковую поверхность труб, полутруб, труб с вырезом.

r_1, r_2 – внутренний и внешний радиусы труб и полутруб.

$$F_{n2}(L, \alpha, dh) = k \cdot \int_0^L P_2^e(l \cdot \sin(\alpha), dh) dl \quad (12)$$

$$F_{n3}(L, \alpha, dh) = k \cdot \int_0^L P_2^{\bar{o}}(l \cdot \sin(\alpha), dh) dl \quad (13)$$

$F_{n2}(L, \alpha, dh)$, $F_{n3}(L, \alpha, dh)$ – трение о плоскую прямоугольную полосу.

$$\begin{aligned} F_{нап} = & F_{n1}(R_{1H}, R_{1\bar{o}}, 0, 2 \cdot \pi, 0) + 2 \cdot F_{n2}(L_1, \alpha_1, R_{1H} \cdot \sin(\alpha_1)) + \\ & 2 \cdot F_{n2}\left(L_1, -\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right), R_{1H} \cdot \sin(\alpha_1)\right) + 2 \cdot F_{n2}(L_1, \alpha_2, R_{1H} \cdot \sin(\alpha_2)) + \\ & 2 \cdot F_{n2}\left(L_1, \left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_2|\right), R_{1H} \cdot \sin(\alpha_2)\right) + 2 \cdot F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_1, (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_1) - \delta_1 \cdot \cos(\alpha_1)) + \\ & 2 \cdot F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, -\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right), (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_1) - \delta_1 \cdot \cos(\alpha_1)\right) + \\ & 2 \cdot F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_2, (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_2) - \delta_1 \cdot \cos(\alpha_2)) + \\ & 2 \cdot F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, \left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_2|\right), (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_2) + \delta_1 \cdot \cos(\alpha_2)\right) \end{aligned} \quad (14)$$



$F_{напр}$ – сила трения, действующая на направляющую трубу;

$R_{1н}, R_{1в}$ – внешний и внутренний радиусы труб;

L_1 – ширина полки уголка;

δ_1 – толщина уголка;

α_1, α_2 – углы расположения уголков на направляющей трубе.

$$\begin{aligned}
 F_{мп_баз_эл}^6 = & 2 \cdot F_{н1} (R_{2н}, R_{2в}, \alpha_3, \alpha_4, dh_1) + 3 \cdot F_{н1} (R_{2н}, R_{2в}, 0, \pi, dh_2) + \\
 & 16 \cdot F_{н1} (R_{нл}, 0, \alpha_{mx}, \pi - \alpha_{mx}, dh_3) \cdot \frac{\Delta}{l_c} - 16 \cdot F_{н1} (R_{2н}, 0, \alpha_{mn}, \pi - \alpha_{mn}, dh_3) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + \\
 & 16 \cdot P_2^6 (0, dh_4) \cdot a \cdot \frac{\Delta}{l_c} + 16 \cdot P_2^6 (0, dh_4 - h) \cdot b \cdot \frac{\Delta}{l_c}
 \end{aligned} \quad (15)$$

$F_{мп_баз_эл}^6$ – сила трения, действующая на верхний базовый элемент;

$R_{2н}, R_{2в}$ – внешний и внутренний радиусы труб;

$R_{нл}$ – радиус фигурной полосы;

α_3, α_4 – углы расположения выреза в трубе;

dh_1 – смещение оси трубы с вырезом по оси y относительно начала координат;

dh_2 – смещение оси полутруб по оси y относительно начала координат;

dh_3 – смещение центров окружностей круглых частей фигурной полосы по оси y относительно начала координат;

dh_4 – смещение верхней поверхности прямой части фигурной пластины по оси y относительно начала координат;

α_{mn}, α_{mx} – углы верхней и нижней дуги фигурной полосы;

Δ – ширина фигурной пластины;

a, b – верхняя и нижняя части фигурной полосы.



$$\begin{aligned}
F_{\text{напр_верх_бок}} = & F_{n1}(R_{1H}, R_{1B}, 0, 2 \cdot \pi, 0) + F_{n2}(L_1, \alpha_1, R_{1H} \cdot \sin(\alpha_1)) + \\
& F_{n2}\left(L_1, -\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right), R_{1H} \cdot \sin(\alpha_1)\right) + F_{n2}(L_1, \alpha_2, R_{1H} \cdot \sin(\alpha_2)) + \\
& F_{n2}\left(L_1, -\left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_2|\right), R_{1H} \cdot \sin(\alpha_2)\right) + F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_1, (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_1) - \delta_1 \cdot \cos(\alpha_1)) + \\
& F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, -\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right), (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_1) - \delta_1 \cdot \cos(\alpha_1)\right) + \\
& F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_2, (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_2) + \delta_1 \cdot \cos(\alpha_2)) + \\
& F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, \left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_2|\right), (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_2) + \delta_1 \cdot \cos(\alpha_2)\right) + F_{n2}(L_1, \alpha_5, R_{1H} \cdot \sin(\alpha_5)) + \quad (16) \\
& F_{n2}\left(L_1, -\left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_5|\right), R_{1H} \cdot \sin(\alpha_5)\right) + F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_5, (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_5) - \delta_1 \cdot \cos(\alpha_5)) + \\
& F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, -\left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_5|\right), (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_5) + \delta_1 \cdot \cos(\alpha_5)\right) + F_{n2}(L_1, \alpha_6, R_{1H} \cdot \sin(\alpha_6)) + \\
& F_{n2}\left(L_1, -\left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_6|\right), R_{1H} \cdot \sin(\alpha_6)\right) + F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_6, (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_6) - \delta_1 \cdot \cos(\alpha_6)) + \\
& F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, -\left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_6|\right), (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_6) + \delta_1 \cdot \cos(\alpha_6)\right)
\end{aligned}$$

$F_{\text{напр_верх_бок}}$ – сила трения, действующая на верхнюю боковую направляющую трубу;
 α_5, α_6 – углы расположения уголков на направляющей трубе.



$$\begin{aligned}
F_{\text{напр_ниж_бок}} = & F_{n1}(R_{1H}, R_{1B}, 0, 2 \cdot \pi, dh_5) + F_{n2}(L_1, \alpha_7, R_{1H} \cdot \sin(\alpha_7) + dh_5) + \\
& F_{n2}\left(L_1, -\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_7\right), R_{1H} \cdot \sin(\alpha_7) + dh_5\right) + F_{n2}(L_1, \alpha_8, R_{1H} \cdot \sin(\alpha_8) + dh_5) + \\
& F_{n2}\left(L_1, \left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_8|\right), R_{1H} \cdot \sin(\alpha_8) + dh_5\right) + \\
& F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_7, (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_7) - \delta_1 \cdot \cos(\alpha_7) + dh_5) + \\
& F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, -\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_7\right), (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_7) - \delta_1 \cdot \cos(\alpha_7) + dh_5\right) + \\
& F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_8, (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_8) + \delta_1 \cdot \cos(\alpha_8) + dh_5) + \\
& F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, \left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_8|\right), (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_8) + \delta_1 \cdot \cos(\alpha_8) + dh_5\right) + \\
& F_{n2}(L_1, \alpha_9, R_{1H} \cdot \sin(\alpha_9) + dh_5) + \\
& F_{n2}\left(L_1, \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_9\right), R_{1H} \cdot \sin(\alpha_9) + dh_5\right) + \\
& F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_9, (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_9) + \delta_1 \cdot \cos(\alpha_9) + dh_5) + \\
& F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_9\right), (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_9) + \delta_1 \cdot \cos(\alpha_9) + dh_5\right) + \\
& F_{n2}(L_1, \alpha_{10}, R_{1H} \cdot \sin(\alpha_{10}) + dh_5) + \\
& F_{n2}\left(L_1, \frac{\pi}{2} - \alpha_{10}, R_{1H} \cdot \sin(\alpha_{10}) + dh_5\right) + \\
& F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_{10}, (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_{10}) + \delta_1 \cdot \cos(\alpha_{10}) + dh_5) + \\
& F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, \frac{\pi}{2} - \alpha_{10}, (R_{1H} + \delta_1) \cdot \sin(\alpha_{10}) + \delta_1 \cdot \cos(\alpha_{10}) + dh_5\right)
\end{aligned} \tag{17}$$

$F_{\text{напр_ниж_бок}}$ – сила трения, действующая на нижнюю боковую направляющую трубу;
 $\alpha_7, \alpha_8, \alpha_9, \alpha_{10}$ – углы расположения уголков на направляющей трубе.



$$\begin{aligned}
F_{mp_баз_эл}^{\bar{6}} = & F_{n1}(R_{2H}, R_{2\theta}, \alpha_{11}, \alpha_{12}, dh_6) + F_{n1}\left(R_{2H}, R_{2\theta}, -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, dh_7\right) + \\
& F_{n1}\left(R_{2H}, R_{2\theta}, -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, dh_8\right) + F_{n1}\left(R_{2h}, R_{2\theta}, -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, dh_9\right) + F_{n1}(R_{2h}, R_{2\theta}, \alpha_{13}, \alpha_{14}, dh_{10}) - \\
& 4 \cdot F_{n1}(R_{2h}, 0, -\alpha_{mn_d}, 0, dh_6) \cdot \frac{\Delta}{l_c} - 4 \cdot F_{n1}(R_{2h}, 0, -\alpha_{mn_d}, \alpha_{mn_d}, dh_8) \cdot \frac{\Delta}{l_c} - \\
& 4 \cdot F_{n1}(R_{2h}, 0, -\alpha_{mn_d}, \alpha_{mn_d}, dh_9) \cdot \frac{\Delta}{l_c} - 4 \cdot F_{n1}(R_{2h}, 0, 0, \alpha_{mn_d}, dh_{10}) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + \\
& 4 \cdot F_{n1}(R_{nl}, 0, -\alpha_{mn_d}, 0, dh_6) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + 4 \cdot F_{n1}(R_{nl}, 0, -\alpha_{mn_d}, \alpha_{mn_d}, dh_7) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + \\
& 4 \cdot F_{n1}(R_{nl}, 0, -\alpha_{mn_d}, \alpha_{mn_d}, dh_8) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + 4 \cdot F_{n1}(R_{nl}, 0, -\alpha_{mn_d}, \alpha_{mn_d}, dh_9) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + \\
& 4 \cdot F_{n1}(R_{nl}, 0, 0, \alpha_{mn_d}, dh_{10}) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + 4 \cdot F_{n3}\left(b, -\frac{\pi}{2}, dh_{11}\right) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + 4 \cdot F_{n3}\left(a, -\frac{\pi}{2}, dh_{12}\right) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + \\
& 4 \cdot F_{n3}\left(b, -\frac{\pi}{2}, dh_{13}\right) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + 4 \cdot F_{n3}\left(a, -\frac{\pi}{2}, dh_{14}\right) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + 4 \cdot F_{n3}\left(b, -\frac{\pi}{2}, dh_{15}\right) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + \\
& + 4 \cdot F_{n3}\left(a, -\frac{\pi}{2}, dh_{16}\right) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + 4 \cdot F_{n3}\left(b, -\frac{\pi}{2}, dh_{17}\right) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + 4 \cdot F_{n3}\left(a, -\frac{\pi}{2}, dh_{18}\right) \cdot \frac{\Delta}{l_c} + \\
& + 2 \cdot 5 \cdot F_{n3}\left(h_{pl}, -\frac{\pi}{2}, dh_{19}\right) \cdot \frac{\Delta}{l_c}
\end{aligned} \tag{18}$$

$F_{mp_баз_эл}^{\bar{6}}$ – сила трения, действующая на боковой базовый элемент;

α_{11}, α_{12} – углы расположения выреза в трубе;

dh_6 – смещение оси трубы с вырезом по оси у относительно начала координат;

dh_8 – смещение оси полутруб по оси у относительно начала координат;

dh_9 – смещение центров окружностей круглых частей фигурной полосы по оси у относительно начала координат;

dh_{10} – смещение верхней поверхности прямой части фигурной пластины по оси у относительно начала координат;

$\alpha_{mn_d}, \alpha_{mn_d}$ – углы верхней и нижней дуги фигурной полосы;

Δ – ширина фигурной пластины;

a, b – верхняя и нижняя части фигурной полоски.

$$F_{ниж_тр} = F_{n1}(R_{2H}, R_{2\theta}, \alpha_{15}, \alpha_{16}, dh_{20}) \tag{19}$$

$F_{ниж_тр}$ – сила трения, действующая на нижнюю трубу с вырезанным сектором;

α_{15}, α_{16} – углы расположения выреза в трубе;

dh_{20} – смещение оси трубы с вырезом по оси у относительно начала координат.

$$F_1 = P_{np} \cdot S_{нанр} + F_{нанр} \tag{20}$$

$$F_2 = P_{np} \cdot S_{баз_эл}^{\bar{6}} + F_{mp_баз_эл}^{\bar{6}} \tag{21}$$

$$F_3 = P_{np} \cdot S_{напр_верх_бок} + F_{напр_верх_бок}, \quad (22)$$

$$F_4 = P_{np} \cdot S_{напр_ниж_бок} + F_{напр_ниж_бок}, \quad (23)$$

$$F_5 = P_{np} \cdot S_{баз_эл}^{\bar{}} + F_{тр_баз_эл}^{\bar{}}, \quad (24)$$

$$F_6 = P_{np} \cdot S_{ниж_тр} + F_{ниж_тр}, \quad (25)$$

$S_{напр}$ – площадь торца направляющей трубы;

$S_{баз_эл}^{\bar{}}$ – площадь торца верхнего базового элемента;

$S_{напр_верх_бок}$ – площадь торца верхней боковой направляющей трубы;

$S_{напр_ниж_бок}$ – площадь торца нижней боковой направляющей трубы;

$S_{баз_эл}^{\bar{}}$ – площадь торца бокового базового элемента;

$S_{ниж_тр}$ – площадь торца нижней трубы с вырезами;

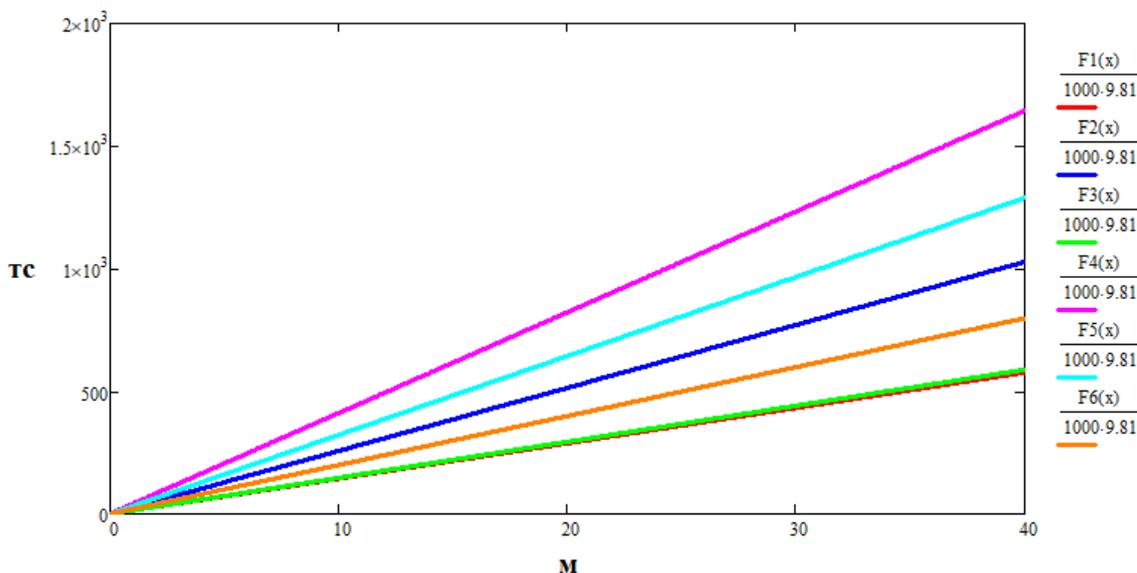


Рис. 4 – График зависимости давления домкрата от длины продавливания

Fig. 4 – Graph of the dependence of the pressure of the jack on the length of punching

На рисунке 4 показаны усилия по продавливанию элементов защитного экрана.

Где $k=0.4$ – коэффициент трения стали о грунт, x –длина продавливания, м.,

1. $F_1(x)$ – давление домкрата, требуемое для продавливания промежуточных направляющих труб верхней секции металлического защитного экрана;

2. $F_2(x)$ – давление домкрата, требуемое для продавливания верхних элементов секции металлического защитного экрана;

3. $F_3(x)$ – давление домкрата, требуемое для продавливания боковых верхних направляющих труб металлического защитного экрана;

4. $F_4(x)$ – давление домкрата, требуемое для продавливания боковых нижних направляющих труб металлического защитного экрана;

5. $F_5(x)$ – давление домкрата, требуемое для продавливания боковых элементов секции металлического защитного экрана;

6. $F_6(x)$ – давление домкрата, требуемое для продавливания трубы с вырезанным сектором в нижней части металлического защитного экрана.



Максимальное давление домкрата необходимо для продавливания боковых нижних направляющих труб металлического защитного экрана. При продавливании нижних направляющих труб на 40 метров оно составляет $F4(40) = 1643.2$ Тонн-силы.

Расчеты показали, что при использовании базовых элементов мы прикладываем в 1.5 раза меньшее усилие, чем при продавливании секций из труб и труб с вырезанным сектором. Это показывают изложенные в данной статье результаты для защитного экрана из направляющих труб и базовых элементов и результаты, изложенные в статье [30] для секций из труб и труб с вырезанным сектором при одинаковых условиях продавливания. Следовательно, при производстве работ можно применять менее мощное оборудование.

4 Conclusions / Заключение

С учетом вышеизложенного можно сделать вывод, что данное техническое решение является жизнеспособным. Защитный экран:

1. предотвращает деформацию и просадку поверхности;
2. минимизирует влияние строительно-монтажных работ на городскую и транспортную инфраструктуру;
3. для сооружения защитного экрана необходимо использовать менее мощное оборудование для задавливания направляющих труб и базовых элементов, что ведет к снижению себестоимости строительства и уменьшению его продолжительности.

Если сравнивать данный способ с открытым способом строительства тоннелей, то по себестоимости затраты по сооружению защитного экрана соизмеримы с затратами на крепление вертикальных стен котлованов. Для крепления в качестве свай используют стальные балки двутаврового сечения, трубы, а также железобетонные или бетонные (буронабивные) сваи. При строительстве подземных транспортных коммуникаций закрытым способом с использованием защитного экрана под автодорогами не нужно нести затраты по строительству временных объездных дорог. При закрытом способе строительства нет необходимости восстанавливать разрушенную инфраструктуру сооружений и вести работы по благоустройству прилегающей территории, что также сокращает финансовые затраты. При строительстве закрытым способом перерывов движения и каких-либо ограничений движения железнодорожного и автомобильного транспорта на участке строительства объекта не требуется.

References

- 1 Shaposhnikov E.A. and Frolov Yu.S. (2017) On application of forepoling when constructing subway stations without side platforms. *Transportation: problems, ideas, prospects. Proceedings of the LXXVII All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists*, **1**, 138-142. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29836643>.
- 2 Frolov Yu. S. and Larionov A.A. (2008) Stability of excavation with roof and crown forepoling in Proterozoic clays/Subway and Tunnels. *Subway & Tunnels*, **2**, 24-26. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24289883>.
- 3 Solovyev D.A., Antsiferov S.V., Sammal A.S. and Deev P.V. (2022) Interaction between Proterozoic clay massif and roof forebolting. *Proceedings of the Tula States University. Sciences of Earth*, **1**, 363-372. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48164391>.
- 4 Maslak V.A. (2009) Experience of providing face and roof stability in construction of mines in Proterozoic clays. *Proceedings of the Mining Institute*, **183**, 297-299. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13031010>.
- 5 Bezrodny K.P., Salan A.I., Maslak V.A., Markov V.A. and Lebedev M.O. (2012) Implementation of no-slump technologies in construction of the Saint Petersburg Metro. *Proceedings of the Mining Institute*, **199**, 190-195. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19527357>.
- 6 Taranenko I.N., Nikiforov K.P., Kiselev V.N. and Deplagny E.F. (2008) Application of the artificial ground freezing technique in construction of the Serebryanoborsky tunnel junction. *Subway and Tunnels*, **2**, 20-23. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24289882>.



- 7 Lebedev M.O. and Egorov G.D. (2019) Ground surveying in construction of escalator tunnels. *Mining Information and Analytical Bulletin*, **10**, 146-159. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41153532>.
- 8 Lvova O.M. and Pavlovich K.Yu. (2009) Application of tube shields in construction of underground facilities in St. Petersburg. *Journal of Construction Engineering*, **7**, 6-10. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15416056>.
- 9 Ilyichev V.A., Nikiforova N.S., Gotman Yu.A. and Trofimov E.Yu. (2015) Efficiency of active and passive methods of surrounding development protection in the area of underground construction impact. *Housing Construction*, **6**, 11-15. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23754562>.
- 10 Korolko S.N. (2010) Technologies and safety of underground works in tunneling of the combined motorway and railway Adler – Alpine Resort Alpika-Service. *Subway and Tunnels*, **4**, 30-33. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24229800>.
- 11 Zorin I.M. (2017) Technology of tunnel crossing construction without traffic restrictions in the area. *Construction: The Formation of Living Environment. Proceedings of the XX International Interuniversity Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists*, **1**, 1156-1158. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29657878>.
- 12 Antsiferov S.V., Treshcheva O.V. and Feklin A.A. (2019) Stress-deformed state of the system 'soil massif – tunnel lining – tube shields'. *Chronos: Natural and Technical Sciences*, **4**, 15-21. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46512382>.
- 13 Merkin V.E. and Chebotaev V.V. (2015) Calculation prerequisites for cost reduction of underground facilities of transport purposes. *Transport Construction*, **4**, 9-12. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23606866>.
- 14 SP 227.1326000.2014. Intersections of railway lines with transport lines and utility systems. <https://docs.cntd.ru/document/1200120205>.
- 15 Nurmukhametov R.R. (2019) Reduction of water saturated clayey soils' deflections by reinforcement. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **9**, 22-33. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42550677>.
- 16 Garmanov G.V., Sokolov V.A., Strakhov D.A. and Sinyakov L.N. (2017) Effectiveness of jet grouting method for soil base strengthening. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **5**, 56-63. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29912346>.
- 17 Protosenya A.G., Karasev M.A. and Belyakov N.A. (2019) Method of predicting earth surface subsidence during the construction of tunnels using TBM with face cantledge on the basis of multivariate modeling. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, **11**, 1620 – 1629. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85058016965&origin=inward&txGid=d32da848932a46c989aea3b1e533bdf3>.
- 18 Guidelines for the Integrated Development of the Underground Space of Large Cities. Ed. V.A. Ilyichev. Moscow, 2004. 206 p. <https://files.stroyinf.ru/Data1/45/45107/index.htm>.
- 19 Patent No. 121860 U1, Russian Federation, IPC7 E21D 9/04, E21D 29/02. Shield segment: No. 2012119721/03 : appl. 14.05.2012 : publ. 10.11.2012 / Son I.B., Kim V.M., Ananidze G.A., Konkov A.A., Zubov V.A.; Patentee: I.B. Son. https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=0000121860&TypeFile=html.
- 20 Patent No. 2501953, Russian Federation, IPC7 E21D 9/04, E21D 11/04. Shield creation technique : No. 2012119720/03 : appl. 14.05.2012 : publ. 20.12.2013 / Son I.B., Kim V.M., Ananidze G.A., Konkov A.A., Zubov V.A.; Patentee: I.B. Son. https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=0002501953&TypeFile=html.
- 21 Patent No. 22473, Belarus, IPC7 E21D 9/04, E02D 29/00. Shield tunneling method and underground tunnel: No. a 20170396 : appl. 24.10. 2017 : publ. 30.04.2019 / Kravtsov V.N., Kim V.V., Kim V.A., Lapatin P.V.; Patentee: A.A. Bezugly. <https://search.ncip.by/database/?page=3&target=37587>.
- 22 Patent No. 23710, Belarus, IPC7 E21D 9/04. Tunneling shield, tube shield, or tunnel overpass shield in loose soil (options) and its construction technique: No. a 20210046 : appl. 26.02.2021 : publ. 30.06.2022 / N.M. Pribylskaya, A.A. Bezugly; Applicants: N.M. Pribylskaya, A.A. Bezugly. <https://search.ncip.by/database/?page=3&target=43148>.



- 23 Bulychev N.S. and Fotieva N.N. Modern Tunneling Science And Technology. Theory and practice of tunnel lining design. London, 2017. 628 p. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35696026>.
- 24 Fotieva N.N., Sammal A.S. and Antsiferov S.V. (2001) Assessment of the strength of shallow tunnel lining during nearby construction on the surface. *Mining Information and Analytical Bulletin*, **11**, 136-138. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12855999>.
- 25 Railway Operating Rules in the Republic of Belarus. <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21530414p&p1=1>.
- 26 Instructions for the Current Maintenance of the Railway. <https://docs.cntd.ru/document/456052478>.
- 27 Pribylskaya N.M. and Grechukhin V.A. (2022) Stress-deformed state of the tube shield and basic elements in underground construction. *Subway and Tunnels*, **1**, 9-13. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48325655>.
- 28 SN 3.03.01-2019. Bridges and Pipes. <https://normy.by/mand.php>.
- 29 SP 122.13330.2012. Railway and highway tunnels. <https://docs.cntd.ru/document/1200095544>.
- 30 Kurochka P.N., Revyakin A.A., Song Ir Bon and Kopylov A.B. (2015) Construction of flying junctions of existing rail- and motorways without train traffic cessation. *Transport Construction*, **4**, 14-17. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23606871>.