

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-507-516>

УДК 69.001.5

Продавливание металлических защитных экранов на основе элементов из листового проката и полутруб

Асп. Н. М. Прибыльская¹⁾, канд. тех. наук, доц. В. А. Гречухин¹⁾

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

Реферат. Объектом исследования являются новые конструктивные решения металлических защитных экранов на основе элементов из листового проката, полутруб и направляющих труб. Металлические защитные экраны применяются при строительстве подземных транспортных сооружений закрытым способом. Защитный экран предотвращает деформации и просадки поверхности вышележащих слоев грунта, авто- и железнодорожного полотна. При строительстве сооружений тоннельного типа под действующими транспортными коммуникациями не должны быть нарушены условия безопасной эксплуатации автомобильных и железных дорог. В этом случае особое внимание уделяется просадкам вышележащих слоев грунта. Величина просадок влияет на возможность эксплуатации автомобильных дорог и снижение скорости либо полную остановку движения на железной дороге. Поэтому было исследовано напряженно-деформированное состояние предлагаемых металлических защитных экранов с помощью расчетной модели, разработанной на основе метода конечных элементов. Для повышения точности расчета внутренних усилий на продавливание отдельных конструктивных элементов металлического защитного экрана использовался метод Ромберга. Предлагаемые конструкции и технологии защитных экранов сохраняют преимущества применяемых в настоящее время при одновременном снижении затрат на сооружение защитного экрана, так как исследуемые конструктивные решения требуют меньших усилий на продавливание отдельных элементов и, как следствие, использования менее мощного оборудования. Расчеты напряженно-деформированного состояния предложенных конструкций защитных экранов показали их жизнеспособность. В качестве критерия проверки работоспособности рассматривались максимальные напряжения, воспринимаемые отдельными частями конструкций, они не превышают предела текучести выбранной стали. Также были рассчитаны максимальные вертикальные и горизонтальные перемещения отдельных частей экранов, которые не превышают обозначенных в требованиях Правил технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь и Инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути в Российской Федерации. Это подтверждает работоспособность предлагаемых металлических защитных экранов.

Ключевые слова: подземные транспортные коммуникации, защитные экраны, продавливание, нарушение структуры вышележащих слоев грунта, деформации и просадка поверхности несущего слоя

Для цитирования: Прибыльская, Н. М. Продавливание металлических защитных экранов на основе элементов из листового проката и полутруб / Н. М. Прибыльская, В. А. Гречухин // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 6. С. 507–516. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-507-516>

Punching Metal Protective Screens Based on Elements Made of Rolled Sheets and Half Pipes

N. M. Pribylskaya, V. A. Grechukhin

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

Abstract. The object of the study is new design solutions for metal protective screens based on elements made of rolled sheets, half-pipes and guide pipes. Metal protective screens are used in the construction of underground transport structures

Адрес для переписки

Прибыльская Наталья Михайловна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 173-19-95
npribylskaya@bntu.by

Address for correspondence

Pribylskaya Natalya M.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 29 173-19-95
npribylskaya@bntu.by

using a closed method. The protective screen prevents deformations and subsidence of the surface of overlying soil layers, road and railway bed. During the construction of tunnel-type structures under existing transport communications, the conditions for the safe operation of roads and railways must not be violated. In this case, special attention is paid to subsidence of the overlying soil layers. The magnitude of subsidence affects the possibility to operate roads and reduce the speed or completely stop traffic on the railway. Therefore, the stress-strain state of the proposed metal protective screens was studied using a calculation model developed on the basis of the finite element method. To improve the accuracy of calculating internal forces on punching individual structural elements of a metal protective screen, the Romberg method was used. The proposed designs and technologies of protective screens retain the advantages of those currently used, while simultaneously reducing the costs of constructing a protective screen, since the design solutions under study require less effort to push through individual elements, and, as a consequence, use less powerful equipment. Calculations of the stress-strain state of the proposed designs of protective screens have shown their viability. As a criterion for checking the operability, the maximum stresses perceived by individual parts of the structures were considered; they do not exceed the yield strength of the selected steel, and the maximum vertical and horizontal displacements of individual parts of the screens were calculated, which do not exceed those specified in the requirements of the Rules for Technical Operation of Railways in the Republic of Belarus and the Instructions for Current Maintenance of Railway Tracks in the Russian Federation. This confirms the operability of the proposed metal protective screens.

Keywords: underground transport communications, protective screens, punching, violation of the structure of the overlying soil layers, deformation and subsidence of the surface of the bearing layer

For citation: Pribylskaya N. M., Grechukhin V. A. (2024) Punching Metal Protective Screens Based on Elements Made of Rolled Sheets and Half Pipes // *Science and Technique*. 23 (6), 507–516. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-507-516> (in Russian)

Введение

В настоящее время при строительстве подземных транспортных коммуникаций применяют различные технические решения [1]. Для сравнения необходимых усилий на продавливание отдельных элементов конструкций защитных экранов были рассмотрены способ, применяемый ООО «Анкерные технологии-М» (Российская Федерация), и предложенные методы сооружения защитных экранов.

Защитный экран, который использует ООО «Анкерные технологии-М», включает ряд соединенных между собой труб или секций, состоящих из двух и более труб, в каждой из которых выполнены продольный вырез для вхождения в него примыкающей трубы и окна для размещения поперечной арматуры. Вдоль продольных вырезов установлены ребра жесткости, а стенки продольных вырезов сопряжены с замково-направляющим устройством. При этом защитный экран выполнен с лидерной трубой, которая имеет два продольных выреза для вхождения в них и фиксации посредством замково-направляющего устройства труб, примыкающих к лидерной трубе, и соответственно два ряда ребер жесткости, расположенных вдоль этих вырезов [2, 3].

При сооружении первого предложенного металлического защитного экрана (МЗЭ) используются направляющие трубы и базовые элементы, содержащие секции из сваренных

между собой полутруб. Данный вид защитного экрана показан на рис. 1 [4].

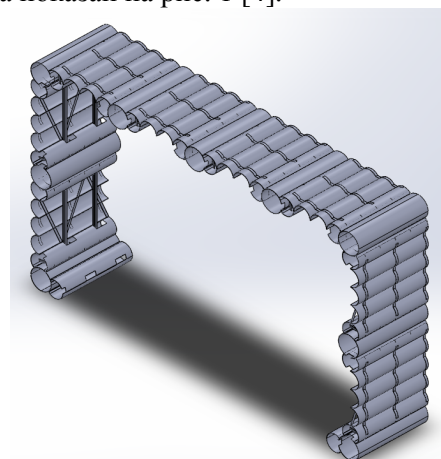


Рис. 1. Металлический защитный экран из направляющих труб и базовых элементов, состоящих из секций из полутруб

Fig. 1. Metal protective screen made of guide pipes and base elements consisting of sections of half pipes

При сооружении второго предложенного металлического защитного экрана в грунт продавливаются направляющие трубы и однотипные элементы металлического защитного экрана, при изготовлении которых используют плоский прокатный лист, к которому приварены прокатные уголки, как показано на рис. 2 [5].

Для проверки надежности предложенных конструкций исследовано их напряженно-деформированное состояние. Расчет производился с использованием программного продукта SolidWorks (<https://www.solidworks.com>).

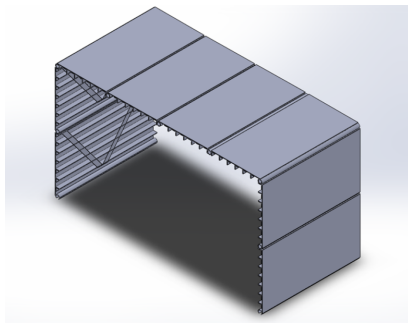


Рис. 2. Схема металлического защитного экрана, состоящего из однотипных элементов на основе листового проката

Fig. 2. Diagram of a metal protective screen, consisting of identical elements based on sheet metal

Уравнение для расчетной нагрузки на верхнюю секцию защитного экрана

$$P_p^B = 23470 \cdot (2,51 - y) + \frac{230050}{5,21 - y}. \quad (1)$$

Уравнение для расчетной нагрузки на боковые секции защитного экрана

$$P_p^B = 7669 \cdot (2,51 - y) + \left(9807 + \frac{10787}{e^{0,1004 - 0,04 \cdot y}} + \frac{43149}{(2,51 - y)^2} \right) \cdot 4,8995 + \frac{4,8995}{5,21 - y}. \quad (2)$$

Расчеты показали, что максимальное напряжение, которое испытывают отдельные части металлического защитного экрана из направляющих труб и базовых элементов, состоящих из секций из полутруб: $\sigma = 1,5 \cdot 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$. При рас-

четах была выбрана сталь С245, предел текучести которой $2,45 \cdot 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$. Максимальное на-

пряжение не превышает предел текучести вышеуказанной стали. Результаты исследования показаны на рис. 3.

Рассчитанное максимальное перемещение, возникающее в конструкции металлического защитного экрана под воздействием нагрузок, составляет $\Delta r = 0,017$ м. Максимальное перемещение не превышает норм, установленных Правилами технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь [6] и Инструкцией по текущему содержанию железнодорожного пути в Российской Федерации [7]. Предложенная конструкция позволяет организовать непрерывное движение поездов при проведении строительных работ на железной дороге. Ограничений скорости движения поездов на участке дороги, где ведутся работы, не требуется [8].

Результаты исследования показаны на рис. 4.

При расчете МЗЭ из однотипных элементов на основе листового проката получены следующие результаты (рис. 5). Как видно на рис. 5, максимальное напряжение, которое испытывают отдельные части металлического защитного экрана, состоящего из однотипных элементов на основе листового проката, составляет $\sigma = 2,4 \cdot 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$. Оно не превышает предела

текучести выбранной нами стали $\left(2,45 \cdot 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right)$.

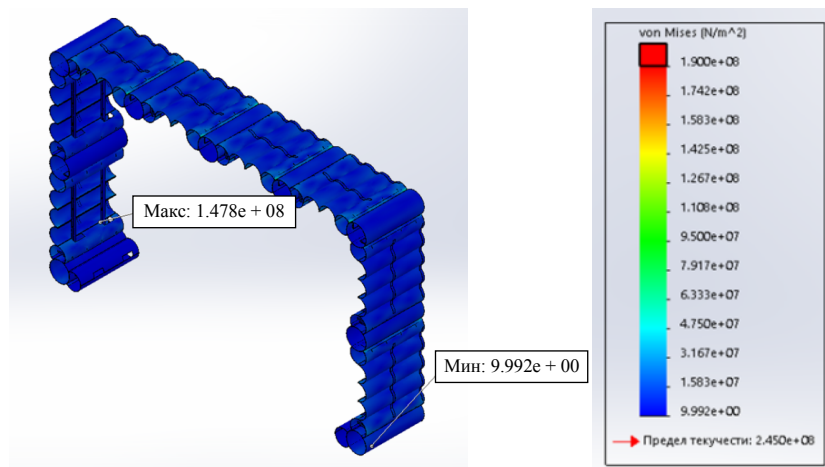


Рис. 3. Результаты исследования напряженного состояния металлического защитного экрана из направляющих труб и базовых элементов

Fig. 3. Results of the study of the stressed state of a metal protective screen made of guide pipes and base elements

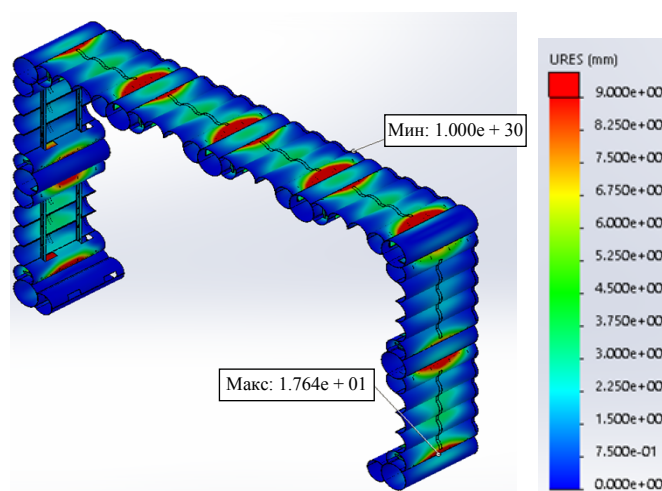


Рис. 4. Результаты исследования перемещений, возникающих в конструкции металлического защитного экрана из направляющих труб и базовых элементов

Fig. 4. Results of the study of displacements occurring in the design of a metal protective screen made of guide pipes and base elements

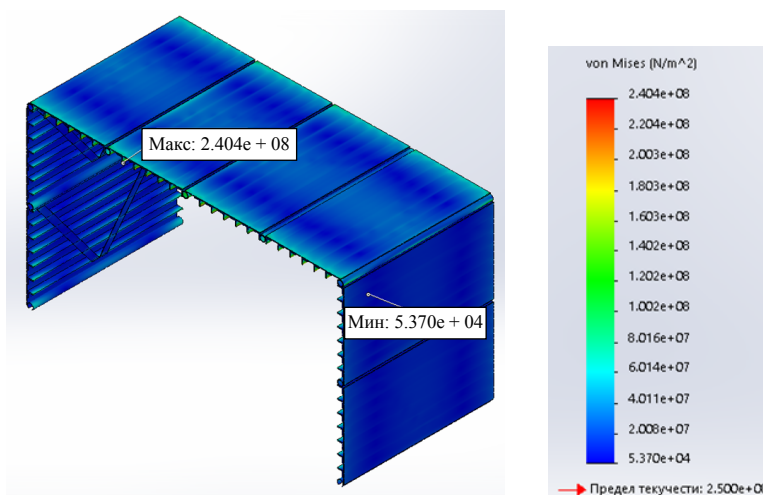


Рис. 5. Результаты исследования напряженного состояния металлического защитного экрана из однотипных элементов на основе листового проката

Fig. 5. Results of the study of stressed state of a metal protective screen made of similar elements based on rolled sheets

На рис. 6 показана эпюра перемещений. Максимальное перемещение составляет $\Delta r = 4,1$ мм. Максимальное перемещение не превышает норм, установленных Правилами технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь [6] и Инструкцией по текущему содержанию железнодорожного пути в Российской Федерации [7]. Предложенная конструкция позволяет организовать непрерывное движение поездов при проведении строительных работ на железной дороге. Ограничений скорости движения поездов на участке дороги, где ведутся работы, не требуется [8].

Для определения усилий продавливания использованы методические указания Строительных норм Республики Беларусь СН 3.03.01–2019 [9].

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

$$F_{\text{тр}} = \mu N, \quad (3)$$

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.

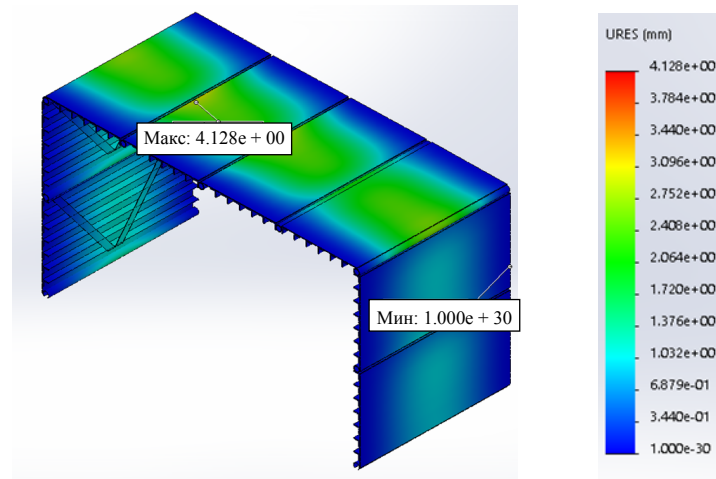


Рис. 6. Результаты исследования перемещений металлического защитного экрана из однотипных элементов на основе листового проката

Fig. 6. Results of the study of displacements of a metal protective screen made of similar elements based on rolled sheets

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 :

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

$$N = \int_{h_1}^{h_2} P_p^G(h) ds. \quad (5)$$

Получаем формулы для расчета силы трения:

$$F_{тр} = \mu \int_{h_1}^{h_2} P_p^B(h) ds; \quad (6)$$

$$F_{тр} = \mu \int_{h_1}^{h_2} P_p^G(h) ds. \quad (7)$$

Усилия по продавливанию элементов защитного экрана рассчитываем с использованием программного продукта Mathcad (<https://www.mathcad.com>).

Предельно допустимое давление на грунт

$$P_{пр} = 1 \text{ Па};$$

коэффициент трения стали о грунт $k = 0,4$:

$$P_r^B(y, dh) = 18054(2,51 - y - dh); \quad (8)$$

$$P_{nc}^B(y, dh) = \frac{176962}{(5,21 - y - dh)}; \quad (9)$$

$$P_r^G(y, dh) = 5899(2,51 - y - dh); \quad (10)$$

$$P_{nc}^G(y, dh) = \frac{\left(9807 + \frac{10787}{e^{0,1004-0,04(y+dh)}} + \frac{43149}{(2,51 - y - dh)^2} \right) 4,0829}{(5,21 - y - dh)}, \quad (11)$$

где $P_r^B(y, dh)$ – давление на верх экрана со стороны грунта, Па; $P_{nc}^B(y, dh)$ – то же на верх экрана со стороны подвижного состава, Па; $P_r^G(y, dh)$ – то же на боковую поверхность экрана со стороны грунта, Па; $P_{nc}^G(y, dh)$ – то же на боковую поверхность экрана со стороны подвижного состава, Па; dh – глубина относительно точки, м;

$$F_{n1}(r_1, r_2, \varphi_1, \varphi_2, dh) = kr_1 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} P_r^B(r_1 \sin(\varphi), dh) d\varphi + \quad (12)$$

$$+ kr_2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} P_r^B(r_2 \sin(\varphi), dh) d\varphi;$$

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

$$F_{n2}(L, \alpha, dh) = k \int_0^L P_r^B(l \sin(\alpha), dh) dl; \quad (13)$$

$$F_{n3}(L, \alpha, dh) = k \int_0^L P_r^B(l \sin(\alpha), dh) dl; \quad (14)$$

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

$$\begin{aligned}
F_{\text{напр}} = & F_{n1}(R_{1\text{н}}, R_{1\text{в}}, 0, 2\pi, 0) + 2F_{n2}(L_1, \alpha_1, R_{1\text{н}} \cdot \sin(\alpha_1)) + 2F_{n2}\left(L_1, -\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right), R_{1\text{н}} \sin(\alpha_1)\right) + \\
& + 2F_{n2}(L_1, \alpha_2, R_{1\text{н}} \cdot \sin(\alpha_2)) + 2F_{n2}\left(L_1, \left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_2|\right), R_{1\text{н}} \sin(\alpha_2)\right) + \\
& + 2F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_1, (R_{1\text{н}} + \delta_1) \sin(\alpha_1) - \delta_1 \cos(\alpha_1)) + \\
& + 2F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, -\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right), (R_{1\text{н}} + \delta_1) \sin(\alpha_1) - \delta_1 \cos(\alpha_1)\right) + \\
& + 2F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_2, (R_{1\text{н}} + \delta_1) \sin(\alpha_2) - \delta_1 \cos(\alpha_2)) + \\
& + 2F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, \left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_2|\right), (R_{1\text{н}} + \delta_1) \sin(\alpha_2) + \delta_1 \cos(\alpha_2)\right);
\end{aligned} \tag{15}$$

$F_{\text{напр}}$ – сила трения, действующая на направляющую трубу; $R_{1\text{н}}, R_{1\text{в}}$ – внешний и внутренний радиусы труб; L_1 – ширина полки уголка; δ_1 – толщина уголка; α_1, α_2 – углы расположения уголков на направляющей трубе;

$$\begin{aligned}
F_{\text{тр_баз_эл}}^{\text{в}} = & 2F_{n1}(R_{2\text{н}}, R_{2\text{в}}, \alpha_3, \alpha_4, dh_1) + 3F_{n1}(R_{2\text{н}}, R_{2\text{в}}, 0, \pi, dh_2) + 16F_{n1}(R_{\text{пл}}, 0, \alpha_{\text{мх}}, \pi - \alpha_{\text{мх}}, dh_3) \frac{\Delta}{l_c} - \\
& - 16F_{n1}(R_{2\text{н}}, 0, \alpha_{\text{мн}}, \pi - \alpha_{\text{мн}}, dh_3) \frac{\Delta}{l_c} + 16P_{\Gamma}^{\text{в}}(0, dh_4) a \frac{\Delta}{l_c} + 16P_{\Gamma}^{\text{в}}(0, dh_4 - h) b \frac{\Delta}{l_c};
\end{aligned} \tag{16}$$

$F_{\text{тр_баз_эл}}^{\text{в}}$ – сила трения, действующая на верхний базовый элемент; $R_{2\text{н}}, R_{2\text{в}}$ – внешний и внутренний радиусы труб; $R_{\text{пл}}$ – 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 – то же оси полутруб по оси y относительно начала координат; dh_3 – то же 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; $\alpha_{\text{мн}}, \alpha_{\text{мх}}$ – углы верхней и нижней дуги фигурной полосы; Δ – ширина фигурной пластины; a, b – длины верхней и нижней плоской части фигурной полосы;

$$\begin{aligned}
F_{\text{напр_верх_бок}} = & F_{n1}(R_{1\text{н}}, R_{1\text{в}}, 0, 2\pi, 0) + F_{n2}(L_1, \alpha_1, R_{1\text{н}} \sin(\alpha_1)) + F_{n2}\left(L_1, -\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right), R_{1\text{н}} \sin(\alpha_1)\right) + \\
& + F_{n2}(L_1, \alpha_2, R_{1\text{н}} \sin(\alpha_2)) + F_{n2}\left(L_1, -\left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_2|\right), R_{1\text{н}} \sin(\alpha_2)\right) + \\
& + F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_1, (R_{1\text{н}} + \delta_1) \sin(\alpha_1) - \delta_1 \cos(\alpha_1)) + F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, -\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right), (R_{1\text{н}} + \delta_1) \sin(\alpha_1) - \delta_1 \cos(\alpha_1)\right) + \\
& + F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_2, (R_{1\text{н}} + \delta_1) \sin(\alpha_2) + \delta_1 \cos(\alpha_2)) + F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, \left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_2|\right), (R_{1\text{н}} + \delta_1) \sin(\alpha_2) + \delta_1 \cos(\alpha_2)\right) + \\
& + F_{n2}(L_1, \alpha_5, R_{1\text{н}} \sin(\alpha_5)) + F_{n2}\left(L_1, -\left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_5|\right), R_{1\text{н}} \sin(\alpha_5)\right) + F_{n2}(L_1 - \delta_1, \alpha_5, (R_{1\text{н}} + \delta_1) \sin(\alpha_5) - \delta_1 \cos(\alpha_5)) + \\
& + F_{n2}\left(L_1 - \delta_1, -\left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_5|\right), (R_{1\text{н}} + \delta_1) \sin(\alpha_5) + \delta_1 \cos(\alpha_5)\right) + F_{n2}(L_1, \alpha_6, R_{1\text{н}} \sin(\alpha_6)) +
\end{aligned} \tag{17}$$

$$+ F_{n2} \left(L_1, -\left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_6| \right), R_{1H} \sin(\alpha_6) \right) + F_{n2} \left(L_1 - \delta_1, \alpha_6, (R_{1H} + \delta_1) \sin(\alpha_6) - \delta_1 \cos(\alpha_6) \right) + \\ + F_{n2} \left(L_1 - \delta_1, -\left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_6| \right), (R_{1H} + \delta_1) \sin(\alpha_6) + \delta_1 \cos(\alpha_6) \right);$$

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

$$F_{\text{напр_ниж_бок}} = F_{n1} (R_{1H}, R_{1B}, 0, 2\pi, dh_5) + F_{n2} (L_1, \alpha_7, R_{1H} \sin(\alpha_7) + dh_5) + \\ + F_{n2} \left(L_1, -\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_7 \right), R_{1H} \sin(\alpha_7) + dh_5 \right) + F_{n2} (L_1, \alpha_8, R_{1H} \sin(\alpha_8) + dh_5) + \\ + F_{n2} \left(L_1, \left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_8| \right), R_{1H} \sin(\alpha_8) + dh_5 \right) + F_{n2} (L_1 - \delta_1, \alpha_7, (R_{1H} + \delta_1) \sin(\alpha_7) - \delta_1 \cos(\alpha_7) + dh_5) + \\ + F_{n2} \left(L_1 - \delta_1, -\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_7 \right), (R_{1H} + \delta_1) \sin(\alpha_7) - \delta_1 \cos(\alpha_7) + dh_5 \right) + \\ + F_{n2} (L_1 - \delta_1, \alpha_8, (R_{1H} + \delta_1) \sin(\alpha_8) + \delta_1 \cos(\alpha_8) + dh_5) + \\ + F_{n2} \left(L_1 - \delta_1, \left(\frac{\pi}{2} - |\alpha_8| \right), (R_{1H} + \delta_1) \sin(\alpha_8) + \delta_1 \cos(\alpha_8) + dh_5 \right) + F_{n2} (L_1, \alpha_9, R_{1H} \sin(\alpha_9) + dh_5) + \quad (18) \\ + F_{n2} \left(L_1, \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_9 \right), R_{1H} \sin(\alpha_9) + dh_5 \right) + F_{n2} (L_1 - \delta_1, \alpha_9, (R_{1H} + \delta_1) \sin(\alpha_9) + \delta_1 \cos(\alpha_9) + dh_5) + \\ + F_{n2} \left(L_1 - \delta_1, \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_9 \right), (R_{1H} + \delta_1) \sin(\alpha_9) + \delta_1 \cos(\alpha_9) + dh_5 \right) + F_{n2} (L_1, \alpha_{10}, R_{1H} \sin(\alpha_{10}) + dh_5) + \\ + F_{n2} \left(L_1, \frac{\pi}{2} - \alpha_{10}, R_{1H} \sin(\alpha_{10}) + dh_5 \right) + F_{n2} (L_1 - \delta_1, \alpha_{10}, (R_{1H} + \delta_1) \sin(\alpha_{10}) + \delta_1 \cos(\alpha_{10}) + dh_5) + \\ + F_{n2} \left(L_1 - \delta_1, \frac{\pi}{2} - \alpha_{10}, (R_{1H} + \delta_1) \sin(\alpha_{10}) + \delta_1 \cos(\alpha_{10}) + dh_5 \right);$$

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

$$F_{\text{тр_баз_эл}}^6 = F_{n1} (R_{2H}, R_{2B}, \alpha_{11}, \alpha_{12}, dh_6) + F_{n1} \left(R_{2H}, R_{2B}, -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, dh_7 \right) + \\ F_{n1} \left(R_{2H}, R_{2B}, -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, dh_8 \right) + F_{n1} \left(R_{2H}, R_{2B}, -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, dh_9 \right) + F_{n1} (R_{2H}, R_{2B}, \alpha_{13}, \alpha_{14}, dh_{10}) - \\ 4F_{n1} (R_{2H}, 0, -\alpha_{mn_d}, 0, dh_6) \frac{\Delta}{l_c} - 4F_{n1} (R_{2H}, 0, -\alpha_{mn_d}, \alpha_{mn_d}, dh_8) \frac{\Delta}{l_c} - 4F_{n1} (R_{2H}, 0, -\alpha_{mn_d}, \alpha_{mn_d}, dh_9) \times \\ \times \frac{\Delta}{l_c} - 4F_{n1} (R_{2H}, 0, 0, \alpha_{mn_d}, dh_{10}) \frac{\Delta}{l_c} + 4F_{n1} (R_{\text{пл}}, 0, -\alpha_{mn_d}, 0, dh_6) \frac{\Delta}{l_c} + 4F_{n1} (R_{\text{пл}}, 0, -\alpha_{mn_d}, \alpha_{mn_d}, dh_7) \frac{\Delta}{l_c} + \\ + 4F_{n1} (R_{\text{пл}}, 0, -\alpha_{mn_d}, \alpha_{mn_d}, dh_8) \frac{\Delta}{l_c} + 4F_{n1} (R_{\text{пл}}, 0, -\alpha_{mn_d}, \alpha_{mn_d}, dh_9) \frac{\Delta}{l_c} + \\ + 4F_{n1} (R_{\text{пл}}, 0, 0, \alpha_{mn_d}, dh_{10}) \frac{\Delta}{l_c} + 4 \cdot F_{n3} \left(b, -\frac{\pi}{2}, dh_{11} \right) \frac{\Delta}{l_c} + 4 \cdot F_{n3} \left(a, -\frac{\pi}{2}, dh_{12} \right) \frac{\Delta}{l_c} +$$

$$\begin{aligned}
& + 4F_{n3} \left(b, -\frac{\pi}{2}, dh_{13} \right) \frac{\Delta}{l_c} + 4F_{n3} \left(a, -\frac{\pi}{2}, dh_{14} \right) \frac{\Delta}{l_c} + 4F_{n3} \left(b, -\frac{\pi}{2}, dh_{15} \right) \frac{\Delta}{l_c} + \\
& + 4F_{n3} \left(a, -\frac{\pi}{2}, dh_{16} \right) \frac{\Delta}{l_c} + 4F_{n3} \left(b, -\frac{\pi}{2}, dh_{17} \right) \frac{\Delta}{l_c} + 4F_{n3} \left(a, -\frac{\pi}{2}, dh_{18} \right) \frac{\Delta}{l_c} + 10F_{n3} \left(h_{pl}, -\frac{\pi}{2}, dh_{19} \right) \frac{\Delta}{l_c};
\end{aligned} \quad (19)$$

$F_{тр_баз_эл}^6$ – 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 y относительно начала координат; dh_8 – то же оси полутруб по оси y относительно начала координат; dh_9 – то же центров окружностей круглых частей фигурной полосы по оси y относительно начала координат; dh_{10} – то же верхней поверхности прямой части фигурной пластины по оси y относительно начала координат; $\alpha_{mn_d}, \alpha_{mn_d}$ – углы верхней и нижней дуги фигурной полосы; Δ – ширина фигурной пластины; a, b – длины верхней и нижней части фигурной полосы;

$$F_{ниж_тр} = F_{n1} (R_{2н}, R_{2в}, \alpha_{15}, \alpha_{16}, dh_{20}); \quad (20)$$

$F_{ниж_тр}$ – 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 y относительно начала координат;

$$F_1 = P_{пр} S_{напр} + F_{напр}; \quad (21)$$

$$F_2 = P_{пр} S_{баз_эл}^B + F_{тр_баз_эл}^B; \quad (22)$$

$$F_3 = P_{пр} S_{напр_верх_бок} + F_{напр_верх_бок}; \quad (23)$$

$$F_4 = P_{пр} S_{напр_ниж_бок} + F_{напр_ниж_бок}; \quad (24)$$

$$F_5 = P_{пр} S_{баз_эл}^6 + F_{тр_баз_эл}^6; \quad (25)$$

$$F_6 = P_{пр} S_{ниж_тр} + F_{ниж_тр}; \quad (26)$$

$S_{напр}$ – площадь торца направляющей трубы; $S_{баз_эл}^B$ – то же торца верхнего базового элемента; $S_{напр_верх_бок}$ – то же торца верхней боковой направляющей трубы; $S_{напр_ниж_бок}$ – то же торца нижней боковой направляющей трубы; $S_{баз_эл}^6$ – то же торца бокового базового элемента; $S_{ниж_тр}$ – то же торца нижней трубы с вырезами.

На рис. 7 показаны усилия по продавливанию элементов защитного экрана, где $k = 0,4$ – коэффициент трения стали о грунт, x – длина продавливания, м; $F1(x)$ – усилие домкрата, требуемое для продавливания промежуточных направляющих труб верхней секции металлического защитного экрана; $F2(x)$ – то же для продавливания верхних элементов секции металлического защитного экрана; $F3(x)$ – то же для продавливания боковых верхних направляющих труб металлического защитного экрана; $F4(x)$ – то же для продавливания боковых нижних направляющих труб металлического защитного экрана; $F5(x)$ – то же для продавливания боковых элементов секции металлического защитного экрана; $F6(x)$ – то же для продавливания трубы с вырезанным сектором в нижней части металлического защитного экрана.

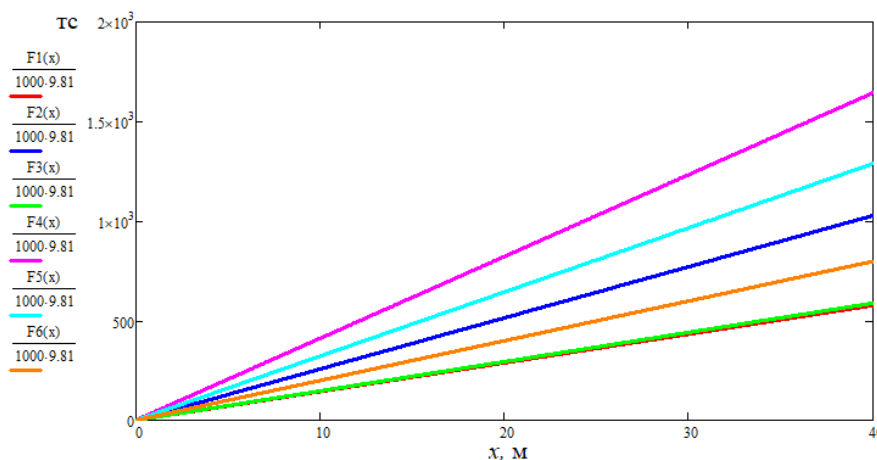


Рис. 7. График зависимости усилия домкрата от длины продавливания для базовых элементов из полутруб

Fig. 7. Graph of the dependence of the jack force on the punching length for basic elements made of half pipes

Произведем расчет усилий на продавливание для элементов на основе листового проката:

$$fn1(a, b, dh) = k \int_a^b P_{вэ}(y, dh) dy; \quad (27)$$

$$fn2(a, b, dh) = k \int_a^b P_{бэ}(y, dh) dy; \quad (28)$$

$$fn3(w, dh, y) = k \int_0^w P_{вэ}(y, dh) dx; \quad (29)$$

$$fn4(w, dh, y) = k \int_0^w P_{бэ}(y, dh) dx. \quad (30)$$

На рис. 8 показаны усилия по продавливанию однотипных элементов защитного экрана, где $k = 0,4$ – коэффициент трения стали о грунт; x – длина продавливания, м; $F7(x)$ – усилие домкрата, требуемое для продавливания верхних однотипных элементов секции металлического защитного экрана; $F8(x)$ – то же для продавливания боковых однотипных элементов секции металлического защитного экрана.

$$\begin{aligned} F_{базлв} = & 2fn1(-h_{0в}, -h_{0в} + b + t, 0) + 2fn1(-h_{0в}, -h_{0в} + b, 0) + 2fn1(-h_{0в} + b - a, -h_{0в} + b, 0) + \\ & + 4fn1(-h_{0в} + b - a + t, -h_{0в} + b, 0) + 2fn1(-h_{0в}, -h_{0в} + b + t, 0) + fn3(L_{лист}, 0, -h_{0в} + b) + \quad (31) \\ & + fn3(L_{лист} - 5t, 0, -h_{0в} + b - t) + fn3(L_{лист}, 0, -h_{0в} + b) + fn3(b, 0, -h_{0в} + b - a), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{базлб} = & 2fn2(-h_{0б} - L_{лист}, -h_{0б}, 0) + fn4(-h_{0б} - d_{уг} - b, -h_{0б} - d_{уг} - t, 0) + \\ & + fn4(-h_{0б} - 2d_{уг} + b, -h_{0б} - 2d_{уг} + t, 0) + fn4(-h_{0б} - d_{уг} - t, -h_{0б} - d_{уг} - b, 0) + \\ & + fn4(-h_{0б} - 3d_{уг} + b, -h_{0б} - 3d_{уг} + t, 0) + fn4(b + t, 0, -h_{0б}) + fn4(b - t, 0, -h_{0б}) + \quad (32) \\ & + fn4(a, 0, -h_{0б} - d_{уг}) + fn4(a - t, 0, -h_{0б} - d_{уг} - t) + fn4(a - t, 0, -h_{0б} - 2d_{уг} + t) + \\ & + fn4(a - t, 0, -h_{0б} - 2d_{уг} - t) + fn4(a - t, 0, -h_{0б} - 3d_{уг} + t) + fn4(a, 0, -h_{0б} - 3d_{уг} - t) + \\ & + fn4(a - t, 0, -h_{0б} - 4d_{уг} + t) + fn4(a, 0, -h_{0б} - 4d_{уг} - t), \end{aligned}$$

где $fn1(a, b, dh)$, $fn2(a, b, dh)$, $fn3(w, dh, y)$, $fn4(w, dh, y)$ – трение в плоских прямоугольных элементах; $F_{базлв}$ – сила трения, действующая на верхние однотипные элементы; $F_{базлб}$ – то же, действующая на боковые однотипные элементы; $L_{лист}$ – длина секции из однотипных элементов; a, b – ширина полков неравнобокого уголка; $d_{уг}$ – расстояние между уголками; $h_{0б}, h_{0в}$ – глубина задавливания однотипного элемента.

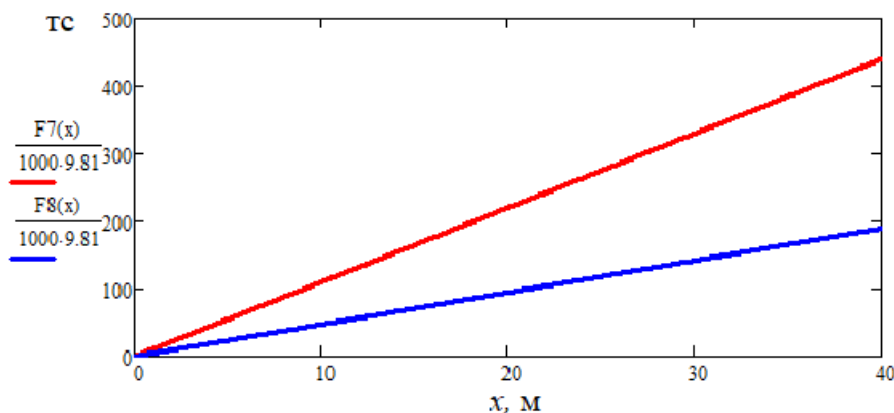


Рис. 8. График зависимости усилия домкрата от длины продавливания для однотипных элементов на основе листового проката

Fig. 8. Graph of the dependence of the jack force on the punching length for similar elements based on rolled sheets

Максимальное усилие домкрата необходимо для продавливания боковых нижних направляющих труб металлического защитного экрана. При продавливании нижних направляющих труб на 40 м оно составляет $F_4(40) = 1643,2$ тс.

Расчеты показали, что при использовании базовых и однотипных 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 [10], для секций из труб и труб с вырезанным сектором при одинаковых условиях продавливания. Следовательно, при производстве работ можно применять менее мощное оборудование.

ВЫВОДЫ

1. С учетом вышеизложенного можно сделать вывод, что данные технические решения являются жизнеспособными.

2. Защитный экран предотвращает деформацию и просадку поверхности, минимизирует влияние строительно-монтажных работ на городскую и транспортную инфраструктуру.

3. Для сооружения защитного экрана необходимо использовать менее мощное оборудование для вдавливания направляющих труб и базовых элементов, что ведет к снижению себестоимости строительства и уменьшению его продолжительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по комплексному освоению подземного пространства крупных городов / под ред. В. А. Ильичева. М.: ГУП НИИАЦ, 2004. 206 с.
2. Секция защитного экрана: пат. RU 121860 / И. Б. Сон, В. М. Ким, Г. А. Ананидзе, А. А. Коньков, В. А. Зубов. Оpubл. 10.11.2012.
3. Способ создания защитного экрана: пат. RU 2501953 / И. Б. Сон, В. М. Ким, Г. А. Ананидзе, А. А. Коньков, В. А. Зубов. Оpubл. 20.12.2013.
4. Защитный экран для тоннеля, или трубы, или путепровода тоннельного типа в рыхлом грунте (варианты) и способ его сооружения: пат. BY 23710 / Н. М. Прибыльская, А. А. Безуглый. Оpubл. 30.06.2022.
5. Защитный экран из однотипных элементов для сооружения тоннеля: пат. Евразийский патент EA042410 / Н. М. Прибыльская. Оpubл. 02.10.2023.
6. Правила технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь [Электронный ресурс]: постановление М-ва транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, 25 нояб. 2015 г., № 52. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21530414p>.
7. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути [Электронный ресурс]: распоряжение ОАО «РЖД», 14.11.2016, № 2288р. Режим доступа: <https://company.rzd.ru/api/media/resources/1503751?action=download>.
8. Напряженно-деформированное состояние защитного экрана из труб и базовых элементов в подземном строительстве / Н. М. Прибыльская, В. А. Гречухин // Метро и тоннели. 2022. № 1. С. 9–13.
9. Мосты и трубы: СН 3.03.01–2019. Введ. 31.10.2019. Минск: Минстройархитектуры, 2020. 286 с.
10. Устройство пересечений в разных уровнях существующих железной и автомобильной дорог без остановки движения поездов / П. Н. Курочка [и др.] // Транспортное строительство. 2015. № 4. С. 14–17.

Поступила 19.08.2024

Подписана в печать 22.10.2024

Опубликована онлайн 29.11.2024

REFERENCES

1. Ilyichev V. A. (ed.) (2004) *Guidelines for the Integrated Development of Underground Space in Large Cities*. Moscow, Publishing House of State Unitary Enterprise "Research Analytical Center". 206 (in Russian).
2. Son I. B., Kim V. M., Ananidze G. A., Konkov A. A., Zubov V. A. (2012) *Protective Screen Section*. Patent Russian Federation no. RU 121860 (in Russian).
3. Son I. B., Kim V. M., Ananidze G. A., Konkov A. A., Zubov V. A. (2013) *Method for Creating a Protective Screen*. Patent Russian Federation no. RU 2501953 (in Russian).
4. Pribylskaya N. M., Bezugly A. A. (2022) *Protective Screen for a Tunnel, or Pipe, or Tunnel-Type Overpass in Loose Soil (Options) and Method of its Construction*. Patent BY no. 23710 (in Russian).
5. Pribylskaya N. M. (2023) *Protective Screen Made of the Same Type of Elements for Tunnel Construction*. Eurasian Patent no. EA042410 (in Russian).
6. *Rules for the Technical Operation of the Railway in the Republic of Belarus, Approved by Decree of the Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus on November 25, 2015 No.52*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21530414p> (in Russian).
7. *Instructions for the Current Maintenance of the Railway Track, Approved by the Order of JSC Russian Railways dated November 14, 2016 No.2288p*. Available at: <https://company.rzd.ru/api/media/resources/1503751?action=download> (in Russian).
8. Pribylskaya N. M., Grechukhin V. A. (2022) *Stress-Strained State of a Protective Screen Made of Pipes and Base Elements in Underground Construction. Metro i Tonneli [Subway and Tunnels]*, (1), 9–13 (in Russian).
9. SN [Construction Norms] 3.03.01–2019. *Bridges and Pipes*. Minsk, Minstroiarhitektury, 2020. 286 (in Russian).
10. Kurochka P. N., Revyakin A. A., Son I. B., Kopylov A. B. (2015) *Construction of Intersections at Different Levels of Existing Railways and Highways Without Stopping Train Traffic. Transportnoye Stroitelstvo = Transport Construction*, (4), 14–17 (in Russian).

Received: 19.08.2024

Accepted: 22.10.2024

Published online: 29.11.2024