ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(6):59-71
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 624.19 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_59

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОННЕЛЯ КВАЗИПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ОЧЕРТАНИЯ ПО СИЛОВОМУ ФАКТОРУ

Нгуен Тай Тиен[1], М.А. Карасев[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: karasevma@gmail.com

Аннотация: В настоящее время тоннели некругового очертания все чаще используются в практике строительства тоннелей щитовыми проходческими комплексами из-за преимуществ этой формы, которая имеет высокий коэффициент использования сечения. Тоннель квазипрямоугольного поперечного сечения является примером такой формы, которая была разработана и применяется на линии метрополитена в г. Нинбо, Китай. Однако принципы расчета и поиска оптимальной формы тоннелей некруговой формы поперечного сечения по силовым факторам практически не представлены в научных исследованиях. В данной статье предложен подход к оптимизации формы поперечного сечения двухпутного тоннеля квазипрямоугольной формы поперечного сечения. При выполнении расчетов напряженного состояния обделки тоннеля принят метод HRM (The Hyperstatic Reaction Method — метод гиперстатических реакций), а также предложен алгоритм поиска оптимальных параметров тоннеля квазипрямоугольное поперечное сечение, на основании анализа интегральных показателей напряженного состояния сечения обделки, продольных сил и изгибающих моментов.

Ключевые слова: тоннель, оптимизация, напряженное состояние, обделка, взаимодействие крепи с породным массивом, квазипрямоугольное сечение, форма сечения, строительство, щитовая проходка.

Для цитирования: *Нгуен Тай Тиен, Карасев М. А.* Расчет оптимальных геометрических параметров тоннеля квазипрямоугольного поперечного очертания по силовому фактору // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 6. – С. 59–71. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_59.

Optimization of geometry design of quasi-rectangular section tunnel by the force criterion

Nguyen Tai Tien[1], M.A. Karasev[1]

[1] Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: karasevma@gmail.com

Abstract: The noncircular section tunnels are finding increasingly more often application in shield tunneling due to the advantageously high section utilization efficiency. For instance, a quasi-rectangular section tunnel in Ningbo Rail Transit in China. At the same time, the scientific researches lack guidelines on the optimum shape design for the noncircular section tunnels by the force criterion. This article puts forward an approach to optimizing geometry of a double-

© Нгуен Тай Тиен, М.А. Карасев. 2021.

track quasi-rectangular section tunnel. The stress–strain analysis of the tunnel lining used the Hyperstatic Reaction Method. Furthermore, the search algorithm is proposed for the optimized quasi-rectangular section tunnel geometry based on the analysis of the integral indicators of stresses, axial forces and bending moments in the tunnel lining.

Key words: tunnel, optimization, stress state, lining, rock–lining interaction, quasi-rectangular section, section geometry, construction, shield tunneling.

For citation: Nguyen Tai Tien, Karasev M. A. Optimization of geometry design of quasi-rectangular section tunnel by the force criterion. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(6):59-71. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_59.

Введение

Круговая форма поперечного сечения тоннеля является наиболее распространенной при строительстве подземных сооружений и, в частности, протяженных тоннелей системы городского подземного транспорта. Данная форма поперечного сечения хорошо адаптирована под технологии строительства тоннелей в слабых грунтах с применением щитовых проходческих комплексов, а сама круговая форма поперечного сечения является весьма устойчивой к внешним воздействиям и позволяет минимизировать формируемые под внешним воздействием напряжения в крепи [1 — 6]. Однако недостатком круговой формы является небольшой коэффициент использования сечения, то есть сечение тоннеля в свету не используется эффективно [7 — 8].

Тоннели квазипрямоугольного поперечного очертания позволяют добиться более высоких показателей коэффициента использования сечения по сравнению с круговыми, а это, в свою очередь, снижает требуемый объем выемки грунта из выработанного пространства, значительно уменьшает расход бетонной смеси на сооружение основания для рельсового или автодорожного пути. Исследования по оценке эффективности применения такой формы поперечного сечения подземных сооружений с точки зрения прочностных расчетов выполнялись учеными и инженерами. Среди их научных работ можно выделить такие, где рассматриваются аналитические решения прогноза напряженного состояния обделок подземных сооружений криволинейного очертания [3, 9 — 13], подходы к построению численных моделей [14, 15], а также результаты экспериментальных исследований, проводимых в лабораторных и натурных условиях [16 — 18].

Однако, несмотря на выполненный объем исследований, до сих пор отсутствуют расчетные положения по обоснованию параметров формы тоннелей квазипрямоугольного поперечного сечения. Во всех упомянутых выше исследованиях криволинейное очертание тоннелей задается в качестве исходного без расчетного обоснования их геометрических параметров. Следовательно, поиск эффективного способа оптимизации геометрических параметров тоннелей квазипрямоугольных форм поперечного сечения, на основании анализа напряженного состояния обделки, является важным для облегчения разработки тоннелей такого типа.

Теоретические положения расчета напряженного состояния обделки

При выполнении расчетов напряженного состояния обделки тоннеля принят метод HRM [19 — 22], который не только позволяет учесть особенности взаимодействия между грунтовым массивом и

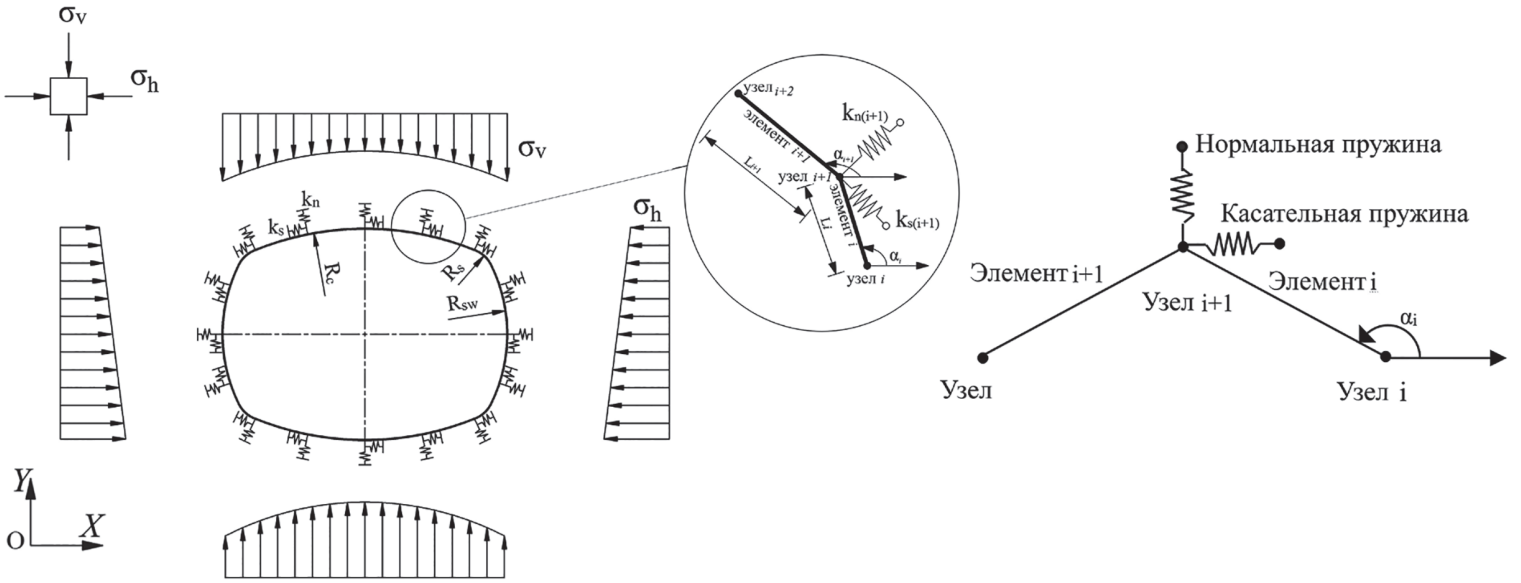

Рис. 1. Принципиальная схема расчета напряженного состояния обделки по схеме взаимодействия с грунтовым массивом по методу HRM
Fig. 1. HRM-based stress–strain analysis diagram for lining in interaction with rock mass

обделкой (рис. 1), но и за счет малой с вычислительной точки зрения ресурсоемкости подходит для решения оптимизационных задач, где в процессе поиска оптимального решения могут быть рассмотрены около 1000 расчетных вариантов. Принятая при выполнении исследования вариация метода HRM основана на работах Oreste (2007) [19] и Do et al. (2014) [20] и заключается в разделении расчетной модели на отдельные сегменты, которые моделируются балочными элементами, а взаимодействие с грунтовым массивом реализовано через набор пружинок, расположенных в нормальном и касательном направлениях, которые объединены с балочными элементами через смежные узловые точки. Механическое поведение пружинок определяется направлением их деформирования. Так, при сжатии пружинок их начальная жесткость сохраняется в течение всей стадии нагружения, при растяжении пружинок их жесткость уменьшается до значения, близкого к нулевому. Более детально ознакомиться с основными теоретическими положениями метода HRM можно в [20 — 21, 23]. В работе выполнена адаптация метода HRM для криволинейной формы поперечного сечения тоннеля.

В узловые точки прикладывается активная нагрузка, величина которой для рассматриваемых условий определяется по формуле Терцаги [24, 25]. Принято, что мощность пород над сводом тоннеля составляет не менее двух его диаметров. Величина вертикальной нагрузки на обделку тоннеля σ_v определяется по следующей формуле:

$$\sigma_v = \gamma h_0 \qquad (1)$$

$$h_0 = \frac{B_1\left(1-\left(c / B_1\gamma\right)\right)}{K_0 tg\varphi}\left(1-e^{\left(-K_0 tg\varphi\left(H/B_1\right)\right)}\right)+ \\ +\frac{P_0}{\gamma}\left(e^{\left(-K_0 tg\varphi\left(H/B_1\right)\right)}\right) \qquad (2)$$

$$B_1 = \frac{B}{2} + H_t ctg\left(\frac{\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}}{2}\right) \qquad (3)$$

где B_1 — ширина активной зоны опускающегося столба породы; c — сцепление породы; φ — угол внутреннего трения породы; γ — объемный породы; K_0 — коэффициент бокового давления; B и H_t — соответственно ширина и высота тоннеля квазипрямоугольного поперечного очертания; H — мощность расположенных над сводом тоннеля пород; P_0 — дополнительная нагрузка приложенная в уровне земной поверхности.

Данный метод нашел широкое распространение при определении напряженного состояния обделки как тоннелей кругового очертания [20, 23], тоннелей подковообразной формы [10, 21], так и тоннелей криволинейного очертания [11, 12].

Алгоритм поиска оптимальных геометрических параметров сечения тоннеля квазипрямоугольной формы

Алгоритм поиска (рис. 2) оптимальной формы поперечного сечения тоннеля квазипрямоугольной формы заключается в разбивке сечения тоннеля на отдельные сегменты, параметры (положение центра сегмента и радиус) которых контролируются через опорные точки. В первую очередь определяется фиксированная площадь (площадь сечения тоннеля, определяемая по габариту приближения строений [26]) двухпутного тоннеля метрополитена. Внутренние поверхности обделки тоннеля квазипрямоугольной формы должны как минимум перекрывать эту фиксированную зону. С учетом этого требования предлагается ряд математических функций для оптимизации геометрических параметров квазипрямоугольной формы тоннеля с точки

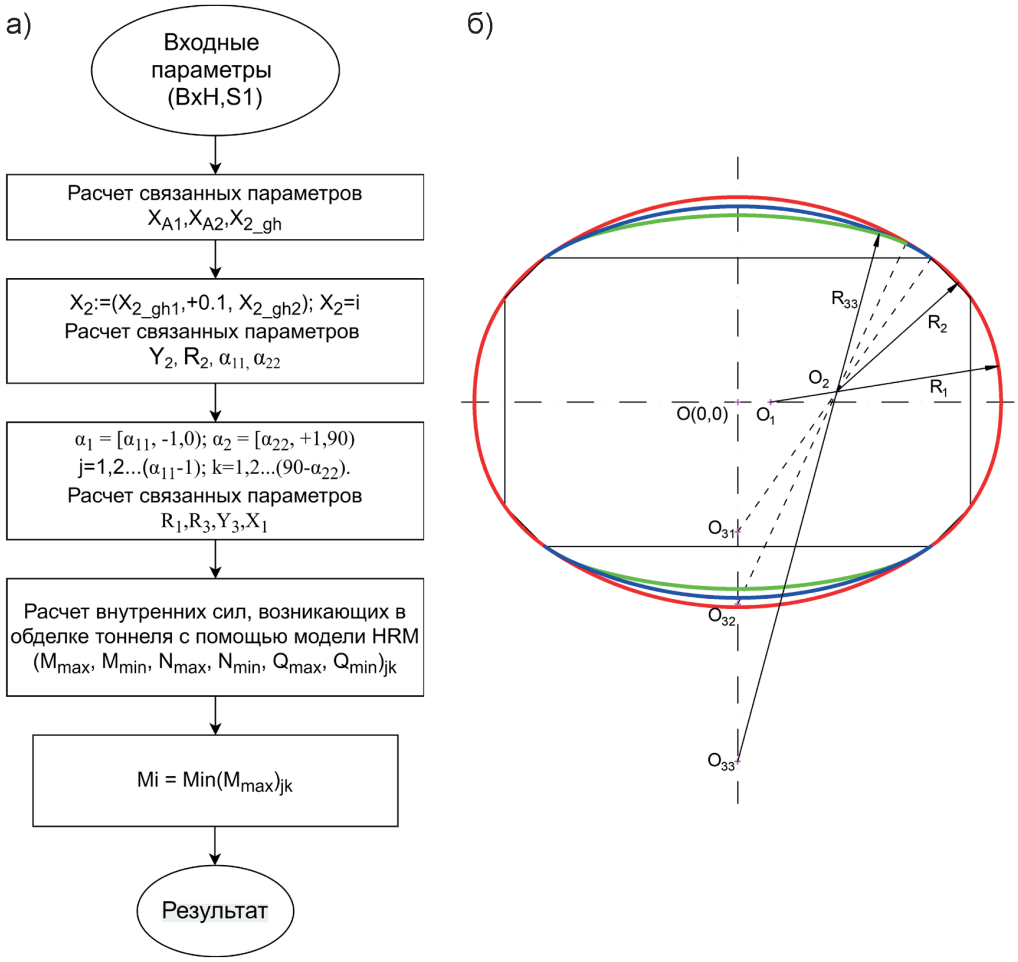

Рис. 2. Общий алгоритм оптимизации геометрических параметров поперечного сечения (а) и различные конфигурации поперечного сечения (б) для тоннелей криволинейного очертания

Fig. 2. General optimization algorithm of cross-section geometry (a) and various cross-section geometries (b) for curvilinear configuration tunnels

зрения внутренних сил, возникающих в обделке тоннеля.

Алгоритм расчета оптимальной формы криволинейного сечения тоннеля следующий (рис. 3):

• На начальном этапе выполняется выбор центра O_2 и вычисляется радиус R_2. Центр O_2 (x_2, y_2) дуги *2* расположен на биссектрисе отрезка прямой A_1A_2, которая описывается линейным уравнением: $y = x + (h_1 - d_1)$. Радиус R_2 определяется по следующей формуле

$$R_2 = \sqrt{(d_2 - x_2)^2 + (h_1 - y_2)^2};$$

• Далее определяется расположение центров O_1, O_3. Дуга *2* ограничена точками A_1' и A_2', расположенными на окружности с центром O_2 и радиусом R_2. Углы между прямой O_2A_1', O_2A_2' и горизонтальной осью должны удовлетворять следующему условию: $\alpha_1 = (0, \alpha_{11})$ и $\alpha_2 = (\alpha_{22}, 90)$.

Центр O_1 дуги *1* является пересечением линии, проходящей через точку O_2,

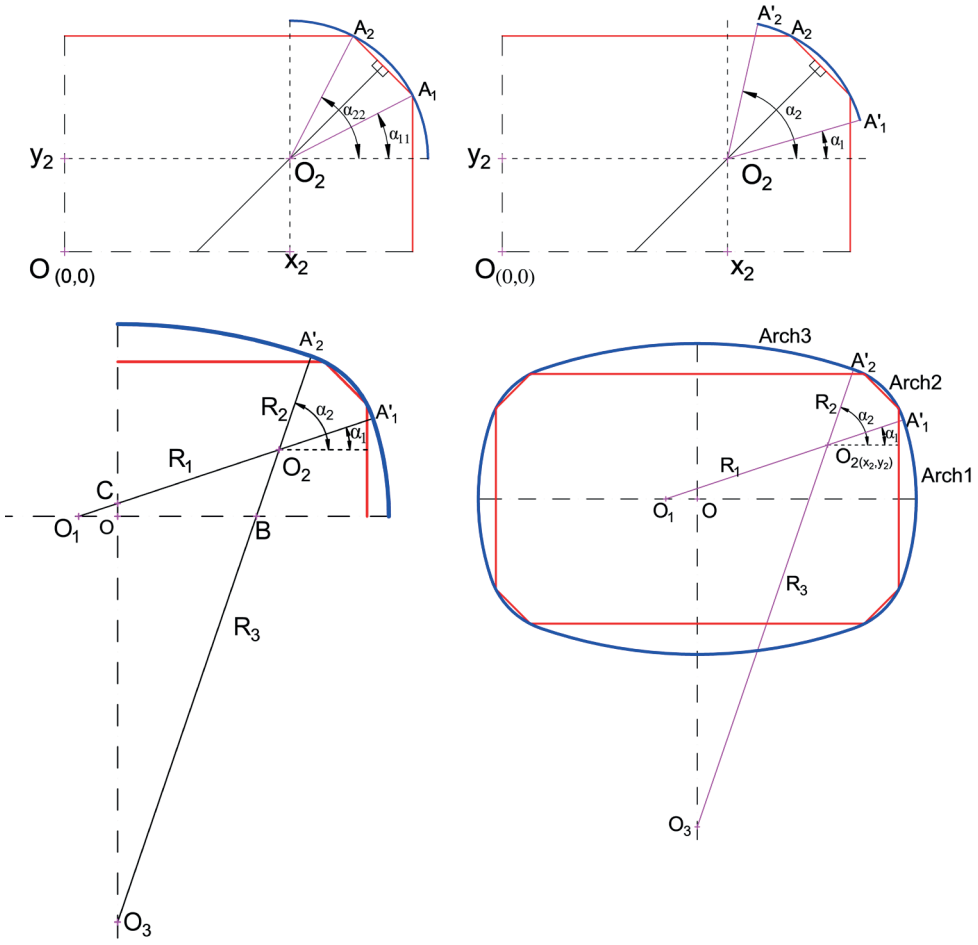

Рис. 3. Принципиальная схема оптимизации геометрических параметров тоннеля квазипрямоугольного поперечного сечения
Fig. 3. Geometry optimization diagram for quasi-rectangular section tunnels

имеющую наклон tg(α_1), и горизонтальной оси *x*.

$$O_1(x_1, 0);\ x_1 = -\frac{y_2}{tg(\alpha_1)} + x_2.$$

Центр O_3 дуги *3* является пересечением линии, проходящей через точку O_2, имеющую наклон tg(α_2), и вертикальной оси *x*.

$$O_3(0, y_3);\ y_3 = tg(\alpha_2)(-x_2) + y_2$$

$$R_1 = \sqrt{\left(x_{A'_1} - x_1\right)^2 + \left(y_{A'_1}\right)^2};$$

$$R_3 = \sqrt{\left(x_{A'_2}\right)^2 + \left(y_{A'_2} - y_3\right)^2}$$

Адаптация метода HRM для тоннеля криволинейного поперечного сечения выполнена в программном комплексе Matlab. Алгоритм оптимизации поперечного сечения тоннеля также является элементов общего программного кода для выполнения расчета напряженного состояния обделки. В качестве выходных данных выступают интегральные показатели напряженного состояния обделки (нормальная сила, изгибающий

момент, продольная сила), а также положение узловых точек системы после проведения оптимизации.

При выполнении расчетов на настоящий момент оптимизация выполняется на основании минимизации показателей, характеризующих напряженное состояние обделки тоннеля, однако нами выполнено расширение алгоритма оптимизации через оценку показателя, характеризующего прочность расчетного сечения. Данный подход достаточно эффективно может быть использован при оптимизации параметров поперечного сечения железобетонной обделки. В этом случае за показатель, характеризующий прочность сечения обделки, может выступать коэффициент использования сечения, который согласно СП 63.13330.2012 может быть определен по следующей формуле:

$$k_{исп} = \frac{N}{N_{пр}} = \frac{N}{\gamma_{b1}\gamma_{b3}R_{б.сж}b_{кр}x\left(h_0 - 0,5x\right) + R_{с.сж}A_{ст.сж}\left(h_0 - a_{зс.сж}\right)} \le 1 \qquad (4)$$

e_p

где N — продольная сила в сечении крепи; $N_{пр}$ — максимально допустимая продольная сила; γ_{b1} и γ_{b3} — коэффициенты условия работы; $R_{б.сж}$ — расчетное сопротивление бетона сжатию; x — высота сжатой зоны; h_0 — расчетная высота сечения крепи; $R_{с.сж}$ — расчетное сопротивление арматуры сжатию; $A_{ст.сж}$ — площадь поперечного сечения арматуры в сжатой зоне; $a_{зс.сж}$ — защитный слой бетона в сжатой зоне.

В дальнейшем планируется выполнять не только оптимизацию формы поперечного сечения тоннеля по фактору коэффициента использования сечения, но и подбирать параметры армирования, обеспечивающие коэффициент использования сечения не менее 1,0.

Результаты оптимизации сечения тоннеля криволинейного очертания

Пример выполнения расчета напряженного состояния обделки тоннелей криволинейного очертания выполнен для следующих условий. Рассматривается строительство тоннеля квазипрямоугольного поперечного очертания в инженерно-геологических условиях г. Ханой, Вьетнам (таблица). Габарит приближения строений

Физико-механические характеристики грунтового массива и обделки тоннеля
Physical and mechanical characteristics of enclosing rock mass and tunnel lining

Параметр	Символ	Значение	Ед. изм.
Грунт			
Модуль Юнга	E_s	3,6	МПа
Удельный вес	γ_s	19	кН/м^3
Угол внутреннего трения	φ	16,5	град.
Коэффициент Пуассона	ν_s	0,495	–
Сцепление	c	0,0256	МПа
Коэффициент бокового давления грунта	K_0	0,6	–
Обделка тоннеля			
Модуль Юнга	E	35	МПа
Коэффициент Пуассона	ν	0,15	–

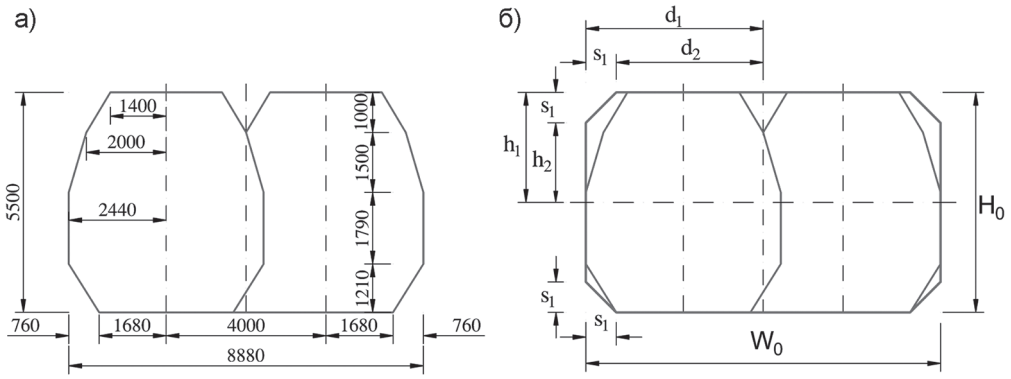

Рис. 4. Построение габарита приближения строений тоннеля: габарит приближения строений двухпутного железнодорожного тоннеля по вьетнамским стандартам (а); упрощенный габарит приближения строений тоннеля (W_0 = 8,88 м; H_0 = 5,50 м; s_1 = 0,76 м; s_2 = 1,21 м; s_2 = 1,21 м; s_3 = 1,07 м; d_2 = 4,44 м; d_1 = 3,68 м; h_1 = 2,75 м; h_2 = 1,54 м; $h_1 = H_0/2 = h_2 + s_2$) (б)

Fig. 4. Plotting construction clearances for tunnels: construction clearance for double-track railway tunnel by Vietnamese standards (a); simplified construction clearance (b) (W_0 = 8.88 m; H_0 = 5.50 m; s_1 = 0.76 m; s_2 = = 1.21 m; s_2 = 1.21 m; s_3 = 1.07 m; d_2 = 4.44 m; d_1 = 3.68 m; h_1 = 2.75 m; h_2 = 1.54 m; $h_1 = H_0/2 = h_2 + s_2$)

тоннеля для рассматриваемых условий представлен на рис. 4 [24]. Глубина заложения тоннеля 10 м. Толщина обделки тоннеля 0,5 м. Оптимизация геометрических параметров сечения тоннеля выполняется согласно алгоритму, представленному в предыдущем разделе.

С целью сокращения времени расчета каждый случай расчета оценивается с использованием шага взаимодействия в 1° для угла α_1 и α_2 от ограниченного угла α_{11} и α_{22} соответственно, и 0,1 м для x_2. Следует отметить, что при оптимизации геометрических параметров сечения тоннеля выполнено 12 479 расчетов напряженного состояния обделки квазипрямоугольного поперечного сечения, расчет времени для каждого расчетного случая с применением модели HRM занимает около 2 с (на компьютере Intel Core CPU i5-8500 3.0GHz, 16GB RAM).

На рис. 5 можно увидеть зависимость внутренних сил и радиальных смещений обделки от величины радиуса свода R_3 (или лотка) тоннеля. Влияние радиуса R_3 на величину максимального изгибающего момента в сечении обделки значительное. Увеличение радиуса R_2 также приводит к увеличению максимального изгибающего момента в обделке. Максимальная нормальная сила меняется незначительно при изменении радиуса R_3.

Как и ожидалось, увеличение радиуса R_3 приводит к тому, что свод и лоток тоннеля становятся более плоскими. Тогда нормальная вертикальная нагрузка, действующая на эти сегменты обделки, становиться больше, а вертикальная поперечная нагрузка — меньше. Кроме того, вертикальная нагрузка, передаваемая на боковую стенку обделки тоннеля, снижается. Таким образом, чем ровнее свод и лоток тоннеля, тем выше максимальный изгибающий момент в обделке тоннеля.

Максимальное нормальное смещение обделки тоннеля увеличивается с увеличением радиуса R_2.

Обработка результатов выполненных расчетов позволила установить, что соотношение между радиусом R_3 и максимальным изгибающим моментом в обделке тоннеля квазипрямоугольной фор-

мы поперечного сечения может быть описано следующим уравнением с коэффициентом корреляции R^2 = 0,9827.

$$Z = 0,2848\ln(R_3) + 0,567 \qquad (5)$$

Связь между максимальным изгибающим моментом в обделке тоннеля и радиусами R_3, R_1, R_2 с достаточной для практических расчетов достоверностью можно описать уравнением (6), коэффициент корреляции R^2 = 0,9866.

$$Z = 0,61038 - 0,00059\exp(R_2) + \\ + 0,28776\ln(R_3) - 0,02505\ln(R_1) \qquad (6)$$

Из уравнений (1) и (2) видно, что на максимальный изгибающий момент в обделке в основном влияет радиус сводовой (нижней) части и незначительно — радиус, определяющий кривизну боковой части обделки тоннеля.

Детальный анализ результатов расчетов позволил установить, что величина максимального изгибающего момента в сечении обделки тоннеля для рассматриваемых условий изменяется от 1,05 МН*м/м (оптимальная форма поперечного сечения) до 1,85 МН*м/м (наихудшая форма поперечного сечения тоннеля), то есть разница в величинах

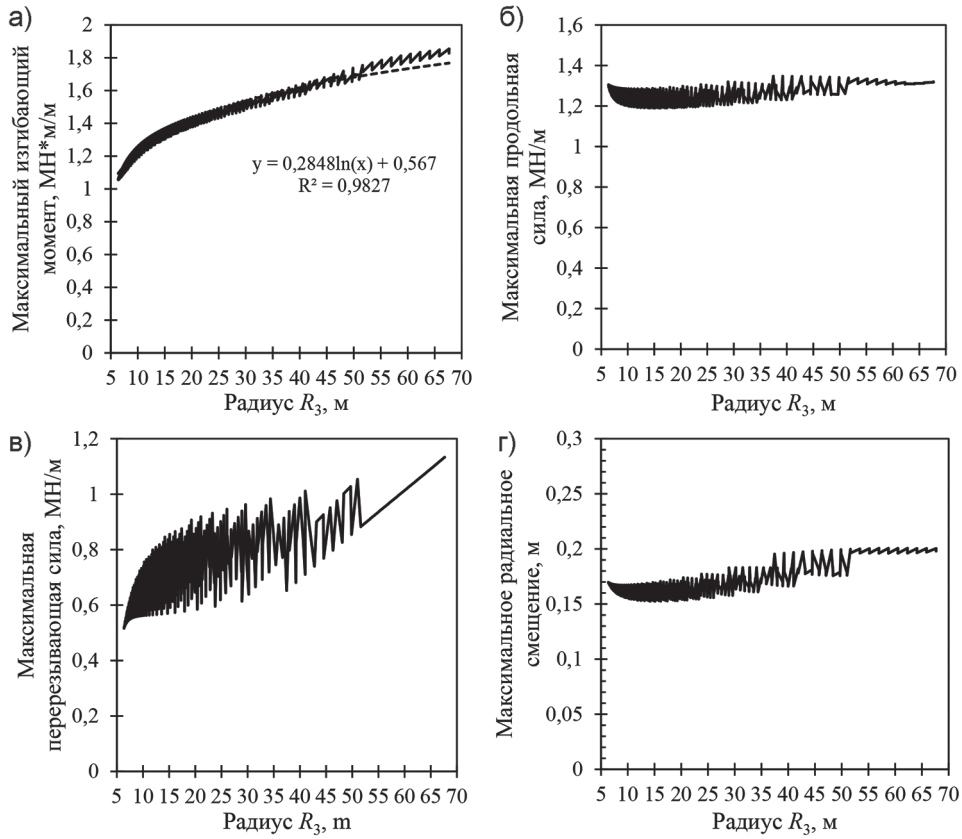

Рис. 5. Внутренние силы и нормальные смещения, возникающие в обделке тоннелей: максимальный изгибающий момент (а); максимальная нормальная сила (б); максимальная перерезывающая сила (в); максимальное нормальное смещение (г)

Fig. 5. Internal forces and normal displacements in tunnel lining: maximal bending moment (a); maximal normal force (b); maximal shearing force (v); maximal normal displacement (g)

изгибающего момента составляет 75%. При этом изменение площади поперечного сечения от оптимальной формы поперечного сечения до наихудшей с точки зрения распределения напряженного состояния обделки составило 21%. Установив влияние параметров формы поперечного сечения на величину максимального продольного усилия, можно заключить, что применение оптимизационного алгоритма позволило в значительной степени снизить напряженное состояние обделки при сохранении минимального размера площади поперечного сечения тоннеля.

Заключение

Выполненные в работе исследования позволили установить необходимость оптимизации параметров формы тоннеля квазипрямоугольного поперечного сечения. Установлено количественное снижение интегральных показателей напряженного состояния обделки по мере изменения кривизны ее поперечного сечения. Предложенный подход к оптимизации формы поперечного сечения позволяет снизить значение продольной силы и изгибающего момента при незначительном увеличении площади поперечного сечения тоннеля.

Более точную оценку эффективности той или иной формы поперечного сечения можно будет определить по расходу материала и, в частности, расходу арматуры для армирования обделки, однако пока такой расчет не был выполнен. В тоже время, полученные результаты подтверждают эффективность предложенного алгоритма оптимизации геометрических параметров формы квазипрямоугольного сечения, принятый подход может быть распространен на тоннели, сооружаемые щитовыми проходческими комплексами, а также традиционными способами.

На настоящий момент совмещение метода оптимизации формы поперечного сечения реализовано в рамках расчетного метода HRM, который является не требовательным к вычислительным ресурсам. Однако предложенный авторами работы алгоритм оптимизации формы поперечного сечения может быть имплементирован в любой коммерческий программный продукт для выполнения прочностных расчетов.

При такой схеме взаимодействия становится возможным учесть влияние нелинейного поведения грунтового массива на развитие напряжений в обделке тоннеля, что в значительной степени повысит достоверность предложенного решения.

Разработка такого решения выполняется авторами работы в настоящий момент. Результаты будут опубликованы в последующих научных работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Саммаль А. С., Фотиева Н. Н., Булычев Н. С., Хренов С. И.* Расчет тоннельных обделок переменной толщины с учетом влияния земной поверхности // Записки Горного института. — 2004. — Т. 156. — С. 24.

2. *Безродный К. П., Лебедев М. О.* О нагрузках от горного давления на обделки тоннелей закрытого способа работ // Записки Горного института. — 2017. — Т. 228. — С. 649—653.

3. *Протосеня А. Г., Иовлев Г. А.* Прогноз напряженно-деформируемого состояния в окрестности подземного сооружения в нелинейно-деформируемых грунтовых массивах // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2020. — № 2. — С. 215—228.

4. *Протосеня А. Г., Иовлев Г. А.* Прогноз пространственного напряженно-деформированного состояния физически нелинейного грунтового массива в призабойной зоне тоннеля // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 5. — С. 128—139. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-128-139.

5. *Деменков П. А.*, *Шубин А. А.* Совершенствование конструкций, геомеханическое обоснование и разработка технологии строительства колонной станции закрытого типа метрополитена глубокого заложения // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2016. — № 1. — С. 131—138.

6. *Господариков А. П.*, *Зацепин М. А.* Математическое моделирование нелинейных краевых задач геомеханики // Горный журнал. — 2019. — № 12. — С. 16—20.

7. *Li J.* Key technologies and applications of the design and manufacturing of non-circular TBMs // Engineering. 2017, vol. 3, no. 6, pp. 905—914.

8. *Krcík M.* Non-circular full face tunnel boring machines — 21st century challenge / Underground Space: the 4th Dimension of Metropolises, Prague, Czech Republic, 2007.

9. *Zhang C., Li W., Zhu W., Tan Z.* Face stability analysis of a shallow horseshoe-shaped shield tunnel in clay with a linearly increasing shear strength with depth // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020, vol. 97.

10. *Du D., Dias D., Do N.* Designing U-shaped tunnel linings in stratified soils using the hyperstatic reaction method // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2018, pp. 1—18.

11. *Du D., Dias D., Do N.* Lining performance optimization of sub-rectangular tunnels using the hyperstatic reaction method // Computers and Geotechnics. 2019, vol. 117.

12. *Do N. A.*, *Dias D., Zhang Z., Huang X., Nguyen T. T., Pham V. V., Nait-Rabah O.* Study on the behavior of squared and sub-rectangular tunnels using the Hyperstatic Reaction Method // Transportation Geotechnics. 2020, vol. 22.

13. *Nguyen T. T., Karasev M. A., Vilner M. A.* Study of the stress-strain state in the sub-rectangular tunnel / Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development. Hanoi, 2019.

14. *Abdellah W. R.*, *Ali M. A.*, *Yang H.-S.* Studying the effect of some parameters on the stability of shallow tunnels // Journal of Sustainable Mining. 2018, vol. 17, no.1, pp. 20—33. DOI: 10.1016/j.jsm.2018.02.001.

15. *Rostami A., Asghari N., Ziarati M. A., Jahani S., Shahi B.* Investigating effect of tunnel gate investigating effect of tunnel gate inserted forces on its coverage and soil surface settlement // Journal of Civil Engineering. 2016, vol. pp. 358—369.

16. *Huang X., Zhua Y., Zhanga Z., Zhuc Y., Wang S., Zhuang Q.* Mechanical behaviour of segmental lining of a sub-rectangular shield tunnel under self-weight // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, vol. 74, pp. 131—144.

17. *Liu X., Ye Y., Liu Z., Huang D.* Mechanical behavior of Quasi-rectangular segmental tunnel linings: First results from full-scale ring tests // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, vol. 71, pp. 440–453.

18. *Liu X., Liu Z., Ye Y., Bai Y., Zhu Y.* Mechanical behavior of quasi-rectangular segmental tunnel linings: Further insights from full-scale ring tests // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, vol. 79, pp. 304–318.

19. *Oreste P.* A numerical approach to the hyperstatic reaction method for the dimensioning of tunnel supports // Tunnelling and Underground Space Technology. 2007, vol. 22, pp. 185—205.

20. *Do N. A.*, *Dias D., Oreste P.* 2D seismic numerical analysis of segmental tunnel lining behaviour // Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering. 2014, vol. 47, no. 3, pp. 1—11.

21. *Du D., Dias D.*, *Do N. A.*, *Oreste P. P.* Hyperstatic reaction method for the design of U-shaped tunnel supports // International Journal of Geomechanics. 2018, vol. 18, no. 6.

22. *Gospodarikov A. P.*, *Nguyen C. T.* Hyperstatic reaction method for calculations of tunnels with horseshoe-shaped cross-section under the impact of earthquakes // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2020, no. 19, pp. 179—188.

23. *Do N. A.*, *Dias D., Oreste P.*, *Maigrea I. D.* The behaviour of the segmental tunnel lining studied by the hyperstatic reaction method // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2014, vol. 18, no. 4, pp. 489—510.

24. *Chen K., Peng F. L.* An improved method to calculate the vertical earth pressure for deep shield tunnel in Shanghai soil layers // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, vol. 75, pp. 43—66.

25. *Takano Y. H.* Guidelines for the design of shield tunnel lining // Tunneling and Underground Space Technology. 2000, vol. 15, no. 3, pp. 303—331.

26. TCVN Ham đuong sat và ham đuong ô tô — Tiêu chuan thiêt kê. 4527—1988. ГИАБ

REFERENCES

1. Sammal' A. S., Fotieva N. N., Bulychev N. S., Khrenov S. I. Design of tunnel lining with variavle thickness located new ground surface. *Journal of Mining Institute*. 2004, vol. 156, pp. 24. [In Russ].

2. Bezrodnyy K. P., Lebedev M. O. Earth pressure and lining design for deep tunnels. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 228, pp. 649—653. [In Russ].

3. Protosenya A. G., Iovlev G. A. Assessment of lining stress state based on the nonlinear behavior of soil mass. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Nauki o zemle*. 2020, no. 2, pp. 215—228. [In Russ].

4. Protosenya A. G., Iovlev G. A. Prediction of spatial stress–strain behavior of physically nonlinear soil mass in tunnel face area. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 5, pp. 128—139. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-128-139.

5. Demenkov P. A., Shubin A. A. Improvement of structures, geomechanical substantiation and development of technology for the construction of a column-type subway station. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Nauki o zemle*. 2016, no. 1, pp. 131—138. [In Russ].

6. Gospodarikov A. P., Zatsepin M. A. Mathematical modeling of boundary problems in geomechanics. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 12, pp. 16—20. [In Russ].

7. Li J. Key technologies and applications of the design and manufacturing of non-circular TBMs. *Engineering*. 2017, vol. 3, no. 6, pp. 905—914.

8. Krcík M. Non-circular full face tunnel boring machines — 21st century challenge. *Underground Space: the 4th Dimension of Metropolises*, Prague, Czech Republic, 2007.

9. Zhang C., Li W., Zhu W., Tan Z. Face stability analysis of a shallow horseshoe-shaped shield tunnel in clay with a linearly increasing shear strength with depth. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020, vol. 97.

10. Du D., Dias D., Do N. Designing U-shaped tunnel linings in stratified soils using the hyperstatic reaction method. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2018, pp. 1—18.

11. Du D., Dias D., Do N. Lining performance optimization of sub-rectangular tunnels using the hyperstatic reaction method. *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 117.

12. Do N. A., Dias D., Zhang Z., Huang X., Nguyen T. T., Pham V. V., O. Nait-Rabah Study on the behavior of squared and sub-rectangular tunnels using the Hyperstatic Reaction Method. *Transportation Geotechnics*. 2020, vol. 22.

13. Nguyen T. T., Karasev M. A., Vilner M. A. Study of the stress-strain state in the sub-rectangular tunnel. *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development*. Hanoi, 2019.

14. Abdellah W. R., Ali M. A., Yang H.-S. Studying the effect of some parameters on the stability of shallow tunnels. *Journal of Sustainable Mining*. 2018, vol. 17, no.1, pp. 20—33. DOI: 10.1016/j.jsm.2018.02.001.

15. Rostami A., Asghari N., Ziarati M. A., Jahani S., Shahi B. Investigating effect of tunnel gate investigating effect of tunnel gate inserted forces on its coverage and soil surface settlement. *Journal of Civil Engineering*. 2016, vol. pp. 358—369.

16. Huang X., Zhua Y., Zhanga Z., Zhuc Y., Wang S., Zhuang Q. Mechanical behaviour of segmental lining of a sub-rectangular shield tunnel under self-weight. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 74, pp. 131—144.

17. Liu X., Ye Y., Liu Z., Huang D. Mechanical behavior of Quasi-rectangular segmental tunnel linings: First results from full-scale ring tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 71, pp. 440–453.

18. Liu X., Liu Z., Ye Y., Bai Y., Zhu Y. Mechanical behavior of quasi-rectangular segmental tunnel linings: Further insights from full-scale ring tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 79, pp. 304–318.

19. Oreste P. A numerical approach to the hyperstatic reaction method for the dimensioning of tunnel supports. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2007, vol. 22, pp. 185 — 205.

20. Do N. A., Dias D., Oreste P. 2D seismic numerical analysis of segmental tunnel lining behaviour. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*. 2014, vol. 47, no. 3, pp. 1 — 11.

21. Du D., Dias D., Do N. A., Oreste P. P. Hyperstatic reaction method for the design of U-shaped tunnel supports. *International Journal of Geomechanics*. 2018, vol. 18, no. 6.

22. Gospodarikov A. P., Nguyen C. T. Hyperstatic reaction method for calculations of tunnels with horseshoe-shaped cross-section under the impact of earthquakes. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2020, no. 19, pp. 179 — 188.

23. Do N. A., Dias D., Oreste P., Maigrea I. D. The behaviour of the segmental tunnel lining studied by the hyperstatic reaction method. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2014, vol. 18, no. 4, pp. 489 — 510.

24. Chen K., Peng F. L. An improved method to calculate the vertical earth pressure for deep shield tunnel in Shanghai soil layers. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 75, pp. 43 — 66.

25. Takano Y. H. Guidelines for the design of shield tunnel lining. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2000, vol. 15, no. 3, pp. 303 — 331.

26. TCVN Ham đuong sat và ham đuong ô tô — Tiêu chuan thiêt kê. 4527 — 1988.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нгуен Тай Тиен[1] — аспирант, e-mail: taitien12@gmail.com,
Карасев Максим Анатольевич[1] — д-р техн. наук, доцент,
e-mail: karasevma@gmail.com,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.
Для контактов: Карасев М.А., e-mail: karasevma@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nguyen Tai Tien[1], Graduate Student,
e-mail: taitien12@gmail.com,
M.A. Karasev[1], Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: karasevma@gmail.com,
[1] Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: M.A. Karasev, e-mail: karasevma@gmail.com.

Получена редакцией 08.12.2020; получена после рецензии 18.12.2020; принята к печати 10.05.2021.
Received by the editors 08.12.2020; received after the review 18.12.2020; accepted for printing 10.05.2021.