

## РОЗРОБКА ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ТУНЕЛІВ КОЛОВОГО ОКРЕСЛЕННЯ

У статті розглянуті теоретичні основи модифікованого методу розрахунку тунелів колового окреслення.

*Ключові слова:* розрахунок, тунель, момент, нормальна сила

### Вступ

Існуючі на даний час методики розрахунку конструктивних елементів тунелів колового окреслення базуються на побудові розрахункових схем конструкції та інтерпретації оточуючого масиву з деякими припущеннями, які спрощують його реальну поведінку. Але існує і підхід, який значно ускладнює аналітичну роботу по відшукуванню напружено-деформованого стану (НДС) тунельної конструкції шляхом відкидання гіпотез та припущень при побудові розрахункової моделі. Це виражається у застосуванні просторових моделей та інтерпретації масиву ґрунту, як середовища із складними характеристиками. Таким чином, задача забезпечення міцності через пошуку НДС стає складною науковою задачею, яка не розроблена у практичних інженерних методиках.

Важливим критичним зауваженням для застосування пластинчастих та об'ємних схем при пошуку міцності тунельних конструкцій без наявності нерегулярності та неоднорідності (перегінні та станційні тунелі, гірські тунелі різного окреслення тощо) є те, що підвищення складності моделі не є завжди доцільним. Врахування просторового фактору в моделях регулярних об'єктів, як відомо, є зайвим, притому що складність вирішення задачі пошуку НДС збільшується в декілька разів.

Таким чином, відкинуті на етапі розвитку розрахунків стержневі схеми тунельних конструкцій із заміною взаємодії в системі «кріплення – масив» і заміна їх на пластинчасті та об'ємні є дещо поспішною, так як стержневі схеми мають ряд переваг. Так, основною перевагою є можливість створення інженерної методики, яка вирізняється значною простотою та алгоритмічністю. Важливою перевагою також є те, що результатами НДС пластинчастих та об'ємних схем є напруження та переміщення, а оперування із такими факторами ніяк не регламентується ДБН. Наприклад, ДБН по залізобетонним конструкціям побудований на аналізі

таких силових факторів, як моменти та нормальні сили, і саме такі параметри можна отримати при застосуванні стержневих схем.

Особливу критику стержневих схем складає ряд обговорень значного спрощення взаємодії кріплення з масивом, заміну його пружними стержнями, силами тощо. Саме цьому варто приділити особливу увагу, так як розробка теоретичних положень взаємодії в системі «кріплення – масив» надає змогу більш обґрунтовано застосовувати стержневі схеми при розрахунку тунельних конструкцій.

Саме тому, метою роботи є створення нового методу розрахунку тунельних конструкцій на основі стержневих схем, тобто створення теоретичних основ та інженерної методики, що є актуальною задачею.

У якості методу дослідження було обрано метод скінчених елементів (МСЕ). Його числова реалізація проводилася на основі професійного розрахункового комплексу Structure CAD for Windows, version 7.29 R.3 (SCAD).

### Розгляд методів розрахунку оправ колового окреслення

Методики розрахунку кріплень і оправ, розроблені окремими авторами й авторськими колективами, досить численні. Досить докладний огляд цих методик наводиться в роботах [1-3]. Слід згрупувати їх за принципом приналежності до тих або інших методів механіки.

В основу всіх методик розрахунку покладені відомі методи механіки твердого тіла, яке деформується (теорії пружності, пластичності й повзучості) або будівельної механіки (стержневих систем, пластин, оболонок). Розходження в методиках, заснованих на тих самих методах механіки, пояснюється, як правило, введенням різних гіпотез у постановку й рішення завдання. Оскільки розрахунок конструкцій кріплень і оправ супроводжується розрахунком напружень і деформацій у навколишньому породному масиві, зазначені методи механіки застосовуються як

для конструкцій, так і для масиву, причому в різному сполученні залежно від постановки задачі й необхідної точності розрахунків.

Для розрахунку конструкцій кріплень і оправ звичайно використовуються розповсюджені методи будівельної механіки стержневих систем (методи сил, переміщень, початкових параметрів, скінчених елементів). Тому що розрахунки в рамках цих методів в остаточному підсумку зводяться до рішення систем алгебраїчних рівнянь і легко можуть бути виконані на сучасних ЕОМ, застосування їх представляється перспективним. Методи механіки твердого тіла, яке деформується (частіше теорії пружності, рідше теорії пластичності й повзучості) мають обмежене застосування головним чином для розрахунку осесиметричних кільцевих конструкцій і рідше конструкцій неколового обрису. Вони забезпечують більше високу точність, але й більшу трудомісткість, часом неприйнятну для інженерних розрахунків.

Напружено-деформований стан навколишнього породного масиву при розрахунку його взаємодії з конструкціями досліджується методами механіки твердого тіла (гіпотеза загальних деформацій), але й тут найбільш доступними для інженерних розрахунків виявляються осесиметричні завдання. Тому в інженерних розрахунках для породного масиву застосовується загальновідома модель будівельної механіки – модель основи Вінклера (гіпотеза місцевих деформацій) [4]. Розвиватися перспективний метод будівельної механіки – метод скінчених елементів, коли породний масив моделюється системою дискретних елементів.

Зазначені методи розрахунку конструкцій і масиву застосовуються у вигляді трьох варіантів (сполучень), які й покладені в основу пропонованої класифікації методик розрахунку кріплень і оправ [5, 6]. Перший варіант – використання методів будівельної механіки для конструкції й масиву – конструкція розглядається у вигляді стержневої системи, а масив моделюється основою Вінклера. Другий варіант – використання методів механіки твердого тіла для конструкції й масиву – конструкція й масив досліджуються методами теорії пружності, рідше методами теорії пластичності й повзучості. Третій варіант – використання методів будівельної механіки для конструкції й методів механіки твердого тіла для масиву – конструкція моделюється стержневою системою, а для масиву використовуються моделі теорії пружності, рідше теорії пластичності й повзучості.

## Основні результати дослідження

Концептуальними відмінностями нового (модифікованого) методу Метродіпротрансу є наступні:

1. На відміну від метода Метродіпротрансу рішення систем і описання невідомих напружень і деформацій виконується не вирізанням вузлів, а рішенням конструкції в цілому. Це можливо за допомогою МСЕ, який не розбиває конструкцію, а знаходить невідомі, враховуючи змазок між частинами. Таким чином, знімається проблема, зв'язана з переміщенням пружної основи Фусса-Вінклера і гіпотези місцевих деформацій, яка автоматично перетворюється в гіпотезу загальних деформацій.

2. «Грунтові» стержні (стержні еквівалентної жорсткості) розглядаються у загальному випадку як пружно-пластичні тіла, що міняють деформаційні властивості із-за рівня напружень.

3. Розбивка криволінійної осі тунелю в загальному випадку не обмежується, але підбирається так, щоб відповідати умовам вірної дискретизації [7].

4. Закріплення стержнів еквівалентної жорсткості – шарнірно нерухоме із умови існування ґрунту.

5. Постановка стержнів по всьому контуру. В першому приближенні – знаходження стержнів, які недопустимо розтягнулись і зруйнувались; в другому – знаходження стержнів в яких відбулися пластичні зміни.

6. Широка робота із шарнірами, які є конструктивними, наприклад, шарніри між елементами оправи на відміну від штучних шарнірів методу сил, на якому базується метод Метродіпротрансу.

Моделювання пружного відпору у вигляді стержнів еквівалентної жорсткості виконується з наступних міркувань. Безпосереднє забезпечення радіальних переміщень оправи, а звідси і інтенсивність пружного відпору, яка знаходилася перемноженням переміщення на коефіцієнт пружного відпору не зовсім вірно, хоча вищезгадане логічно впливає із гіпотези Фуса-Вінклера (гіпотеза прямої пропорційності напружень та деформацій), яка була вибрана в якості робочої гіпотези в попередніх розрахунках. У випадку безпосереднього забезпечення радіальних переміщень оправи головне не враховано, а саме: радіальне переміщення  $\delta$  від вертикального навантаження знаходиться без урахування взаємодії ґрунту за оправою, тобто без урахування його стиснення. Переміщення

$\delta$  інтерпретуються як миттєві переміщення оправи в ґрунт, що в реальному житті неможливо. Точка на оправі, під дією гірського вертикального тиску переміщується в сторону ґрунту, які мають пружні властивості, тобто переміщення отримані без урахування пружних властивостей ґрунту невірна.

В якості робочої гіпотези приймаємо гіпотезу місцевих деформацій (Фуса-Вінклера), промодельюємо ґрунт за оправою, пружність (як характеризується коефіцієнтом пружного відпору) стержнями еквівалентної жорсткості. Дані стержні, поставлені в границях пружного відпору, зможуть реально описати пружні властивості ґрунту, його здатність до стиску, а звідси і його пасивний тиск.

Кількість цих стержнів в процесі розрахунку буде мінятися, так як в стержнях, в яких утворюється розтягнення, будуть відкинуті і буде проведений перерахунок до тих пір, поки не будуть знайдені точні границі зони пружного відпору.

Площа еквівалентного стержня знаходиться за формулою

$$A = \frac{kl}{En}, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт пружного відпору;  $l$  – довжина стержня, дорівнює 1 м із умов зручності створення скінчено-елементної моделі;  $E$  – модуль пружності матеріалу оправи;  $n$  – кількість стержнів.

Площа стержня буде мінятися, так як кількість стержнів еквівалентної жорсткості буде мінятися. Діалог із присвоєнням властивостей стержнів в моделі виконується із перевіркою жорсткості.

Після присвоєння жорсткості моделі (рис. 1), розпочинається ітераційний процес перевірки нормальних сил та пошуку стержнів, в яких відбувається розтяг – ці стержні відкидаються і створюється нова уточнена модель (рис. 2).

Контроль нормальних сил дозволяє чітко та швидко відкинути стержневі елементи, які на епюрі нормальних сил мають знак «+» (пошук «зони відлипання»), так як ґрунт не може працювати на розтяг із отриманням уточненої моделі (див. рис. 2).

Із порівняння моментів (див. рис. 1 і 2, в), можна зробити висновок, що ітераційний процес відкидання зайвих стержнів значно впливає на перерозподіл силових факторів. Але застосування уточненої моделі є більш відповідним

до реального деформування колової оправи із оточуючим ґрунтом, але така модель коректно може застосовуватися лише для суцільної оправи, наприклад, монолітної.

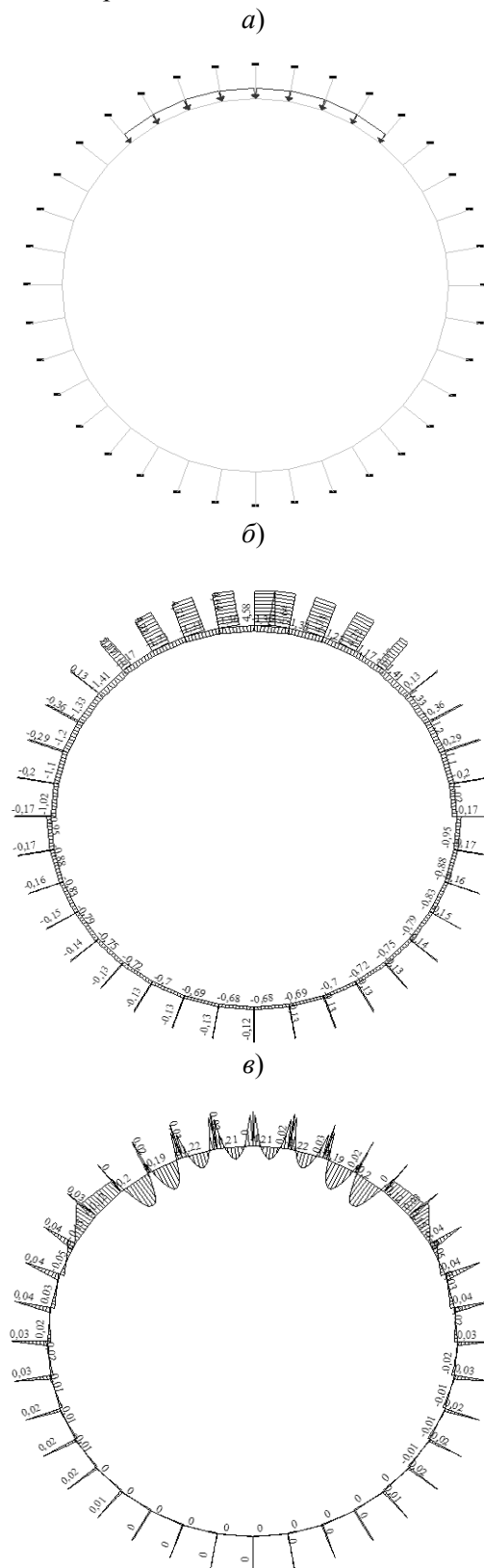


Рис. 1. Розрахункова модель (а) із епюрою нормальних сил (б) та епюрою моментів (в)

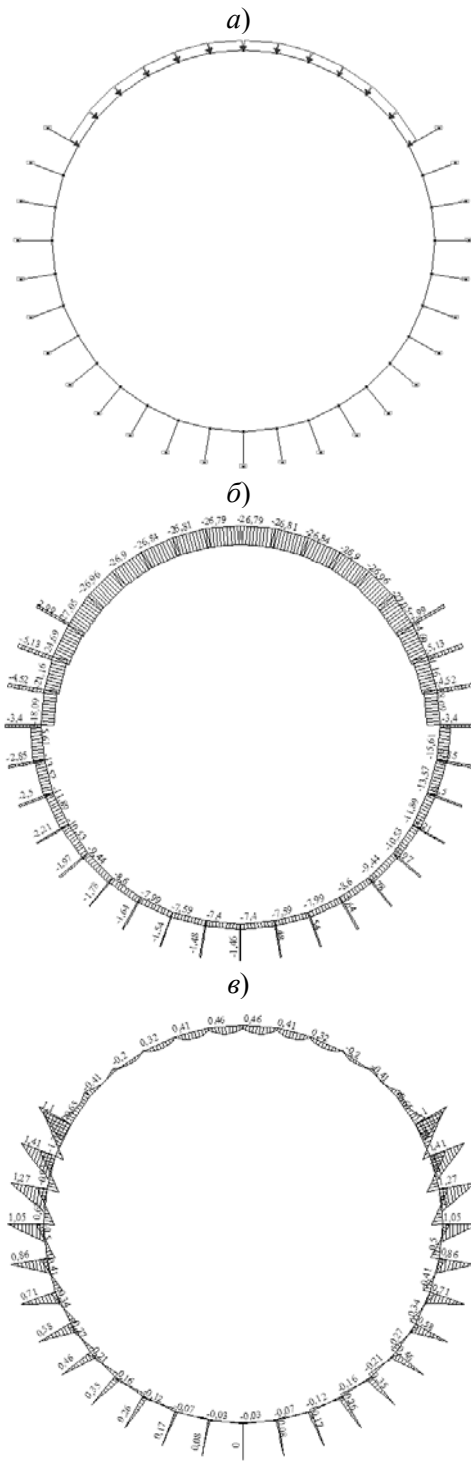


Рис. 2. Уточнена розрахункова модель (а) із епюрою нормальних сил (б) та епюрою моментів (в)

Тому проведемо розрахунок моделі із врізаними шарнірами (рис. 3).

### Висновки

1. Розглянуто та проаналізовано існуючі методи розрахунку колових оправ і з'ясовано, що, базуючись на діаметрально протилежних принципах взаємодії кріплення з масивом, ме-

тодики розрахунку є занадто складними у математичному плані і частіш усього не є інженерними. Проаналізовано основи методу Метродіпротрансу, як одного із найбільш вдалих інженерних методів, і доведено можливість створення нового методу на основі скінчених елементів із застосуванням деяких прийомів методу Метродіпротрансу.

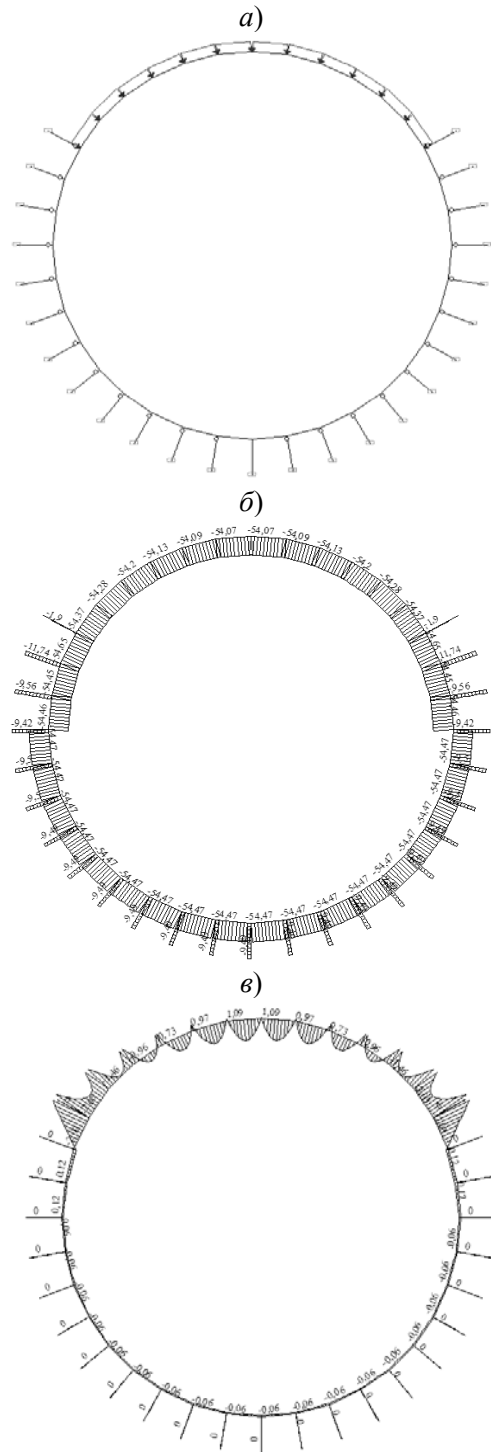


Рис. 3. Розрахункова модель із шарнірами (а) із епюрою нормальних сил (б) та епюрою моментів (в)

2. Розроблено концептуальні відмінності нового методу від методу Метродіпротрансу, що надало змогу коректно застосовувати його основи при моделюванні методом скінчених елементів (завдання жорсткостей, конструктивних шарнірів, пружно-пластичних властивостей ґрунтів тощо).

3. Більш детально розглянуто особливості завдання деформаційних характеристик оточуючого масиву для «ґрунтових» стержнів (стержнів еквівалентної жорсткості), а також завантаження стержневої моделі, якісно відмінної від моделі Метродіпротрансу.

4. Виконано ітераційні розрахунки нової моделі із покровою зміною кількості «ґрунтових» стержнів для відшукування розтягнутого стержня. Час на ітераційний процес займає хвилини, що значно економить термін розрахунку на відміну від методу Метродіпротрансу. Доведено, що врізання шарнірів між оправою та всіма стержнями еквівалентної жорсткості, як це проводилося в методі Метродіпротрансу із умов можливості рішення, не є коректним, так як схема є геометрично змінюваною, що не відповідає дійсному деформуванню конструкції оправи.

5. Теоретико-практичні основи нового методу дозволили виконати розрахунок із конструктивними шарнірами в оправі (між елементами оправи), що неможливо як у методі Метродіпротрансу, так і при розрахунку методом скінчених елементів для пластинчатих та об'ємних елементів. Розрахункова модель із конструктивними шарнірами в оправі більш

повно відповідає реальним конструкціям оправ без в'язів розтягнення

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Айвазов, Ю. Н. О методах расчета несущих конструкций транспортных тоннелей и метрополитенов [Текст] / Ю. Н. Айвазов // Строительство и архитектура. – 1969. – № 12. – С. 29-30.
2. Баклашов, И. В. Конструкции и расчет крепей и обделок [Текст] / И. В. Баклашов, О. В. Тимофеев. – М.: Недра, 1979. – 263 с.
3. Демешко, Е. А. Современные методы прочностных расчетов в метро- и тоннелестроении [Текст] / Е. А. Демешко и др. // Сб. трудов науч.-техн. конф. «Подземное строительство России на рубеже XXI века», Москва, 15-16 марта 2000. – М.: ТАР, 2000. – С. 200-207.
4. Даушвили, А. П. Расчет тоннельных обделок в матричной форме [Текст] / А. П. Даушвили. – М.: Транспорт, 1972. – 120 с.
5. Безухов, Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести [Текст] / Н. И. Безухов. – М.: Высшая школа, 1961. – 537 с.
6. Беркина, С. Н. Расчет обделки тоннеля произвольного очертания [Текст] / С. Н. Беркина // Строительная механика и расчет сооружений. – 1960. – № 5. – С. 32-37.
7. Карпиловский, В. С., SCAD для пользователя [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер. – К.: ВВП «Компас», 2000. – 332 с.

Надійшла до редколегії 01.02.2012.

Прийнята до друку 01.03.2012.

А. Л. ТЮТКИН, В. А. МІРОШНИК (ДПТ)

## РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ТОННЕЛЕЙ КРУГОВОГО ОЧЕРТАНИЯ

В статье рассмотрены теоретические основы модифицированного метода расчета тоннелей кругового очертания.

*Ключевые слова:* расчет, тоннель, момент, нормальная сила

A. L. TYUTKIN, V. A. MIROSHNIK (Dnipropetrovsk National University of Railway Transport)

## DEVELOPMENT OF THEORETICAL BASES OF THE MODIFIED CALCULATION METHOD OF CIRCULAR OUTLINE TUNNELS

In the article theoretical bases of the modified calculation method of circular outline tunnels are considered.

*Keywords:* calculation, tunnel, moment, normal force