ISSN 2413-6212 (Online), ISSN 2227-1252 (Print)
Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2024, № 26

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.42:624/042/.044-047.44

К. Є. ФЕДОРОВ[1*], О. Л. ТЮТЬКІН[2]

[1*] Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 353 29 33, ел. пошта kostia.fedoroff1@gmail.com, ORCID 0000-0002-3010-0489
[2] Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЇ СТАНЦІЇ МЕТРОПОЛІТЕНУ ПІЛОННОГО ТИПУ

Мета. Проведення критичного аналізу методів розрахунку напружено-деформованого стану конструкції станції метрополітену пілонного типу та обґрунтований вибір того з них, що дозволить врахувати складний взаємозв'язок елементів цієї конструкції та їхню взаємодію з оточуючим масивом. **Методика.** Для проведення критичного аналізу методів розрахунку напружено-деформованого стану проаналізовано конструкцію станції метрополітену пілонного типу. Також визначено основні особливості архітектурно-конструктивного рішення пілонної станції глибокого закладення. Аналіз елементів та загальної конструкції дозволив виявити важливі параметри, без врахування яких неможливе отримання близької до реальної картини напружено-деформованого стану. Проаналізувавши конструкцію станції пілонного типу глибокого закладення, визначено, що сутнісним параметром формування її напружено-деформованого стану є просторовий фактор. **Результати.** Викладено результати критичного аналізу методів розрахунку напружено-деформованого стану конструкції станції метрополітену пілонного типу під час її взаємодії із оточуючим масивом, представленого міцними породами (умови закладення метрополітену в м. Дніпрі). Визначено, що застосування плоских схем для розрахунку станцій пілонного типу глибокого закладення тягне за собою втрату адекватності реальній конструкції, але деякі їхні аспекти можливо використовувати і для просторового випадку. Доведено, що підхід із застосуванням чисельних методів, наприклад, методу скінченних елементів, а також створення скінченно-елементних просторових схем на основі об'ємних елементів є найбільш адекватними розрахунковій ситуації методиками розрахунку. **Наукова новизна.** Для станції пілонного типу глибокого закладення остаточно доведене застосування скінченно-елементних моделей, які максимально повно відображають просторовий фактор, що є сутнісним для такої конструкції. **Практична значимість.** Запропоновані в науковій роботі скінченно-елементні моделі станції пілонного типу глибокого закладення в міцних породах є найбільш адекватними реальній ситуації взаємодії конструкції з оточуючим масивом і можуть бути прийняті в якості розрахункових моделей для умов Дніпровського метрополітену.

Ключові слова: метрополітен; станція пілонного типу; напружено-деформований стан; методи розрахунку; просторовий фактор

Вступ

Станції метрополітену глибокого закладення в українських метрополітенах представлені в односклепінчастому та трьохсклепінчастому варіантах архітектурно-конструктивного рішення (Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютькін, 2005; 2012; Тютькін, 2020). Трьохсклепінчастий варіант, в свою чергу, поділяється на пілонну та колонну схеми, вибір яких ґрунтується на міцності ґрунту або породи оточуючого станцію масиву. Якщо окреслити межі існуючих варіантів за допомогою шкали міцності за проф. М. М. Протод'яконовим, то односклепінчасті станції проєктують в міцних породах з коефіцієнтом міцності f>6, колонні – в межах 6>f>1,5, пілонні – нижче значення f<1,5 (Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютькін, 2005; 2012).

Однак такі межі застосування типів станцій метрополітену глибокого закладення, що вважалися класичними і були основою для обрання конструкції, наразі дещо змінюються і коригуються. Причиною таких змін стало освоєння нових технологій спорудження станційних конструкцій, наприклад, у зв'язку з імплементацією Новоавстрійського методу спорудження тунелів (NATM), який успішно застосовувався

© К. Є. Федоров, О. Л. Тютькін, 2024 Creative Commons Attribution 4.0 International

в Європі ще з 1960-х років (Chapman, Metje, & Stärk, 2010), але впроваджений на об'єктах Дніпровського метрополітену лише в 2010-2020-х роках (Pshynko, Radkevych, Netesa, M., & Netesa, A., 2020).

Так, межа коефіцієнту міцності за проф. М. М. Протод'яконовим для пілонної станції змінилася, оскільки цей тип станції метрополітену глибокого закладення в м. Дніпрі запроєктовано в міцних породах f=6…10 (Тютькін, & Федоров, 2022). Станції метрополітену колонного типу глибокого закладення повністю змінили матеріал і проєктуються виключно з залізобетонних блоків суцільного або ребристого перерізу, але при цьому можуть бути застосовані при коефіцієнті міцності f<1,5 (Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютькін, 2005). Таким чином, область застосування кожного з типів станції розширилася, чому посприяли нові технології бетонування (в тому числі, і торкретування), гідроізоляції й розробки ґрунтового або породного масиву, а також нові конструкції.

Така ситуація, без сумніву, виражає позитивні здобутки галузі будівництва та її розвиток. Разом з тим, поява нових технологій та конструкцій станцій метрополітену тягне за собою і низку проблем, що пов'язані з невизначеністю їхнього впливу та експлуатації. Нові конструкції станцій обов'язково потребують наукового обґрунтування їхньої роботи, взаємозв'язку елементів та врахування взаємного впливу оточуючого масиву й підземного об'єкту (Петренко, В. Д., Тютькін, & Петренко, В. І., 2012; Банніков, Купрій, & Вотченко, 2021; Більченко, & Смолянюк, 2021).

Якщо у випадку станції односклепінчастого типу ці проблеми в силу однозначності конструкції виражені не настільки явно (Смолянюк, & Більченко, 2024), то це є сутнісним для трьохсклепінчастого варіанту, в якому взаємозв'язок елементів станційної конструкції та їхня взаємодія з масивом є визначальними. Саме тому обґрунтування конструкції станції пілонного типу глибокого закладення, а саме визначення за допомогою методів розрахунку її напружено-деформованого стану, є актуальною задачею.

Складність цієї задачі також полягає в тому, що вже проведені дослідження інших авторів для нових умов оточуючого масиву, тобто варіант закладення станції пілонного типу в міцних породах, не розглядався. В закордонному досвіді такий тип станції не є дуже розповсюдженим по причині тяжіння до мілкого закладення більшості метрополітенів світу (Kolymbas, 2005), а існуючі варіанти трьохсклепінчастих конструкцій складно порівнювати з вітчизняними (Svoboda, & Mašín, 2011; Do, & Dias, 2017; Федоров, & Тютькін, 2023). Це ще раз підкреслює потребу в наукових дослідженнях та їхню актуальність.

Мета

Метою наукової статті є проведення критичного аналізу методів розрахунку напружено-деформованого стану конструкції станції метрополітену пілонного типу та обґрунтований вибір того з них, що дозволить врахувати складний взаємозв'язок елементів цієї конструкції та їхню взаємодію з оточуючим масивом.

Методика

Для того, щоб обрати адекватний конструкції метод розрахунку, слід визначити важливі параметри, без врахування яких неможливе отримання близької до реальної картини напружено-деформованого стану. Відомо, що при застосуванні будь-якого матеріалу оправи архітектурно-конструктивна схема пілонної станції залишається незмінною (рис. 1-3).

Станція пілонного типу глибокого закладення представляє собою три тунелі колового (рис. 1-2) або неколового (рис. 3) окреслення, що розташовані в горизонтальній площині і розділені між собою пілонами. Цей особливий конструктивний елемент пілонної станції, який саме і надав їй назву, представляє собою або цілик нерозробленої породи, або бетонну чи залізобетонну конструкцію визначених загальним виглядом станції розмірів.

На відміну від колонної станції, в якій колонна є елементом, на який збираються навантаження і від масиву, і від перемички (прогону) та розімкнених кілець оправи, пілон більшою мірою сприймає навантаження від масиву. Однак, якщо проаналізувати конструкцію дільниці проходу (рис. 1-2, б), то слід відмітити й те, що він опосередковано, за рахунок перемички, також включений в сумісну роботу всієї станції і сприймає певну долю від перерозподілу навантаження.

Creative Commons Attribution 4.0 International © К. Є. Федоров, О. Л. Тютькін, 2024

ISSN 2413-6212 (Online), ISSN 2227-1252 (Print)
Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2024, № 26

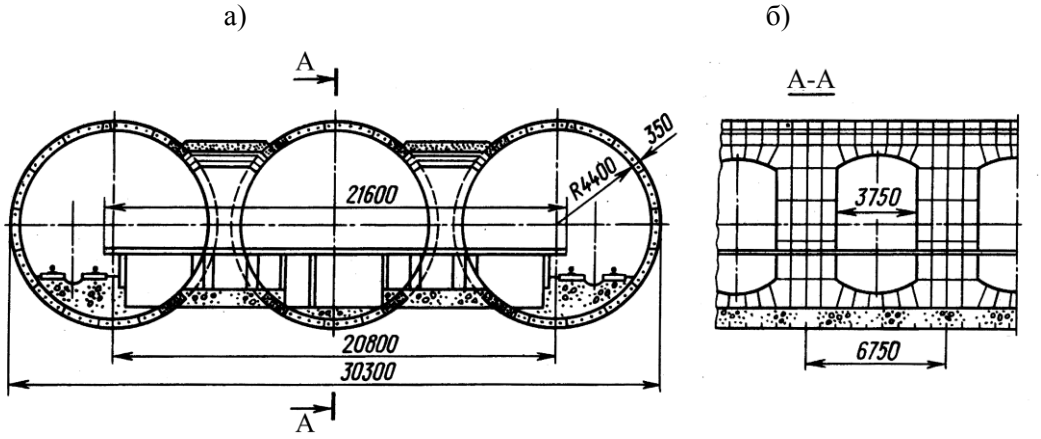


Рис. 1. Конструкція пілонної станції із чавунною оправою (а) та дільниці «прохід – пілон» (б)
(з джерела Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютькін, 2012)

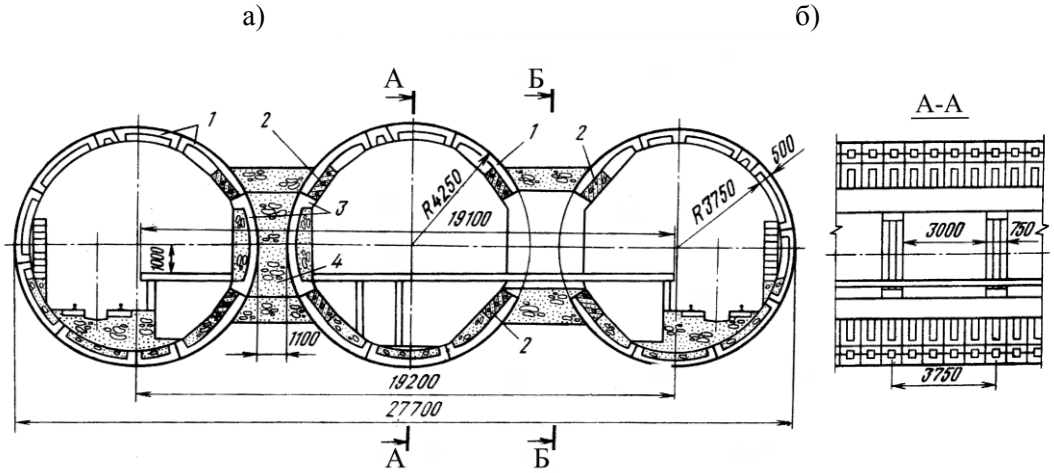


Рис. 2. Конструкція пілонної станції із залізобетонною оправою (а) та дільниці «прохід – пілон» (б)
(з джерела Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютькін, 2012)

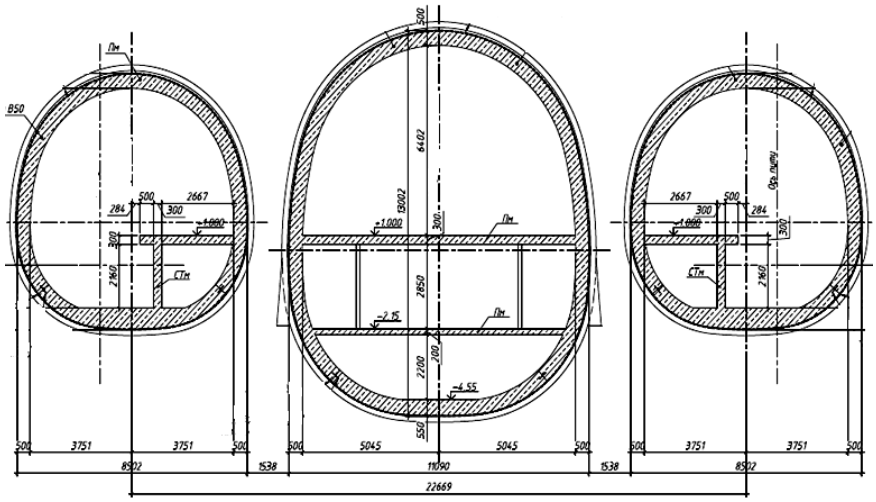


Рис. 3. Конструкція пілонної станції із монолітного залізобетону в дільниці пройому (варіант NATM)
(з джерела Федоров, & Тютькін, 2023)

© К. Є. Федоров, О. Л. Тютькін, 2024 Creative Commons Attribution 4.0 International

Роль пілону на початку створення архітектурно-конструктивного рішення станції пілонного типу глибокого закладення, коли він залишався ґрунтовим, була лише роздільною. Тобто, пілон лише розділяв у просторі боковий і середній тунелі, сприймаючи частину вертикального гірського тиску, який формувався над оправами виробок великого окреслення (8,5 або 9,5 м). Розвиток пілонів для варіанту станції пілонного типу з чавунних тюбінгів та залізобетонних блоків детально наведено в посібнику (Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютькін, 2012) (рис. 4) та монографії (Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютькін, 2004).

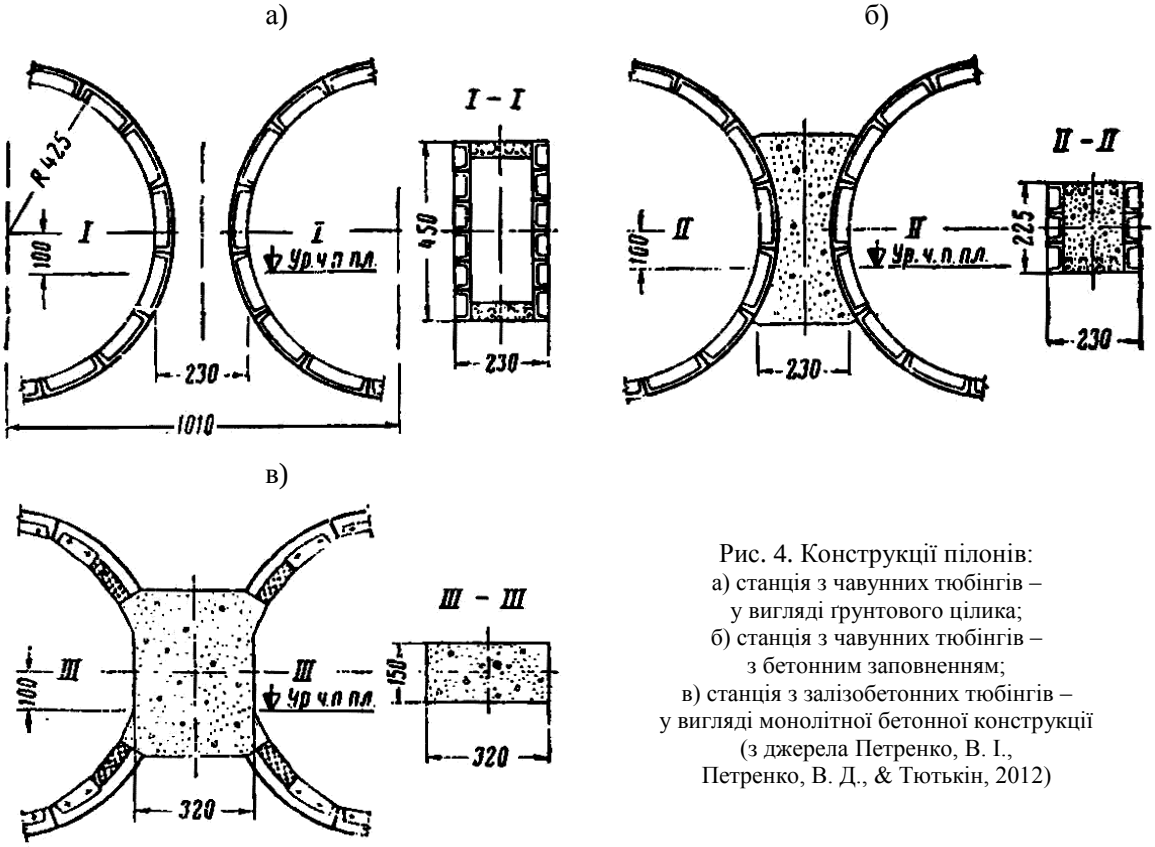


Рис. 4. Конструкції пілонів:
а) станція з чавунних тюбінгів –
у вигляді ґрунтового цілика;
б) станція з чавунних тюбінгів –
з бетонним заповненням;
в) станція з залізобетонних тюбінгів –
у вигляді монолітної бетонної конструкції
(з джерела Петренко, В. І.,
Петренко, В. Д., & Тютькін, 2012)

Вже заміна ґрунтового цілику бетонним заповненням (рис. 4, б) кардинальним чином змінила конструкцію пілонної станції. Ці зміни полягають в тому, що ґрунт, який для класичного варіанту був слабким (f<1,5 за шкалою міцності за проф. М. М. Протод'яконовим), замінено бетоном, що має модуль пружності (E, МПа) на декілька порядків більше при значному підвищенні міцності на стиск (R, МПа). Це призвело до того, що дільниця станції із чергуванням пілонів та проходів (див. рис. 1 і 2, б) отримала більшу жорсткість на відміну від варіанту, в якому пілони були ґрунтовими циліками. Окрім цього, чавунна оправа і бетон, що замінив ґрунт пілону (рис. 4, б) отримала чітко виражений зв'язок, тобто, на відміну від ґрунтового пілону, бетонне заповнення пов'язує три кільця чавунних тюбінгів в єдиний елемент. Разом з тим, більша міцність та менша деформативність бетонного заповнення дозволили зменшити поздовжній розмір пілону в 2 рази (з 6 до 3 кілець, тобто з 4,5 до 2,25 м).

Якщо аналізувати конструкцію пілонної станції із монолітного залізобетону (варіант NATM), спроєктовану для Дніпровського метрополітену (рис. 3), то заповнення пілону бетоном не відбувається, проте деформативні та міцнісні характеристики плагіограніту (інженерно-геологічні умови м. Дніпра) доволі схожі з характеристиками бетону. На відміну від класичного варіанту станції пілонного типу в слабких ґрунтах, варіант NATM, що споруджується в міцних, за роботою пілону схожий саме на варіант ґрунтового цілику (рис. 4, а).

Creative Commons Attribution 4.0 International © К. Є. Федоров, О. Л. Тютькін, 2024

Однак, не можна вважати, що у всіх представлених варіантах станції пілонного типу робота бокових і середнього тунелю на дільниці «прохід – пілон» є незалежною. Такий висновок можна зробити, якщо проаналізувати роботу проходу і особливо перехідної зони між проходом та пілоном. Важливим під час такого аналізу є визначення ролі поздовжніх елементів, що пов'язують кільця оправи (рис. 1, б) або розмикають їх у залізобетонному варіанті (рис. 2, б). Перемичка і плита над проходом, які мають значні розміри (700…1000 мм), пов'язують оправу бокового тунелю на дільниці «прохід – пілон», а, з огляду на формування навантаження, і сприймають його частину, що дорівнює навантаженню на площу пілону, і перерозподіляють його між сусідніми оправами і пілонами. Саме такий перерозподіл навантажень і, відповідно, напруженого стану між всіма елементами конструкції станції пілонного типу (кільцями оправи, перемичкою та стійками (рамою) проходу, плитою проходу, пілоном), що деформований стан дільниці «прохід – пілон» та глухої дільниці є майже однорідним.

У варіанті конструкції пілонної станції із залізобетонною оправою, яка успішно застосовувалася під час будівництва Київського метрополітену в складних і надто складних інженерно-геологічних та гідрогеологічних умовах (обводнені супіски та суглинки, f=0,8…0,9 за шкалою міцності за проф. М. М. Протод'яконовим) поздовжні елементи є головними у всій конструкції. Такий варіант станції був реалізований у двох видах: 1) із перемичкою над проходом (збірний або збірно-монолітний варіант); 2) з монолітною балкою, що споруджувалася по всій довжині станції. Ці поздовжні елементи поєднували кільця станційної конструкції, створюючи перерозподіл деформованого стану за рахунок його кардинального зменшення і приведення до однорідного по всій довжині станції.

В конструкції пілонної станції із монолітного залізобетону (варіант NATM) поздовжніх елементів немає, тому може виникнути висновок, що її елементи не взаємопов'язані. Проте, це не так, оскільки двошарова оправа, що притаманна NATM, створюється суцільною і не має розривів на дільниці «прохід – пілон», тобто шар торкрет-бетону повністю покриває і пілон, і прохід, а також формує плиту над ним.

Як показує проведений аналіз, основною тенденцією, яка склалася під час проєктування станцій пілонного типу глибокого закладення, є тенденція максимального взаємного зв'язку елементів на дільниці «прохід – пілон» для успішного перерозподілу навантаження і формування якомога більш однорідного напружено-деформованого стану в системі «станційна конструкція – оточуючий масив». Таким чином, основним параметром нормальної експлуатації станції пілонного типу глибокого закладення є вивільнення просторового фактору, тобто активного включення в просторову роботу всіх елементів станційної конструкції.

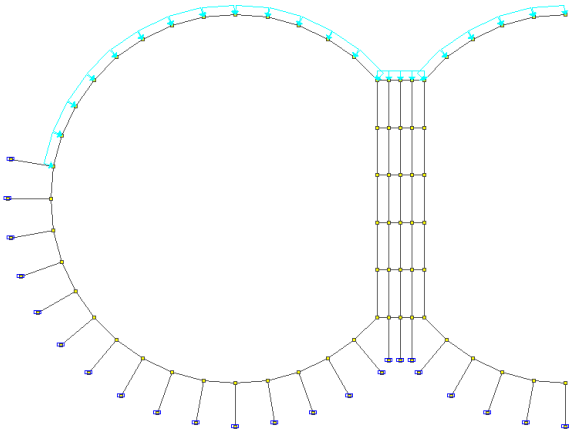
Результати

Проаналізувавши конструкцію станції пілонного типу глибокого закладення та визначивши, що сутнісним параметром формування її напружено-деформованого стану є просторовий фактор, слід констатувати, що будь-які плоскі схеми не є адекватними конструкції, що досліджується. Але відмова від плоских схем, хоча і обґрунтована обов'язковим врахуванням просторового фактору, не повинна бути категоричною. Безсумнівно, що застосування плоских схем для розрахунку станцій пілонного типу глибокого закладення тягне за собою втрату адекватності реальній конструкції, але деякі аспекти плоских схем (рис. 5, а) можливо використовувати і для просторового випадку (Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютькін, 2004).

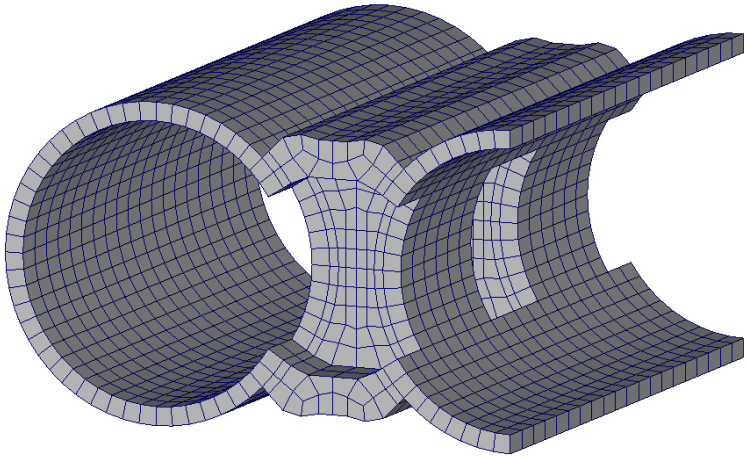
Слід також наголосити на тому факті, що застосування просторових схем, наприклад, реалізованих в розрахункових комплексах, надає змогу отримувати виключно напружено-деформований стан, який неможливо перетворити адекватним чином на картини силових факторів, тобто згинальних моментів та нормальних сил. Це пов'язано з тим, що просторові схеми, що створюються в рамках чисельних методів, наприклад, методу скінченних елементів, частіш усього базуються на застосуванні об'ємних елементів (рис. 5, б і в), які виключають прямий аналіз згинальних моментів та нормальних сил по причині метрики 3D-моделі. Саме тому стрижневі плоскі або просторові моделі, що створені на основі плоских, ще мають розрахунковий потенціал і можуть в подальшому розглядатися в якості робочих розрахункових схем станцій метрополітену.

© К. Є. Федоров, О. Л. Тютькін, 2024 Creative Commons Attribution 4.0 International

а)



б)



в)

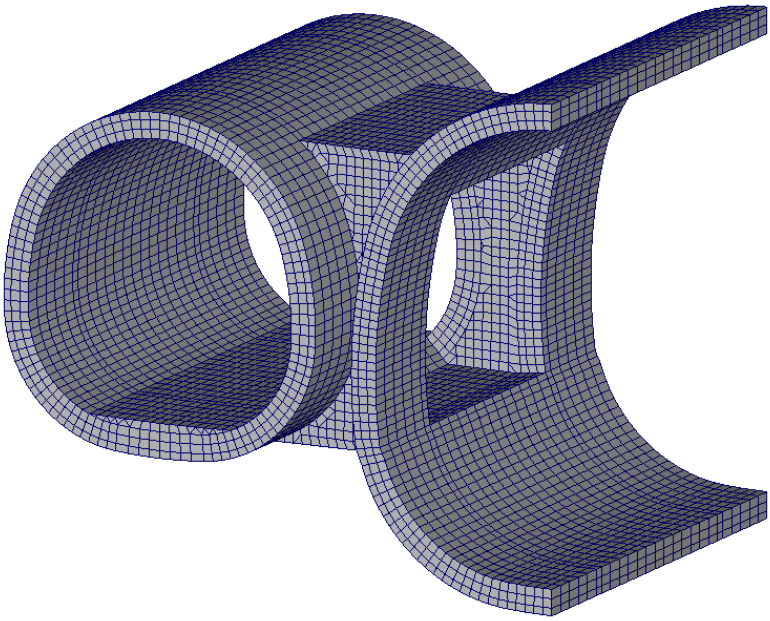


Рис. 5. Скінченно-елементні моделі станції пілонного типу в розрахунковому комплексі SCAD:
а) плоска стрижнева модель (модифікований метод Метродіпротрансу, реалізований в методі скінченних елементів);
б) фрагмент об’ємної моделі (варіант із залізобетонною оправою;
в) фрагмент об’ємної моделі (варіант NATM із монолітного залізобетону)

Creative Commons Attribution 4.0 International © К. Є. Федоров, О. Л. Тютькін, 2024

Якщо відмова від плоских та просторових стрижневих схем не є категоричною, відмова від аналітичного підходу визначення напружено-деформованого стану станції пілонного типу глибокого закладення, як й інших конструкцій, що втілюють просторовий фактор, є однозначною. Критика цієї відмови від представників аналітичного підходу до розрахунку підземних конструкцій не є аргументованою, оскільки запропоновані аналітичні методи будівельної механіки настільки спрощують підземний об'єкт, що не можна вважати результати, отримані під час аналітичного розрахунку, адекватними реальній ситуації формування напружено-деформованого стану. Розуміючи складність самої конструкції, взаємодія елементів якої базується на просторовому факторі й перерозподілі навантаження, а також складність взаємодії такої конструкції з оточуючим масивом, слід зробити однозначний висновок, що лише чисельні методи, наприклад, метод скінченних елементів, реалізований в потужному розрахунковому комплексі, надають змоги виконати розрахунок в доволі повному обсязі.

Відмовляючи аналітичному підходу в області дослідження станції пілонного типу глибокого закладення, автори також розуміють його важливість як деякого еталону, який можна застосувати для такої складної конструкції лише частково. Також, як було проаналізовано вище, слід розуміти, що просторова скінченно-елементна модель станції пілонного типу, що створена на основі об'ємних елементів типу призми та тетраедру, потребує перегляду якщо не будівельних норм, що базуються на оперуванні згинальними моментами й нормальними силами, то хоча б нормативних методик оцінювання міцності торкрет-бетону, бетону й залізобетону оправи. Розвиток в цій області вбачається в нормуванні порівняння отриманих значень напруженого стану в об'ємних елементах просторової моделі з еквівалентними напруженнями, що відповідають межі міцності вказаних матеріалів.

Наукова новизна та практична значимість

Наукову новизну роботи складає те, що для станції пілонного типу остаточно доведене застосування скінченно-елементних моделей, які максимально повно відображають просторовий фактор, що є сутнісним для такої конструкції.

Практична значимість полягає в тому, що запропоновані в науковій роботі скінченно-елементні моделі станції пілонного типу глибокого закладення в міцних породах є найбільш адекватними реальній ситуації взаємодії конструкції з оточуючим масивом і можуть бути прийняті в якості розрахункових моделей для умов Дніпровського метрополітену.

Висновки

В статті викладено результати критичного аналізу методів розрахунку напружено-деформованого стану конструкції станції метрополітену пілонного типу. В його ході доведено, що сутнісним параметром формування напружено-деформованого стану такої конструкції є просторовий фактор, а також взаємодія з оточуючим масивом.

Доведено, що підхід із застосуванням чисельних методів, наприклад, методу скінченних елементів, а також створення скінченно-елементних просторових схем на основі об'ємних елементів є найбільш адекватними розрахунковій ситуації методиками розрахунку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Chapman, D., Metje, N., & Stärk, A. (2010). *Introduction to Tunnel Construction*. London: Spon Press.

Do, N., & Dias, D. (2017). A comparison of 2D and 3D numerical simulations of tunnelling in soft soils. *Environmental Earth Sciences*, 76, 1-12. DOI: https://doi.org/10.1007/s12665-017-6425-z

Kolymbas, D. (2005). *Tunnelling and tunnel mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Pshynko, O., Radkevych, A., Netesa, M., & Netesa, A. (2020). Problems of development of an underground transport infrastructure of cities. *Transport Problems*, 15(1), 81-91. DOI: https://doi.org/10.21307/tp-2020-008

Svoboda, T., & Mašín, D. (2011). Comparison of displacement field predicted by 2D and 3D finite element modelling of shallow NATM tunnels in clays. *Geotechnik*, 34(2). DOI: https://doi.org/10.1002/gete.201000009

Банніков, Д. О., Купрій, В. П., & Вотченко, Д. Ю. (2021). Закономірності напружено-деформованого стану оправ під час будівництва пілонної станції метрополітену. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 19, 19-27. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233871

Більченко, А. В., & Смолянюк, Н. В. (2021). Причини порушення геотехнологій при будівництві тунелів і метрополітенів. *Вісник Харківського*

© К. Є. Федоров, О. Л. Тютькін, 2024
Creative Commons Attribution 4.0 International

національного автомобільно-дорожнього університету, 93, 74-82. DOI: https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.93.0.74

Петренко, В. Д., Тютькін, О. Л., & Петренко, В. І. (2012). Огляд аналітичних і експериментальних методів дослідження взаємодії масиву і кріплення. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 1, 75-81. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2012/25968

Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютькін, О. Л. (2004). *Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення*. Дніпропетровськ: Наука і освіта.

Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютькін, О. Л. (2005). *Сучасні технології будівництва метрополітенів в Україні*. Дніпропетровськ: Наука і освіта.

Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютькін, О. Л. (2012). *Станції метрополітену: конструкції та спорудження: навчальний посібник*. Дніпропетровськ: Вид-во «Нова ідеологія».

Смолянюк, Н. В., & Більченко, А. В. (2024). Чисельний аналіз односклепінчастої станції мілкого закладення Харківського метрополітену. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 25, 109-118. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2024/303474

Тютькін, О. Л. (2020). *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій*. Дніпро: Журфонд.

Тютькін, О. Л., & Федоров, К. Є. (2022). Аналіз зміни концепції спорудження пілонної станції метрополітену в скельних породах. *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»*, Дніпро, 48-49.

Федоров, К., & Тютькін, О. (2023). Порівняльний аналіз конструктивних схем станції метрополітену пілонного типу. *Матеріали науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених*. Дніпро: ПДАБА, 336-338.

K. YE. FEDOROV[1*], O. L. TIUTKIN[2]

[1*] Department «Transport infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 353 29 33, e-mail kostia.fedoroff1@gmail.com, ORCID 0000-0002-3010-0489
[2]Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

CRITICAL ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING THE STRESS-STRAIN STATE OF THE PYLON-TYPE METRO STATION STRUCTURE

Purpose. Carrying out a critical analysis of the methods for calculating the stress-strain state of the structure of the pylon-type metro station and the justified choice of one of them, which will allow taking into account the complex interrelationship of the elements of this structure and their interaction with the surrounding massif. **Methodology.** To carry out a critical analysis of methods for calculating the stress-strain state, the structure of the pylon-type metro station was analyzed. Also, the main features of the architectural and constructive solution of the deep laying pylon station are determined. The analysis of the elements and the general structure allowed identifying important parameters, without taking into account of which it is impossible to obtain a close to the real picture of the stress-strain state. Having analyzed the structure of the pylon-type station of deep laying, it was determined that the essential parameter of the formation of its stress-strain state is the spatial factor. **Findings.** The results of a critical analysis of methods for calculating the stress-strain state of the structure of the pylon-type metro station during its interaction with the surrounding massif represented by solid rocks (the conditions of laying the metro in the city of Dnipro) are presented. It was determined that the use of flat schemes for the calculation of pylon-type stations of deep laying entails a loss of adequacy to the real structure, but some aspects of the flat schemes can be used for the spatial case as well. It has been proven that the approach using numerical methods, for example, the finite element method, as well as the creation of finite-element spatial schemes based on volumetric elements, are the most adequate calculation methods for the calculation situation. **Originality.** For a pylon-type station of deep laying, the use of finite-element models, which fully reflect the spatial factor that is essential for such a design, has been finally proven. **Practical value.** The finite-element models of the pylon-type station of deep laying in solid rocks proposed in the scientific work are the most adequate to the real situation of interaction of the structure with the surrounding massif and can be accepted as calculation models for the conditions of the Dnipro metro.

Keywords: metro; pylon-type station; stress-strain state; calculation methods; spatial factor

Creative Commons Attribution 4.0 International © К. Є. Федоров, О. Л. Тютькін, 2024

REFERENCES

Chapman, D., Metje, N., & Stärk, A. (2010). *Introduction to Tunnel Construction*. London: Spon Press. (in English)
Do, N., & Dias, D. (2017). A comparison of 2D and 3D numerical simulations of tunnelling in soft soils. *Environmental Earth Sciences*, 76, 1-12. DOI: https://doi.org/10.1007/s12665-017-6425-z (in English)
Kolymbas, D. (2005). *Tunnelling and tunnel mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. (in English)
Pshynko, O., Radkevych, A., Netesa, M., & Netesa, A. (2020). Problems of development of an underground transport infrastructure of cities. *Transport Problems*, 15(1), 81-91. DOI: https://doi.org/10.21307/tp-2020-008 (in English)
Svoboda, T., & Mašín, D. (2011). Comparison of displacement field predicted by 2D and 3D finite element modelling of shallow NATM tunnels in clays. *Geotechnik*, 34(2). DOI: https://doi.org/10.1002/gete.201000009 (in English)
Bannikov, D. O., Kuprii, V. P., & Votchenko, D. Yu. (2021). Zakonomirnosti napruzheno-deformovanoho stanu oprav pid chas budivnytstva pilonnoi stantsii metropolitenu. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 19, 19-27. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233871 (in Ukrainian)
Bilchenko, A. V., & Smolianiuk, N. V. (2021). Prychyny porushennia heotekhnolohii pry budivnytstvi tuneliv i metropoliteniv. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, 93, 74-82. DOI: https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.93.0.74 (in Ukrainian)
Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., & Petrenko, V. I. (2012). Ohliad analitychnykh i eksperymentalnykh metodiv doslidzhennia vzaiemodii masyvu i kriplennia. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 1, 75-81. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2012/25968 (in Ukrainian)
Petrenko, V. I., Petrenko, V. D., & Tiutkin, O. L. (2004). *Rozrakhunok trysklepinchastykh stantsii metropolitenu hlybokoho zakladennia*. Dnipropetrovsk: Nauka i osvita. (in Ukrainian)
Petrenko, V. I., Petrenko, V. D., & Tiutkin, O. L. (2005). *Suchasni tekhnolohii budivnytstva metropoliteniv v Ukraini*. Dnipropetrovsk: Nauka i osvita. (in Ukrainian)
Petrenko, V. I., Petrenko, V. D., & Tiutkin, O. L. (2012). *Stantsii metropolitenu: konstruktsii ta sporudzhennia: navchalnyi posibnyk*. Dnipropetrovsk: Vyd-vo «Nova ideolohiia». (in Ukrainian)
Smolianiuk, N. V., & Bilchenko, A. V. (2024). Chyselnyi analiz odnosklepinchastoi stantsii milkoho zakladennia Kharkivskoho metropolitenu. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 25, 109-118. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2024/303474 (in Ukrainian)
Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstruktsii*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
Tiutkin, O. L., & Fedorov, K. Ye. (2022). Analiz zminy kontseptsii sporudzhennia pilonnoi stantsii metropolitenu v skelnykh porodakh. *Materialy VIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka»*, Dnipro, 48-49. (in Ukrainian)
Fedorov, K., & Tiutkin, O. (2023). Porivnialnyi analiz konstruktyvnykh skhem stantsii metropolitenu pilon-noho typu. *Materialy naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv i molodykh vchenykh*. Dnipro: PDABA, 336-338. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 07.10.2024.
Прийнята до друку 28.10.2024.

© К. Є. Федоров, О. Л. Тютькін, 2024 Creative Commons Attribution 4.0 International