

УДК 625.42:624.166.8-027.28

К. Є. ФЕДОРОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 353 29 33, ел. пошта kostia.fedoroff1@gmail.com, ORCID 0000-0002-3010-0489

Обґрунтування конструкції станції метрополітену пілонного типу в скельних породах при варіюванні ширини пілонної частини

Мета. Автор ставить за мету провести чисельний аналіз методом скінченних елементів конструкції станції пілонного типу, що зводиться в скельних породах Новоавстрійським методом спорудження тунелів (NATM), й провести її обґрунтування під час варіювання ширини пілонної частини, визначивши залежності компонент напружено-деформованого стану. **Методика.** Визначено, що станція метрополітену пілонного типу, що досліджується, є конструкцією, яка має явну неоднорідність структури. Проведений детальний аналіз конструктивного рішення системи «пілон – прохід» станції метрополітену пілонного типу, що споруджується NATM. Обґрунтовано, що відображення неоднорідної структури станції метрополітену пілонного типу із відтворенням системи «пілон – прохід» є завданням математичного моделювання на основі методу скінченних елементів. За допомогою розрахункового професійного комплексу Structure CAD розроблено скінченно-елементні моделі станції пілонного типу із варіюванням ширини пілонної частини. **Результати.** Отримано результати напружено-деформованого стану комбінованої оправи станції метрополітену пілонного типу за допомогою скінченно-елементних моделей із варіацією ширини пілону. Доведено, що для станції метрополітену пілонного типу при варіації ширини пілону $b_{\text{пил}}$ деформований стан залишається однорідним. Якісний аналіз шістьох компонент напружено-деформованого стану при варіації ширини пілону доводить, що вплив ширини пілону є локальним і загасає в околиці 1,0...1,2 м. Проаналізовані залежності є лінійними або поліноміальними відповідно для різних компонент напруженого й деформованого стану і дозволяють обґрунтувати ширину пілону, що забезпечує міцність станційної конструкції. **Наукова новизна** характеризується вперше отриманими залежностями напружено-деформованого стану комбінованої оправи станції метрополітену пілонного типу при варіації ширини $b_{\text{пил}}$. **Практична значимість** полягає в проведенні низки розрахунків під час математичного моделювання методом скінченних елементів із проведенням аналізу міцності станційної конструкції та наданням рекомендацій щодо вибору її розмірів.

Ключові слова: метрополітен; станція пілонного типу; скельні породи; напружено-деформований стан; метод скінченних елементів; Новоавстрійський метод спорудження тунелів

Вступ

Наукове обґрунтування підземних об'єктів має об'єктивно складний аналітичний перебіг, оскільки, наприклад, станція метрополітену пілонного типу є конструкцією, яка має неоднорідність структури [1, 2]. Саме наявність ослаблених ділянок, якими є проходи, й підсилені частини конструкції, якими є пілони (система «пілон – прохід»), потребує особливих підходів під час математичного моделювання, що направлені на відображення складної взаємодії станційної конструкції [6, 11].

Можливість створення в ході чисельного аналізу математичних моделей, що характеризуються складним й нерегулярним розподілом деформаційних характеристик і, відповідно, неоднорідністю структури, дозволяє врахувати основні особливості конструкції станції метро-

політену пілонного типу й трисклепінчастих підземних об'єктів взагалі [2, 10, 12]. Розрахункові комплекси, які використовуються під час чисельного аналізу, дозволяють таке врахування на етапі створення геометрії моделі (врахування структури трисклепінчастої станційної конструкції) із подальшим наданням різних деформаційних характеристик [6–8].

Система «пілон – прохід» в станції метрополітену пілонного типу, що зводиться в скельних породах Новоавстрійським методом спорудження тунелів (далі – NATM), є суцільною замкненою конструкцією, яка поєднана відповідно з комбінованою (тимчасовою і постійною) оправою бокового й середнього станційних тунелів. При цьому комбінована оправа обрамлює систему «пілон – прохід», тобто вся станційна конструкція є суцільною (рис. 1).

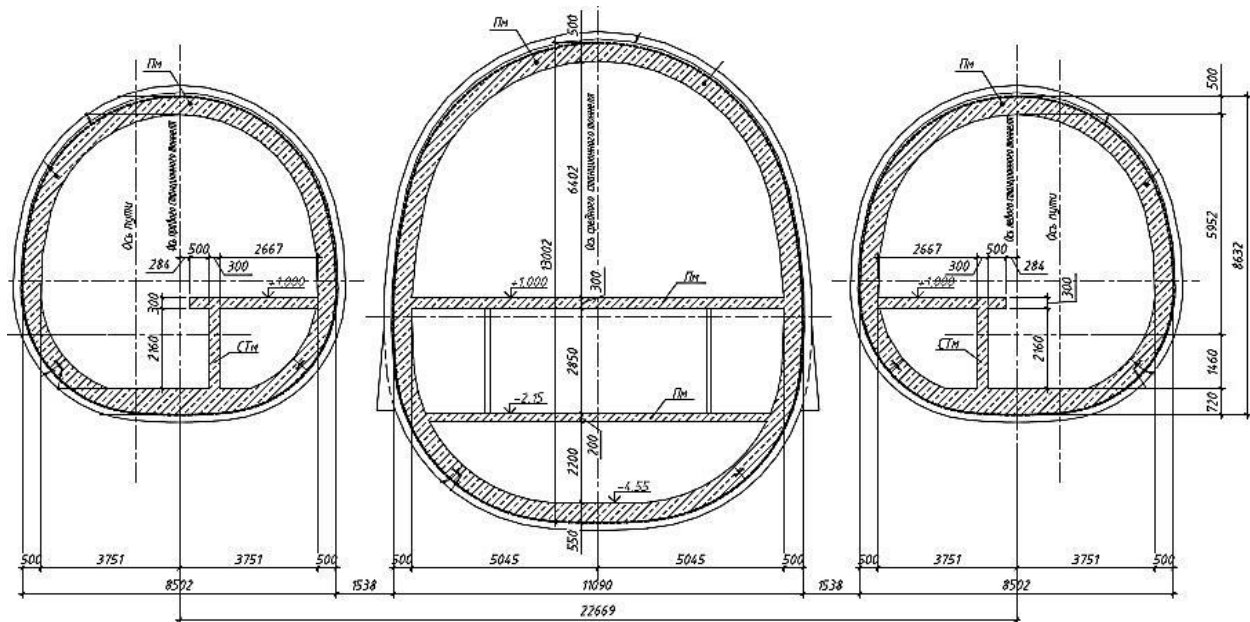


Рис. 1. Конструкція трисклепінчастої станції із монолітного бетону в дільниці пілону

Fig. 1. Construction of a three-arch station made of monolithic concrete in the pylon section

Не викликає сумнівів, що відображення неоднорідної структури станції метрополітену пілонного типу із відтворенням системи «пілон – прохід» є завданням математичного моделювання [3–5]. Причому після проведення чисельного аналізу змодельованих скінченно-елементних моделей потребується розгляд всіх компонент напруженого і найбільш характерних компонент деформованого стану [9]. Відсутність аналізу хоча б однієї компоненти напруженого стану не дозволяє зробити однозначний висновок про міцність комбінованого кріплення станції метрополітену пілонного типу під час варіювання ширини пілонної частини.

Більш детальний аналіз конструктивного рішення системи «пілон – прохід» станції метрополітену пілонного типу, що споруджується NATM в скельних породах, надає можливість свідчити, що його проектна ширина навіть більше ніж ширина пілону, що був виконаний з ґрунту у варіанті станції із збірною чавуну ($b_{\text{під}} = 4,5$ м) [1]. З позиції формування напружено-деформованого стану таке збільшення ширини пілону є позитивним тому, що він наближається до конструкції суцільної поздовжньої стіни. Таке рішення в конструкції станцій метрополітену глибокого закладення пілонного типу мало назву «глуха частина» і займало по-

декуди 2/3 довжини станції [1, 3]. Безсумнівно, для сучасних станцій така конструкція з позиції розподілу пасажиропотоку не є раціональною, оскільки на всю довжину станції влаштовувалося всього 5 пар проходів. Однак з огляду на розподіл компонент напружень й деформацій стіни між станційними тунелями ще активніше вивільнювала просторовий фактор і успішно розподіляла напружений стан, зменшуючи його інтенсивність.

Таким чином, збільшення ширини пілону в станції метрополітену пілонного типу, що споруджується NATM, є тим конструктивним рішенням, що, за можливості, слід зберегти. Проте, якщо розглядати таку конструкцію з ракурсу формування й розподілу пасажиропотоків, то при проході значної ширини, що більше регульованих значень (3,0...3,75 м), ширина пілону не є такою, що дозволяє успішно вирішити проблему комфортного заповнення платформи. Відомо, що чим пілон має менші розміри, тим пасажиром зручніше заповнювати бічні платформи й формувати однорідні пасажиропотоки в середньому залі й проходах [1]. Таким чином, для вирішення цієї практичної задачі слід змінити ширину пілону, зменшуючи її.

Другим важливим моментом, що визначено під час аналізу конструкцій станції метрополі-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

тену пілонного типу, є те, що у такої станції, котра споруджується NATM, і товщина пілону ($t_{\text{пил}} = 2,54$ м) наближається до значень, що притаманні варіанту станції із збірного чавуну ($b_{\text{пил}} = 2,3$ м), але менше товщини варіанту станції із збірного залізобетону ($b_{\text{пил}} = 3,2$ м), в якій пілон є окремим залізобетонним елементом, що повністю замінює ґрунт оточуючого масиву. Такий вибір товщини пілону обґрунтовується досвідом спорудження Київського метрополітену, для котрого і була розроблена остання конструкція, однак пілон станції «Центральна» пов'язує в собі і досвід будівництва конструкцій станцій метрополітену, в яких серцевиною пілону є ґрунт оточуючого масиву (для міста Дніпра ним є міцний та міцний тріщинуватий плагіограніт).

Мета

Метою наукової статті є проведення чисельного аналізу методом скінченних елементів й обґрунтування конструкції станції метрополітену пілонного типу, що зводиться в скельних породах Новоавстрійським методом спорудження тунелів, під час варіювання ширини пілонної частини із визначенням залежностей компонент напружено-деформованого стану.

Методика

Для досягнення поставленої задачі було розроблено скінченно-елементну модель станції метрополітену пілонного типу у професійному розрахунковому комплексі Structure CAD.

Якщо охарактеризувати і плоску, і 3D-модель з позиції основних розрахункових схем, то вони відносяться до схеми, що базується на взаємному впливі деформацій. Ця схема, на відміну від схеми завданого навантаження, враховує не лише зміну внутрішніх зусиль в оправі й напружень в оточуючому масиві, а й їхнє деформування. Без сумнівів, моделі, що відносяться до схеми взаємного впливу деформацій при взаємодії елементів системи «станційна конструкція – оточуючий масив».

Найважливішим для схем, що базуються на взаємному впливі деформацій, є відтворення не тільки геометричних форм елементів системи «станційна конструкція – оточуючий масив», а присвоєння створеній геометрії деформацій-

них властивостей, що взяті із реальних випробувань гірських порід.

Проведено чисельний аналіз скінченно-елементної моделі мультифронтальним методом на поєднання навантажень, які притаманні наданій розрахунковій ситуації. Використано наступне поєднання з коефіцієнтами надійності за граничним навантаженням: 1,1 (власна вага та навантаження від навколишнього ґрунту) + 1,05 (тимчасове навантаження).

Прохід створений шляхом усунення частини схеми, має прямокутний обрис, при цьому розміри по висоті та ширині, а також геометричні параметри кріплення (верхня та нижня плити проходу) дотримані (рис. 2).

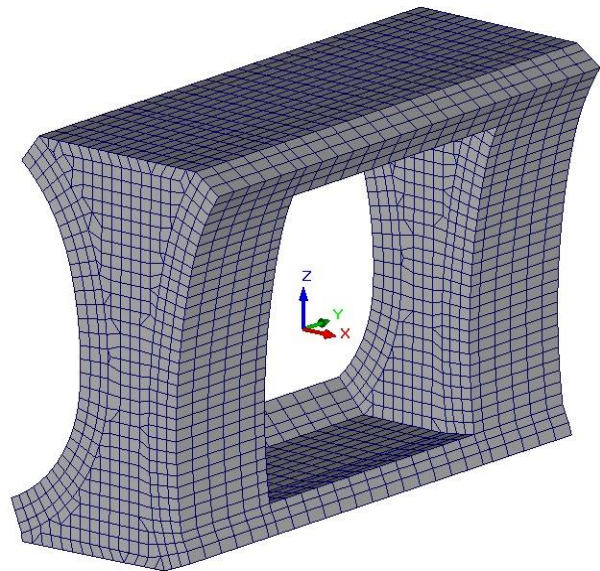


Рис. 2. Фрагмент скінченно-елементної моделі – система «пів пілона – прохід – пів пілона»

Fig. 2. Fragment of the finite element model – the system «half-pylon – passage – half-pylon»

Жорсткість загальної системи, що зменшиться по причині зменшення площі пілону, може призвести до того, що просторовий фактор в станції метрополітену пілонного типу не вивільниться повною мірою й розподіл напружень та деформацій не буде задовільним. Для того, щоб з'ясувати вплив жорсткості пілону на зміну напружено-деформованого стану до вже розрахованої моделі із проектною шириною пілону розроблені й розраховані скінченно-елементні моделі із такими значеннями ширини

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

пілону: 4,65 м; 2,79 м; 1,86 м тобто $2/3b_{\text{пил}}$, $1/2b_{\text{пил}}$ й $1/3b_{\text{пил}}$ від проектної ширини $b_{\text{пил}}$, що складає 5,58 м.

Результати

Перед тим, як перейти до аналізу результатів напружено-деформованого стану комбінованої оправи станції метрополітену пілонного

типу для проектної ширини пілону $b_{\text{пил}}$, що складає 5,58 м, слід відмітити, що для отримання залежностей переміщень й напружень їх доповнено результатами чисельного аналізу скінченно-елементних моделей з варіацією $b_{\text{пил}}$, але для економії місця не всі компоненти наведено, але всі проаналізовано.

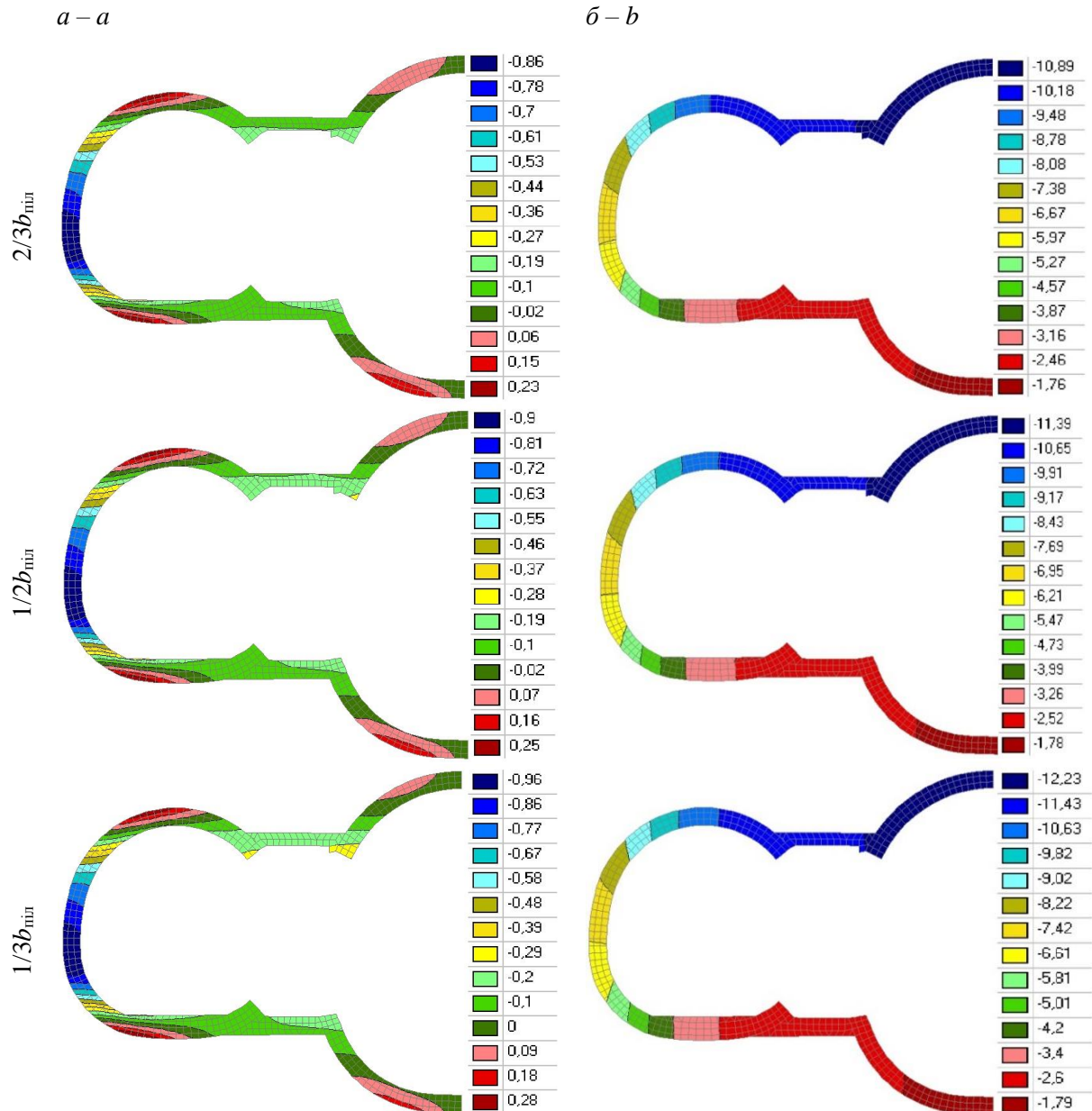


Рис. 3. Ізолінії та ізополя горизонтальних (а) і вертикальних (б) переміщень (мм) в місці проходу при варіації ширини пілону $b_{\text{пил}}$

Fig. 3. Isolines and isofields of horizontal (a) and vertical (b) displacements (mm) at the passage location with variation of the pylon width b_{pyl}

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Якісний аналіз компонент переміщень (рис. 3) свідчить про те, що розподіл ізоліній та ізополів майже ідентичний і дозволяє провести кількісний аналіз в повній мірі. Як і для станції метрополітену пілонного типу з проектною шириною пілону $b_{\text{пл}}$, у випадку варіації цього параметру деформований стан залишається од-

норідним, що демонструє розподіл наведених ізополів. Цей факт доводить те, що навіть при зменшенні ширини пілону його жорсткість залишається достатньою для вивільнення просторового фактору і формування однорідного деформованого стану.

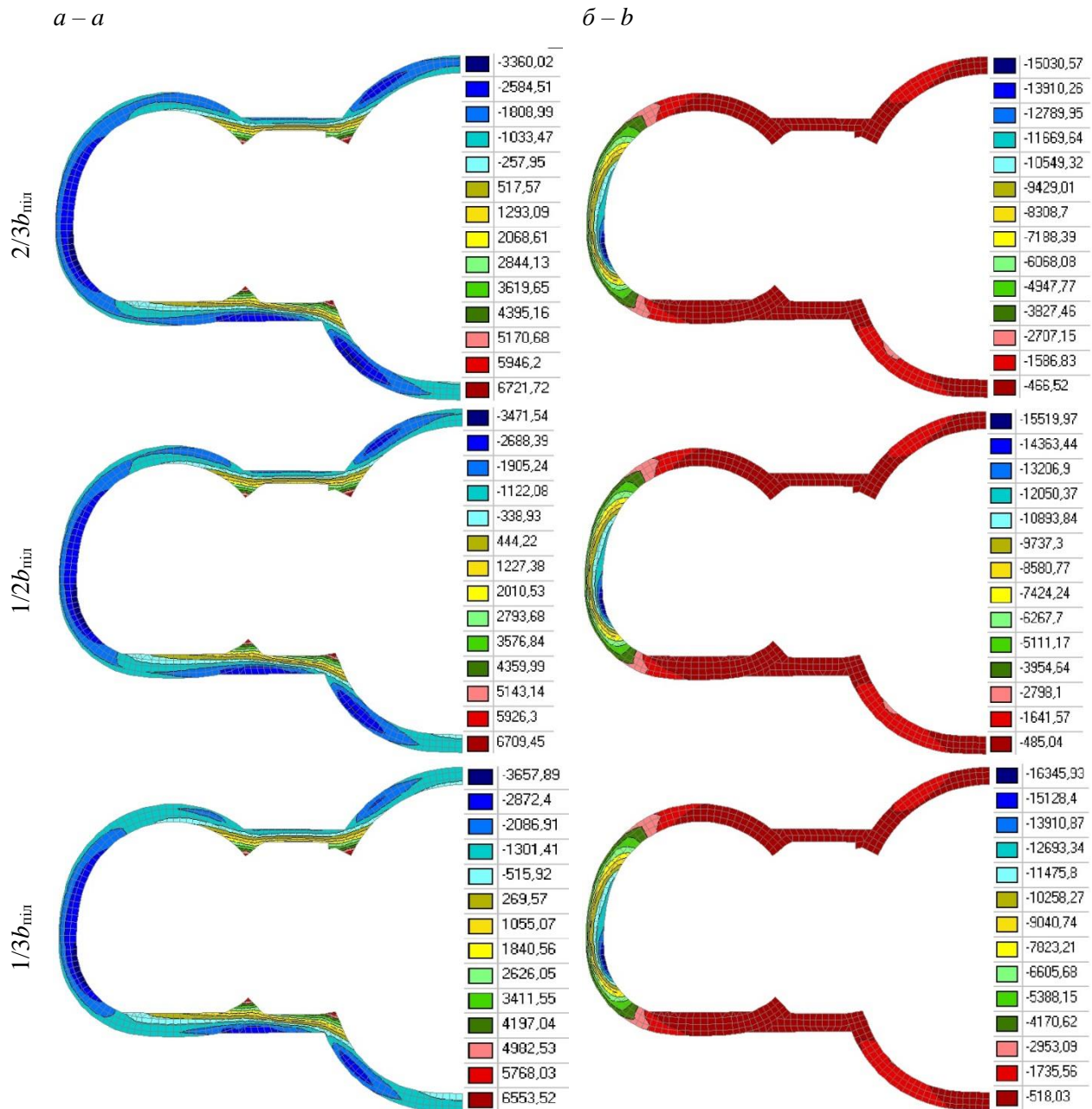


Рис. 4. Ізолінії та ізополя поздовжніх (а) й вертикальних (б) нормальних напружень (kN/m^2) в місці проходу при варіації ширини пілону $b_{\text{пл}}$

Fig. 4. Isolines and isofields of longitudinal (a) and vertical (b) normal stresses (kN/m^2) at the passage location with variation of the pylon width b_{pyl}

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Якісний аналіз нормальних напружень за трьома компонентами надає можливість стверджувати, що в місці проходу розподіл ізоліній та ізополів майже ідентичний, а у пілонній частині має явні відмінності (рис. 4). Особливо ці відмінності явно виражені у поздовжній та вертикальній компонентах нормальних напружень, причому зміни форми ізополів спостерігаються відповідно в тілі пілону (поздовжнє нормальне напруження, вісь Y) й частині оправи, що межує з пілоном (вертикальне нормальне напруження, вісь Z).

Найбільш характерним в перерозподілі вертикальної компоненти нормальних напружень є значна зміна форм концентраторів. Безсумнівно, очікувалося, що зміна жорсткості пілону внаслідок варіації зміни його ширини призведе до перерозподілу компонент напружено-деформованого стану. Проте характер зміни ізоліній та ізополів не міг бути передбачуваним, що ілюструється отриманими результатами, які в якісному плані доводять досить значний вплив жорсткості на деякі компоненти напруженого стану, наприклад, дотичних напружень, розподіл яких демонструє зміну як форми, так і розташування концентраторів.

Якісний аналіз шістьох компонент напружено-деформованого стану при варіації шири-

ни пілону i , відповідно, його жорсткості доводить, що зміна розміру цього важливого елемента станційної конструкції є мінімальною для місця проходу. Тобто вплив пілону є локальним і загасає в околиці 1,0...1,2 м, якісно не впливаючи на розподіл напружень й переміщень в проході. Для пілонної ж частини вплив пілону та варіації його ширини є визначальним для формування напружено-деформованого стану станційної конструкції із комбінованою оправою бокового й станційного тунелів.

Характер перерозподілу ізоліній та ізополів напружень потребує кількісного аналізу по компонентам, а не тільки еквівалентних напружень для з'ясування міцності. Проведено аналіз компонент напруженого станів у відповідності до розташування концентраторів напружень у кріпленні станції метрополітену пілонного типу в пілонній частині та місці проходу. Однак, для економії місця, обрано не всі точки концентрації, а ті, в яких зміна напруженого стану є явно вираженою.

На основі отриманих даних побудовано графіки залежностей переміщень (рис. 5) та нормальних (рис. 6–7) напружень, які демонструють кількісні зміни напружено-деформованого стану при варіації ширини пілону $b_{\text{пил}}$.

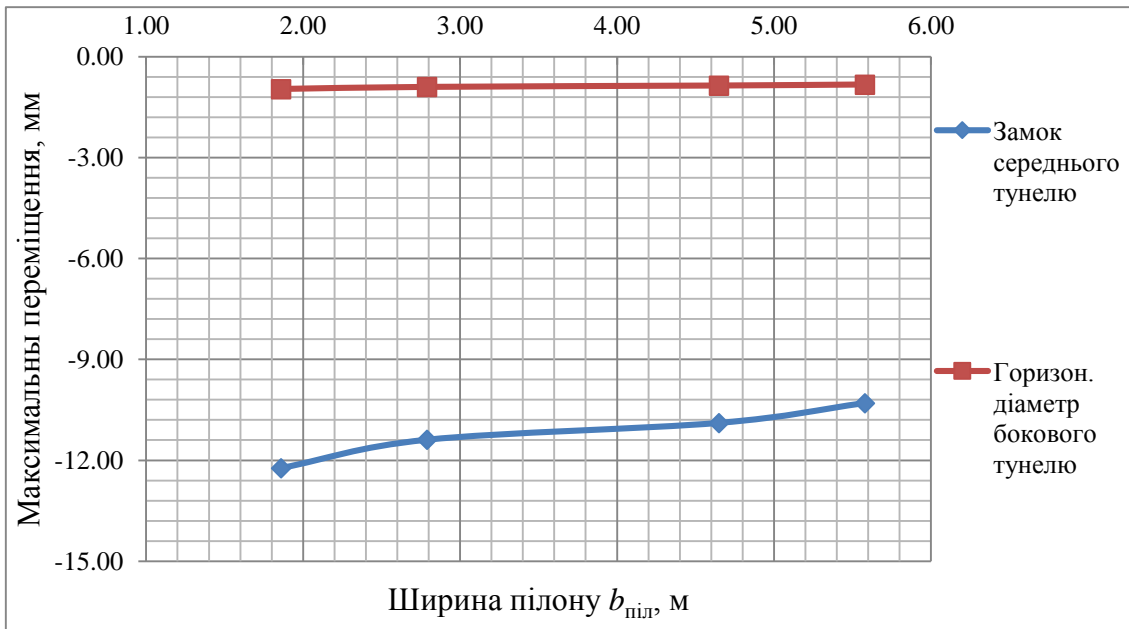


Рис. 5. Залежності максимальних переміщень при варіації ширини пілону $b_{\text{пил}}$

Fig. 5. Dependences of maximum displacements with variation of the pylon width b_{pyl}

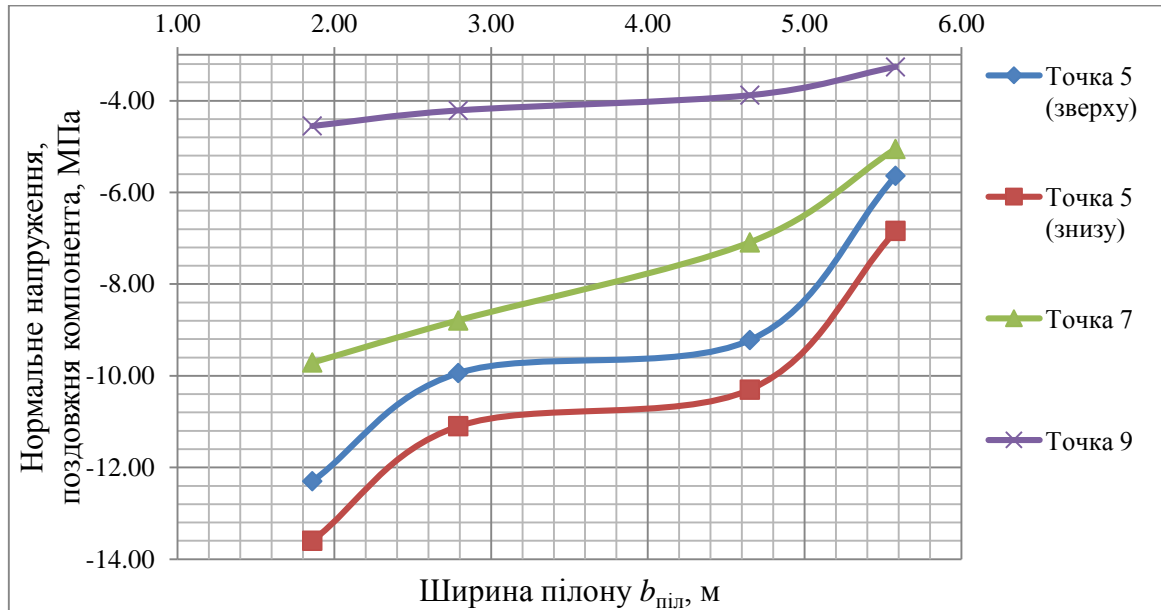


Рис. 6. Залежності нормальних напружень (поздовжня компонента) в точках-концентраторах при варіації ширини пілону $b_{\text{пил}}$

Fig. 6. Dependences of normal stresses (longitudinal component) at concentrator points with variation of the pylon width b_{pyl}

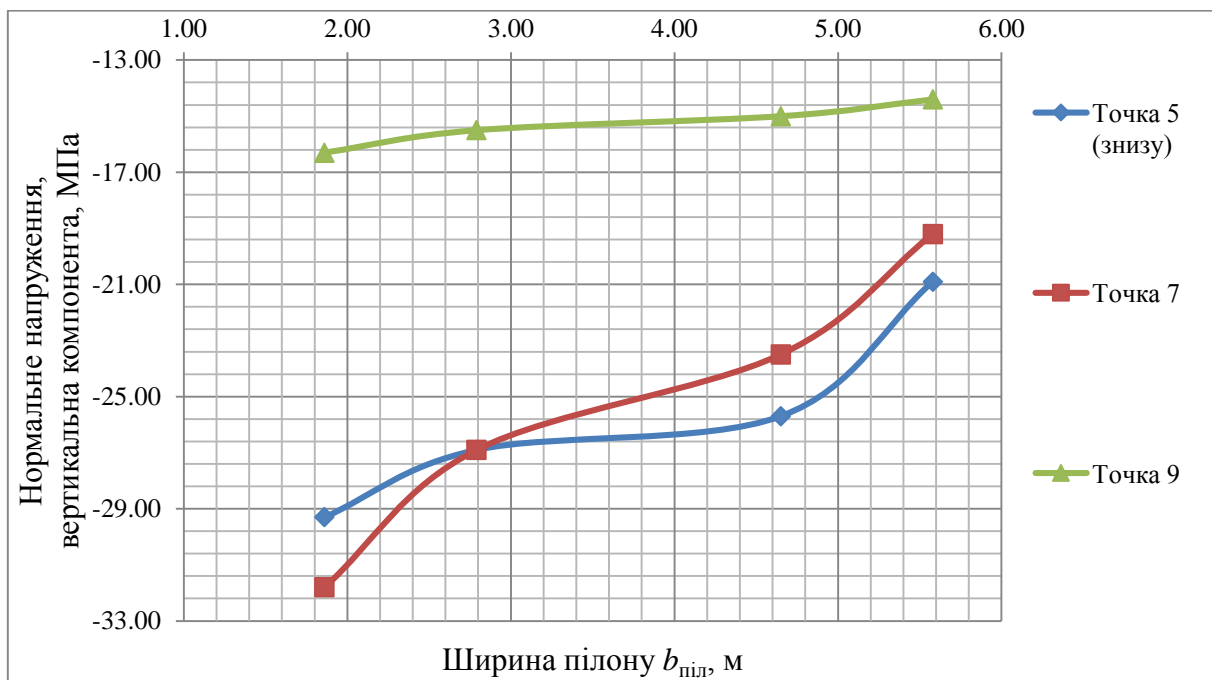


Рис. 7. Залежності нормальних напружень (вертикальна компонента) в точках-концентраторах при варіації ширини пілону $b_{\text{пил}}$

Fig. 7. Dependences of normal stresses (vertical component) at concentrator points with variation of the pylon width b_{pyl}

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Аналіз залежностей деформованого стану від ширини пілону $b_{\text{пил}}$ (чотири розрахункові випадки: проектна ширина $b_{\text{пил}}$, що складає 5,58 м; зменшені значення ширини 4,65 м ($2/3b_{\text{пил}}$); 2,79 м ($1/2b_{\text{пил}}$); 1,86 м ($1/3b_{\text{пил}}$) ще раз доводить, що варіація властивостей оточуючого масиву або варіація жорсткості елементів конструкції станції метрополітену пілонного типу викликає рівномірну зміну компонент переміщень.

Про це свідчить характер графіків залежностей (рис. 5), які є монотонними, без наявних стрибків або різких змін напрямку розвитку функцій. З високим ступенем апроксимації ($R^2 = 0,95 \dots 0,98$) тренди функцій максимальних вертикальних переміщень в замку середнього тунелю та максимальних горизонтальних переміщень на горизонтальному діаметру бокового тунелю є лінійними. Відповідно, варіація властивостей оточуючого масиву та елементів конструкції залишає деформований стан однорідним, змінюючи його поступово й незначно.

Переходячи до аналізу залежностей нормальних напружень (рис. 6–7), слід відмітити, що в концентраторах, котрі знаходяться на поверхні бокового тунелю (точки 8 (зверху), 8 (знизу) й точка 9), як і для компоненти деформованого стану, для компонент напруженого характер розподілу є монотонним, а тренди функцій з високим ступенем апроксимації ($R^2 = 0,97 \dots 0,98$) є лінійними. Це доводить той факт, що вже було відмічено, а саме локальний вплив пілону в околиці 1,0...1,2 м в проході, а також виключно незначну кількісну зміну напружень (не більше ніж 3...10 % в залежності від зменшення ширини $b_{\text{пил}}$), що змінюються поступово.

Кардинально іншою є картина розподілу компонент нормальних напружень в концентраторах, котрі знаходяться на поверхні комбінованої оправи, що обрамляє пілон. Для залежностей нормальних напружень від ширини пілону трендом функцій з високим ступенем апроксимації ($R^2 = 0,97 \dots 0,99$) є поліном третього порядку ($\sigma = a \cdot b_{\text{пил}}^3 - b \cdot b_{\text{пил}}^2 + c b_{\text{пил}} - d$) (рис. 6–7). Характерною особливістю цього поліному є немонотонна хвилеподібна зміна напружень із певним майданчиком, що має більш монотонний характер і розташовується між значеннями ширини пілону 4,65 м ($2/3b_{\text{пил}}$) й 2,79 м

($1/2b_{\text{пил}}$). Тобто від значення проектної ширини пілону $b_{\text{пил}}$ (5,58 м) до зменшеної 4,65 м ($2/3b_{\text{пил}}$) графік має значну зміну напружень за всіма компонентами, потім, від ширини пілону 4,65 м ($2/3b_{\text{пил}}$) до 2,79 м ($1/2b_{\text{пил}}$), графік демонструє знижену інтенсивність збільшення напружень, яка стрімко збільшується на ділянці від 2,79 м ($1/2b_{\text{пил}}$) до 1,86 м ($1/3b_{\text{пил}}$).

Таким чином, результати аналізу залежностей компонент нормальних напружень свідчать про те, що їхній розподіл в залежності від варіації ширини пілону характеризується стрімким збільшенням значення від $b_{\text{пил}}$ до $2/3b_{\text{пил}}$, які потім дещо менш інтенсивні на ділянці від $2/3b_{\text{пил}}$ до $1/2b_{\text{пил}}$ і отримують прогресування на ділянці від $1/2b_{\text{пил}}$ до $1/3b_{\text{пил}}$. Це дає можливість, обґрунтовуючи розмір пілону як елементу станційної конструкції, зробити однозначний висновок, що не треба зменшувати ширину пілону менше, ніж значення $2/3$ від проектної ширини $b_{\text{пил}}$.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна виконаного дослідження характеризується отриманими вперше залежностями напружено-деформованого стану комбінованої оправи станції метрополітену пілонного типу при варіації ширини пілону $b_{\text{пил}}$. Проаналізовані залежності є лінійними або поліноміальними відповідно для різних компонент напруженого й деформованого стану і дозволяють обґрунтувати ширину пілону, що забезпечує міцність станційної конструкції.

Практична значимість полягає в проведенні низки розрахунків під час математичного моделювання методом скінченних елементів із проведенням аналізу міцності станційної конструкції та наданням рекомендацій щодо вибору її розмірів.

Висновки

У статті наведено результати чисельного аналізу конструкції станції пілонного типу під час варіювання ширини пілонної частини. Проаналізовано конструкції системи «пілон – прохід» й розроблені скінченно-елементні моделі із варіацією значення ширини пілону: 4,65 м; 2,79 м; 1,86 м тобто $2/3b_{\text{пил}}$, $1/2b_{\text{пил}}$ й $1/3b_{\text{пил}}$ від проектної ширини $b_{\text{пил}} = 5,58$ м. З'ясовано, що

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

вплив пілону є локальним і загасає в околиці 1,0...1,2 м, якісно не впливаючи на розподіл напружень й переміщень в проході, при цьому деформований стан є однорідним.

На основі отриманих результатів обґрунтовано, що суттєве зменшення ширини пілону для станції метрополітену, котра споруджена в ске-

льних породах за допомогою NATM, нераціональне з позиції напруженого стану. Обґрунтована ширина пілону знаходиться в межах $b_{\text{пил}} = 5,15 \dots 5,58$ м і не може бути зменшена по причині появи еквівалентних напружень, що перевищують міцність торкрет-бетону.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тютюкін О. Л. *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій* : монографія. Дніпро : Журфонд. 2020. 187 с.
2. Федоров К. Є., Тютюкін О. Л. Критичний аналіз методів розрахунку напружено-деформованого стану конструкції станції метрополітену пілонного типу. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2024. № 26. С. 104–112. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315520>
3. Федоров К. Є., Тютюкін О. Л. Математичне моделювання конструкції станції метрополітену пілонного типу на основі чисельного аналізу. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 4(112). С. 200–209. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/343192>
4. Ding D. Y., Yang X. R., Lu W. D., Liu W. N., Yan M., Li A. M. Numerical analysis of metro station construction by large-diameter shield and pile-beam-arch method. *Advanced Materials Research*. 2012. Vols. 368–373. P. 2711–2715. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.368-373.2711>
5. Fung I. W., Wang J. A., Au A. S., Zhou Y. F. Three-dimensional numerical analysis of stress and deformation of surrounding soil in safety construction of metro station. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. Vol. 96. P. 012121. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/96/1/012121>
6. Jiang C., Tiutkin O. L., Chen Z., Chen Z. Analytical regularities of force factors in the lining of a three-vaulted metro station with variation of the elastic resistance coefficient of the rock. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*. 2025. Vol. 27. P. 70–77. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2025/333785>
7. Li H., Wei R., Zhu H., Jia C., Shang H., Wang X., Li S., Shi G. Numerical analysis of excavation stability of transfer station of Jinan Metro. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 632, Iss. 2. P. 022019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/632/2/022019>
8. Li Y., Jin X., Lv Z., Dong J., Guo J. Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 56. P. 22–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.016>
9. Yan M., Ding D. Y., Yang X. R., Yang X. R., Lu W. D., Liu W. N., Li A. M. 3D numerical analysis of metro station by PBA method to enlarge existing large-size shield tunnel. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vols. 170–173. P. 1673–1678. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.170-173.1673>
10. Yanjuan H., Dingli Z., Ran L., Xu C., Weiwei Q. Calculation method for surrounding rock pressure of deeply buried triple-arch tunnel. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2024. Vol. 56, Iss. 11. P. 3213–3226. DOI: <http://doi.org/10.6052/0459-1879-24-015>
11. Zhang J.-L., Liu X., Zhao J.-B., Yuan Y., Mang H. Application of a combined precast and in-situ-cast construction method for large-span underground vaults. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 111. 103795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103795>
12. Zhou M., Chen J., Huang H., Zhang D., Zhao S., Shadabfar M. Multi-source data driven method for assessing the rock mass quality of a NATM tunnel face via hybrid ensemble learning models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021. Vol. 147. 104914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104914>

K. YE. FEDOROV^{1*}

^{1*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 353 29 33, e-mail kostia.fedoroff1@gmail.com, ORCID 0000-0002-3010-0489

Substantiation of the Design of a Pylon-Type Metro Station in Rock Formations with Varying the Width of the Pylon Part

Purpose. The author aims to conduct a numerical analysis using the finite element method of the structure of a pylon-type station, which is being built in rock formations using the New Austrian tunneling method (NATM), and to conduct its substantiation when varying the width of the pylon part, determining the dependences of the components of the stress-strain state. **Methodology.** It was determined that the pylon-type metro station under study is a structure that has obvious structural heterogeneity. A detailed analysis of the structural solution of the «pylon – passage» system of a pylon-type metro station constructed by NATM was conducted. It was substantiated that the reflection of the heterogeneous structure of a pylon-type metro station with the reproduction of the «pylon – passage» system is a task of mathematical modeling based on the finite element method. Using the professional calculation complex Structure CAD, finite element models of a pylon-type station with varying the width of the pylon part were developed. **Findings.** The results of the stress-strain state of the combined lining of a pylon-type metro station were obtained using finite element models with varying the pylon width. It is proven that for a pylon-type metro station with varying the pylon width b_{pyl} , the deformed state remains homogeneous. Qualitative analysis of the six components of the stress-strain state with variation in the pylon width proves that the effect of the pylon width is local and decays in the vicinity of 1.0 ... 1.2 m. The analyzed dependencies are linear or polynomial, respectively, for different components of the stress and strain state and allow us to justify the width of the pylon, which ensures the strength of the station structure. **Originality** is characterized by the first-ever obtained dependences of the stress-strain state of the combined lining of the pylon-type metro station with variations in the width b_{pyl} . **Practical value** lies in carrying out a series of calculations during mathematical modeling by the finite element method with the analysis of the strength of the station structure and the provision of recommendations for the selection of its dimensions.

Keywords: metro; pylon-type station; rock formations; stress-strain state; finite element method; New Austrian tunneling method

REFERENCES

1. Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstruksii: monohrafiia*. Dnipro : Zhurfond (in Ukrainian)
2. Fedorov, K. Ye., & Tiutkin, O. L. (2024). Critical Analysis of Methods for Calculating the Stress-Strain State of the Pylon-Type Metro Station Structure. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 26, 104-112. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315520> (in Ukrainian)
3. Fedorov, K. Ye., & Tiutkin, O. L. (2025). Mathematical Modeling of the Pylon-Type Metro Station Design Based on Numerical Analysis. *Science and Transport Progress*, 4(112), 200-209. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/343192> (in Ukrainian)
4. Ding, D. Y., Yang, X. R., Lu, W. D., Liu, W. N., Yan, M., & Li, A. M. (2012). Numerical analysis of metro station construction by large-diameter shield and pile-beam-arch method. *Advanced Materials Research*, 368-373, 2711-2715. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.368-373.2711> (in English)
5. Fung, I. W., Wang, J. A., Au, A. S., & Zhou, Y. F. (2008). Three-dimensional numerical analysis of stress and deformation of surrounding soil in safety construction of metro station. *Journal of Physics: Conference Series*, 96, 012121. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/96/1/012121> (in English)
6. Jiang, C., Tiutkin, O. L., Chen, Z., & Chen, Z. (2025). Analytical regularities of force factors in the lining of a three-vaulted metro station with variation of the elastic resistance coefficient of the rock. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 27, 70-77. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2025/333785> (in English)
7. Li, H., Wei, R., Zhu, H., Jia, C., Shang, H., Wang, X., Li, S., & Shi, G. (2021). Numerical analysis of excavation stability of transfer station of Jinan Metro. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 632(2), 022019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/632/2/022019> (in English)
8. Li, Y., Jin, X., Lv, Z., Dong, J., & Guo, J. (2016). Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56, 22-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.016> (in English)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

9. Yan, M., Ding, D. Y., Yang, X. R., Yang, X. R., Lu, W. D., Liu, W. N., & Li, A. M. (2012). 3D numerical analysis of metro station by PBA method to enlarge existing large-size shield tunnel. *Applied Mechanics and Materials*, 170-173, 1673-1678. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.170-173.1673> (in English)
10. Yanjuan, H., Dingli, Z., Ran, L., Xu, C., & Weiwei, Q. (2024). Calculation method for surrounding rock pressure of deeply buried triple-arch tunnel. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 56(11), 3213-3226. DOI: <http://doi.org/10.6052/0459-1879-24-015> (in English)
11. Zhang, J.-L., Liu, X., Zhao, J.-B., Yuan, Y., & Mang, H. (2021). Application of a combined precast and in-situ-cast construction method for large-span underground vaults. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 111, 103795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103795> (in English)
12. Zhou, M., Chen, J., Huang, H., Zhang, D., Zhao, S., & Shadabfar, M. (2021). Multi-source data driven method for assessing the rock mass quality of a NATM tunnel face via hybrid ensemble learning models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 147, 104914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104914> (in English)

Надійшла до редколегії: 12.11.2025

Рекомендовано до публікації: 17.12.2025

Дата публікації: 27.03.2026