

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.19.036.5-044.923:519.876

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, О. Л. ТЮТЬКІН<sup>2\*</sup>, О. Б. ХАВІН<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, ел. пошта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>2\*</sup> Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> ТОВ «КИЇВМЕТРОПРОЕКТ», вул. Богдана Хмельницького, 16-22, Київ, Україна, 01030, тел. +38 (044) 484 40 94, ел. пошта A.Khavin@metroproekt.kiev.ua

### ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ПЕРЕГІННИХ ТУНЕЛІВ, ЩО ЗНАХОДЯТЬСЯ В РІЗНИХ РІВНЯХ

**Мета.** Створення методології розробки скінченно-елементних моделей для визначення напружено-деформованого стану (НДС) оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях. **Методика.** Застосування чисельного методу скінченних елементів для розрахунку НДС оправ перегінних тунелів по п'яти варіантам розташування, що знаходяться в різних рівнях. Розроблені об'ємні скінченно-елементні моделі на основі просторових елементів, що дозволяють врахувати розміщення перегінних тунелів в оточуючому масиві по глибині та відносно друг друга. **Результати.** Отримані ізолінії та ізополя напруженого і деформованого станів п'яти варіантів розташування перегінних тунелів. Встановлено, що розміщення перегінних тунелів безпосередньо один над одним та з деяким зміщенням по горизонталі не призводить до збільшення НДС і повністю відповідає потрібним значенням горизонтальних, вертикальних, поздовжніх і дотичних напружень в залізобетонній оправі з урахуванням різного виду навантажень. **Наукова новизна.** Висновки чисельного аналізу НДС п'яти скінченно-елементних моделей (п'яти варіантів) в програмного комплексу SCAD свідчать про достатній запас міцності бетону для всіх п'яти варіантів оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. **Практична значимість.** На основі результатів аналізу можна рекомендувати запроєктовані варіанти конструкцій, що мають високий рівень міцності, до впровадження оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, з метою суттєвого зменшення об'ємів використання підземного простору при спорудженні об'єктів метрополітену мілкого закладення в мегаполісах України.

*Ключові слова:* перегінні тунелі, що знаходяться в різних рівнях; мілке закладення; суцільно-секційна оправа; напруження, переміщення, напружено-деформований стан; метод скінченних елементів

#### Вступ

Тенденція зростання протяжності ліній мілкого закладення на мережах вітчизняних і зарубіжних метрополітенів, зокрема в м. Києві, обумовлена їх певними перевагами в порівнянні з лініями глибокого закладення [1-3]. Так, вартість ліній мілкого закладення у відносно сприятливих інженерно-геологічних та гідрологічних умовах в середньому в два рази менше, ніж ліній глибокого [4].

Техніко-економічні переваги ліній мілкого закладення і великі зручності в експлуатації відкривають широку перспективу їх розвитку в мережі як існуючих, так і знову споруджуваних метрополітенів. Аналіз досвіду будівництва метрополітенів доводить, що частка ліній міл-

кого закладення в загальній протяжності підземних транспортних магістралей переважною більшістю міст суттєво збільшується.

Зведення у котлованах перегінних тунелів мілкого закладення із суцільно-секційною оправою виключає специфічно трудомісткі процеси, властиві закритим умовам. З'являється можливість використання високопродуктивних машин і сучасного устаткування, впровадження суцільно-секційних збірних конструкцій. Усе це дозволяє істотно підвищити темпи будівництва на значному фронті робіт порівняно із закритим способом.

Водночас на період будівництва відчужуються тисячі квадратних метрів міської площі, порушується рух наземного транспорту, вини-

кає необхідність перекладання підземних комунікацій, а іноді й зносу розташованих у зоні будівництва споруд. Усі ці обставини, що негативно впливають на нормальні умови життя міста, повинні бути проаналізовані й враховані в ході розв'язання організаційних питань будівництва ліній метрополітену мілкого закладення відкритим способом.

Однією з прогресивних технологій будівництва метрополітену мілкого закладення, який на даний момент розвитку метрополітенів в Україні поступово застосовується, є спорудження перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях. Поки що надана технологія застосовується в обмежених обсягах, наприклад, у випадку, коли наземний простір, що відчужується на момент будівництва, є дуже обмеженим. Так, наприклад, при будівництві Київського метрополітену виникають ситуації, коли практично неможливо розмістити два перегінні тунелі один біля одного [5], або у випадку розгалуження ліній, що мають кардинально різний напрям [4].

Технологія спорудження перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, безсумнівно є прогресивною, оскільки повністю вписується в загальну концепцію освоєння підземного простору мегаполісів, одним із важливих аспектів якої є прагнення до економії як наземного, так і підземного просторів великих міст. Будівництво підземних споруд, що знаходяться в різних рівнях, зокрема перегінних тунелів, дозволяє ефективно економити наземний простір [6, 7].

### Мета

Але окрім переваг технології спорудження перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, існують і об'єктивні недоліки, що потребують їх усунення. Застосування конструкцій, що знаходяться в різних рівнях і взаємодіють із оточуючим масивом та складним комплексом навантажень (метропоїзд, рухоме навантаження), потребує нових конструктивних рішень. Причому ці нові підземні конструкції потребують наукового обґрунтування, оскільки вони не мають прямих аналогів, тобто пошук напружено-деформованого стану оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях,

є актуальною науково-технічною задачею, яка має також наукову новизну і практичне значення.

### Методика

Технологія спорудження перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, і підземних об'єктів метрополітену взагалі набула деякого поширення на лініях метрополітенів країн бывшего СРСР та світу. Але відсутність розроблених об'ємно-планувальних рішень та схем організації будівництва таких доволі складних об'єктів не дозволяє, не дивлячись на значні переваги наданих дворівневих конструкцій, застосовувати їх максимально широко. Аналіз радянського досвіду, а також сучасного досвіду будівництва метрополітенів країн близького зарубіжжя свідчить про те, що найбільш розробленими технологіями є такі, що торкаються саме станцій метрополітену глибокого і мілкого закладення, а не перегінних тунелів.

На лініях метрополітенів України підземні конструкції, що розташовуються в двох рівнях, представлені у вигляді станцій глибокого і мілкого закладення. В Київському метрополітені існування такого роду станцій обґрунтовується їх можливістю до перевлаштування у сполученні вузла пересадки та у більш ефективному регулюванні пасажиропотоками.

Дворівневі станції глибокого закладення на теренах бывшего СРСР дуже рідкі, хоча оригінальних проектів, зокрема архітектора Івана Таранова, було розроблено декілька десятків. Всього лиш одним випадком успішного спорудження була станція «Спортивна» (рос. Спортивная) Фрунзенсько-Приморської лінії Петербурзького метрополітену. Станція є вузлом пересадки і являє собою об'ємно-планувальне рішення у вигляді односклепінчастої станції глибокого закладення. У поперечному перерізі конструкція складається зі збірного залізобетонного багат шарнірного склепіння, що спирається на масивні опори, забетоновані всередині круглих тунелів діаметром 9,8 м. У нижній частині перетину побудовано зворотне склепіння, що слугує одночасно розпіркою для бічних опор. Станційні зали розділені міжповерховим перекриттям, що спирається на систему колон і прогонів. Конструктивна частина базується на досвіді спорудження односклепінчас-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

тої станції зі збірними залізобетонними склепіннями, обтиснутими в породу.

Однак було розроблено декілька оригінальних ідей щодо спорудження станцій глибокого закладення в якості вузлів пересадки, що мають дворівневе об'ємно-планувальне рішення. Так, архітектор та інженер Іван Георгійович Таранов запропонував ряд новаторських рішень для дворівневого планування станцій, хоча його проекти не були реалізовані. Станція «Київська» Арбатсько-Покровської лінії Московського метрополітену, яка побудована у вигляді пілонної станції і є вузлом пересадки, І. Г. Тарановим планувалася у вигляді дворівневої (навіть був побудований її макет).

І. Г. Тарановим був розроблений також ряд станцій («Площадь Ногина», «Таганская», «Пушкинская площадь», «Калужская застава», «Пироговская», «Краснопресненская», «Савеловский вокзал», «Ржевский вокзал», «Шарикоподшипник», «Серпуховская застава» та інші), які були б дворівневими в якості вузлів пересадки, причому автор навіть склав альбом типових рішень таких об'ємно-планувальних рішень.

Як відомо, дворівневе об'ємно-планувальне рішення для станційних підземних споруд є доволі розробленим і апробованим [8-10]. Разом з тим в окресленому обсязі надане рішення

для перегінних тунелів майже не застосовувалося, хоча його переваги, наприклад, у випадку мілкового закладення не потребують доказів (менша площа, що відчужується для будівництва, менші витрати на земляні роботи, більш економічне освоєння підземного простору тощо). Однак майже повна відсутність досвіду будівництва перегінних тунелів, що залягають в різних рівнях, пояснюється відсутністю наукового обґрунтування конструкцій, що проектується для такого типу об'ємно-планувальних рішень [8, 10]. Таким чином, на основі виконаного аналізу можна зробити наступний висновок, що ця наукова-технічна задача є актуальною для метрополітенів мегаполісів України.

## Результати

З метою розробки теоретичних положень ефективності розміщення перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, було створено 5 варіантів скінченно-елементних моделей (СЕ-моделей) (рис. 1-5) та виконаний їх чисельний аналіз з метою визначення НДС опор. Створення СЕ-моделей проводиться для того, щоб відтворити взаємодію оточуючого масиву в розрахунковому комплексі SCAD [11, 12], оскільки рішення такої складної задачі неможливе в аналітичному вигляді [13].

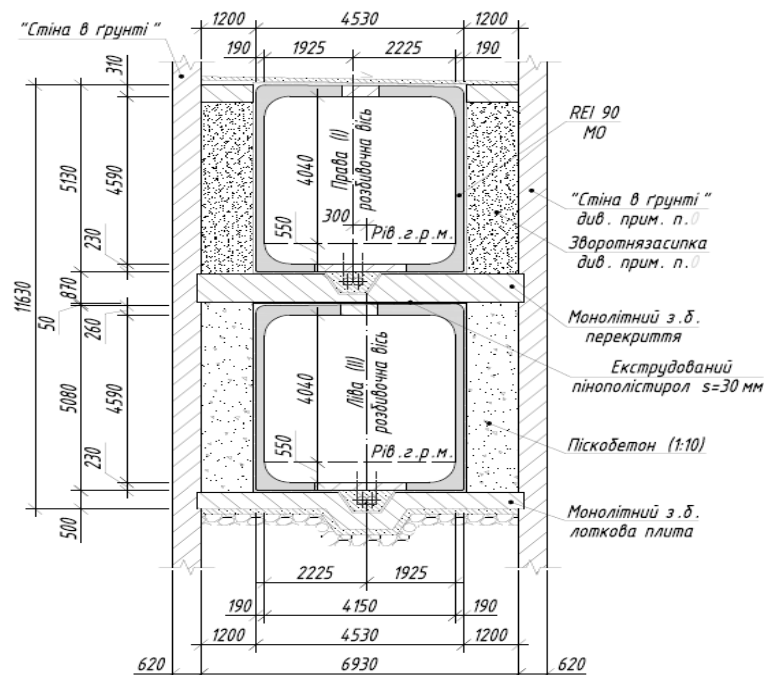


Рис. 1. Опори перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях (Варіант 1)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

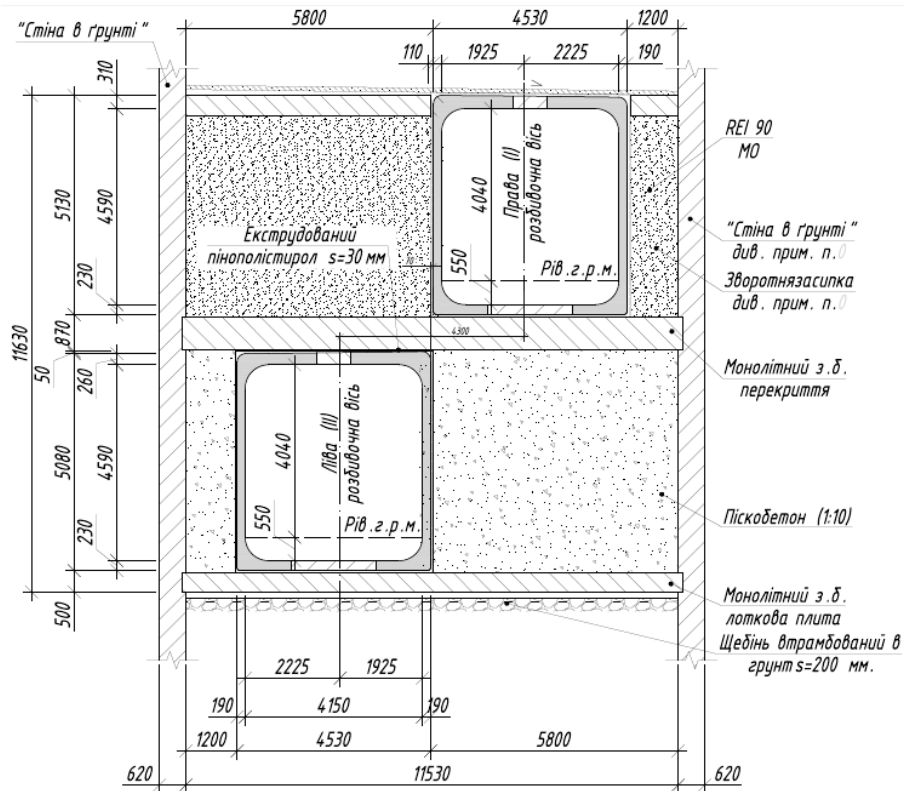


Рис. 2. Оправи перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях (Варіант 2)

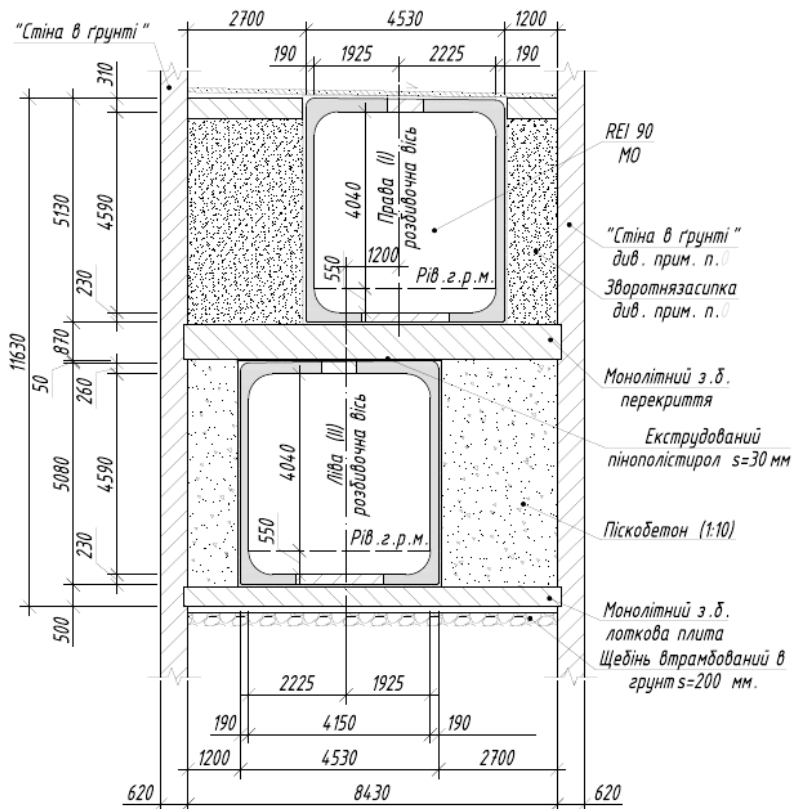


Рис. 3. Оправи перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях (Варіант 3)

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

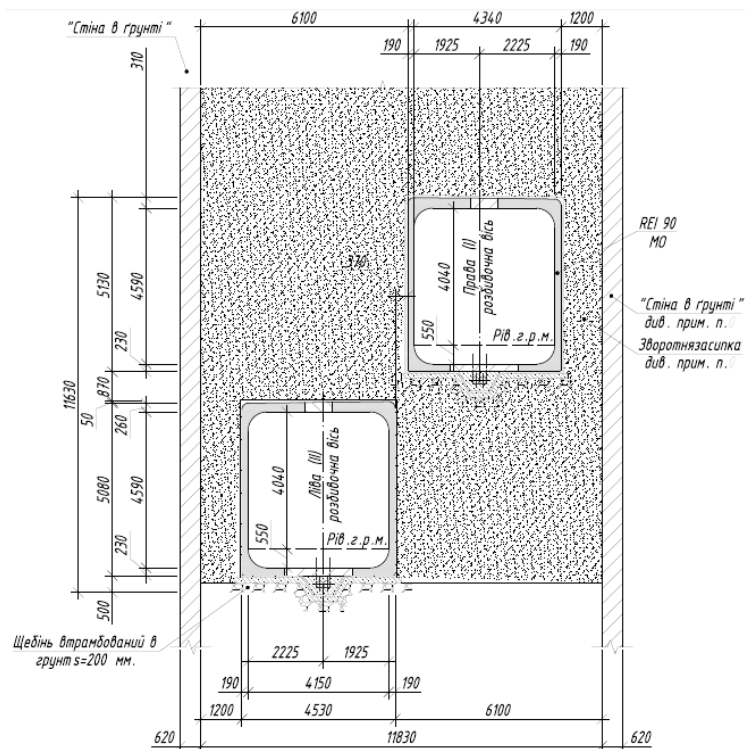


Рис. 4. Оправи перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях (Варіант 4)

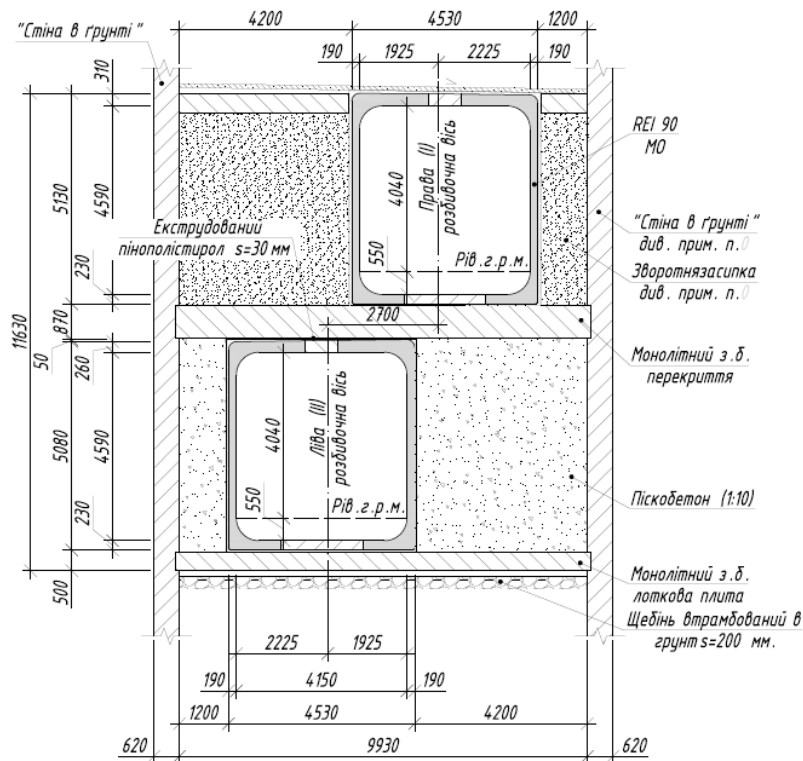


Рис. 5. Оправи перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях (Варіант 5)

Розроблені СЕ-моделі засновані на об'ємних скінченних елементах типу гексаєдрів та тетраєдрів (Варіант 1: 40011 вузлів, 27206 скінченні елементи; Варіант 2: 43686 вузлів, 29716 скінченні елементи; Варіант 3: 48216 вузлів, 32714 скінченні елементи; Варіант 4: 30063 вузлів, 19812 скінченні елементи; Варіант 5: 30561 вузлів, 20242 скінченні елементи; зменшення кількості СЕ в Варіантах 4-5 пов'язане із збільшенням їх розміру для знаходження всіх варіантів в одній розмірності задачі), і повно відображає взаємну роботу оправи із оточуючим масивом [11, 14].

Визначені деформаційні характеристики скінченно-елементної моделі наступні: жорсткість 1 (грунт [15]; піскобетон не враховується, його міцність йде у запас) – модуль пружності  $E=30$  МПа, коефіцієнт Пуассону  $\mu=0,3$ , питома вага  $\gamma=18,5$  кН/м<sup>3</sup>; жорсткість 2 (залізобетон) – приведений модуль пружності – 36 000 МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,2$ , питома вага  $\gamma=24,5$  кН/м<sup>3</sup>; жорсткість 3 (бетон ВБШ) – модуль пружності  $E=21$  000 МПа, коефіцієнт Пуассону  $\mu=0,2$ , питома вага  $\gamma=24$  кН/м<sup>3</sup>.

Після надання деформаційних характеристик на модель накладалися граничні умови. Навантаженнями на модель були наступні [16]: 1. Метропоїзд. Статичне навантаження від нормативного вертикального значення (150 кН на кожну вісь) було перетворене на динамічне шляхом введення коефіцієнта динамічності  $\mu=1,5$ , тобто розрахункове вертикальне значення метропоїзду сягало 225 кН (112,5 кН на колесо). 2. НК-80. 3. Власна вага масиву (товщина зворотної засипки – 5 м) і бетонних / залізобетонних елементів (із коефіцієнтом перевантаження 1,1).

Окрім поодиноких навантажень, були проведені розрахунки на комбінації навантажень: 1 комбінація – власна вага із коефіцієнтом перевантаження 1,1, метропоїзд зверху, метропоїзд знизу, НК-80 (найбільш критичне навантаження, надалі результати НДС наводяться саме по ній); 2 комбінація – метропоїзд зверху, метропоїзд знизу, НК-80 (комбінація для з'ясування впливу оточуючого масиву); 3 комбінація – метропоїзд зверху, метропоїзд знизу (комбінація для з'ясування впливу метропоїзду).

Після створення геометрії, завдання навантажень та граничних умов, СЕ-моделі варіантів оправ перегінних тунелів, що знаходяться в рі-

зних рівнях, піддавалися розрахунку мультифронтальним методом, а їх результати детально аналізувалися.

Результати чисельного аналізу НДС наведені в Розділі 3 поваріантно.

#### Варіант 1.

НДС оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, є складним та асиметричним (рис. 6), оскільки формується несиметричною комбінацією навантажень, що в подальших варіантах проявляється ще явніше.

Аналіз горизонтальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -4,3 мм; 2 комбінація – -3,3 мм; 3 комбінація – -1,1 мм; максимальні значення в оправі (стіна верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -1,3 мм; 2 комбінація – -0,7 мм; 3 комбінація – -0,4 мм.

Аналіз вертикальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -93,1 мм; 2 комбінація – -54,9 мм; 3 комбінація – -9,7 мм; максимальні значення в оправі (шелига склепіння верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -49,8 мм; 2 комбінація – -14,8 мм; 3 комбінація – -9,7 мм (лоток нижнього тунелю).

Аналіз горизонтальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -4,80 МПа; 2 комбінація – -4,11 МПа; 3 комбінація – -4,18 МПа.

Аналіз вертикальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -11,3 МПа; 2 комбінація – -7,5 МПа; 3 комбінація – -7,5 МПа. Аналіз поздовжніх напружень свідчить, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -2,64 МПа; 2 комбінація – -2,32 МПа; 3 комбінація – -2,34 МПа.

Аналіз дотичних напружень свідчить, що їх максимальні значення: 1 комбінація – -1,99 МПа; 2 комбінація – -1,27 МПа; 3 комбінація – -1,26 МПа.

Такі значення компонент напруженого стану свідчать про достатній запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа.

Висновком щодо Варіанту 1 на основі аналізу його НДС є те, що він відповідає умовам міцності при наявності вказаних комбінацій навантажень.

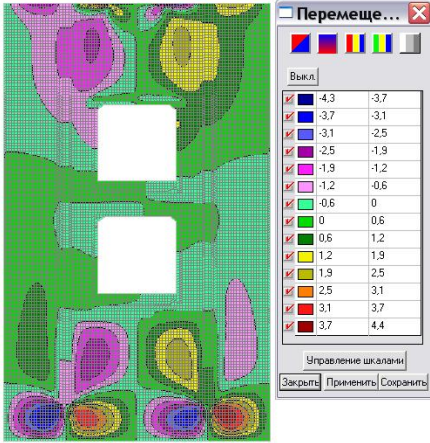
МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

**Варіант 2**

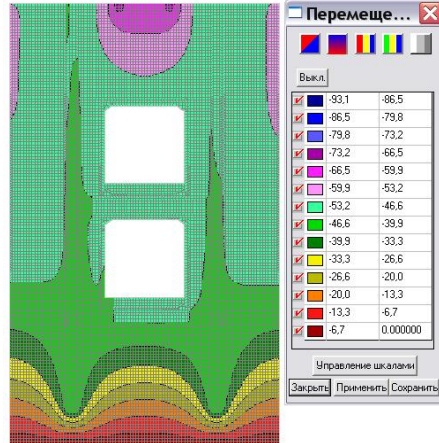
НДС опор перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, є більш асиметричним

(рис. 7), ніж в Варіанті 1, оскільки формується несиметрична комбінація навантажень проявляється явніше.

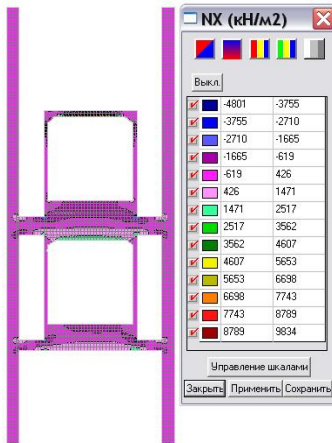
Горизонтальні переміщення (мм)



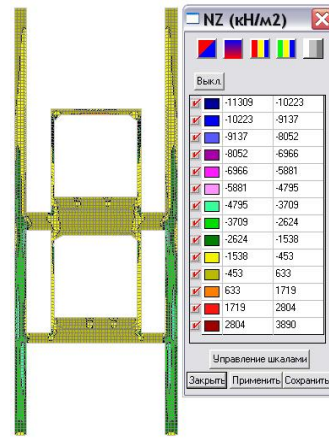
Вертикальні переміщення (мм)



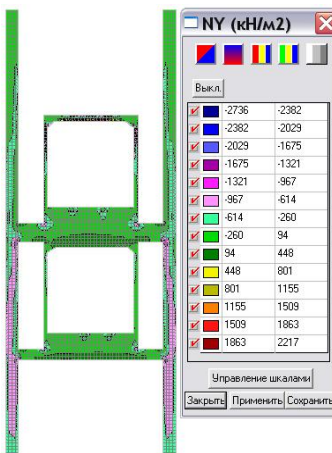
Горизонтальні напруження (кН/м<sup>2</sup>)



Вертикальні напруження (кН/м<sup>2</sup>)



Поздовжні напруження (кН/м<sup>2</sup>)



Дотичні напруження XZ (кН/м<sup>2</sup>)

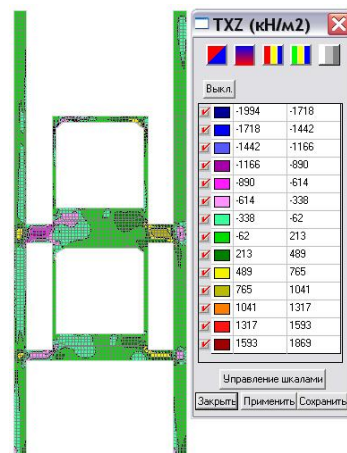


Рис. 6. Ізолінії та ізополя деформаційного стану моделі і напруженого стану фрагменту моделі (конструкція) (Варіант 1)

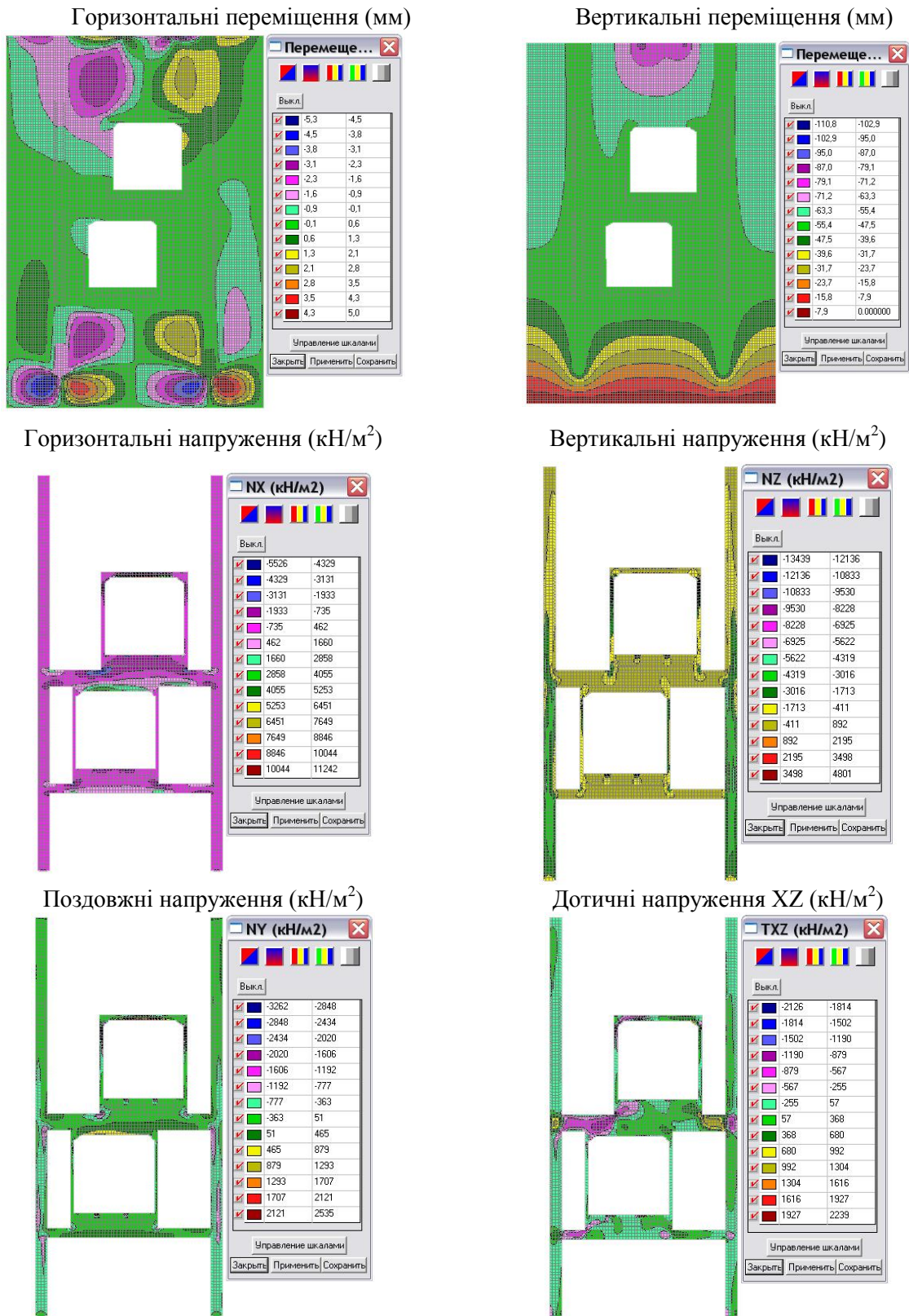


Рис. 7. Ізолінії та ізополя деформаційного стану моделі і напруженого стану фрагменту моделі (конструкція) (Варіант 2)



## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Аналіз горизонтальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -5,3 мм; 2 комбінація – -4,2 мм; 3 комбінація – -1,2 мм; максимальні значення в оправі (стіна верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -1,5 мм; 2 комбінація – -0,8 мм; 3 комбінація – -0,6 мм. Аналіз вертикальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -110,8 мм; 2 комбінація – -64,3 мм; 3 комбінація – -10,6 мм; максимальні значення в оправі (шелига склепіння верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -57,3 мм; 2 комбінація – -16,2 мм; 3 комбінація – -10,6 мм (лоток нижнього тунелю).

Аналіз горизонтальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -5,53 МПа; 2 комбінація – -4,19 МПа; 3 комбінація – -4,15 МПа. Такі значення свідчать про значний запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Аналіз вертикальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення наступні: 1 комбінація – -13,4 МПа; 2 комбінація – -7,54 МПа; 3 комбінація – -7,54 МПа. Такі значення компонент напруженого стану свідчать про достатній запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Аналіз поздовжніх напружень свідчить, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -3,26 МПа; 2 комбінація – -2,34 МПа; 3 комбінація – -2,33 МПа. Аналіз дотичних напружень свідчить, що їх максимальні значення: 1 комбінація – -2,13 МПа; 2 комбінація – -1,36 МПа; 3 комбінація – -1,27 МПа. Висновком щодо Варіанту 2 на основі аналізу його НДС є те, що він відповідає умовам міцності при наявності вказаних комбінацій навантажень.

**Варіант 3**

НДС оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, є більш асиметричним (рис. 8), ніж в Варіантах 1 і 2, оскільки формується несиметрична комбінація навантажень, що проявляється ще явніше. Аналіз горизонтальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -5,9 мм; 2 комбінація – -4,4 мм; 3 комбінація – -1,2 мм; максимальні значення в оправі (стіна верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -1,5 мм; 2 комбінація – -1,0 мм; 3 комбінація – -0,6 мм. Аналіз вертикальних перемі-

щень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -113,5 мм; 2 комбінація – -64,2 мм; 3 комбінація – -10,3 мм; максимальні значення в оправі (шелига склепіння верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -58,5 мм; 2 комбінація – -15,8 мм; 3 комбінація – -10,3 мм (лоток нижнього тунелю).

Аналіз горизонтальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -6,1 МПа; 2 комбінація – -4,49 МПа; 3 комбінація – -4,31 МПа. Такі значення свідчать про значний запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Аналіз вертикальних напружень свідчить (рис. 3.13) про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -14,54 МПа; 2 комбінація – -13,1 МПа; 3 комбінація – -7,54 МПа. Аналіз поздовжніх напружень свідчить, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -3,54 МПа; 2 комбінація – -2,39 МПа; 3 комбінація – -2,36 МПа. Аналіз дотичних напружень свідчить, що їх максимальні значення: 1 комбінація – -2,32 МПа; 2 комбінація – -1,35 МПа; 3 комбінація – -1,29 МПа. Такі значення компонент напруженого стану свідчать про достатній запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Висновком щодо Варіанту 3 на основі аналізу його НДС є те, що він відповідає умовам міцності при наявності вказаних комбінацій навантажень.

**Варіант 4**

НДС оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, є більш асиметричним (рис. 9), ніж в Варіантах 1-3, оскільки формується несиметрична комбінація навантажень проявляється ще явніше. Аналіз горизонтальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -6,1 мм; 2 комбінація – -4,3 мм; 3 комбінація – -1,2 мм; максимальні значення в оправі (стіна верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -1,7 мм; 2 комбінація – -1,1 мм; 3 комбінація – -0,7 мм. Аналіз вертикальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -110,0 мм; 2 комбінація – -58,1 мм; 3 комбінація – -10,1 мм; максимальні значення в оправі (шелига склепіння верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -59,6 мм; 2 комбінація – -15,3 мм; 3 комбінація – -10,1 мм (лоток нижнього тунелю).

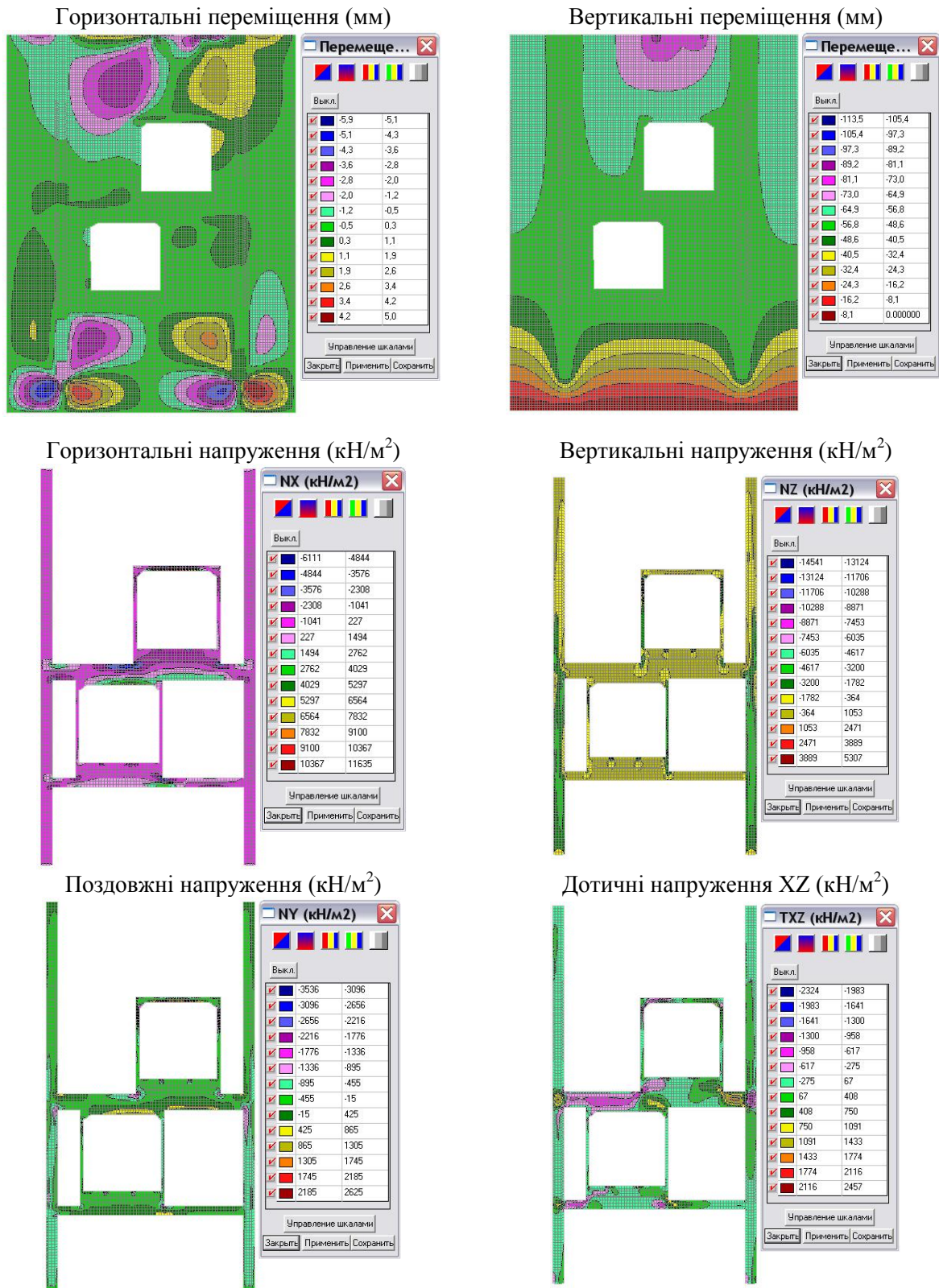


Рис. 8. Ізолінії та ізополі деформаційного стану моделі і напруженого стану фрагменту моделі (конструкція) (Варіант 3)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

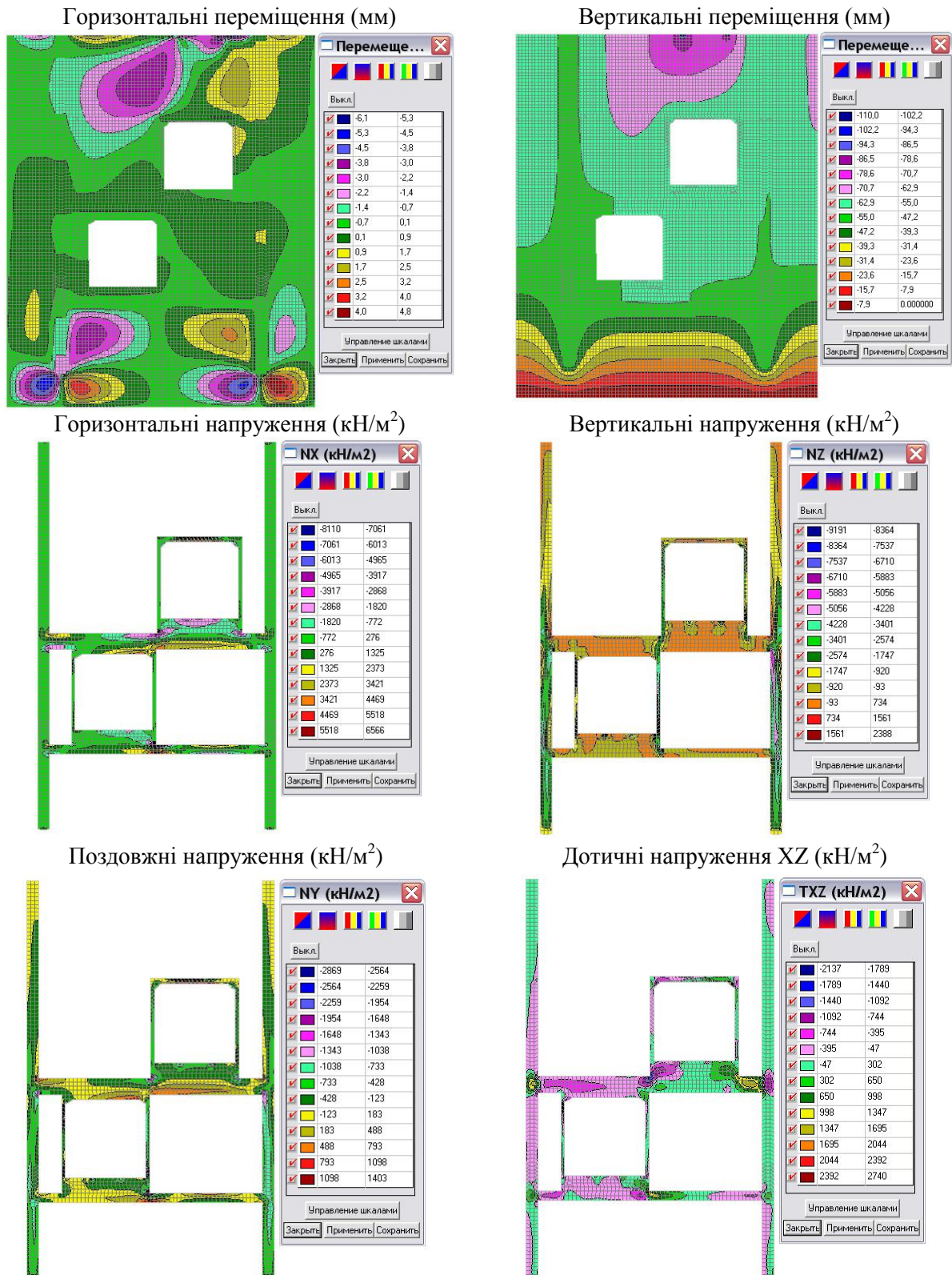


Рис. 9. Ізолінії та ізополя деформаційного стану моделі і напруженого стану фрагменту моделі (конструкція) (Варіант 4)

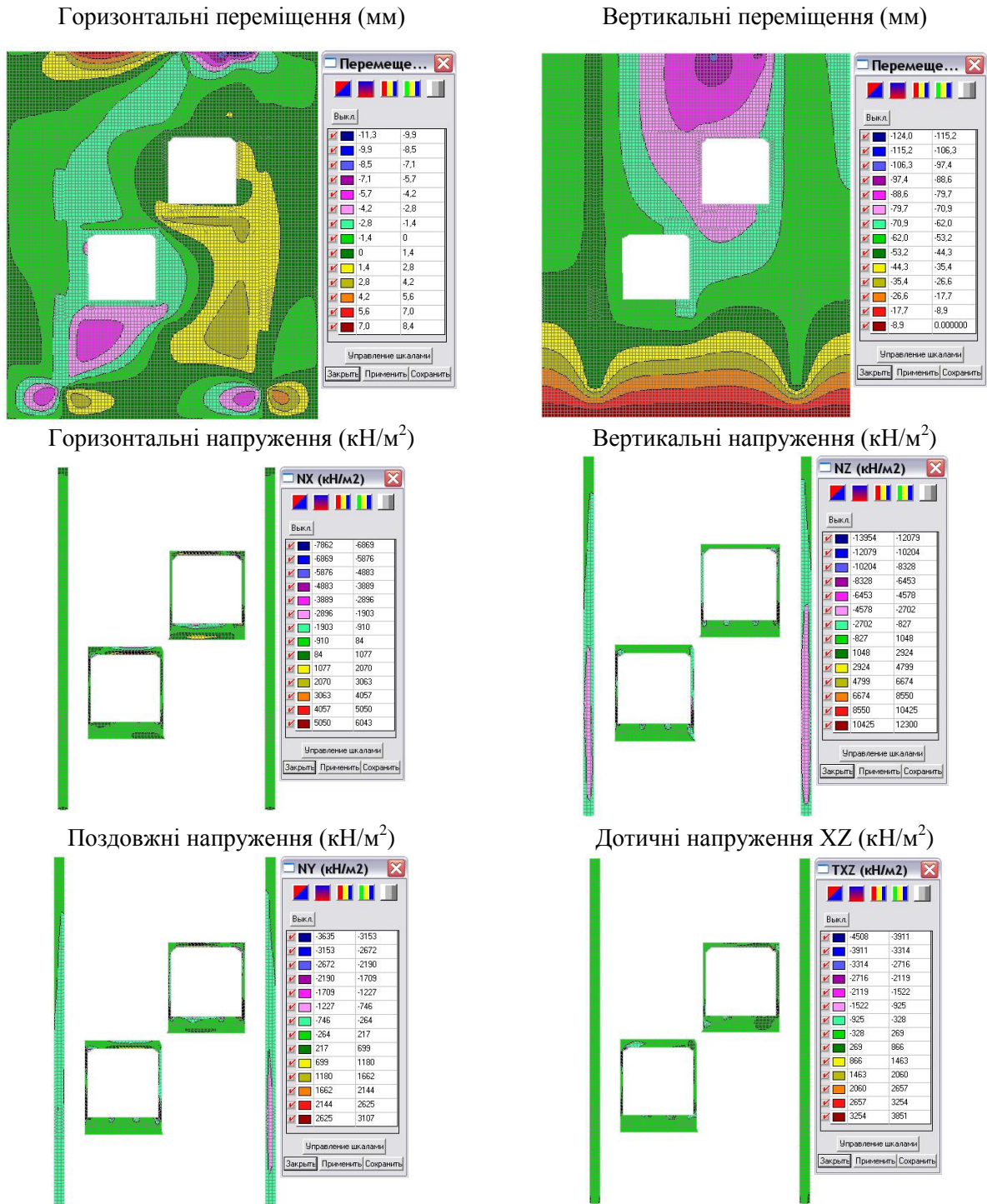


Рис. 10. Ізолінії та ізополя деформаційного стану моделі і напруженого стану фрагменту моделі (конструкція) (Варіант 5)

Аналіз горизонтальних напружень (свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -8,11 МПа; 2 комбінація – -4,1 МПа; 3 комбінація – -3,18 МПа. Такі значення свідчать про значний запас міцності бетону,

оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Аналіз вертикальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -9,19 МПа; 2 комбінація – -4,9 МПа; 3 комбінація – -

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

4,87 МПа. Аналіз поздовжніх напружень свідчить, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -2,87 МПа; 2 комбінація – -1,64 МПа; 3 комбінація – -1,61 МПа. Аналіз дотичних напружень свідчить, що їх максимальні значення: 1 комбінація – -2,14 МПа; 2 комбінація – -1,34 МПа; 3 комбінація – -0,96 МПа. Такі значення компонент напруженого стану свідчать про достатній запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Висновком щодо Варіанту 4 на основі аналізу його НДС є те, що він відповідає умовам міцності при наявності вказаних комбінацій навантажень.

**Варіант 5**

НДС оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, є максимально асиметричним (рис. 10), ніж в Варіантах 1-4, оскільки формується несиметрична комбінація навантажень проявляється ще явніше на відміну Варіанту 4. Аналіз горизонтальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -11,3 мм; 2 комбінація – -6,9 мм; 3 комбінація – -2,4 мм; максимальні значення в оправі (стіна верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -4,0 мм; 2 комбінація – -2,3 мм; 3 комбінація – -1,5 мм. Аналіз вертикальних переміщень свідчить про те, що максимальні значення в масиві складають: 1 комбінація – -124,0 мм; 2 комбінація – -64,5 мм; 3 комбінація – -16,4 мм; максимальні значення в оправі (шеліга склепіння верхнього тунелю) складають: 1 комбінація – -77,3 мм; 2 комбінація – -23,9 мм; 3 комбінація – -16,4 мм (лоток верхнього тунелю).

Аналіз горизонтальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -7,86 МПа; 2 комбінація – -3,2 МПа; 3 комбінація – -3,55 МПа. Такі значення свідчать про значний запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Аналіз вертикальних напружень свідчить про те, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -13,9 МПа; 2 комбінація – -6,6 МПа; 3 комбінація – -4,9 МПа. Аналіз поздовжніх напружень свідчить, що їх максимальні значення складають: 1 комбінація – -3,64 МПа; 2 комбінація – -1,78 МПа; 3 комбінація – -1,69 МПа. Аналіз дотичних напружень свідчить, що їх максимальні значення: 1 комбінація – -4,5 МПа; 2 комбінація – -2,38

МПа; 3 комбінація – -1,41 МПа. Такі значення компонент напруженого стану свідчать про достатній запас міцності бетону, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа. Висновком щодо Варіанту 5 на основі аналізу його НДС є те, що він відповідає умовам міцності при наявності вказаних комбінацій навантажень.

**Наукова новизна та практична значимість**

Висновки чисельного аналізу напружено-деформованого стану п'яти скінченно-елементних моделей (п'яти варіантів) в програмному комплексі SCAD свідчать про достатній запас міцності бетону для всіх п'яти варіантів оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, оскільки розрахункова міцність для бетону класу В30 складає 21 МПа.

На основі результатів аналізу можна рекомендувати запроєктовані варіанти конструкцій, які мають високий рівень міцності, до впровадження оправ перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях, з метою суттєвого зменшення об'ємів використання підземного простору при спорудженні об'єктів метрополітену мілкового закладення мегаполісів України.

**Висновки**

Проаналізовано ряд підземних споруд метрополітену з дворівневим об'ємно-планувальним рішенням, зокрема станцій мілкового та глибокого закладення, і зроблено висновок, що дворівневе об'ємно-планувальне рішення для перегінних тунелів, відмічене явними перевагами, детально не розроблювалося, що є актуальною науково-технічною задачею для метрополітенів мегаполісів України. Виявлено концептуальні основи спорудження мілко-закладених об'єктів метрополітену і розроблено методику створення скінченно-елементних моделей для числового аналізу перегінних тунелів, що знаходяться в різних рівнях. Також розроблено практичний детальний алгоритм математичного моделювання в комплексі StructureCAD (SCAD), оснований на автоматичній тріангуляції замкнутої області довільної форми на площині, що є одним з найбільш універсальних засобів формування сіток скінченних елементів.

На основі розроблених авторами методики і алгоритму чисельного аналізу створено п'ять просторових скінченно-елементних моделей оправ перегінних тунелів, що знаходяться в рі-

зних рівнях, які максимально повно відображають складну геометрію варіантів, їх конструктивні особливості, інженерно-геологічні умови та комплекс навантажень (власна вага масиву і конструкцій, метропоїзд, рухоме навантаження НК-80) та їх комбінації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Петренко, В. И. Современные технологии строительства метрополитенов в Украине [Текст] / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин. – Днепропетровськ : Наука і освіта, 2005. – 252 с.
- Айвазов, Ю. М. Проектування метрополітенів (у 3-х частинах). Навчальний посібник. Частина 2 [Текст] / Ю. М. Айвазов. – Київ : НТУ, 2009. – 216 с.
- Айвазов, Ю. М. Проектування метрополітенів (у 3-х частинах). Навчальний посібник. Частина 1 [Текст] / Ю. М. Айвазов. – Київ : НТУ, 2006. – 166 с.
- Фролов, Ю. С. Метрополитены на линиях мелкого заложения. Новая концепция строительства [Текст] / Ю. С. Фролов, Ю. Е. Крук. – Москва : ТИМР, 1994. – 202 с.
- Петренко, В. Д. Обзор аналитических и экспериментальных методов исследования взаимодействия массива и крепи [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин, В. И. Петренко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 1. – С. 75-81.
- Sterling, R. Underground space design [Текст] / R. Sterling. – New York : Van Norstrand Reinhold, 1993. – 370 p.
- Fotieva, N. Design of shallow tunnel linings / N. Fotieva, N. Buluychev, A. Sammal // Proc. of the ISRM International Symposium, Torino, Italy. – Rotterdam: Balkema, 1996. – pp. 654-661.
- Баклашов, И. В. Механика подземных сооружений и конструкции крепей [Текст] / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия. – Москва : Недра, 1984. – 415 с.
- Гарбер, В. А. Научные основы проектирования тоннельных конструкций с учетом технологии их сооружения. В 2-х томах [Текст] / В. А. Гарбер. – Москва : АО ЦНИИС, 1996, т.1. – 170 с.
- Макаров, О. М. Транспортные тоннели и метрополитены [Текст] / О. М. Макаров, В. Е. Меркин. – Москва : ТИМР, 1991. – 171 с.
- SCAD для пользователя [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер и др. – Киев : ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
- Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с.
- Петренко, В. Д. Експериментальні дослідження теорії гірського та гідростатичного тиску на щит при проходці в слабких водонасичених грунтах [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тютькин, О. М. Кулаженко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2016. – Вип. 9. – С. 32-41.
- Hamid Chakeri Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling [Text] / Hamid Chakeri, Rohola Hasanpour, Mehmet Ali Hindistan, Bahtiyar Ünver – Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Berlin : Springer Berlin Heidelberg, 2011, Vol. 70, issue 3, p. 439-448.
- Справочник по механике и динамике грунтов [Текст] / под ред. В. Б. Швеца. – Киев : Будівельник, 1987. – 232 с.
- ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. Метрополітени [Текст]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 195 с.

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup>, А. Л. ТЮТЬКИН<sup>2\*</sup>, А. Б. ХАВИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, эл. почта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>2\*</sup> Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, эл. почта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> ООО «КИЕВМЕТРОПРОЕКТ», ул. Богдана Хмельницкого, 16-22, Киев, Украина, 01030, тел. +38 (044) 484 40 94, эл. почта A.Khavin@metroproekt.kiev.ua

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ, НАХОДЯЩИХСЯ В РАЗНЫХ УРОВНЯХ

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

**Цель.** Создание методологии разработки конечно-элементных моделей для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) обделок перегонных тоннелей, находящихся в разных уровнях. **Методика.** Применение численного метода конечных элементов для расчета НДС обделок перегонных тоннелей по пяти вариантам расположения, находящихся в разных уровнях. Разработаны объемные конечно-элементные модели на основе пространственных элементов, позволяющих учесть размещение перегонных тоннелей в окружающем массиве по глубине и относительно друг друга. **Результаты.** Полученные изолинии и изополя напряженного и деформированного состояний пяти вариантов расположения перегонных тоннелей. Установлено, что размещение перегонных тоннелей непосредственно друг над другом и с некоторым смещением по горизонтали не приводит к увеличению НДС и полностью соответствует требуемым значениям горизонтальных, вертикальных, продольных и касательных напряжений в железобетонной обделке с учетом различного вида нагрузок. **Научная новизна.** Выводы численного анализа НДС пяти конечно-элементных моделей (пяти вариантов) в программном комплексе SCAD свидетельствуют о достаточном запасе прочности бетона для всех пяти вариантов оправ перегонных тоннелей, находящихся в разных уровнях, поскольку расчетная прочность для бетона класса В30 составляет 21 МПа. **Практическая значимость.** На основе результатов анализа можно рекомендовать запроектированные варианты конструкций, имеющих высокий уровень прочности, к внедрению обделок перегонных тоннелей, находящихся в разных уровнях, с целью существенного уменьшения объемов использования подземного пространства при сооружении объектов метрополитена мелкого заложения в мегаполисах Украины.

*Ключевые слова:* перегонные тоннели, находящиеся в разных уровнях; мелкое заложение; цельносекционная обделка; напряжения; перемещения; напряженно-деформированное состояние; метод конечных элементов

V. D. PETRENKO<sup>1</sup>, O. L. TIUTKIN<sup>2\*</sup>, A. B. KHAVIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department «Bridges and Tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 50 69, e-mail petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

<sup>2\*</sup> Department «Bridges and Tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> «KIEVMETROPROEKT» LTD, Bohdana Khmelnytskogo Str., 16-22, Kiev, Ukraine, 01030, tel. +38 (044) 484 40 94, e-mail A.Khavin@metroproekt.kiev.ua

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE RUNNING TUNNELS STRUCTURES IN DIFFERENT LEVELS

**Purpose.** Creation of the methodology for the development of finite element models for determining the stress-strain state (SSS) of lining tunnels located in different levels. **Methodology.** The application of the numerical finite element method for calculating the SSS of the lining of the running tunnels according to five variants of their location at different levels. The volume finite-element models are developed on the basis of spatial elements, allowing to take into account the location of the running tunnels in the surrounding massif in depth and relatively to each other. **Findings.** Obtained isolines and contour plots of strained and deformed states of five variants of the location of the running tunnels. It is established that the placement of the running tunnels directly above each other and with some horizontal displacement does not lead to an increase of SSS and fully corresponds to the required values of horizontal, vertical, longitudinal and shear stresses in reinforced concrete lining, taking into account the different types of loads. **Originality.** Conclusions of the numerical analysis of the SSS of five finite element models (five variants) in the SCAD program complex indicate to a sufficient margin of concrete strength for all five variants of the tunnels located at different levels, since the calculated strength for concrete of the class В30 is 21 МПа. **Practical value.** On the basis of the analysis results, it is possible to recommend designed versions of structures having a high level of strength to the introduction of running tunnels located at different levels, in order to significantly reduce the using of underground space under construction of subway facilities in shallow contour interval in megalopolises of Ukraine.

*Keywords:* running tunnels; located in different levels; shallow contour interval; all-section lining; tensions; displacement; stress-strain state; finite element method

REFERENCES

1. Petrenko V. I., Petrenko V. D., Tjut'kin A. L., *Sovremennye tehnologii stroitel'stva metropolitenov v Ukraine* [Modern technologies of building subways in Ukraine], *Nauka i osvita – Science and education*, 2005, 252 p.
2. Ajvazov Ju. M. Proektuvannja metropoliteniv (u 3-kh chastynakh). Navchal'nyj posibnyk. Chastyna 2 [Design of subways (in 3 parts). Tutorial. Part 2]. Kyjiv, NTU Publ., 2009. 216 p.
3. Ajvazov Ju. M. Proektuvannja metropoliteniv (u 3-kh chastynakh). Navchal'nyj posibnyk. Chastyna 1 [Design of subways (in 3 parts). Tutorial. Part 1]. Kyjiv, NTU Publ., 2006. 166 p.
4. Frolov Ju. S., Ju. E. Kruk Metropoliteny na linijah melkogo zalozhenija. Novaja koncepcija stroitel'stva [Subways on small lines. New construction concept]. Moscow, TIMR Publ., 1994. 202 p.
5. Petrenko V. D., Tjut'kin A. L., Petrenko V. I. Obzor analiticheskikh i jeksperimental'nyh metodov issledovanija vzaimodejstvija massiva i krepі [A review of analytical and experimental methods for studying the interaction of an array and a support]. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka –Bridges and tunnels : theory, research, practice*, 2012, issue 1, pp. 75-81.
6. Sterling R. Underground space design. New York, Van Norstrand Reinhold Publ., 1993. 370 p.
7. Fotieva N., Bulychev N., Sammal A. Design of shallow tunnel linings. *Proc. of the ISRM International Symposium, Torino, Italy*. Rotterdam, Balkema Publ., 1996. pp. 654-661.
8. Baklashov I. V., Kartoziya B. A. Mehanika podzemnyh sooruzhenij i konstrukcii krepей [Mechanics of underground structures and construction of supports]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 415 p.
9. Garber V. A. Nauchnye osnovy proektirovanija tonnel'nyh konstrukcij s uchetom tehnologii ih so-oruzhenija. V 2-h tomah [Scientific basis for designing tunnel structures taking into account the technology of their construction. In 2 volumes]. Moscow, AO CNIIS Publ., 1996, vol.1. 170 p.
10. Makarov O. M., Merkin V. E. Transportnye tonneli i metropoliteny [Transport tunnels and subways]. Moscow, TIMR Publ., 1991. 171 p.
11. Karpilovskiy V. S., Kriksunov E. Z., Perelmutter A. V. i dr. *SCAD dlya polzovatelya* [SCAD user]. Kyjiv, VVP «Kompas» Publ., 2000. 332 p.
12. Perelmutter A. V., Slivker V. I. *Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost ikh analiza* [Computational models of structures and the possibility of their analysis]. Kyjiv, Stal Publ., 2002. 600 p.
13. Petrenko V. D., Tjut'kyn A. L., Kulazhenko O. M. Eksperymentaljni doslidzhennja teorij ghirsjkogho ta ghidrostatychnogho tysku na shhyt pry prokhodci v slabkykh vodonasychenykh gruntakh [Experimental studies of theories of mountain and hydrostatic pressure on the shield during passage in weak water-soaked soils]. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka –Bridges and tunnels : theory, research, practice*, 2016, issue 9, pp. 32-41.
14. Hamid Chakeri Rohola Hasanpour, Mehmet Ali Hindistan, Bahtiyar Ünver Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Berlin, Springer Berlin Heidelberg Publ., 2011, Vol. 70, issue 3, p. 439-448.
15. Spravochnik po mehanike i dinamike gruntov [Handbook on mechanics and soil dynamics]. Pod red. Shveca V. B. Kyjiv, Budivel'nyk Publ., 1987, 232 p.
16. *DBN V.2.3-7-2010. Sporudy transportu. Metropoliteny* [State Standard V.2.3-7-2010. Transport construction. Undergrounds], Kyjiv, DP Ukrarkhbudininform Publ., 2011, 195 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. М. Біляєвим, д.т.н, проф. Й. Й. Лучко

Надійшла до редколегії 07.07.2018

Прийнята до друку 22.10.2018