

Д-р техн. наук, проф. В.Д. Петренко,
д-р техн. наук, доц. В.Т. Гузченко,
канд. техн. наук, доц. О.Л. Тютюкін (ДПТ)

РОЗРАХУНОК ЕСКАЛАТОРНОГО ТУНЕЛЮ ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОННОЮ ОПРАВОЮ МСЕ

В статті наведена методика розрахунку ескалаторного тунелю із залізобетонною оправою з використанням методу скінченних елементів. Наведено, що при визначенні напружено-деформованого стану тунелю необхідно розраховувати параметри його деформування при роботі сумісно з верхнім вестибюлем та натяжною камерою.

CALCULATION THE ESCALATOR OF THE TUNNEL WITH A REINFORCED-CONCRETE CASING MSE

In the article the calculation method of escalator tunnel with reinforced concrete lining with the using of the finite elements method is resulted. It is shown that at determination of the tensed and deformed state of tunnel it is necessary to expect the parameters of his deformation during work jointly with an overhead vestibule and a tension chamber.

Ескалаторні комплекси відносяться до одних із найбільш складних підземних споруд метрополітену. Їх будівництво пов'язано із значними складнощами, які зумовлені тим, що ці споруди розташовані, як правило, поблизу міських будівель. Крім того, ескалаторні тунелі мають великі розміри поперечного перерізу, пройдені під кутом 30° до горизонту і перетинають ґрунти різної міцності і вологості. Як правило їх проходять із застосуванням спеціальних способів (заморожування, хімічне закріплення, водозниження). Тому дуже важливим є закріплення перших постійних кілець оправи ескалаторного тунелю до залізобетонного оголовку або бетонного кільця за допомогою анкерів.

При застосуванні заморожування ґрунтів після їх розморожування порушується природна структура і, як наслідок, зменшується несуча здатність. Ці явища характерні для глин і суглинків. Внаслідок цього і розвитку гірського тиску після розморожування ґрунтів можуть виникати значні осадки ескалаторного тунелю в його верхній частині із викривленням поздовжньої осі. По характеру взаємодії із ґрунтом ескалаторний тунель подібний консолі, яка закріплена в нижніх більш міцних і стійких ґрунтах. При приєднанні ескалаторного тунелю до вестибюлю, навантаження збільшується і це викликає більшу осадку оправи, що обумовлюється стисканням оточуючого тунель ґрунту. Враховуючи вище викладене в період будівництва постійно проводять контроль осадок кілець оправи тунелю із метою недопущення просадок, що перевищують нормативні значення і при необхідності приймаються міри по забезпеченню нормального стану виробки.

Для розрахунку ескалаторного тунелю із залізобетонною оправою прийнятий реальний об'єкт – ескалаторний тунель станції „Сирецька” Київського метрополітену, споруджений в 2003 р. Для дослідження напружено-деформованого стану (НДС) похилого тунелю, створено просторову модель із

об'ємних елементів, яка найбільше відображає наступні особливості реальної конструкції:

- вплив просторового фактору на формування напруженого стану, тобто вплив третьої компоненти σ_y на компоненти σ_x та σ_z ;

- найбільш повне відтворення взаємодії залізобетонної чи чавунної конструкції із ґрунтовим масивом, який у загальному змінює свої властивості.

Застосування об'ємних елементів, хоча й ускладнює процес розрахунку, формує дійсний стан кожного елемента з позиції теорії пружності, тобто у кожному елементі є три компоненти нормальних (N_x, N_y, N_z) і три компоненти дотичних напружень (T_{xy}, T_{xz}, T_{yz}), та подібні їм компоненти деформацій.

В прийнятій моделі застосовуються ізопараметричні об'ємні елементи неправильної форми [1] (окрім елементів, які моделюють ґрунтовий масив навколо ескалаторного тунелю – ізопараметричні октаедри на основі паралелограму (октаедрична призма з криволінійними ребрами) та ізопараметричний елемент на основі трикутника (тетраедр з криволінійними ребрами). Усі елементи в моделі надані із співпадаючими вузлами, що дозволяє отримати найбільшу точність, чим в моделях з неузгодженими вузлами. В моделях також не застосовуються «голчасті» елементи, тобто, ні в призмах ні в тетраедрах не має гострих кутів, які менш всього передають напруження у зв'язку із зміною форми [1, 2].

Модель виконувалась шляхом копіювання прототипу (рис. 1). Кількість скінченних елементів – 15315 шт., кількість вузлів – 19536 м, загальний розмір моделі: по довжині – 108 м, по ширині – 18,25 м, по глибині закладення – 63 м. Збіжність моделі нормальна, без флуктуацій. Ізолінії напружень та переміщень мають гладкий характер, що також підтверджує їхню достатню збіжність.

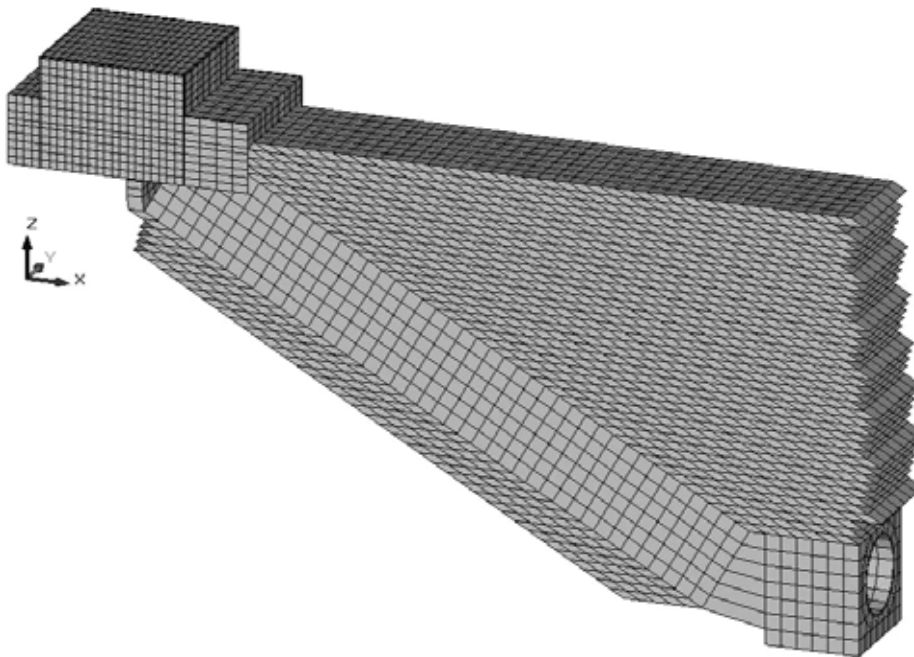


Рис. 1 – Загальна схема моделі ескалаторного комплексу

Питання вибору форми й типу скінченних елементів (СЕ) тісно пов'язане з проблемою впливу дискретизації на результати розрахунку методом скінченних елементів (МСЕ). Проблему становить взаємодія і сумісна робота СЕ різної метрики (плоскі, просторові, ізопараметричні елементи) [3]. Інформація про отримання точних чи приблизних рішень систем з скінченими елементами різної метрики незначна.

Після створення просторової моделі їм надавалися деформаційні характеристики (модуль пружності–деформації, коефіцієнт Пуассона), причому для ґрунту та бетону вони задавалися окремо. Після надання деформаційних характеристик на модель накладалися адекватні граничні умови. Після цього виконувався розрахунок, і його результати піддавалися ґрунтовному аналізу.

Крім ескалаторного тунелю для більшої адекватності моделі реальній споруді змодельований наземний вестибюль та підземна камера (рис. 2, 3). Це дозволило змодельувати більш точні умови прилягання ескалаторного похилого тунелю до підземних конструкцій та не потребувало вводити додаткові гіпотези щодо опирання конструкції тунелю. Такі розрахунки із моделюванням не лише конструкції похилого тунелю, але й прилягаючих підземних конструкцій, є оригінальними, так як ті ж розрахунки, виконані іншими авторами [4, 5], включали в себе лише відтворення конструкції похилого тунелю, що впливало на достовірність отриманих результатів.

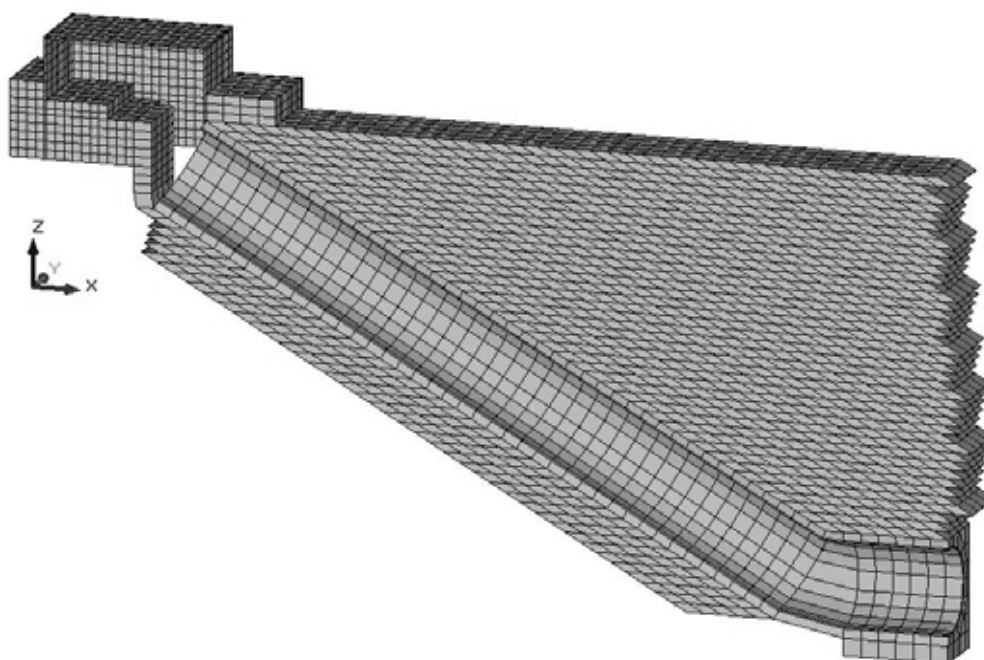


Рис. 2 – Розріз моделі по осі ескалаторного тунелю

Достатньо оригінально проведене спряження ескалаторного тунелю та підземної натяжної камери – на основі криволінійних ізопараметричних скінченних елементів (рис. 4) [6].

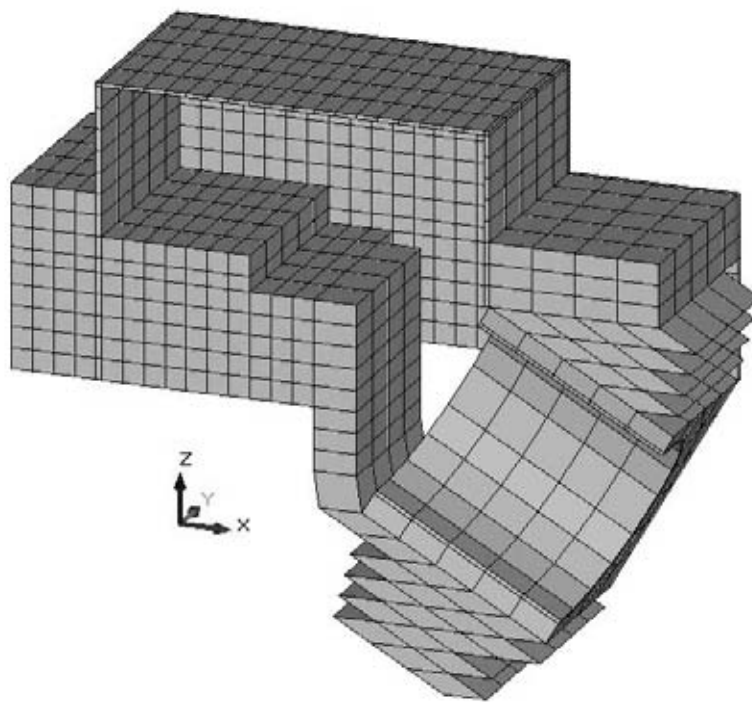


Рис. 3 – Схема вестибюлю (фрагмент моделі)

Усі геометричні характеристики та інженерно-геологічні дані, які взято із технічної документації, застосовувалися у розрахунках без змін, і це підтверджує високу точність отриманих результатів [7].

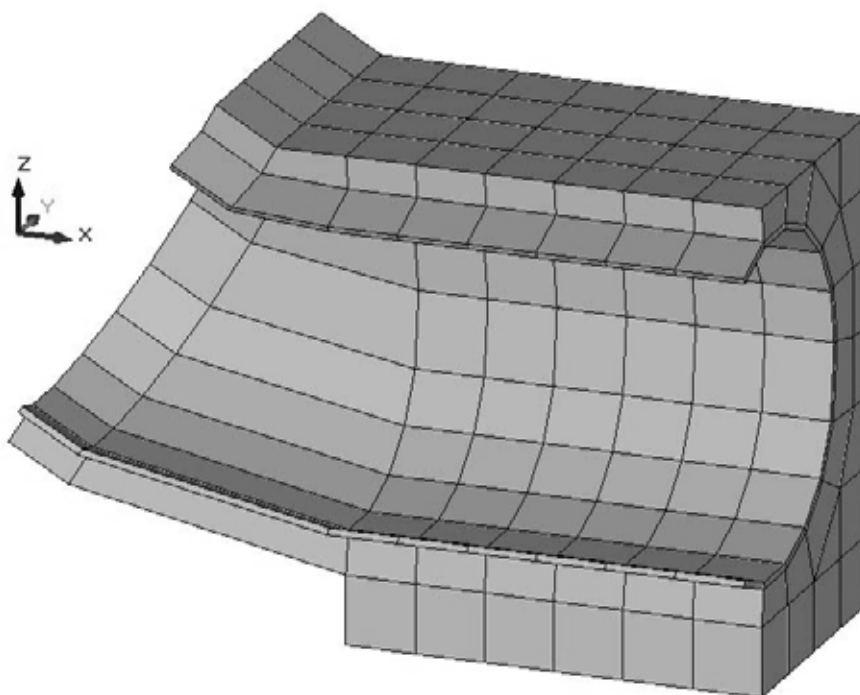


Рис. 4 – Схема камери (фрагмент моделі)

Для того, щоб не вводити у модель додаткові положення щодо розподілення навантажень на усі її частини, змодельований оточуючий їх ґрунт, якому надані реальні деформаційні характеристики, а також власна вага. Розрахунок моделі проводиться лише на власну вагу, причому кожній частині моделі надаються характеристики того матеріалу, із якого вона виконана. Власна вага та деформаційні характеристики ґрунту надаються за даними лабораторних випробувань. Це дозволяє також не вводити положень щодо розподілення жорсткостей та їх взаємодії між собою, так як у моделі ґрунтового масиву проводиться врахування шаруватості масиву, причому кожному шару надаються фізико-механічні властивості. Змінним параметром моделі є деформаційні характеристики шарів оточуючого масиву в залежності від виду ґрунту шару, а деформаційні характеристики залізобетону та чавуну залишаються незмінними і складають: модуль пружності $E=38,5 \cdot 10^6$ кН/м², коефіцієнт Пуассона $\mu=0,02$, питома вага $\gamma=25$ кН/м³. Ці деформаційні характеристики відповідають залізобетонним блокам з поперечним перетином $0,5 \times 0,75$ м на основі бетону В30 та арматури А II з коефіцієнтом армування 3...5 %. Слід відзначити, що коефіцієнт Пуассона μ для залізобетону занадто знижений на відміну від бетону, що відповідає дійсності, так як значення поперечних деформацій в залізобетоні значно менше.

Карта деформаційних характеристик (рис. 5) повністю відповідає деформаційним характеристикам шарів, а геометричні координати залягання шарів по висоті відповідають інженерно-геологічному розрізу. Деформаційні характеристики шарів ґрунту в оточуючому масиві взяті із опису інженерно-геологічних елементів, які відповідають реальним інженерно-геологічним умовам закладення ескалаторного тунелю станції „Сирецька”.

Жорсткість 1 (бетон спрягання натяжної камери): модуль пружності $E=30 \cdot 10^6$ кН/м²; коефіцієнт Пуассона $\mu=0,2$; питома вага $\gamma=24,25$ кН/м³.

Жорсткість 2 (мілкий пісок): модуль пружності $E=38 \cdot 10^3$ кН/м²; коефіцієнт Пуассона $\mu=0,2$; питома вага $\gamma=17,0$ кН/м³.

Жорсткість 3 (суглинок м'який): модуль пружності $E=17 \cdot 10^3$ кН/м²; коефіцієнт Пуассона $\mu=0,25$; питома вага $\gamma=18,0$ кН/м³.

Жорсткість 4 (суглинок твердий): модуль пружності $E=25 \cdot 10^3$ кН/м²; коефіцієнт Пуассона $\mu=0,3$; питома вага $\gamma=18,0$ кН/м³.

Жорсткість 5 (глина тверда): модуль пружності $E=21 \cdot 10^3$ кН/м²; коефіцієнт Пуассона $\mu=0,3$; питома вага $\gamma=18,0$ кН/м³.

Жорсткість 6 (залізобетон оправи та наземного вестибюлю): модуль пружності $E=38,5 \cdot 10^6$ кН/м²; коефіцієнт Пуассона $\mu=0,02$; питома вага $\gamma=25$ кН/м³.

Розрахунок проводився на основі МСЕ, який базується на мультифронтальному методі розкладення матриці жорсткості без помилок із сторони розрахункового методу. Для всіх розрахунків застосовувався ліцензійний професійний комплекс Structure CAD for Windows, version 7.29 R.3 (SCAD).

На рис. 6, 7 наведені результати розрахунку ескалаторного комплексу станції „Сирецька”. Аналіз напружень та переміщень ескалаторного комплексу, оправи тунелю та спрягання тунелю із натяжною камерою дає можливість

зробити висновки щодо поведінки в шаруватому масиві та впливу жорсткості оправи на розвиток НДС.

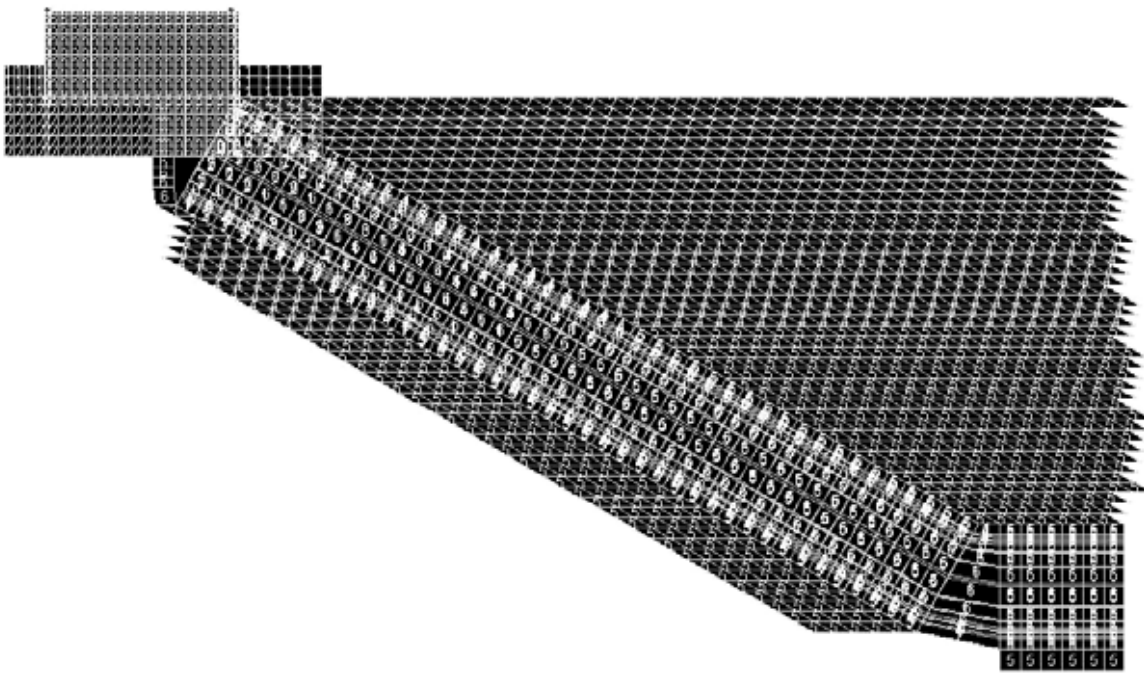


Рис. 5 – Карта деформаційних характеристик моделі станції „Сирецька” із залізобетонною оправою

По-перше, аналіз напружень по осі X свідчить про те, що їх значення знаходяться у нормативних межах. Але розвиток цих переміщень відбувається аж до поверхні, на якій утворюється значна мульда опускання із значними горизонтальними переміщеннями (до 45 мм). Вертикальні деформації сягають величини до 500 мм, що дає змогу зробити висновок про потребу виконання дослідження розвитку переміщень денної поверхні. Мутьда опускання значно розвивається над ескалаторним тунелем, затухаючи біля наземного вестибюлю, осадки якого складають біля 35 мм і є нормальними. Причому однорідність поля переміщень по осі Z в наземному вестибюлі свідчить про його нормальну експлуатацію. Основним висновком є те, що найбільші переміщення та напруження проявляються в другій половині тунелю. Найважча ситуація у відношенні напружень спостерігається в спряганні ескалаторного тунелю із натяжною камерою. Переміщення по осі X значенням 27...30 мм змінюють свій знак в другій половині ескалаторного тунелю від кільця 50 до 95, тобто переміщення оправи проходять всередину кільця. Явна неоднорідність переміщень по осі X зумовлена шаруватістю масиву, що відмічається і в переміщеннях по осі Z , ізолінії яких вигинаються на границі переходу шарів.

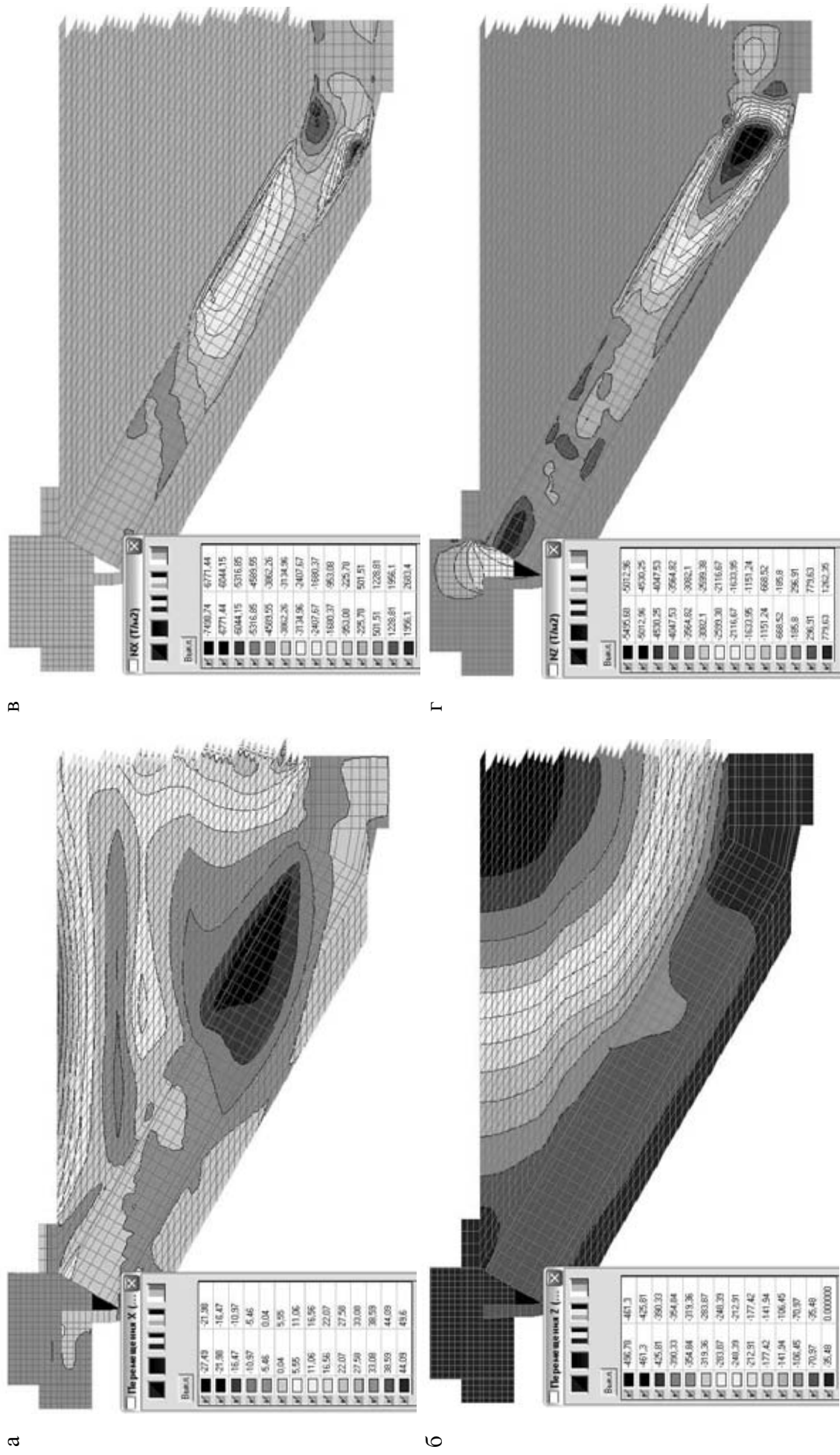
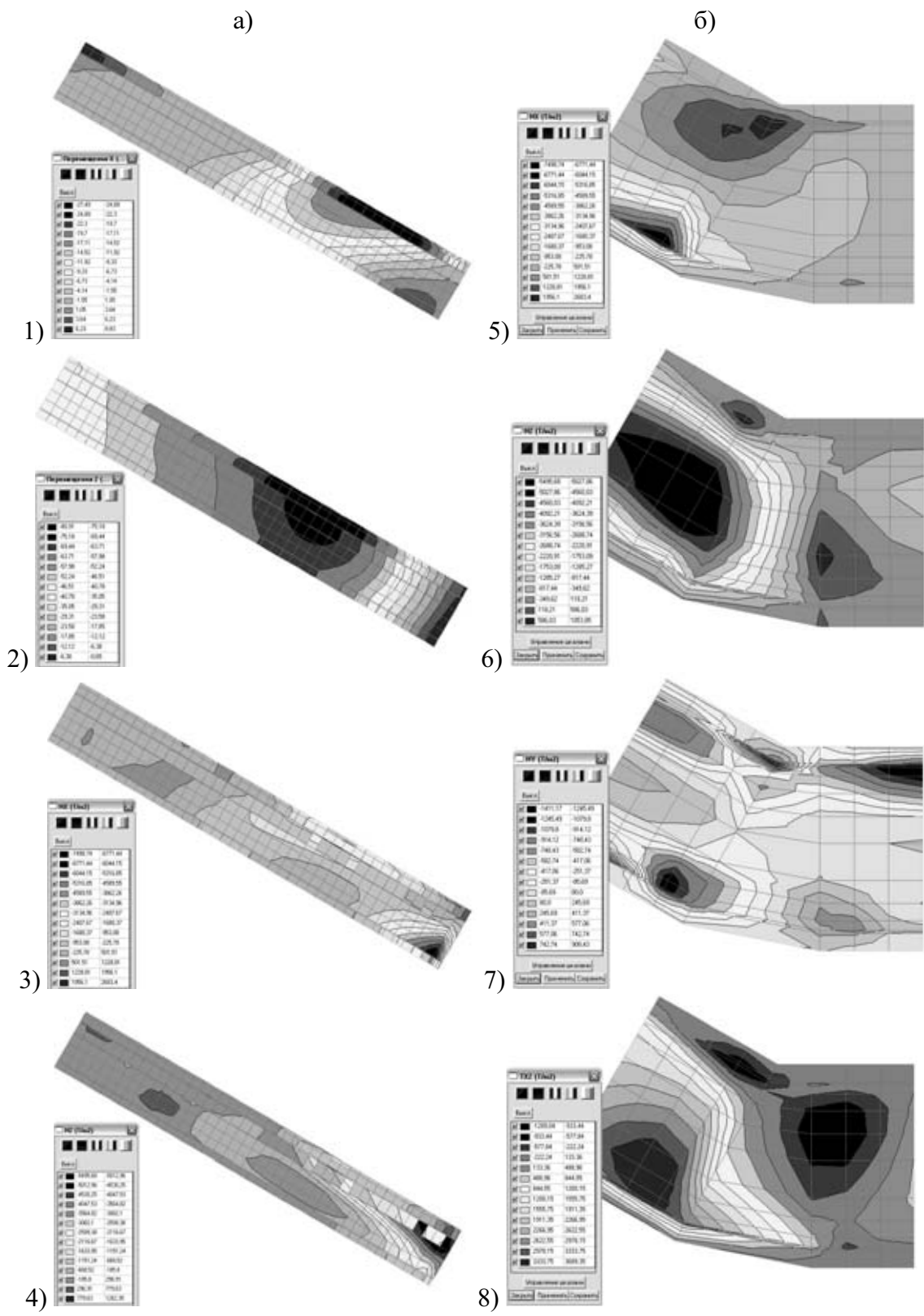


Рис. 6. Ізолінії та ізополя параметрів напружено-деформованого стану ескалаторного комплексу станції „Сирецька”:
 а) переміщення по осі X; б) переміщення по осі Z;
 в) нормальних напружень по осі X; г) нормальних напружень по осі Z



1) переміщень по осі X; 2) переміщень по осі Z; 3), 5) нормальних напружень по осі X; 4), 6) нормальних напружень по осі Z; 7) нормальних напружень по осі Y; 8) дотичних напружень в площині XZ

Рис. 7 – Ізолінії та ізополя параметрів НДС оправи ескалаторного тунелю (а) та його спр'ягання із натяжною камерою (б) станції „Сирецька”:

Аналіз найбільших напружень проводиться в спряганні ескалаторного тунелю із натяжною камерою. Екстремальні значення нормальних напружень складають: $N_z - 0,55$ МПа, $N_x - 0,75$ МПа, $N_y - 0,14$ МПа, що свідчить про те, що вони не є критичними для залізобетону оправи, але розтягуючий характер наприклад напруження N_x , може свідчити про деякі складності при експлуатації тунелю. Але ці складності носять об'єктивний характер і зумовлені формуванням НДС масиву на значних глибинах при складних інженерно-геологічних умовах.

Характер дотичних напружень T_{xz} свідчить про їх неоднорідний розподіл та наявність на одному відрізку конструкції від кілець № 90 до кінця натяжної камери зони як розтягу, так і стиску. Цей факт також доводить те, що особливу увагу при будівництві ескалаторних тунелів слід приділяти спряганням оправи похилого тунелю в місці наземного вестибюлю та натяжної камери. Значення дотичних напружень T_{xz} (від 0,33 до $-0,13$ МПа) також свідчать про те, що критичними для залізобетону і для чавуну вони не являються.

Основними висновками аналізу результатів розрахунку ескалаторного тунелю є такі:

- 1) отримані за допомогою МСЕ напруження в оправі не можна вважати критичними, тобто оправа знаходиться в нормальному експлуатаційному стані;
- 2) деформації кілець залізобетонної оправи залежать від інженерно-геологічних умов, в яких вони розташовані; в розглянутому прикладі загальна величина деформацій не перевищує допустимих величин;
- 3) шаруватість ґрунтів значної деформативності суттєво не впливає на напружено-деформований стан конструкції; при наявності в верхній частині шару менш деформативного ґрунту значної товщини суттєво змінює характер напруженого стану. Напруження збільшується, але вони значно менші критичних значень;
- 4) при забезпеченні чіткого виконання технології робіт (цикл заморожування-відтаювання, нагнітання розчинів за оправу тощо) конструкції тунелів відповідають нормативним вимогам і мають високу надійність, причому застосування залізобетонних оправ в ескалаторних тунелях по напружено-деформованому стані обґрунтовано і забезпечує високу ефективність роботи підземних споруд.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Основы метода конечных элементов. / Большаков В.И., Яценко Е.А., Соссу Г. и др. – Днепропетровск: ПГАСиА, 2000. – 255 с.
2. Немчинов Ю.И. Метод пространственных конечных элементов. – К.: НИИСК, 1995. – 368 с.
3. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений / Городецкий А.С., Заворицкий В.И., Лантух-Лященко А.И., Рассказов А.О. – М.: Транспорт, 1981. – 143 с.
4. Гульбе В.И., Косицын С.Б., Долотказин Д.Б. Пространственный расчет несущей конструкции эскалаторного зала проектируемого второго выхода станции метро «Маяковская» // Метро. – 1994. – № 5-6. – С. 31-32.
5. Чурадзе Т. Численный анализ пространственного напряженного состояния эскалаторного тоннеля // Метро. – 1996. – № 3. – С. 37-38.
6. Петренко В.Д., Тютюкин А.Л. К вопросу о дискретизации конечно-элементных моделей / Сб. научн. тр. ПГАСиА «Строительство. Материаловедение. Машиностроение», Днепропетровск, 2002. – Вып. 18. – С. 123-128.
7. Тютюкин А.Л. Имитационная модель системы «крепь-массив» на основе принципа дискретных состояний / Сб. науч. тр. НГА Украины № 13, том 1. – Днепропетровск: РИК НГА, 2002. – С. 45-50.