

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ НОВИХ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ОБРОБКИ ПІЛОННОЇ СТАНЦІЇ

У статті наведено чисельний аналіз впливу нових конструктивних рішень у конструкціях пілонних станцій. Виявлено, що введення яких-небудь нових елементів у конструкцію підземної споруди потребує ґрунтового аналізу, оскільки зміна напружено-деформованого стану в таких випадках не завжди змінюється в кращу сторону.

В статье приведен численный анализ влияния новых конструктивных решений в конструкциях пилонных станций. Определено, что ввод каких-либо новых элементов в конструкцию подземного сооружения требует обстоятельного анализа, так как изменение напряженно-деформированного состояния в таких случаях не всегда изменяется в лучшую сторону.

The article features a numerical analysis of influence of new design decisions in constructions of pylon stations. It has been concluded that introduction of any new elements in the construction of an underground structure requires a detailed analysis, because the tensed-and-deformed state of the structure in such cases does not always change for the better.

Використання трисклепінчастих станцій пілонного типу при будівництві метрополітенів глибокого закладення дуже поширене у великих містах України. Завдяки простоті спорудження та надійності експлуатації вони є достатньо розповсюдженим типом станцій у вітчизняній та зарубіжній практиці підземного будівництва уже десятки років. У той же час це найменш досліджений вид будівельних конструкцій, що пов'язано з недостатнім науковим обґрунтуванням розрахунку такого типу станцій з урахуванням специфічних взаємодій обробки та масиву [1; 2].

Існуючі на даний час методики проектування, розрахунку та оптимізації конструктивних елементів трисклепінчастих станцій пілонного або колонного типу базуються на побудові плоских розрахункових схем конструкції та інтерпретації оточуючого масиву з деякими припущеннями, які спрощують його реальну поведінку. Даний підхід не дозволяє правильно визначити напружено-деформований стан цієї складної конструкції, оскільки відкидається такий важливий фактор, як просторовість роботи та перекручується реальна взаємодія між обробкою станції та оточуючим масивом [3; 4]. У результаті конструкції пілонних станцій вважаються нераціональними та неекономічними. Авторами пропонується застосування просторової розрахункової схеми, яка дозво-

ляє реалізувати ряд нових пропозицій, а саме можливість зміни жорсткостей конструкції близько до реальної конструкції, проведення розрахунків з видами масиву, який має складні нелінійні властивості, урахування неоднорідності як масиву, так і навантаження на конструкцію, анізотропію. Найважливішу роль у аналізі напружено-деформованого стану системи «кріплення-масив» відіграє дослідження механізму роботи, існування та взаємодії двох частин цієї системи. Причому з'ясування механізму роботи – фундаментальне знання, яке дозволить проводити такі види досліджень, як чисельний аналіз, імітаційне моделювання, побудова моделі за допомогою його первісних фундаментальних властивостей тощо.

Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення пілонного типу являє собою складний процес, який включає аналіз циліндричних оболонки, які послаблені отворами, та системи переминок й пілонів (колон) за умови невизначеності величини навантажень та взаємодії конструкції з оточуючим масивом. Існуючі методи досліджень та розрахунку на міцність конструкцій трисклепінчастих станцій передбачають розділення суцільної конструкції на ряд елементів, які розраховуються за допомогою аналітичних методів будівельної механіки [5; 6].

Такий підхід призводить до неврахування найважливішого фактора, від якого залежить

напружено-деформований стан конструкції, – просторовості її роботи [4]. Неврахування просторового фактора та уведення припущень про використання плоских розрахункових схем – головні причини отримання неадекватного уявлення про роботу споруди, наслідками якого є або створення невиправданих запасів міцності, або існування недопустимих напружень та деформацій [7; 8].

Важливим питанням розрахунку напружено-деформованого стану конструкції станції залишається питання про вплив нових конструктивних рішень, які пропонуються проектувальниками підземних споруд. На даний термін важливими конструктивними рішеннями у пілонних станціях є:

- 1) створення монолітної балки над прорізом станції на всю її довжину;
- 2) заміна ґрунтового пілону залізобетонним.

Ряд авторів відмічає зручність та ефективність застосування методи скінченних елементів (МСЕ) в розрахунках станцій пілонного і колонного типів [7–9]; деякі дослідники виділяють просторовість роботи конструкції як важливий фактор, що впливає на аналіз конструкції [4; 7; 8]. Застосування МСЕ також обґрунтовано його реалізацією на ПЕОМ. Таке впровадження методу дозволяє формувати умови навантаження різноманітного ступеня складності, у тому числі й нерівномірні, граничні умови; розглядати конструкції нерегулярної геометричної структури. Також за допомогою МСЕ можливо відображати суттєві властивості реальних об'єктів у наочному та зручному вигляді. Враховуючи вищесказане, МСЕ був обраний як метод дослідження в цій роботі. Аналіз впливу нових конструктивних рішень проводився на базі пакета прикладних програм професійного рівня Structure CAD for Windows, version 7.29 R.3 (SCAD), яка дозволяє змодельовати конструкцію, надати їй необхідну жорсткість, задати конструкції навантаження і зробити розрахунок. Правильність та адекватність моделювання МСЕ даної конструкції забезпечується коректним використанням МСЕ з додержанням вимог деяких рекомендацій, пов'язаних зі специфікою методу.

Для моделювання конструкції станції спочатку необхідно змодельовати окремі елементи конструкції, наприклад, частини бокового і середнього тунелів для пілонної станції, чи частини бокового і середнього склепіння та колон для колонної станції. Після того як

окремі елементи конструкції готові і їм задана їхня жорсткість, можна приступати до збирання всієї конструкції (режим збирання у комплексі SCAD). Навколо конструкції станції моделюють також шар ґрунту і задають йому його жорсткість. Продуктом розрахунку цієї програми є графічне зображення в ізолінях напружень та переміщень конструкції.

Проаналізуємо вищезазнані випадки нових конструктивних рішень.

### 1. Монолітна балка над проїмом на всю довжину станції

Дані розрахунку: станція із збірного залізобетону В40 з модулем пружності 390 МПа та коефіцієнтом Пуассона рівним 0,2. Змодельований ґрунт навколо станції – суглинок твердий, з модулем пружності 35 МПа та коефіцієнтом Пуассона рівним 0,3. Загальна кількість скінченних елементів складала 5301 штуку. На рис. 1. наведено модель пілонної станції із залізобетонною балкою. Як видно, модель просторова, що дозволяє реалізовувати більш адекватні реальним параметрам системи взаємодії у системі «станція-ґрунт». На рисунку чітко видно балку, яку відтворено в моделі, її характеристики узяті із реального випадку уведення такого нового конструктивного рішення на об'єктах Київського метрополітену.

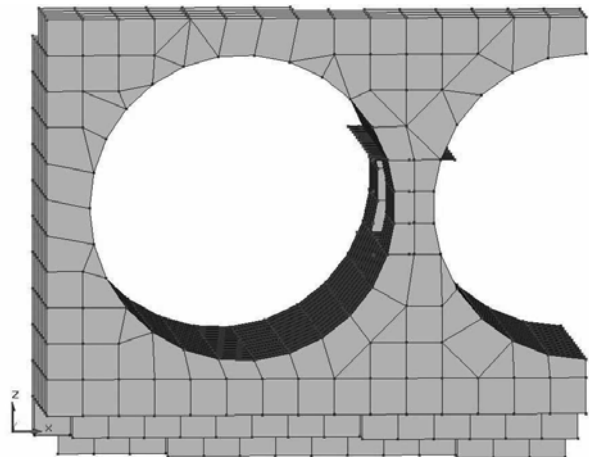


Рис. 1. Модель пілонної станції з залізобетонною балкою на всю довжину в презентаційній графіці програми SCAD

На рис. 2–4 наведені результати розрахунку наведеної моделі. Для порівняння на рис. 5–7 наведені ідентичні параметри в моделі станції, яка не має залізобетонної балки (стандартна конструкція пілонної станції).

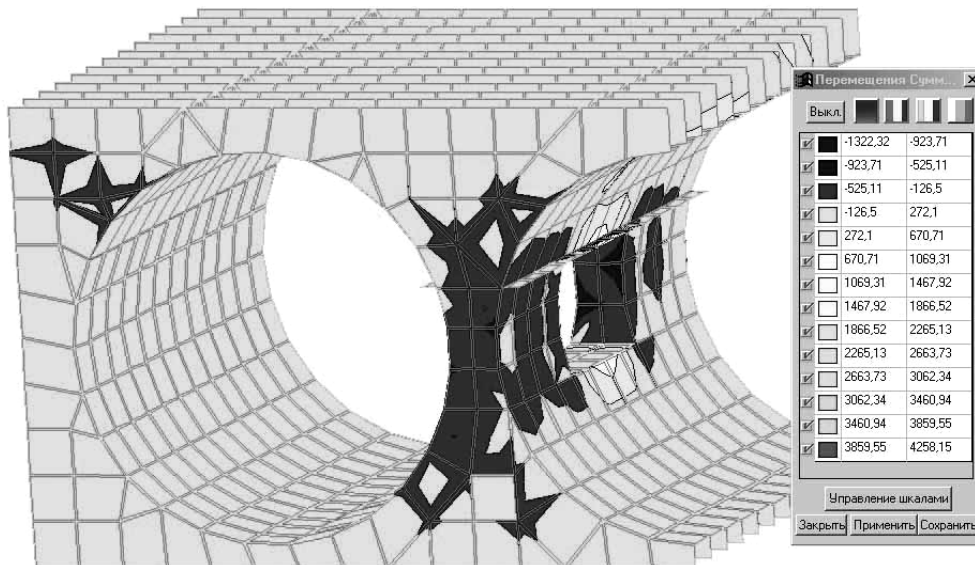


Рис. 2. Ізолінії та ізополю головних напружень  $\sigma_1$  у моделі станції з залізобетонною балкою

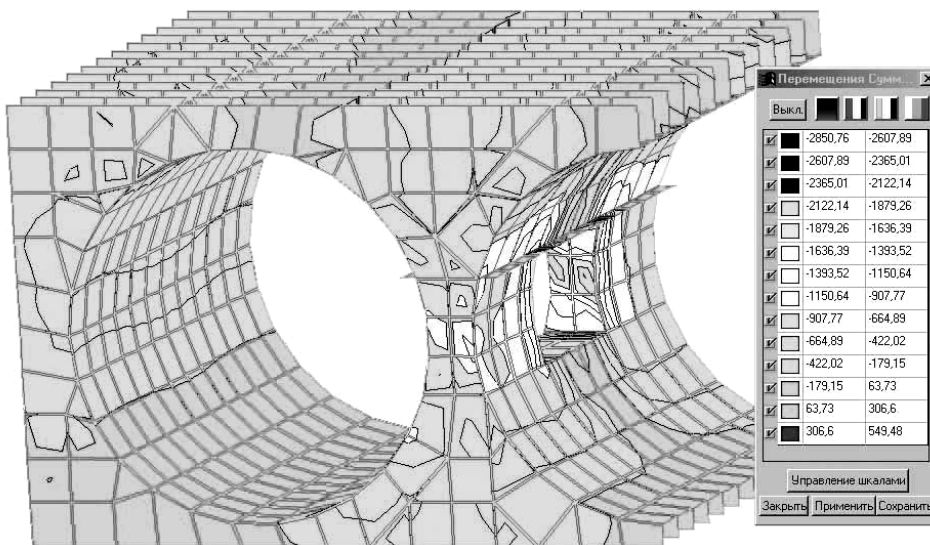


Рис. 3. Ізолінії та ізополю головних напружень  $\sigma_3$  у моделі станції з залізобетонною балкою

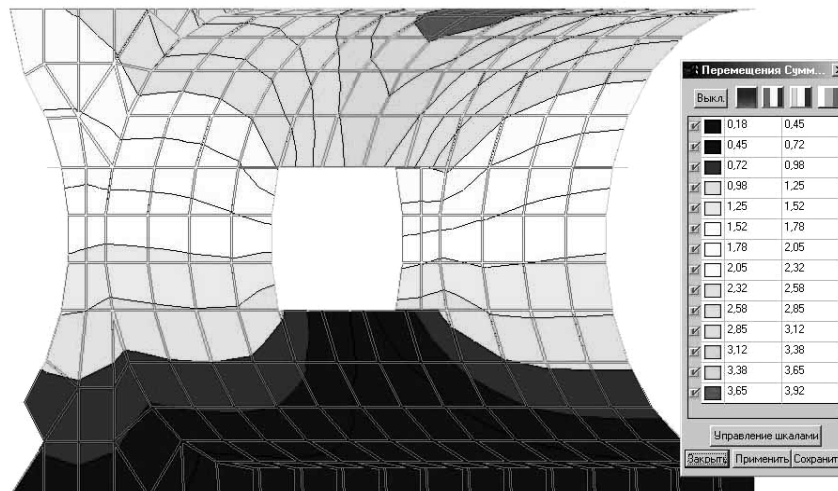


Рис. 4. Ізолінії та ізополю сумарних переміщень у моделі станції з залізобетонною балкою

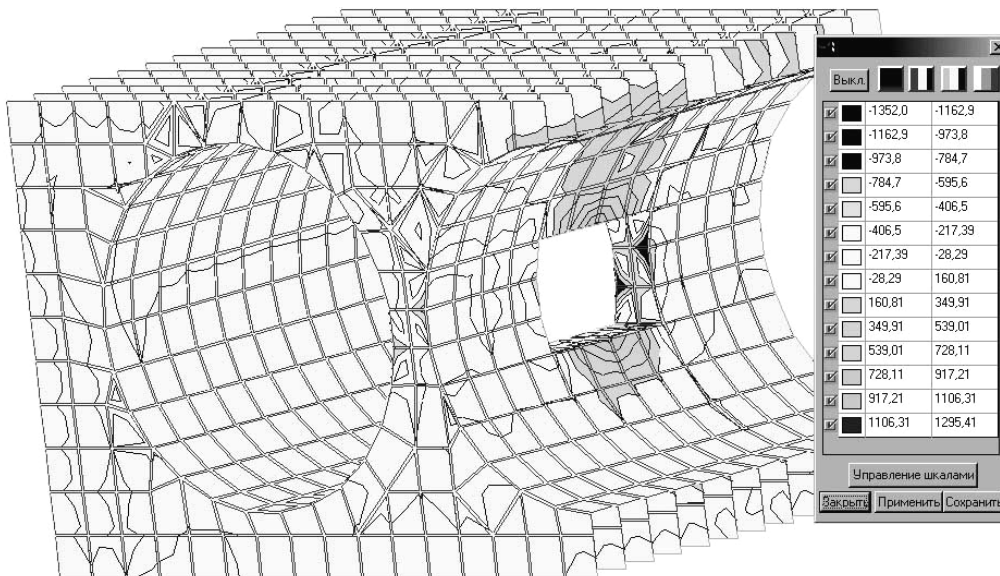


Рис. 5. Ізолінії та ізополя головних напружень  $\sigma_1$  у моделі станції без залізобетонної балки

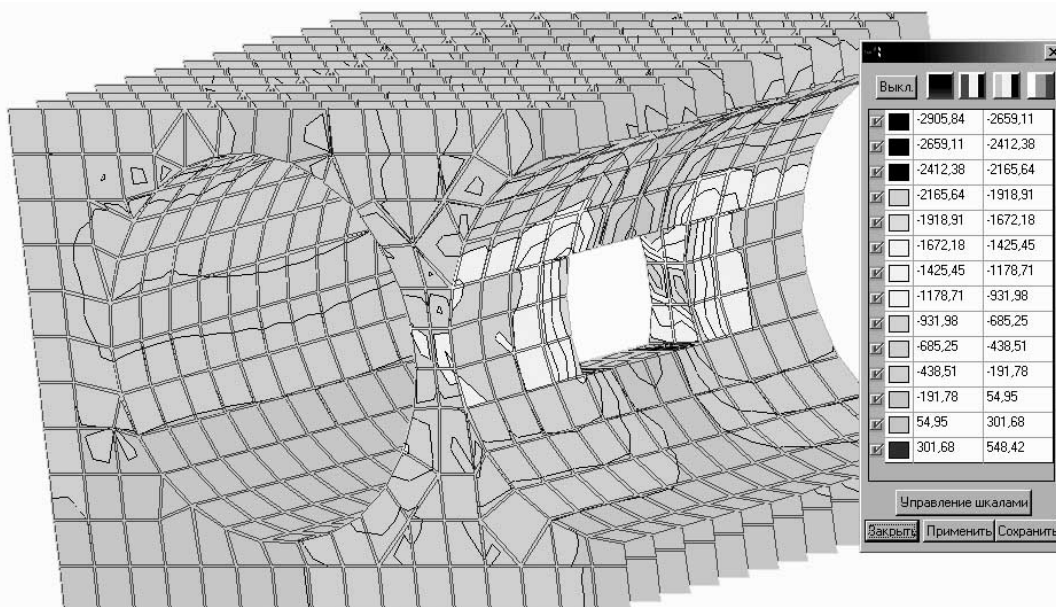


Рис. 6. Ізолінії та ізополя головних напружень  $\sigma_3$  у моделі станції без залізобетонної балки

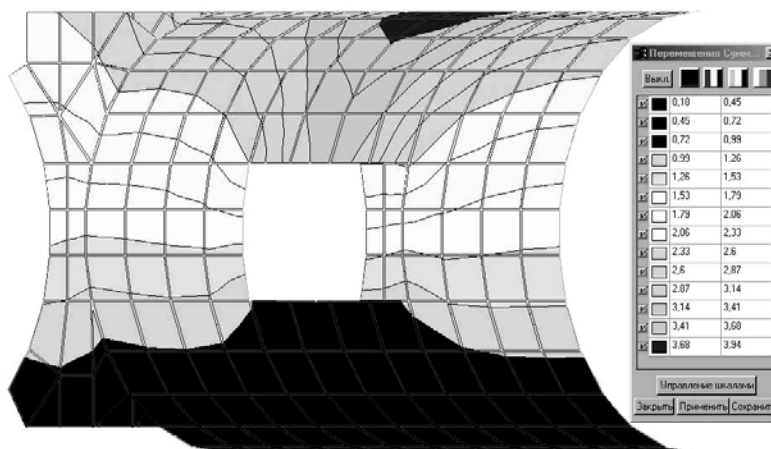


Рис. 7. Ізолінії та ізополя сумарних переміщень у моделі станції без залізобетонної балки

Розглянувши сумарні переміщення рам пілонів звичайної пілонної станції та пілонної станції з залізобетонною балкою на всю довжину, можна зробити висновок, що переміщення в нижній частині пілона з балкою трохи більші, ніж у пілона звичайної станції, і складають 0,32–0,55 мм проти 0,31–0,54 мм. Переміщення у верхній частині пілона з залізобетонною балкою зменшились з 3,05 до 2,8 мм. Це свідчить про те, що впровадження такого нового конструктивного рішення, як залізобетонна балка на всю довжину станції, не зовсім адекватно у ракурсі зміни деформованого стану станції у кращу сторону. Звісно, зменшення переміщень на 8,2 % при впровадженні такого рішення не може доводити його ефективність, оскільки зрозуміло, що балка повинна зменшувати сумарні переміщення, але таке зменшення несуттєве. У той же час, розробка нової технології, яка не апробована науково і подальше її впровадження, а також створення таких конструкцій веде до збільшення матеріальних витрат як на інтелектуальну роботу, так і на засоби виробництва, що може вважатися також неефективним.

Розглянувши напруження  $\sigma_1$  (головне напруження по лінії дії координатної осі  $X$ ), в цих же рамах пілонів ми бачимо, що в рамі пілона з залізобетонною балкою вони менші, ніж у звичайному пілоні, і складають 217,39 т/м<sup>2</sup> (2173,9 кН/м<sup>2</sup>) проти 272,1 т/м<sup>2</sup> (2721 кН/м<sup>2</sup>). Напруження  $\sigma_3$  (головне напруження по лінії дії координатної осі  $Z$ ) в цих пілонах приблизно однакові – 685,25 т/м<sup>2</sup> (6852,5 кН/м<sup>2</sup>). Як видно, зменшення напружень у рамі пілона значне (близько 20 %), але ситуація в деформативному стані не може вважатися більш оптимальною, тому таке зменшення не дає змоги зробити висновок про ефективність нового конструктивного рішення.

Проаналізуємо переміщення і напруження бокових тунелів цих станцій. Переміщення та напруження по  $\sigma_3$  в них приблизно однакові 0,26–0,46 мм і 234,48 т/м<sup>2</sup> (2344,8 кН/м<sup>2</sup>) відповідно, а напруження по  $\sigma_1$  у станції з залізобетонною балкою менші, ніж у звичайної станції 84,51 т/м<sup>2</sup> (845,1 кН/м<sup>2</sup>) проти 93,16 т/м<sup>2</sup> (931,6 кН/м<sup>2</sup>). Цей факт лише підтверджує вищенаведений висновок про невисоку ефективність наданого рішення. Переміщення та напруження по  $\sigma_3$  середнього тунелю в цих станціях абсолютно однакові 2,33–2,6 мм та 438,51 т/м<sup>2</sup>, а напруження по  $\sigma_1$  у станції з залізобетонною балкою значно менші і складають 272,1 т/м<sup>2</sup> (2721 кН/м<sup>2</sup>) проти 406,5 т/м<sup>2</sup> (4065 кН/м<sup>2</sup>).

У цілому напружено-деформований стан обробок цих станцій практично однаковий, але

все ж деякі переваги на стороні нового конструктивного рішення, а саме – розроблена технологія впровадження цього конструктивного рішення і перевірка його нормальної роботи, що можна пояснити неврахуванням деяких факторів при аналізі цієї конструкції. Звісно, виконати розрахунок такої складної конструкції з урахуванням усіх реальних факторів практично неможливо, причому вплив деяких з них, наприклад, застосування спеціальних будівельних технологій є найважливішим при аналізі напружено-деформованого стану, але його врахування є дуже складним.

## 2. Заміна ґрунтового пілону залізобетонним (досвід Київського метрополітену [10])

Для відтворення цього конструктивного рішення було змінено існуючу жорсткість ґрунтового пілона на підвищену жорсткість, яка відповідає залізобетону.

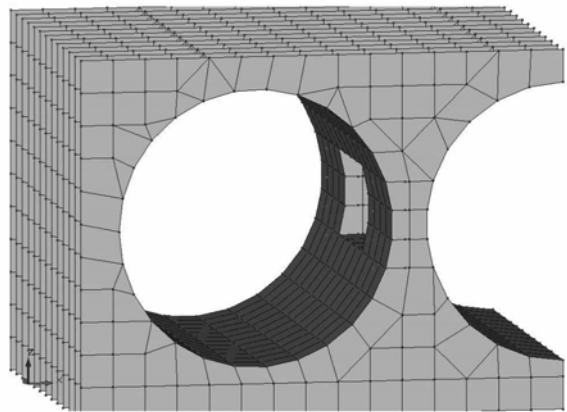


Рис. 8. Пілонна станція з залізобетонним пілоном в презентаційній графіці програми SCAD

На рис. 9–11 наведені результати розрахунку моделі із залізобетонним пілоном. Для порівняння також застосовувалися рис. 5–7, у яких наведені ідентичні параметри в моделі станції, яка не має залізобетонного пілону (стандартна конструкція пілонної станції).

Аналіз ізополів та ізоліній сумарних переміщень рами залізобетонного пілона у верхній частині прорізу довів, що вони менші – 2,86 проти 2,82 мм, а в нижній частині – трохи більші, ніж у звичайному пілоні, і складають 0,34 проти 0,31 мм. Напруження по  $\sigma_1$  в нижній і верхній частині прорізу менші у рамі залізобетонного пілона 694,55 (6945,5 кН/м<sup>2</sup>) та 496,8 т/м<sup>2</sup> (4968 кН/м<sup>2</sup>) відповідно, а напруження по  $\sigma_3$  навпаки більші, ніж у звичайному пілоні, і склали 247,11 (2471,1 кН/м<sup>2</sup>) проти 191,78 т/м<sup>2</sup> (1917,8 кН/м<sup>2</sup>).

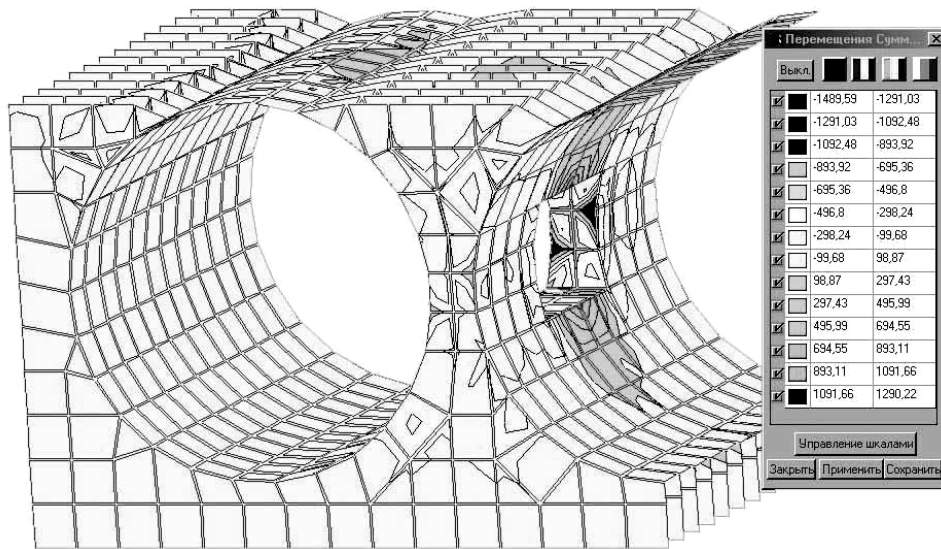


Рис. 9. Ізолії та ізополя головних напружень  $\sigma_1$  у моделі станції із залізобетонним пілоном

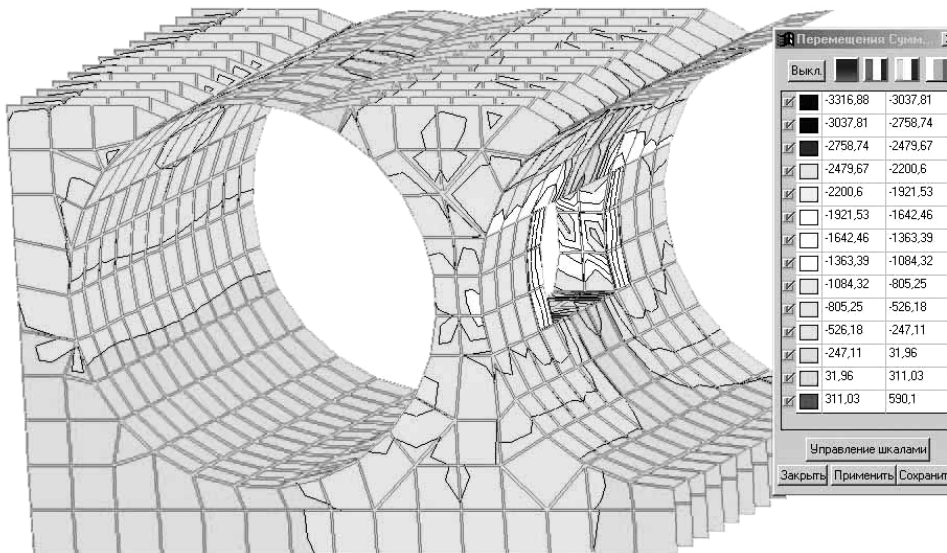


Рис. 10. Ізолії та ізополя головних напружень  $\sigma_3$  у моделі станції із залізобетонним пілоном

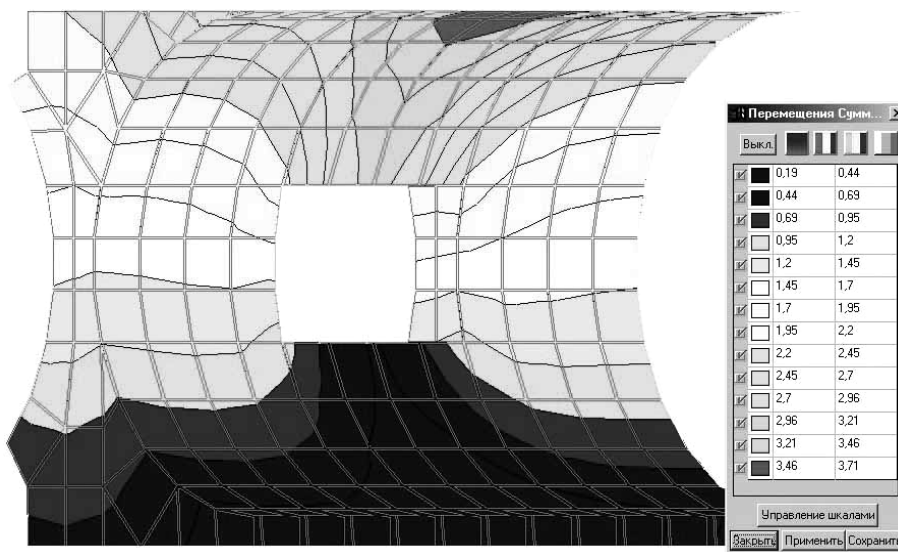


Рис. 11. Ізолії та ізополя сумарних переміщень у моделі станції із залізобетонним пілоном

Сумарні переміщення в бокових тунелях цих станцій приблизно однакові – 2,45 мм. Напруження по  $\sigma_1$  та по  $\sigma_3$  в бокових тунелях станції із залізобетонним пілоном більші, ніж в бокових тунелях станції зі звичайним пілоном 106,73 (1067,3 кН/м<sup>2</sup>) проти 93,16 т/м<sup>2</sup> (9316 кН/м<sup>2</sup>) та 864,19 (8641,9 кН/м<sup>2</sup>) проти 902,66 т/м<sup>2</sup> (9026,6 кН/м<sup>2</sup>) відповідно.

Сумарні переміщення в середніх тунелях в нижній частині прорізу однакові і склали 0,18 мм, а в верхньої частині середнього тунелю станції з залізобетонним пілоном вони менші ніж в середньому тунелі звичайної станції і складають 3,14 проти 3,41 мм. Напруження по  $\sigma_1$  в верхній частині середнього тунелю станції з залізобетонним пілоном менші, ніж у звичайній стандартній станції – 694,55 (6945,5 кН/м<sup>2</sup>) проти 728,11 т/м<sup>2</sup> (7281,1 кН/м<sup>2</sup>), а напруження по  $\sigma_3$  в нижній та верхній частинах середнього тунелю із залізобетонним пілоном навпаки більші і склали 931,98 (9319,8 кН/м<sup>2</sup>) проти 805,25 т/м<sup>2</sup> (8052,5 кН/м<sup>2</sup>).

Наведений аналіз наданого випадку свідчить про те, що введення залізобетонного пілону погіршило ситуацію у напружено-деформованому стані, оскільки і напруження, і сумарні переміщення дещо збільшилися на відміну від звичайної станції. Цей факт також доводить, що перед впровадженням нової технології або нового конструктивного рішення слід виконати ґрунтовний аналіз наслідків його впровадження. Результати наведеної роботи довели, що проаналізовані конструктивні рішення не зовсім ефективні в плані зміни напружено-деформованого стану конструкції станції метрополітену пілонного типу.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Безпальний В. И. Сборный железобетон в подземном строительстве / В. И. Безпальний, И. Я. Бялер, Н. Г. Карсницкий и др. – К.: Госстройиздат, 1961. – 248 с.

2. Петренко В. И. Строительство подземных сооружений метрополитена на Украине в сложных горно-технических и гидрогеологических условиях / Труды международной конференции «Подземный город: геотехнология и архитектура». Россия, Санкт-Петербург, 8–10 сентября 1998 г. – С.-Петербург: Тема, 1998. – С. 308–309.
3. Чурадзе Т. Численный анализ пространственного напряженного состояния эскалаторного тоннеля // Метро. – 1996. – № 3. – С. 37–38.
4. Тютюкин А. Л. Анализ пространственной и плоских расчетных схем станции пилонового типа метрополитена глубокого заложения // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2001. – Вип. 2 (11). – С. 337–340.
5. Лиманов Ю. А. Метрополитены. Изд. второе, исправленное и дополненное. – М.: Транспорт, 1971. – 359 с.
6. Волков В. П. Тоннели и метрополитены / В. П. Волков, С. Н. Наумов, А. Н. Пирожкова, В. Г. Храпов; Под ред. В. П. Волкова. – М.: Транспорт, 1975. – 618 с.
7. Демешко Е. А. Современные методы прочностных расчетов в метро- и тоннелестроении / Е. А. Демешко, С. Б. Косицын, В. К. Сергеев и др. // Подземное строительство России на рубеже XXI века: Сб. тр. науч.-техн. конф. – М.: ТАР, 2000. – С. 200–207.
8. Дмитриев М. Г. Некоторые вопросы пространственного расчета станций метрополитена глубокого заложения / Сб. тр. Всесоюз. научн.-исслед. ин-та трансп. строит. 1968. – Вып. 25. – С. 6–14.
9. Гульбе В. И. Пространственный расчет несущей конструкции эскалаторного зала проектируемого второго выхода станции метро «Маяковская» / В. И. Гульбе, С. Б. Косицын, Д. Б. Долотказин // Метро. – 1994. – № 5, 6. – С. 31–32.
10. Жуков И. Ф. Совершенствование конструкций пилонов станций метрополитена / И. Ф. Жуков, М. П. Кошелев, В. А. Лысяк // Транспортное строительство. – 1964. – № 11. – С. 53–55.

Надійшла до редколегії 14.04.04.