

УДК 624.191.8.042/.044

В. Д. ПЕТРЕНКО – д. т. н., професор, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

О. Л. ТЮТКІН – к. т. н., доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, tutkin@mail.ru

БЕЗПЕЧНІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ КОЛОННОЇ СТАНЦІЇ МЕТРОПОЛІТЕНУ ПРИ ЗМІНІ ЇХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Статтю представив д. фіз. - мат. н., проф. В. І. Гаврилюк

Постановка проблеми

Недостатня вивченість статичної роботи станції в багатьох випадках призводить до значних витрат матеріалів при її спорудженні. Розміри основних несучих елементів приймаються зі значними коефіцієнтами запасу і не відображають їх реальної несучої здатності [6, 7, 10]. Конструкція колонних станцій метрополітенів дозволяє повністю використати площу посадкової платформи, не розділяючи її на декілька частин, як у випадку пілонної [7]. Але досліджень колонних станцій для кількісного та якісного аналізу напружено-деформованого стану (НДС) недостатньо для обґрунтування нових конструктивних рішень, які є ресурсозберігаючими [2, 4, 8].

Мета

Ускладнена робота системи колон, як найбільш навантажених елементів, потребує вивчення закономірностей формування їх НДС в залежності від різних умов роботи [7, 10]. Це є одним з головних пріоритетів забезпечення безпечної та безаварійної роботи при нормальній експлуатації станційної конструкції.

Результати

В наданій роботі викладені результати числового аналізу методом скінченних елементів на основі комплексу Structure CAD (SCAD) [1, 5] залізобетонної оправи станції із варіацією кроку колон, який в бі-

льшості випадків при спорудженні станцій приймається конструктивно. Розроблено чотири моделі колонної станції зі змінною відстанню між колонами в поздовжньому напрямку. Матеріал всіх несучих елементів – залізобетон класу В30 [9]. Розмір поперечного перетину колон $0,6 \times 0,6$ м, прогонів – $0,6 \times 0,6$ м.

Розробка об'ємних моделей починається з розробки плоскої схеми станції і оточуючого її ґрунту із плоских скінченних елементів у вигляді плоских пластин, зв'язаних між собою у вузлових точках, необхідних розмірів, максимально наближених до реальних. Об'ємну модель (рис. 1) отримано за допомогою генерації плоскої схеми у напрямку перпендикулярному її площині.

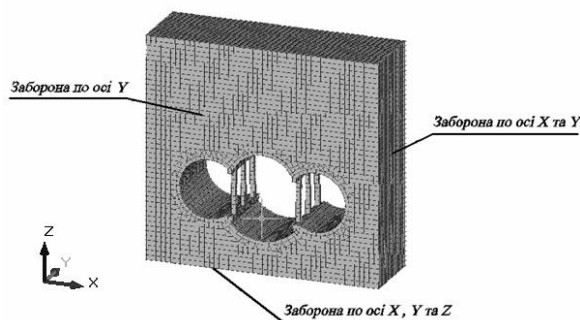


Рис. 1. Об'ємна модель станції

Кількість об'ємних скінченних елементів складає 32 054 штук, вузлів – 35 622 штук. Деформаційні характеристики скінченних елементів призначаються окремо для масиву і елементів станції: 1) ґрунт – глина спонділова (модуль пружності $E=35$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu=0,3$, питома ва-

га $\gamma=18 \text{ кН/м}^3$); 2) станційна конструкція – залізобетон (приведений модуль пружності $E=38\,500 \text{ МПа}$, приведений коефіцієнт Пуассона $\mu=0,02$, питома вага $\gamma=25 \text{ кН/м}^3$) [9].

Граничні умови (див. рис. 1): по нижній границі (площина XOY) – заборона переміщень по осях X , Y та Z ; по боках моделі (площина YOZ) – заборона по осях X та Y ; по торцях моделі (площина XOZ) – заборона по осі X .

Навантаження на станцію прийнято рівним вазі оточуючого ґрунту (глибина закладання станції становить 50 м) [3].

Відстані між осями колон L_k становлять: модель 1: $L_k=3,6 \text{ м}$; модель 2: $L_k=4,2 \text{ м}$; модель 3: $L_k=4,8 \text{ м}$; модель 4: $L_k=5,4 \text{ м}$.

Модель 1. Після розрахунку моделей на власну вагу отримані результати їх НДС. Нижче розглядаються результати лише напруженого стану, що пояснюється об'ємом наданої роботи (рис. 2).

Максимальні стискаючі напруження в колонах становлять 5,29 МПа. Максимальні зусилля розтягу, які виникають в оправі бічних тунелів, становлять 0,491 МПа, прогонах – 0,0045 МПа.

Для розрахунку конструкції на міцність, який буде проводитися лише по бетону, тобто на тріщиностійкість, застосуємо формулу четвертої теорії міцності (енергетична), виразом для якої є

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + 3\tau_{xz}^2} \leq [\sigma], \quad (1)$$

де σ_x та σ_y – компоненти нормальних напружень по глобальних осях X та Y ; τ_{xz} – дотична компонента в площині XZ ; $[\sigma]$ – межа міцності матеріалу (розрахунковий опір), яка для бетону В30 $[\sigma]=21,0 \text{ МПа}$.

Результати дослідження напруженого стану першої моделі приведені в табл. 1.

Цей розрахунок приведений, головним чином, для перевірки на міцність колон, оскільки в них виникають найбільші стискаючі зусилля. Інші несучі елементи є менш навантаженими, але значно деформованою є оправа бічних станційних тунелів, тому для неї цей розрахунок є доцільним.

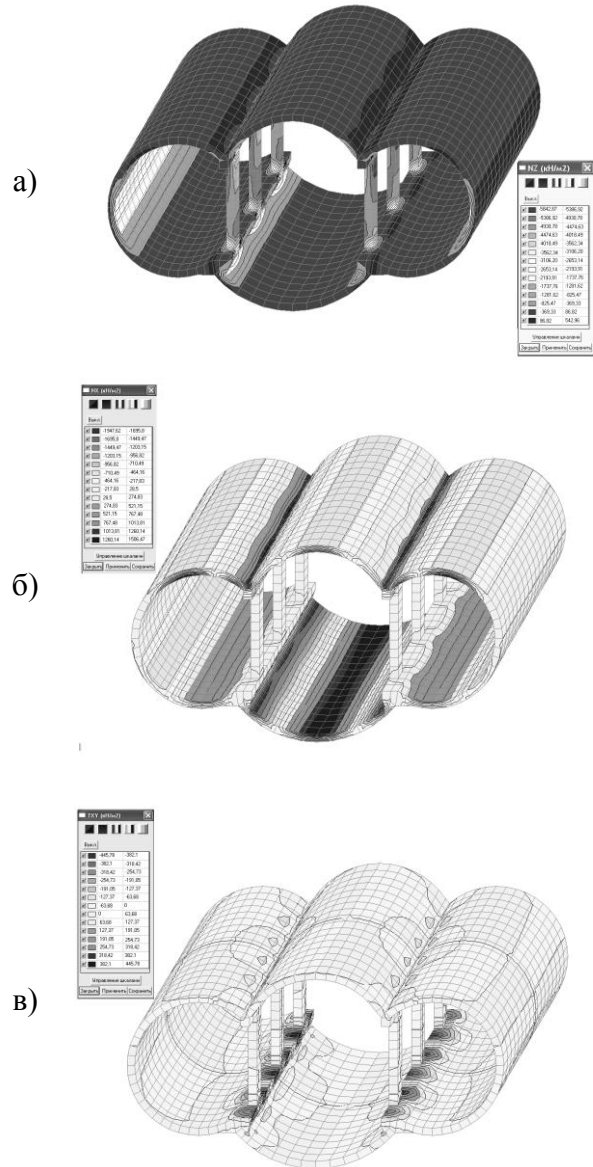


Рис. 2. Ізополя та ізолнії напружень у фрагменті моделі 1:

а) нормальних по осі Z ; б) нормальних по осі X ; в) дотичних в площині XZ

Модель 2. Відстань між осями колон в поздовжньому напрямку в даній моделі збільшена на 0,6 м, що дорівнює кроку генерації плоскої схеми в поздовжньому напрямку (в напрямку осі OZ). Нижче наведені результати розрахунку даної моделі (рис. 3).

Максимальні стискаючі напруження в колонах становлять 6,98 МПа, максимальні напруження розтяг, які виникають в оправі

становлять 0,625 МПа, в прогонах – 0,00922 МПа (див. рис. 3). Результати дослідження напруженого стану моделі приведені в табл. 2.

Таблиця 1

Максимальні та еквівалентні
напруження за IV теорією міцності
(Модель 1)

Несучі елементи станції	σ_z , МПа	σ_x , МПа	τ_{xz} , МПа	$\sigma_{\text{екв}}$, МПа
Колони	-5,84	0,271	0,127	5,714
Прогони	-2,50	-0,86	0,127	3,031
Оправа бічних станційних тунелів	-3,11	-1,95	0,127	4,426
Склепіння середнього станційного тунелю	-1,74	1,51	0,127	1,652
Зворотне склепіння	-1,74	-1,95	0,127	3,205

Таблиця 2

Максимальні та еквівалентні
напруження за IV теорією міцності
(Модель 2)

Несучі елементи станції	σ_z , МПа	σ_x , МПа	τ_{xz} , МПа	$\sigma_{\text{екв}}$, МПа
Колони	-6,98	0,293	-0,26	6,85
Прогони	-2,99	-0,97	-0,39	3,64
Оправа бічних станційних тунелів	-3,71	-2,11	0,547	5,19
Склепіння середнього станційного тунелю	-2,09	-2,11	-0,79	3,89
Зворотне склепіння	-2,09	-2,11	1,08	4,09

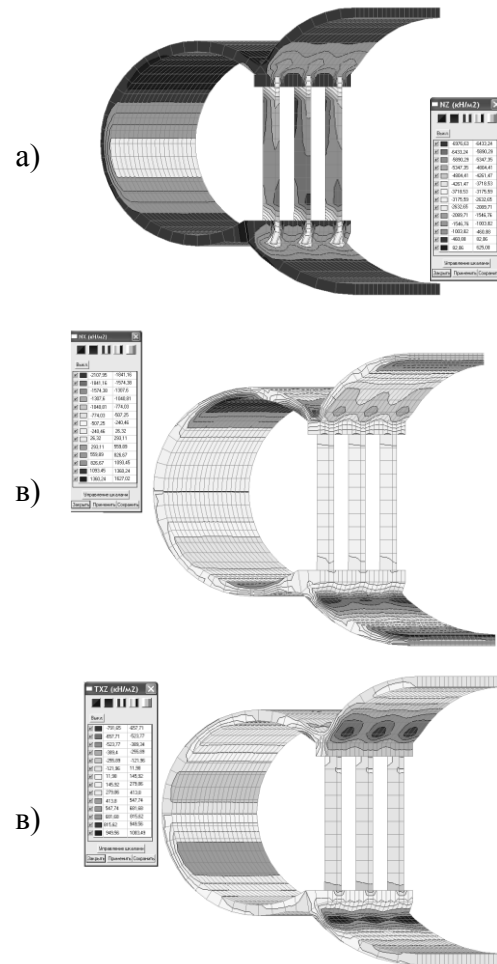


Рис. 3. Напруження фрагменту другої моделі:
а) нормальні по осі Z; б) нормальні по осі X;
в) дотичні в площині XZ

Модель 3. Ілюстрації за цією моделлю не наводяться для економії місця. Максимальні стискаючі напруження в колонах становлять 8,12 МПа, максимальні напруження розтягу становлять 0,671 МПа (оправа бічних тунелів), 0,0146 МПа в прогонах. Максимальні головні напруження несучих елементів та розрахунок еквівалентних напружень наведений в табл. 3.

Модель 4. Ілюстрації за цією моделлю також не наводяться для економії місця.

Максимальні напруження розтягу, які виникають в оправі бічних тунелів, як в найбільш деформованих несучих елементах, становлять 0,733 МПа. Максимальні стискаючі зусилля в колонах складають 9,826 МПа.

Таблиця 3

Максимальні та еквівалентні
напруження за IV теорією міцності
(Модель 3)

Несучі елементи станції	σ_z , МПа	σ_x , МПа	τ_{xz} , МПа	$\sigma_{екв}$, МПа
Колони	-8,1	0,32	-0,40	7,99
Прогони	-3,5	-1,09	-0,4	4,18
Оправа бічних станційних тунелів	-4,4	-2,26	0,80	5,99
Склепіння середнього станційного тунелю	-3,1	-2,26	1,00	4,97
Зворотне склепіння	-3,1	-2,26	1,40	5,26

Межа міцності на стиск бетону В30 становить $R_b = 20$ МПа, на розтяг $R_{bt} = 1,25$ МПа. Це свідчить про те, що максимальні напруження досліджуваних моделей станції не перевищують допустимих значень і деформовано-напружений стан станції знаходиться в пружній зоні, в якій розвиток напружень і деформацій відбувається по лінійним законам.

Результати дослідження напруженого стану четвертої моделі станції занесені в табл. 4.

Еквівалентні напруження несучих елементів не досягають 11 МПа, що означає те, що в них не виникає тріщин, а залізобетонні елементи мають значний запас міцності (близько 2 рази).

На основі даних, отриманих по результатах досліджень моделей 1-4, виведемо закономірності формування напружено-деформованого стану найбільш завантажених несучих елементів станції в залежності від збільшення відстані між колонами (рис. 4).

Закон росту стискаючих напружень σ_{cm} в колонах має вигляд:

$$\sigma_{cm} = 1,476 \cdot a + 3,865, \quad (2)$$

де a – крок колон, $a > 0$, м.

Таблиця 4

Максимальні та еквівалентні
напруження за IV теорією міцності
(Модель 4)

Несучі елементи станції	σ_z , МПа	σ_x , МПа	τ_{xz} , МПа	$\sigma_{екв}$, МПа
Колони	-9,83	-0,61	-0,56	10,2
Прогони	-5,19	-1,26	-0,85	6,1
Оправа бічних станційних тунелів	-5,19	-2,55	1,45	7,28
Склепіння середнього станційного тунелю	-5,19	-2,55	-1,71	7,44
Зворотне склепіння	-5,19	-2,55	2,31	7,92



Рис. 4. Графік росту напружень стиску в колонах

Результати дослідження напружено-деформованого стану моделей показали, що при збільшенні відстані між колонами від 3,6 до 5,4 м статична робота несучих елементів станції є цілком прогнозуємою, тому що закони формування зусиль в них не виходять за межі лінійних. Але збільшення кроку колон до значних величин буде недоцільним з позиції безпечних умов експлуатації та викликає значні перевантажен-

ня несучих елементів в період будівництва. Крім того, це оптимальні відстані між колонами будуть відповідати параметрам у зазначених межах.

Найбільші зусилля розтягу виникають в оправі бічних тунелів, тому врахування закону їх формування є необхідною умовою оцінки загального НДС станції (рис. 5).

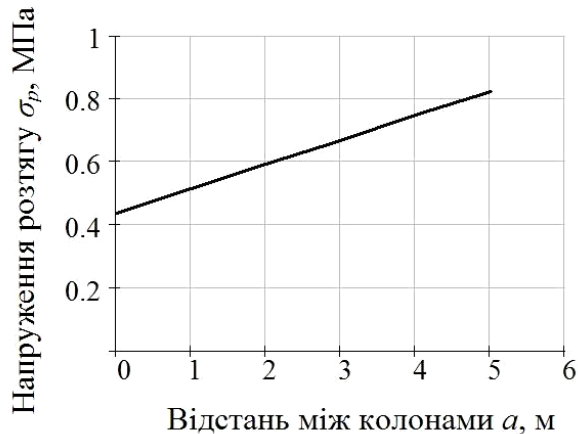


Рис. 5. Графік росту напружень розтягу в оправі бічних тунелів

Закон росту напружень σ_p розтягу має вигляд:

$$\sigma_p = 0,0772 \cdot a + 0,437; a > 0. \quad (3)$$

Оправа бічних станційних тунелів зі збільшенням відстані між колонами від 3,6 до 5,4 м є найбільш деформованою, тому в ній виникають найбільші зусилля розтягу внаслідок її згину. Це є критеріальним доказом при розгляді безпеки конструкції станції. Але напруження в ній не перевищують допустимих значень і підпорядковуються лінійному закону. Самі залізобетонні елементи мають значний запас міцності і не виходять за межі граничних станів.

Висновки

Числовий аналіз залізобетонної станції із варіацією колон надає змогу обґрунтова-

ного застосування конкретних проектних рішень для різних інженерно-геологічних умов, а також чіткого знання їх впливу для різних випадків. Проведення такого числового аналізу напружено-деформованого стану конструкції запобігає різним аварійним ситуаціям, так як дозволяє впевнено прогнозувати наслідки змін в проектних рішеннях і отримувати безпечні умови експлуатації станцій колонного типу.

Бібліографічний список

1. Баженов, В. А. Полуаналитический метод конечных элементов в механике деформируемых тел [Текст] / В. А. Баженов, А. И. Гусляр, А. С. Сахаров. – К.: НИИ строительной механики, 1993. – 376 с.
2. Гузченко, В. Т. Определение напряженного состояния конструкции колонной станции метрополитена [Текст] / В. Т. Гузченко, Д. Р. Шабодяш // Сб. научн. тр. «Устойчивость геотехнических сооружений на железнодорожном транспорте». – Д.: ДИИТ, 1989. – С. 45-47.
3. ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. Метрополітени [Текст]. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2011. – 195 с.
4. Демешко, Е. А. Расчет колонной станции метрополитена как пространственной конструкции [Текст] / Е. А. Демешко, С. Б. Косицын, А. Е. Слемзин // Транспортное строительство. – 1992. – № 1. – С. 32-35.
5. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – К.: Сталь, 2002. – 600 с.

6. Петренко, В. І. Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення [Текст] / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тют'їн. – Д.: Наука і освіта, 2004. – 176 с.
 7. Петренко, В. І. Современные технологии строительства метрополитенов в Украине [Текст] / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тют'їн. – Д.: Наука і освіта, 2005 – 252 с.
 8. Петренко, В. Д. Комплексний аналіз колонної станції із варіацією глибини закладення [Текст] / В. Д. Петренко, О. Л. Тют'їн, В. І. Петренко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Д.: Вид-во ДНУЗТу, 2011. – Вип. 39. – С. 138-143.
 9. Устинов, В. П. Метод конечных элементов в расчете железобетонных конструкций [Текст] / В. П. Устинов, В. М. Круглов, В. И. Кудашов // «Метод конечных элементов в строительной механике», Горький, 1975, Горьковский университет им. Н. И. Лобачевского – С. 141-148.
 10. Яковс, В. В. О выборе рациональной конструкции станций метрополитена [Текст] / В. В. Яковс, О. Ю. Антонов // Транспортное строительство. – 1967. – № 5. – С. 48-49.
- Ключові слова:** числовий аналіз, безпека залізобетонної конструкції, колонна станція, метрополітен, крок колон.
- Ключевые слова:** численный анализ, безопасность железобетонной конструкции, колонная станция, метрополитен, шаг колонн.
- Keywords:** numerical analysis, safety of reinforced concrete construction, columnar station, underground, step columns.
- Надійшла до редколегії 10.10.2013