

УДК 624.191.044

## Дослідження впливу рухомого навантаження на конструкцію колонної станції мілкового закладення

Тютюкін О. Л.\*

*Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
Дніпропетровськ, Україна*

Надійшла до редакції 20.05.09, прийнята до друку 20.11.09.

### Анотація

В роботі викладено результати дослідження рухомого навантаження НК-80 (статична постановка) на напружено-деформований стан конструкції колонної станції мілкового закладення із варіацією глибини. Доведено, що до глибини закладення, яка дорівнює 10 м, вплив цього навантаження можна не враховувати, а розрахунки вважати перевірочними.

Ключові слова: тунельна конструкція, станційна конструкція, напружено-деформований стан, скінченно-елемента модель.

### 1. Постановка проблеми

Основною проблемою дослідження напружено-деформованого стану (НДС) тунельних і станційних конструкцій є те, що розвиток методології статичних розрахунків не дозволяє проводити детальний комплексний аналіз із врахуванням складних властивостей оточуючого масиву, його взаємодії із конструкцією підземної споруди, а також широкого спектру навантажень, які на неї прикладаються. Задачею комплексного аналізу в області навантажень на тунельні конструкції є розробка методик, які дозволяють отримати детальні і репрезентативні результати НДС на ці види навантажень і які складаються в загальну методологію дослідження цих конструкцій. Спектр навантажень поповнюється новими їх видами, які записують в будівельні норми у вигляді особливого сполучення, але випадки експлуатації тунельних конструкцій доводять те, що їх розрахунок на особливе сполучення навантажень не може вважатися перевірочним. Але в той же час деякі види навантажень, які вважаються нормами за тимчасові або короткочасні, регламентуються до розрахунку як обов'язкові.

### 2. Огляд досліджень і публікацій

Дослідження та публікації за направлення визначеної проблеми небагаточисельні, так як її вирішення в рамках концепції комплексного аналізу [1] позначене труднощами методологічного плану. Важливою частиною цієї проблеми є дослідження впливу рухомого навантаження на тунельні конструкції, так як її врахування при проведенні їх статичних розрахунків, наприклад, станційних, значно їх утруднює. В свою чергу, розрахунок на рухоме навантаження НК-80 станцій мілкового закладення (до 20 м) регламентується ДБН [2] як обов'язкове, але в нормах, окрім параметрів навантаження, не наведено ніяких методичних вказівок щодо точок його прикладення відносно конструкції станції.

---

\* E-mail: ggf@mine.dgtu.donetsk.ua

Розрахунок на рухоме навантаження в статичній постановці, як це наведено в ДБН [2], хоча і є спрощеним, але потребує застосування спеціально розроблених моделей, які дозволяють провести ряд розрахунків із зміною положення точок прикладення НК-80, що значно утруднює розрахунки як аналітичними методами [3], так і числовими [4]. Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) [4, 5] полегшує проблему врахування рухомого навантаження НК-80, так як створення скінченно-елементних моделей (СЕ-моделей) дозволяє їх прискорену модифікацію до нових умов прикладення навантаження НК-80, але дослідження його впливу не проводилося, так як кожен конкретний випадок закладення станційних конструкцій не дозволяє провести екстраполяцію на інші випадки.

Тому, враховуючи вищенаведене, в рамках комплексного аналізу тунельних конструкцій наукову новизну складає дослідження рухомого навантаження, причому отримані результати можуть мати не тільки теоретичне значення, але й бути впроваджені при виданні нових Державних будівельних норм, в яких більш повно слід навести класифікацію впливів на тунельні та станційні конструкції, а також методичні прийоми по їх дослідженню.

### 3. Мета дослідження

Метою наданої роботи є дослідження впливу рухомого навантаження на конструкцію колонної станції мілкого закладення і подальші рекомендації по його урахуванню.

### 4. Викладення основного матеріалу

Для дослідження впливу рухомого навантаження НК-80, а також аналізу результатів сумісної дії його із власною вагою розроблено СЕ-модель, яка побудована на основі реальних геометричних розмірів, реальних властивостей ґрунтів та залізобетону та застосування розрахункового професійного комплексу Structure CAD for Windows, version 7.29 R.3 (SCAD) (рис. 1).

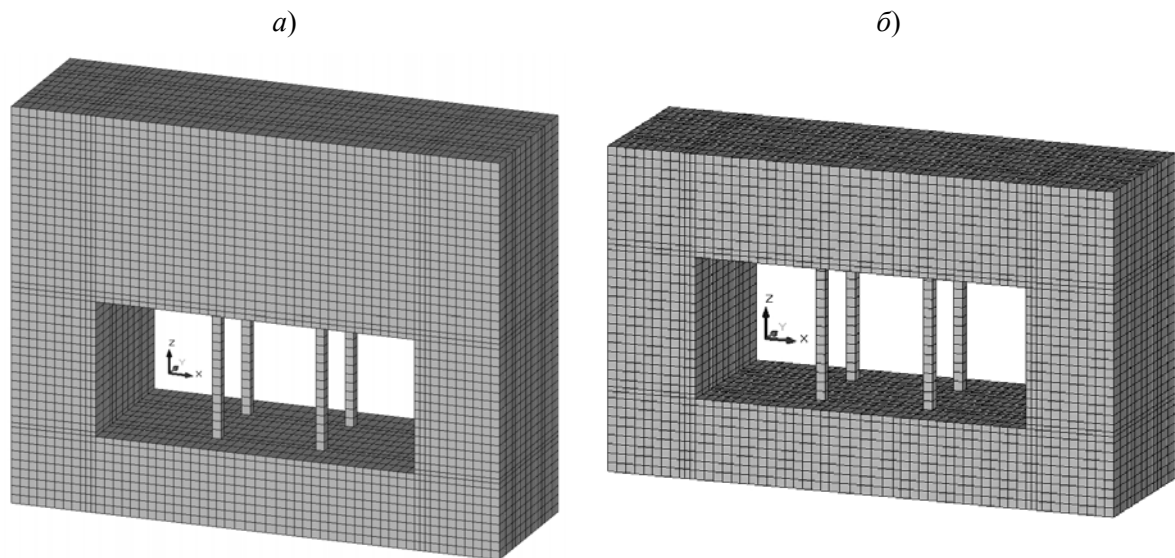


Рис. 1. СЕ-модель для випадку НК-80 із глибиною закладення: а) 10 м; б) 5 м

Після цього виконувався розрахунок на власній вагу моделі і рухоме навантаження НК-80 (рис. 2), і його результати аналізувалися.

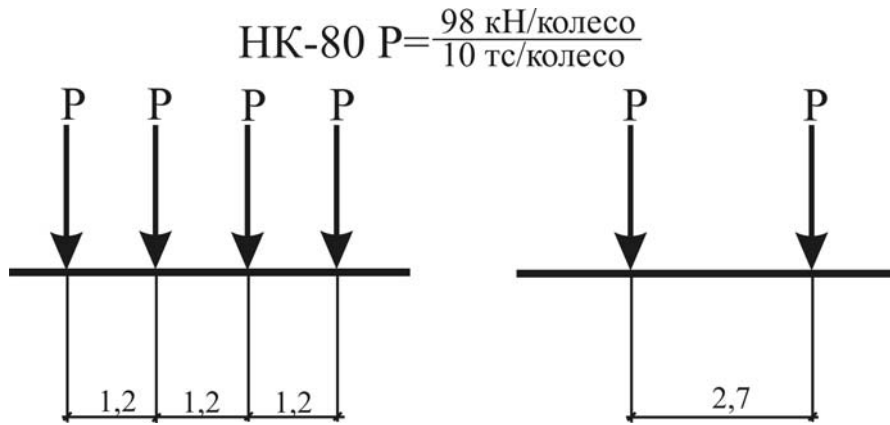


Рис. 2. Параметри рухомого навантаження НК-80

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

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_x \sigma_z + \sigma_z^2 + 3\tau_{xz}^2} \leq [\sigma]$$

де  $\sigma_x$  та  $\sigma_z$  – компоненти нормальних напружень по глобальних осях X та Z;  $\tau_{xz}$  – дотична компонента в площині XZ;  $[\sigma]$  – межа міцності матеріалу, для бетону В30 межа міцності  $[\sigma] = 21,0$  МПа.

Отримання еквівалентних напружень дозволяє врахувати складний напружений стан в елементах моделі і більш точно з'ясувати поведінку конструкції при взаємодії її із оточуючим масивом та спектром навантажень.

Для подальшого кількісного аналізу розрахуємо яка вага масиву приходить на одну колону: 1) крок між колонами в поздовжньому напрямі (вздовж осі станції) дорівнює 6,0 м; 2) відстань між колонами в фронтальному напрямі (від стіни до осі колони – 3 м, від осі колони до вертикальної осі симетрії – 3 м) – 6,0 м; 3) площа дії ваги на колону – 36 м<sup>2</sup>; 4) глибина закладення – 10 м, питома вага ґрунту – 20 кН/м<sup>3</sup>; 5) об'єм дії ґрунту на колону – 36×10=360 м<sup>3</sup>; 6) вага ґрунту – 360×20=7200 кН (70,6 тс). При кроці між колонами, рівним 4 м, ця вага дорівнювала би 24×10×20=4800 (47,0 тс), а напруження стиску в колоні площиною 0,25 м<sup>2</sup> (0,5×0,5 м) дорівнювали б відповідно 28,8 і 19,2 МПа. Причому видно, що у другому випадку напруження не досягають границі міцності бетону, тобто колона працює без утворення тріщин.

На рис. 3 наведені результати розрахунку станції на комплексне навантаження.

Загальна якісна картина розподілу напружень в станційній конструкції є передбачуваною, так як рухоме навантаження НК-80 достатньо рівномірно діє на поверхню СЕ-моделі. Із розподілу компонент напружень рис. 3, а-в можна свідчити, що вплив рухомого навантаження НК-80 несуттєвий. Це можна пояснити тим, що дія навантаження НК-80 практично загасає над шелигою станційної конструкції (рис. 3, з), не доходячи до перекриття на 0,3...0,5 м.

Розрахунок за еквівалентними напруженнями також проведемо у вигляді таблиці (табл. 1), причому точки концентрації напружень наведені на рис. 4.

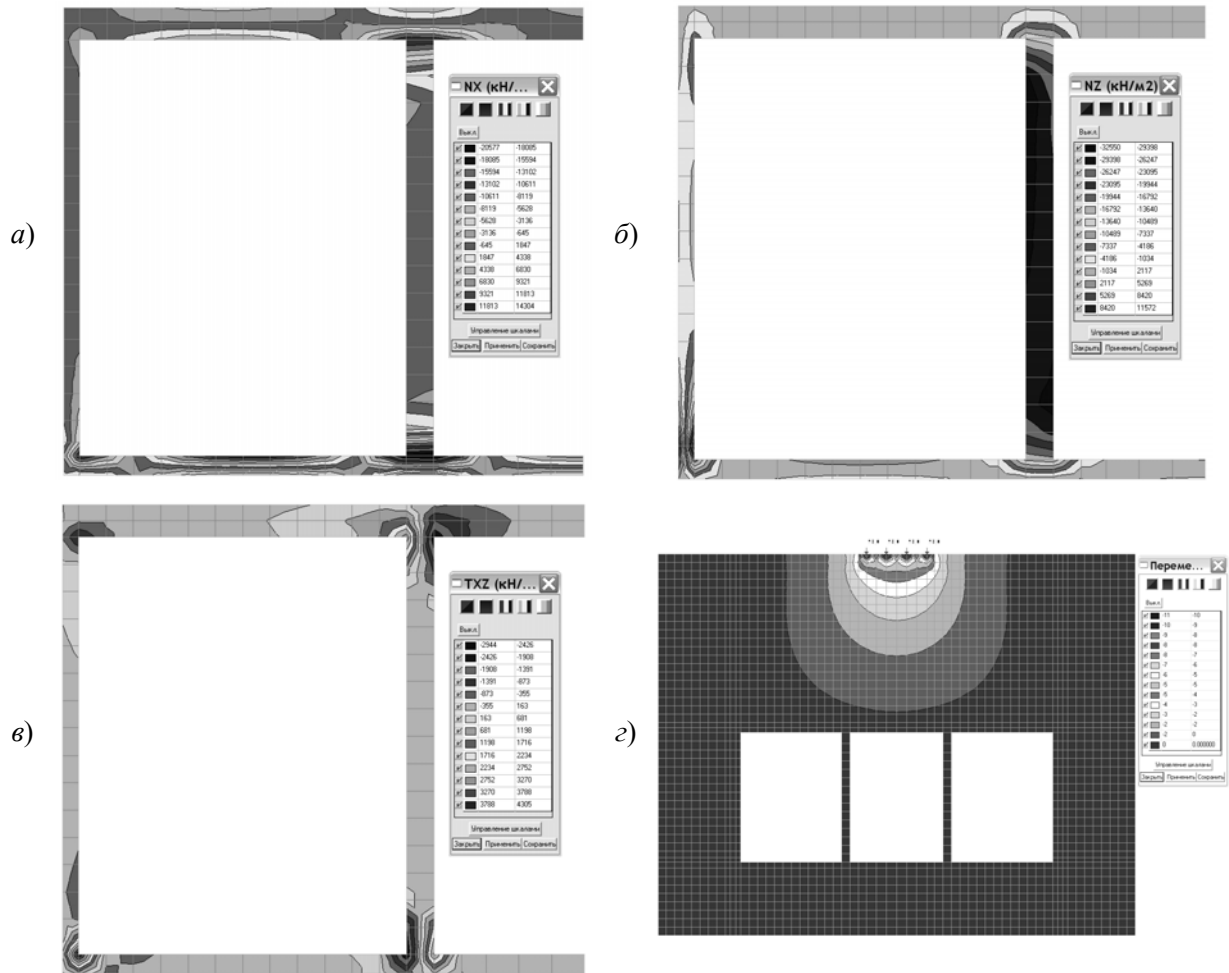


Рис. 3. Ізополя та ізолінії напружень та переміщень в SE-моделі з глибиною закладення 10 м (фрагмент оправи станції) від власної ваги і дії рухомого навантаження НК-80: а) нормальних по осі X; б) нормальних по осі Z; в) дотичних в площині XZ; г) вертикальні переміщення в моделі (лише від дії рухомого навантаження НК-80)

Табл. 1. Розрахунок еквівалентних напружень за четвертою теорією міцності

№ п/п	Номер точки	Напруження, МПа			Еквівалентне напруження, МПа/ Коефіцієнт запасу
		Нормальне по осі X	Нормальне по осі Z	Дотичне в площині XZ	
1.	Точка 1	14,3	5,3	-0,35	17,5/1,2
2.	Точка 2	-0,65	-32,6	-0,36	32,9/0,6
3.	Точка 3	-20,6	-16,8	-2,42	32,7/0,6
3.	Точка 4	-13,1	-26,3	4,3	35,5/0,6

Результати табл. 1 свідчать про те, що вплив НК-80 на напружений стан станційної конструкції незначний. Це також пояснюється тим, що на колону діє не всі 80 т·с, а лише одна чи дві сили, що в сукупності надає 10 або 20 т·с, а це складає лише 11,1 чи 22,2 % від загального комплексного навантаження.

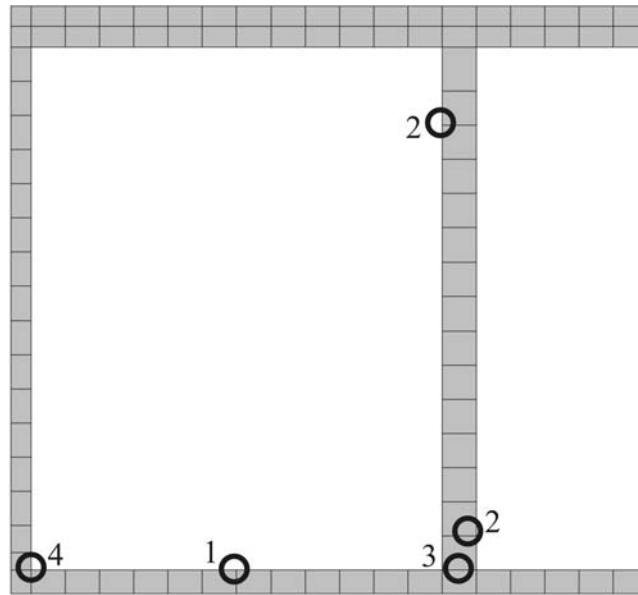


Рис. 4. Точки концентрації напружень в конструкції станції

Важливим дослідженням станційної конструкції колонного типу з кроком колон, який дорівнює 6 м, є з'ясування глибини закладення, при якій напруження в колоні дорівнює межі міцності бетону класу В30 (21 МПа), тобто критичну глибину, при якій тріщиноутворення не відбувається. Для цього проведемо дослідження моделі, яка наведена на рис. 1, б, із зменшенням глибини закладення до 5 м. Це дозволить отримати розподіл напружень в колонах і отримати їх залежність від ваги масиву над станцією. На рис. 5 наведені результати розрахунку станції на комплексне навантаження цієї моделі.

Перед усе проаналізуємо вертикальні переміщення лише від дії НК-80 (рис. 5, з), так як у випадку закладення 5 м НК-80 вже більше діє на станційну конструкцію, що видно із замикання ізополів над шелигою склепіння і їх розповсюдження на колони.

Слід відмітити, що рухоме навантаження НК-80 для глибини закладення 5 м вже суттєве, так як навантаження на колону дорівнює  $180 \times 20 = 3600$  кН (35,3 т·с), а частка НК-80 від комплексного навантаження складає 22,2 % (для однієї пари коліс) або 44,4 % (для двох пар), що підтверджує висновок про перевірочний характер розрахунку при глибині закладення більше 10 м.

Для цього випадку також проведемо розрахунок за еквівалентними напруженнями у вигляді таблиці (табл. 2).

Табл. 2. Розрахунок еквівалентних напружень за четвертою теорією міцності

№ п/п	Номер точки	Напруження, МПа			Еквівалентне напруження, МПа/ Коефіцієнт запасу
		Нормальне по осі X	Нормальне по осі Z	Дотичне в площині XZ	
1.	Точка 1	8,7	2,0	-0,23	9,9/2,1
2.	Точка 2	0,15	-21,5	0,76	21,5/0,99
3.	Точка 3	-11,3	-8,3	-1,6	17,3/1,2
3.	Точка 4	-11,3	-15,1	3,1	23,6/0,9

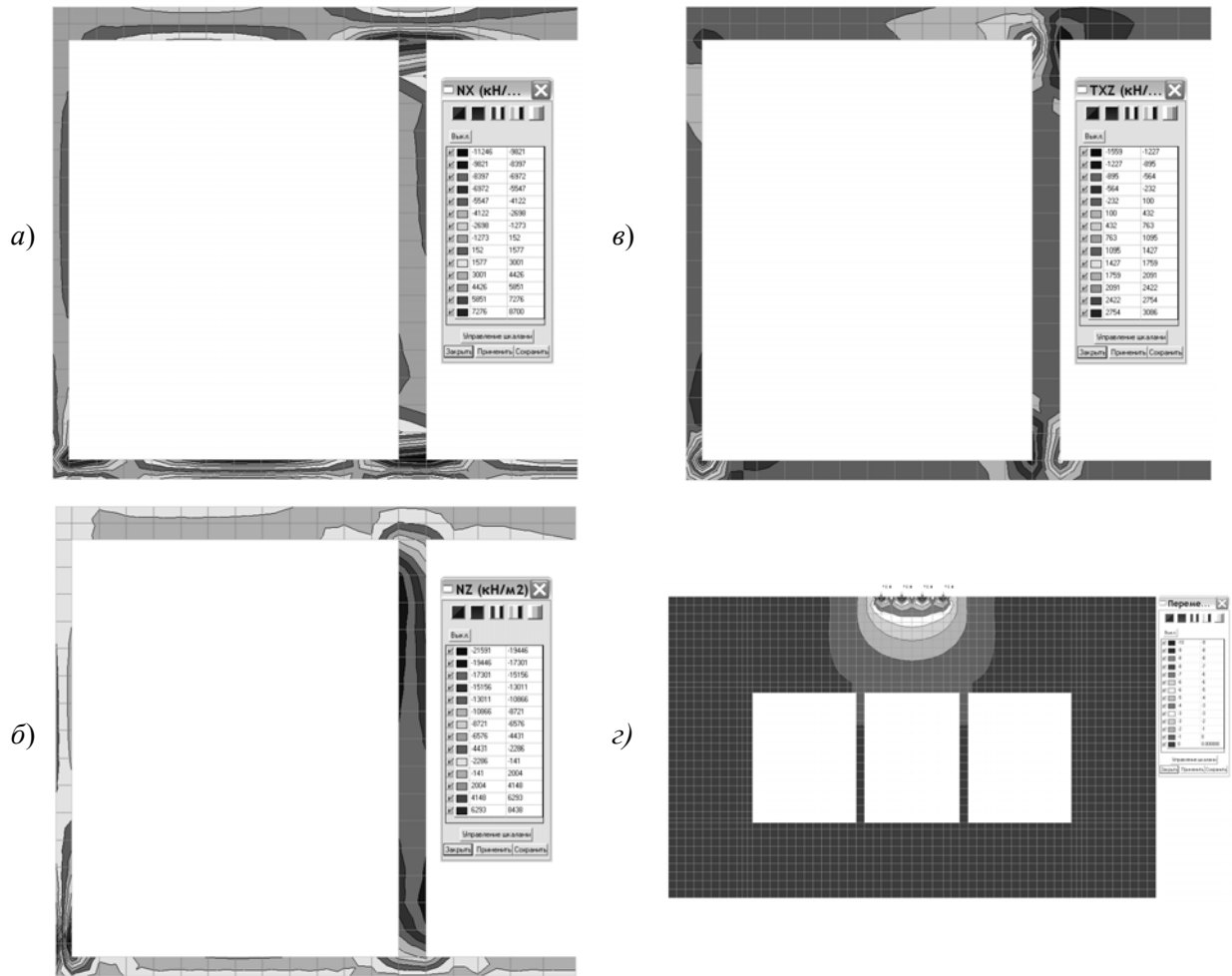


Рис. 5. Ізополя та ізоліїї напружень та переміщень в СЕ-моделі з глибиною закладення 5 м (фрагмент оправи станції) від власної ваги і дії рухомого навантаження НК-80: а) нормальних по осі X; б) нормальних по осі Z; в) дотичних в площині XZ; г) вертикальні переміщення в моделі (лише від дії рухомого навантаження НК-80)

Із отриманих даних в табл. 1 та 2 видно, що залежність напружень від глибини закладення є дещо нелінійною, так як напруження змінюються непропорційно в залежності від подвійного зменшення глибини закладення. Тому проведемо розрахунок станційної конструкції із глибиною закладення 7 м, але графічні результати наводити не будемо, а лише проведемо розрахунок еквівалентних напружень (табл. 3).

Табл. 3. Розрахунок еквівалентних напружень за четвертою теорією міцності

№ п/п	Номер точки	Напруження, МПа			Еквівалентне напруження, МПа/ Коефіцієнт запасу
		Нормальне по осі X	Нормальне по осі Z	Дотичне в площині XZ	
1.	Точка 1	10,9	2,2	-0,16	12,2/1,7
2.	Точка 2	-0,17	-25,0	0,33	25,0/0,8
3.	Точка 3	-15,0	-10,2	-2,0	22,2/0,9
3.	Точка 4	-13,1	-17,6	3,6	27,4/0,8

На рис. 6 наведені графіки залежності еквівалентних напружень від глибини закладення станційної конструкції.

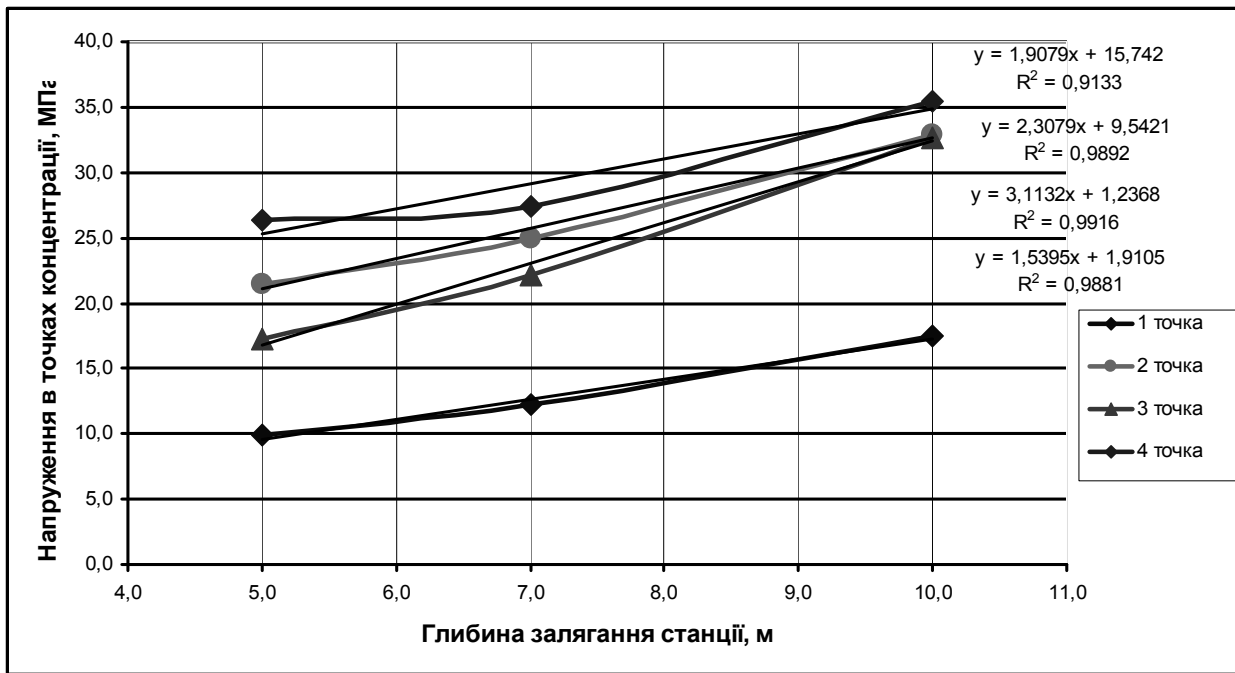


Рис. 6. Графіки залежності еквівалентних напружень від глибини закладення

Апроксимація графіків, яка наведена на рис. 6, свідчить про високу ступінь автоматичного підбору функцій (значення величини апроксимації  $R^2$  практично дорівнює одиниці,  $R^2=0,91\dots0,99$ ), що доводить майже функціональний характер цих залежностей, дещо нелінійний характер графіків добре згладжується апроксимованими лінійними трендами.

Із їх аналізу видно, що критична глибина закладення для конструкції із кроком колон, рівним 6 м, складає 4...4,5 м (якщо не брати до уваги точку 4, в якій зазвичай зменшують дію концентратора напружень в куті розміщення армування або вута) або 5,0...5,5 м по першим трьом точкам.

## 5. Висновки

1. На основі результатів дослідження отримані результати, які свідчать, що розрахунок на рухоме навантаження в статичній постановці, який ДБН «Метрополітени» регламентує як обов'язковий, може вважатися перевіірочним для глибин закладення станції 10 м і більше.
2. З'ясовано, що критична глибина закладення для конструкції із кроком колон, рівним 6 м, складає 4...4,5 м (із умови відсутності тріщиноутворення на поверхні колон).
3. Із проведеного аналізу можна свідчити, що зміну важливих конструктивних параметрів станційної конструкції можливо проводити лише після її комплексного аналізу, результати якого дають змогу прогнозувати поведінку елементів під навантаженням та можливі несприятливі наслідки, вплив яких можна оцінити вже на етапі проектування та розрахунку.

## Бібліографічний список

1. Петренко, В. Д. Комплексний аналіз конструкції колонної станції метрополітена [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин, В. И. Петренко. // Науковий вісник Національного гірничого університету, Дніпропетровськ: НГУ, 2007. – №9. – С. 61-65.
2. ДБН В.2.3-7-2003. Метрополітени [Текст]. – Київ: Держбуд України, 2003. – 300 с.
3. Фролов, Ю. С. Метрополітени на линиях мелкого заложения. Новая концепция строительства [Текст] / Ю. С. Фролов, Ю. Е. Крук. – М.: ТИМР, 1994. – 202 с.

4. Петренко, В. І. Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення [Текст] / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тют'якін. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – 176 с.
5. Фролов, Ю. С. Системный анализ конструкций колонной станции полужакрытого способа [Текст] / Ю. С. Фролов. // Метро. – 1994. – №2. – С. 30-31.

© Тют'якін О. Л., 2010.

#### **Аннотация**

В работе изложены результаты исследования подвижной нагрузки НК-80 (статическая постановка) на напряженно деформированное состояние конструкции колонной станции мелкой закладки с вариацией глубины. Доказано, что к глубине закладки, которая равняется 10 м, влияние этой нагрузки можно не учитывать, а расчеты считать проверочными

Ключевые слова: тоннельная конструкция, станционная конструкция, напряженно-деформированное состояние, конечно-элементная модель.

#### **Abstract**

In work results of research of mobile loading НК-80 (static statement) on tensely deformed condition of a design of columned station of a small bookmark with a depth variation are stated. It is proved that to depth of a bookmark which equals 10 m, influence of this loading can to be considered, and calculations to consider verifying

Keywords: tunnel design, station design, intense-deformed condition, finite element model.