

УДК 624.1

## АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО КОЛЕКТОРУ З УРАХУВАННЯМ ВЗАЄМОДІЇ З ҐРУНТОВОЮ ОСНОВОЮ

**О.В. Гаврилюк,**  
асистент

**В.В. Жук,**  
канд. техн. наук, доцент

*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ*

DOI: 10.32347/2410-2547.2026.116.318-326

У статті представлено результати дублюючого розрахунку прямокутного залізобетонного колектору перерізом  $2 \times 2$  м, що споруджується в рамках будівництва Сирецько-Печерської лінії метрополітену в м. Києві. Метою роботи була перевірка проектних рішень, шляхом порівняння спрощених розрахункових схем із комплексною 2D-моделлю в ПК «Midas GTS NX», що враховує спільну роботу в системі «основа-споруда». Проведено чисельне моделювання трьох розрахункових схем: 2D-модель «Midas GTS NX» та 2D/3D-моделі в ПК «Ліра-САПР» з використанням коефіцієнтів жорсткості основи. Виконано збір постійних (від ґрунту, дорожнього покриття) та тимчасових (від рухомого складу «НК-100» та «qA15») навантажень. За результатами розрахунку в уточнених моделях виявлено, що напружено-деформований стан конструкції суттєво відрізняється від результатів, отриманих за спрощеними схемами. Зокрема, згинальні моменти у верхній полиці колектору за уточненим розрахунком виявилися значно вищими (на 15% в одній точці та до 4 разів в іншій), ніж у розрахунку аналітичним способом. Це свідчить про недооцінку зусиль при використанні спрощених підходів.

**Ключові слова:** колектор дощової каналізації, напружено-деформований стан, взаємодія «ґрунтова основа – інженерна споруда», Midas GTS NX, Ліра-САПР, числове моделювання, армування.

### 1. Вступ

Активний розвиток інфраструктури великих міст, зокрема будівництво нових ліній метрополітену, часто вимагає перекладання існуючих інженерних мереж [1]. При будівництві дільниці Сирецько-Печерської лінії метрополітену в м. Києві виникла необхідність перевлаштування колектору дощової каналізації. Попередньо було запропоновано конструкцію прямокутного залізобетонного блоку (рис. 1) перерізом  $2 \times 2$  м.

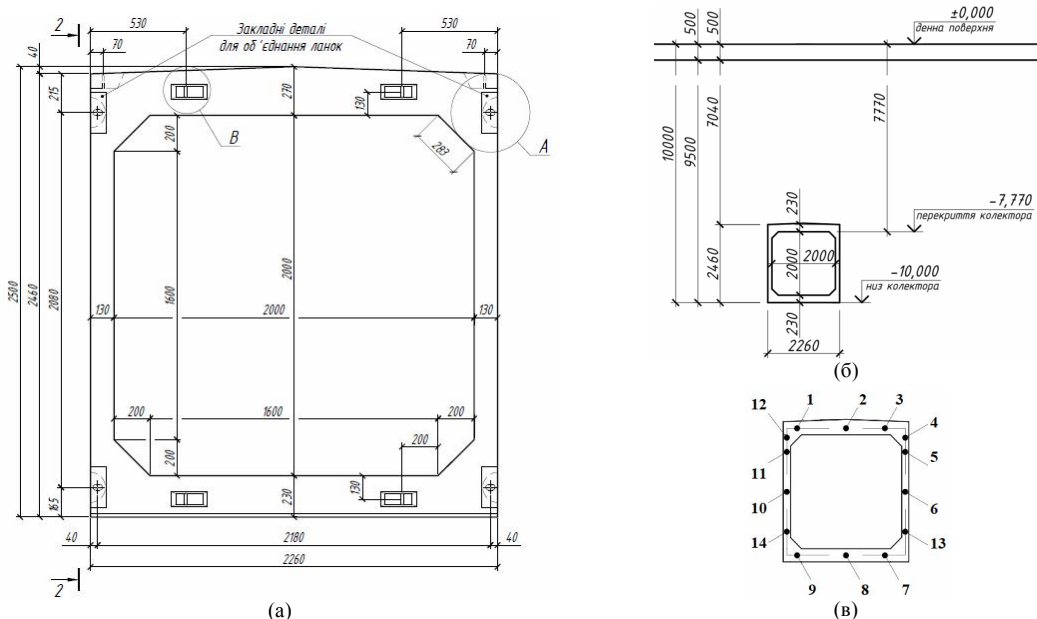


Рис. 1. Секція інженерної споруди (колектору):

(а) - опалубне креслення; (б) – принципова розрахункова схема; (в) - характерні (дослідні) точки для визначення зусиль

Надійність та довговічність підземних споруд [3], що знаходяться у складних інженерно-геологічних умовах [1] та сприймають значні навантаження від ґрунтового масиву [2] та рухомого транспорту [4], є критично важливою. Тому виникла необхідність проведення дублюючого статичного розрахунку для верифікації прийнятих проектних рішень.

Метою даного дослідження є оцінка напружено-деформованого стану (НДС) несучих конструкцій колектору з використанням уточнених розрахункових моделей, що враховують взаємодію споруди з ґрунтовою основою, та порівняння отриманих результатів із даними попередніх розрахунків, ймовірно, використовував спрощені інженерні підходи.

## 2. Матеріали та методи дослідження

Досліджувана споруда являє собою замкнуту залізобетонну раму з внутрішніми розмірами  $2 \times 2$  м (рис. 1). Конструкція виконана з бетону класу С32/40, робоча арматура класу А400С, поперечна – А240С [5]. Проектна позначка низу споруди становить -10,000 м від денної поверхні.

Для оцінки НДС було використано три різні постановки задач:

1) *2D-модель в ПК «Midas GTS NX».* Модель у плоскій постановці, що розглядає систему «основа-інженерна споруда» як єдине ціле. Ґрунтова основа моделювалася суцільним масивом, була використана лінійно-пружна модель деформування. Характеристики основи: модуль деформації  $E=22$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu=0.3$  та питома вага ґрунту  $\gamma = 18$  кН/м<sup>3</sup>.

2) *Спрощена 2D-модель в ПК «Ліра-САПР».* Елементи колектору представлені стержнями, а основа змодельована коефіцієнтами жорсткості ( $C_{1z} = 2 \times 10^3$  кН/м<sup>3</sup>).

3) *Спрощена 3D-модель в ПК «Ліра-САПР».* Елементи колектору змодельовані оболонками (пластинами) на пружній основі з тими ж коефіцієнтами жорсткості. Ця модель використовувалася для підбору робочого армування.

Для оцінки напружено-деформованого стану основних елементів колектору (полічки та ребра) було розглянуті впливи від статичних навантажень. Збір навантажень виконувався згідно норм [2, 4]. Враховувались постійні навантаження: власна вага, тиск ґрунту на глибині 10 м, тиск дорожнього покриття; та змінні короткочасні навантаження від рухомого складу «НК-100» та «qA15».

Тиск від дорожнього покриття:

$$\sigma_{\text{д.п.}} = h_{\text{д.п.}} \times \rho_{\text{д.п.}} = 0,5 \cdot 2,3 = 11,5 \text{ кПа.} \quad (1)$$

Тиск від ґрунту на рівні перекриття колектору:

$$\sigma_{\text{гр.,п.к.}} = (h - h_{\text{д.п.}}) \times \rho_{\text{гр.}} = (7,77 - 0,5) \cdot 1,8 = 130,9 \text{ кПа.} \quad (2)$$

Тиск від ґрунту на рівні низу (підшви) колектору:

$$\sigma_{\text{гр.,н.к.}} = (H - h_{\text{д.п.}}) \times \rho_{\text{гр.}} = (10 - 0,5) \cdot 1,8 = 171 \text{ кПа.} \quad (3)$$

Сумарний тиск над перекриттям колектору:

$$\Sigma \sigma_{\text{п.к.}} = \sigma_{\text{д.п.}} + \sigma_{\text{гр.,п.к.}} = 11,5 + 130,9 = 142,4 \text{ кПа.} \quad (4)$$

Сумарний тиск над низом (підшвою) колектору:

$$\Sigma \sigma_{\text{н.к.}} = \sigma_{\text{д.п.}} + \sigma_{\text{гр.,н.к.}} = 11,5 + 171 = 182,5 \text{ кПа.} \quad (5)$$

Корисне (вертикальне) навантаження від рухомого складу на рівні перекриття колектору:

$$P_{\text{в.,п.к.}} = \frac{\Psi}{\alpha_0 + h} = \frac{19}{3 + 7,77} = 17,64 \text{ кПа.} \quad (6)$$

Корисне бокове (горизонтальне) навантаження від рухомого складу на рівні перекриття колектору:

$$\tau_n = \text{tg}^2(45^\circ - (\varphi/2)) = \text{tg}^2(45^\circ - (25^\circ/2)) = 0,406, \quad (7)$$

$$P_{\text{н.,п.к.}} = P_{\text{в.,п.к.}} \times \tau_n = 1,764 \cdot 0,406 = 7,162 \text{ кПа.} \quad (8)$$

Корисне (вертикальне) навантаження від рухомого складу на рівні низу (підшви) колектору:

$$P_{\text{в.,п.к.}} = \frac{\Psi}{\alpha_0 + h} = \frac{19}{3 + 10} = 14,62 \text{ кПа.} \quad (9)$$

Корисне бокове (горизонтальне) навантаження від рухомого складу на рівні підшоши (низу) колектору:

$$P_{h,п.к.} = P_{v,п.к.} \times \tau_n = 1,462 \cdot 0,406 = 5,936 \text{ кПа.} \quad (10)$$

Корисне (вертикальне) навантаження від «qA15» на рівні перекриття колектору:

$$q_{A15,v,п.к.} = \frac{1,5 \cdot [30 + 1,5 \cdot (1,7 + h)]}{(1,7 + h) \cdot 3} = \frac{1,5 \cdot [30 + 1,5 \cdot (1,7 + 7,77)]}{(1,7 + 7,77) \cdot 3} = 23,34 \text{ кПа.} \quad (11)$$

Корисне бокове (горизонтальне) навантаження від «qA15» на рівні перекриття колектору:

$$q_{A15,h,п.к.} = q_{A15,v,п.к.} \times \tau_n = 2,334 \cdot 0,406 = 9,476 \text{ кПа.} \quad (12)$$

Корисне (вертикальне) навантаження від «qA15» на рівні низу (підшоши) колектору:

$$q_{A15,v,п.к.} = \frac{1,5[30 + 1,5(1,7 + H)]}{(1,7 + H) \cdot 3} = \frac{1,5[30 + 1,5(1,7 + 10)]}{(1,7 + 10) \cdot 3} = 20,32 \text{ кПа.} \quad (13)$$

Корисне бокове (горизонтальне) навантаження від «qA15» на рівні низу (підшоши) колектору:

$$q_{A15,h,п.к.} = q_{A15,v,п.к.} \times \tau_n = 2,032 \cdot 0,406 = 8,25 \text{ кПа.} \quad (14)$$

Постійне бокове (горизонтальне) навантаження над перекриттям колектору:

$$\Sigma \sigma_{п.к.,h} = \Sigma \sigma_{п.к.} \times \tau_n = 14,24 \cdot 0,406 = 57,81 \text{ кПа.} \quad (15)$$

Постійне бокове (горизонтальне) навантаження на підшві колектору:

$$\Sigma \sigma_{п.к.,h} = \Sigma \sigma_{п.к.} \times \tau_n = 18,25 \cdot 0,406 = 74,1 \text{ кПа.} \quad (16)$$

Було сформовано шість розрахункових сполучень навантажень (РСН) для визначення максимальних зусиль в елементах (рис. 2):

1. РСН-1: Постійне (експлуатаційне) + тимчасове ( $q_{A15} + \text{НК-100}$ ).
2. РСН-2: Постійне (розрахункове) + тимчасове ( $q_{A15}$ ).
3. РСН-3: Постійне (розрахункове) + тимчасове (НК-100).
4. РСН-4: Постійне (розрахункове) + тимчасове ( $q_{A15}$  зліва і зверху).
5. РСН-5: Постійне (розрахункове) + тимчасове (НК-100 зліва і зверху).
6. РСН-6: Постійне (розрахункове).

### 3. Напружено-деформований стан інженерної споруди

Розрахунки напружено-деформованого стану основних несучих елементів інженерної споруди (полички та ребра) спільно із ґрунтовою основою виконувались методом скінчених елементів (МСЕ) у двовимірній постановці на базі програмного комплексу «Midas GTS NX», що включає скінчено-елементні бібліотеки та алгоритми розв'язку задач механіки.

Розроблена скінчено-елементна модель (рис. 3) враховує всі елементи системи «ґрунтова основа - інженерна споруда» та особливості реальної геометричної форми колектору (похилі грані верхньої полички та ребра жорсткості по кутам).

Деформації та напруження, які виникають у основних елементах споруди (полиці та ребра) під дією зовнішніх навантажень описувались рівняннями теорії пружності. Конструкції колектору моделювались за допомогою оболонок із кроком триангуляції 25 мм, також враховано зменшення тертя ґрунту (інтерфейси) по граням інженерної споруди колектору.

Для кожного сполучення навантажень (рис. 2) було отримано напружено-деформований стан елементів системи «ґрунтова основа – інженерна споруда».

Вертикальні переміщення нижньої полиці колектору становлять від 51 мм, при використанні РСН-1, до 63 мм, при використанні РСН-2, РСН-4 (рис. 3). Для верхньої полиці вертикальні переміщення становлять від 53 мм для РСН-1 до 64 мм для РСН-2, РСН-4 (рис. 3).

Зусилля у елементах колектору (полиці та ребра) визначались в обраних для дослідження точках (рис. 1-в).

Аналіз результатів розрахунків за постановками задач показав, що внутрішні зусилля відрізняються як кількісно (по величині) так і якісно (по напрямку дії зусилля). Це пояснюється тим, що спрощений підхід не враховує реальну геометрію інженерної споруди, тобто відсутні елементи підвищення жорсткості по краям поличок та ребер.

Виявлено, що застосування спрощеного підходу (стержнева модель на коефіцієнтах жорсткості основи) до числового моделювання призводить до менших поздовжніх зусиль (рис. 4) за результатами розрахунку, а врахування збільшення жорсткості елементів на краях елементів

колектору може призвести до якісної зміни епюри поздовжніх зусиль (зміна знаку на протилежний).

Аналогічно, зафіксовано збільшення (завищення) поперечних зусиль (рис. 5), а врахування збільшення жорсткості елементів на краях елементів колектору може призвести до кількісної зміни епюри поперечних зусиль, що позитивно відобразиться на поперечній арматурі.

Епюри згинальних моментів (рис. 6) мають схожий характер (форму). Слід відмітити, що у верхній полицці згинальні моменти будуть меншими при використанні спрощеного підходу до моделювання, а у нижній полицці навпаки – більші згинальні моменти будуть саме в такому варіанті. У ребрах (стінках), в центральній зоні при використанні спрощеного підходу будуть виникати згинальні моменти певної величини, у той час як застосування моделі із реальною геометрією та історією навантажень (системи «Монтаж») призводить до значно менших значень моментів у цих точках.

На опорних ділянках, за рахунок врахування зміни жорсткості на краях елемента, згинальні моменти розсіюються, у той час як застосування спрощеного підходу виключає таку можливість і передає зусилля на сусідній елемент. Також слід зазначити, що опорні моменти виникають тільки в ребрах, у той час як у спрощеній моделі (рис. 6(б)) згинальні моменти переходять на полицки.

#### 4. Аналіз розбіжностей значень внутрішніх зусиль

Зусилля у елементах колектору (полицках та ребрах) визначались у характерних, обраних для дослідження, точках (рис. 1(в)). Порівняння виконано за максимальним та мінімальним значенням зусиль для результатів дублюючого розрахунку та аналітичної методики визначення (табл. 1, 2). Розбіжність визначена шляхом ділення результатів за аналітичним розрахунком на результати числового моделювання.

Аналізуючи результати порівняння (табл. 1) можна стверджувати, що лише у двох із чотирнадцяти точок зусилля згинальних моментів за дублюючим розрахунком є більшими ніж за

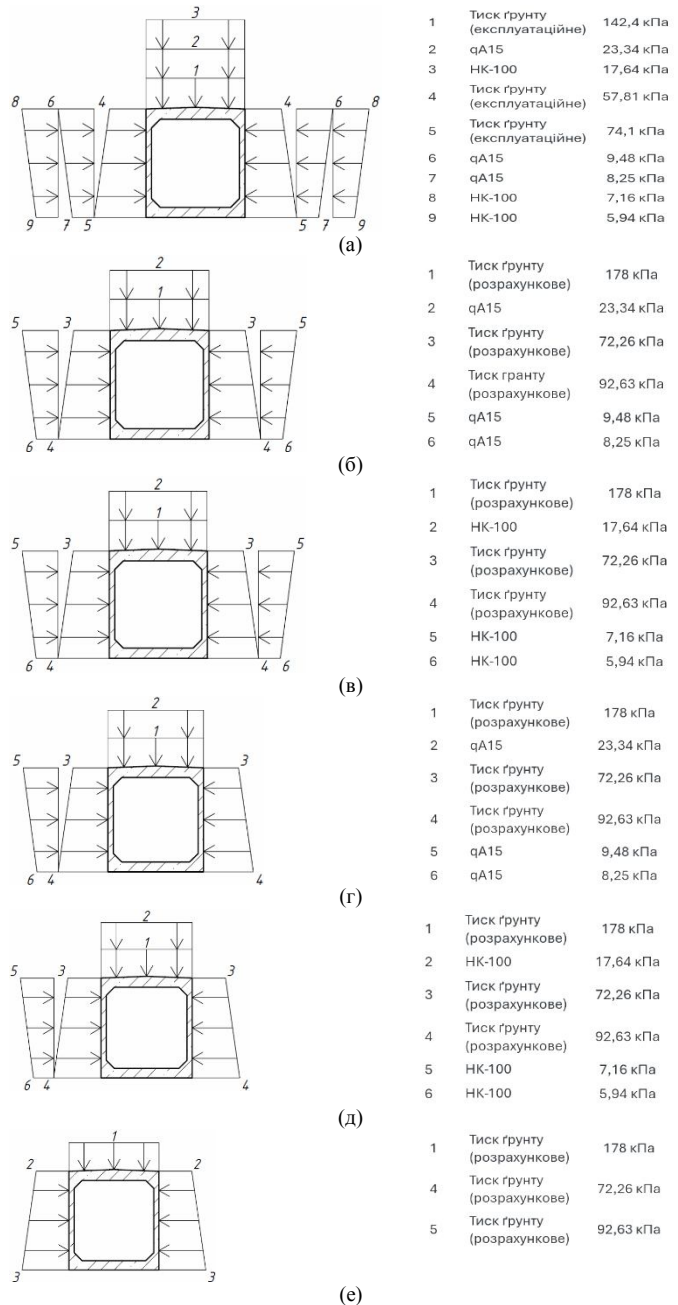


Рис. 2. Сполучення навантажень: (а) - РСН-1; (б) - РСН-2; (в) - РСН-3; (г) - РСН-4; (д) - РСН-5; (е) - РСН-6

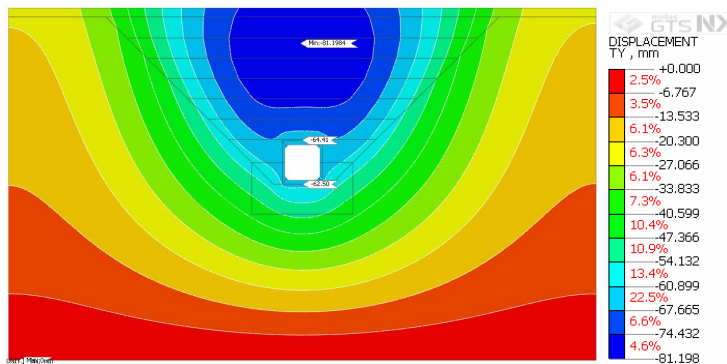


Рис. 3. Ізополя вертикальних переміщень елементів системи «грунтова основа – інженерна споруда» для РСН-4

аналітичною методикою (ці точки розташовані у верхній полиці). Розбіжність у точці 2 становить 15%, що є допустимим для дублюючого розрахунку. Розбіжність у точці 3 становить більше 4 разів, це можна пояснити тим, що модель дублюючого розрахунку враховує реальну геометрію споруди колектору, тому зусилля та

напруження розподіляються по перерізу елемента із врахуванням реальної жорсткості елемента.

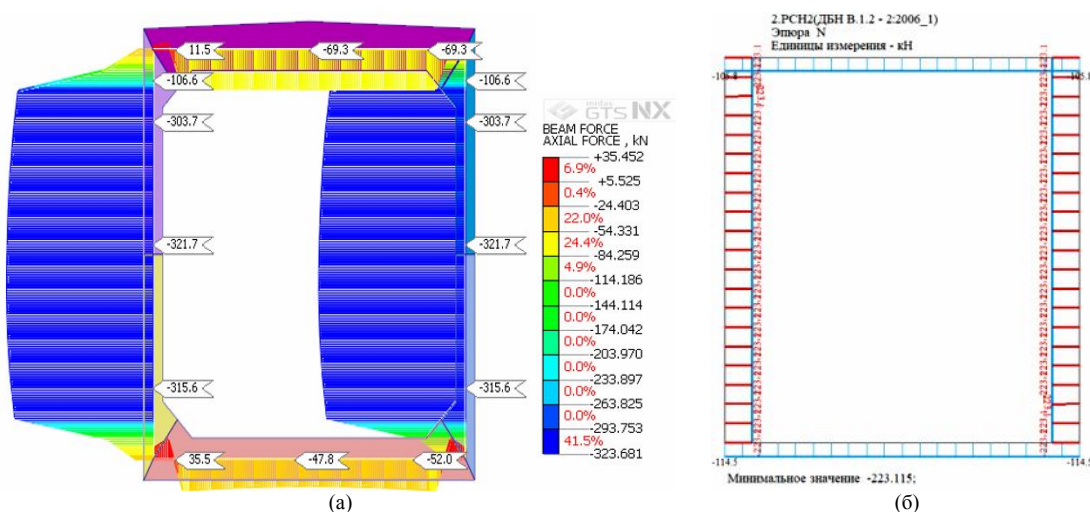


Рис. 4. Епюри поздовжніх зусиль для РСН-2, кН: (а) – задача 1 (ПК Midas GTS NX); (б) – задача 2 (ПК Ліра-САПР)

Точка 3 знаходиться у куті колектору — у місці примикання верхньої полиці та правої стінки (ребра). Ця зона є опорною і критично важливою для сприйняття максимальних моментів. Впливові фактори:

1) *Врахування геометрії та жорсткості.* Уточнена модель (Midas GTS NX) враховує реальну геометричну форму колектору, включаючи похилі грані верхньої полицки та ребра жорсткості у кутах (галтели/фаски). Ці елементи підвищують локальну жорсткість кутового вузла. Спрощена/аналітична модель представляє колектор як прямокутну стрижневу раму. Вона ігнорує підвищення жорсткості на краях елементів (кутах). Наслідок - уточнена модель більш точно моделює поведінку кутового елемента як жорсткого вузла. Це призводить до концентрації та розсіювання внутрішніх зусиль (згинальних моментів і поперечних сил) саме в цій зоні, а не їх некоректної передачі на полицку.

2) *Спільна робота із ґрунтом (основа-споруда).* Уточнена модель враховує систему «основа-споруда» як єдине ціле. Розподіл навантажень від ґрунту та транспортного навантаження (РСН-2) є більш реалістичним і залежить від локальної жорсткості. Спрощена модель моделює взаємодію лише за допомогою коефіцієнтів жорсткості основи. Це призводить до спрощеної та часто некоректної епюри зусиль.

3) *Перерозподіл моментів.* Уточнені моделі демонструють, що опорні моменти виникають переважно у ребрах (стінках) та кутових зонах, і там же розсіюються. Спрощена модель (рис. 6(б)) виключає цю можливість і переносить частину моменту на сусідній елемент – на полицку.

4) **Висновок:** У точці 3 дублюючий розрахунок (22,1 кН·м) показує, що згинальний момент є значно більшим (у 4,42 рази), ніж за аналітичним розрахунком (5 кН·м). Це свідчить про критичну недооцінку зусиль в опорній зоні (куті) при використанні спрощених підходів. Саме цей момент визначає необхідну кількість робочої арматури в куті колектору.

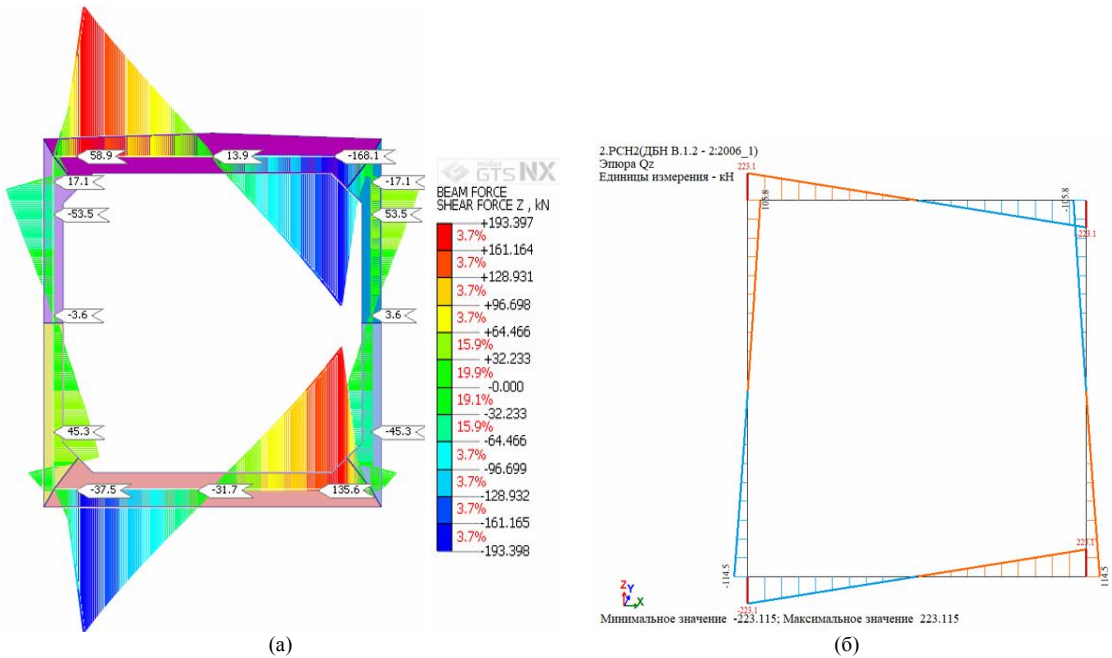


Рис. 5. Епюри поперечних зусиль для PCH-2, кН: (а) – задача 1 (ПК Midas GTS NX); (б) – задача 2 (ПК Ліра-САПР)

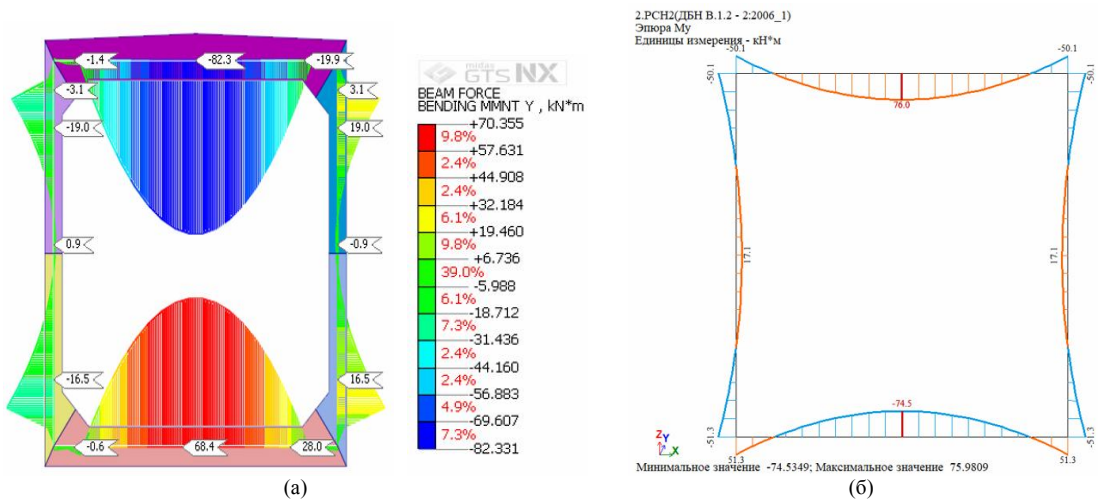


Рис. 6. Епюри згинальних моментів для PCH-2, кН·м: (а) – задача 1 (ПК Midas GTS NX); (б) – задача 2 (ПК Ліра-САПР)

Аналізуючи мінімальні значення зусиль (табл. 2), можна зробити висновок, що відмінність по згинаючим моментам зберіглась, але ще добавилась відмінність по поперечній силі у точці 3. Розбіжність по величинні поперечної сили становить 3%, тому це можна віднести до точності розрахунку.

Точка 2 знаходиться в центрі верхньої полиці (прогін). Аналіз мінімальних значень зусиль показав, що у цій зоні (прогін верхньої полиці) згинальний момент у дублюючому розрахунку (70,6 кН·м) на 24% більший, ніж за аналітичним (54 кН·м).

Таблиця 1

точка	Q, кН		M, кН·м	
	Дублюючий	Аналітичний	Дублюючий	Аналітичний
1	62,8	230	1,8	54
2	0	---	83,9	71
3	168,1	182,2	22,1	5
4	17,1	---	3,1	---
5	53,5	74	19	28
6	0	---	1,4	5
7	135,6	235	30,2	62
8	0	---	69,6	73
9	41,1	---	0,9	---
10	0	---	1,4	5
11	53,5	74	19	28
12	17,1	---	3,1	---
13	45,3	84	16,5	31
14	45,3	84	16,7	31

Таблиця 2

точка	Q, кН		M, кН·м	
	Дублюючий	Аналітичний	Дублюючий	Аналітичний
1	46,3	178	0,9	41
2	0	---	70,6	54
3	146,6	142	15,9	0
4	13,2	---	2,7	---
5	44,9	58	16,7	20
6	0	---	0,2	3
7	112,2	187	21,8	44
8	0	---	55,2	57
9	27,5	---	0,1	---
10	0	---	0,1	3
11	44,9	58	16,7	20
12	13,2	---	2,6	---
13	39,6	62	13,5	21
14	39,6	62	13,5	21

## 5. Результати дослідження

Порівняльний аналіз епюр поздовжніх сил ( $N$ ), поперечних сил ( $Q$ ) та згинальних моментів ( $M$ ) виявив суттєві відмінності між результатами уточненої моделі (Midas) та спрощеної (Ліра-САПР).

Застосування спрощеного підходу (стержнева модель на коефіцієнтах жорсткості) призводить до іншого характеру розподілу зусиль. Модель в «Midas GTS NX», що враховує реальну геометрію (похилі грані, ребра жорсткості) та спільну роботу з ґрунтом, показує більш плавний перерозподіл моментів та сил.

Найбільш показовою є різниця у згинальних моментах. У верхній полиці згинальні моменти за уточненим розрахунком виявилися більшими, ніж у спрощеній моделі, тоді як у нижній полиці – меншими. Це пояснюється тим, що у спрощеній моделі опорні моменти некоректно передаються на полицки, тоді як в реалістичній моделі вони більшою мірою сприймаються вузлами та ребрами.

Для верифікації було проведено порівняння максимальних зусиль, отриманих в даному дослідженні (за всіма моделями), із зусиллями за результатами розрахунків аналітичним методом. Аналіз показує, що у двох ключових точках верхньої полиці (точки 2 і 3) згинальні моменти за дублюючим розрахунком є більшими, ніж за аналітичним розрахунком. Розбіжність у точці 2 становить 15%, розбіжність у точці 3 становить понад 4 рази. Це можна пояснити тим, що модель дублюючого розрахунку враховує реальну геометрію інженерної споруди, тому зусилля та напруження розподіляються по перерізу елементу із врахуванням його фактичної жорсткості, що не було враховано у спрощеній моделі генпроектувальника.

Аналіз підтверджує, що континуальна модель, реалізована у Midas GTS NX, є єдино коректним підходом для високоточного розрахунку глибоко залягаючих рамних конструкцій. На відміну від спрощених методів, FEM-моделювання у континуальній постановці здатне повноцінно врахувати складний механізм взаємодії «ґрунт - споруда» та реалістично змоделювати перерозподіл напружень і деформацій у ґрунтовому масиві навколо жорсткої конструкції.

Для жорстких та глибоких рамних конструкцій, таких як даний колектор, реакція ґрунту залежить від розмірів конструкції, її власної жорсткості та сумісного ущільнення ґрунту. Спрощені моделі, що використовують  $C_{1z}$ , не можуть відтворити цей ефект, що неминуче призводить до некоректного розподілу внутрішніх зусиль по периметру рами.

## 6. Висновки

Застосування спрощеного підходу (стержнева модель на коефіцієнтах жорсткості основи) призводить не лише до кількісних відмінностей, але й до якісної зміни епюр поздовжніх зусиль та поперечних сил. Уточнені моделі, що враховують реальну геометрію, показують більш плавний перерозподіл зусиль. Аналіз мінімальних зусиль показав, що відмінність по згинальному моменту

у точці 2 зростає до 24% (порівняно з 15% для максимальних зусиль). Це демонструє, що спрощений розрахунок аналітичним методом суттєво недооцінює зусилля у певних режимах навантаження. Додатково, модель із реальною геометрією та історією навантажень сприяє розсіюванню згинальних моментів на опорних ділянках (у ребрах/стінках). На відміну від спрощеної моделі, яка виключає цю можливість і призводить до некоректного переходу (передачі) згинальних моментів на сусідній елемент (полички).

За результатами проведеного дублюючого розрахунку НДС залізобетонного колектору, можна зробити наступні висновки:

- Використання уточнених розрахункових моделей, що враховують систему «основа-споруда» (наприклад, в ПК «Midas GTS NX»), дає більш реалістичну картину розподілу зусиль у підземних спорудах порівняно зі спрощеними моделями на пружній основі.

- Розрахунок аналітичним методом, виконаний за спрощеною моделлю, призвів до суттєвої недооцінки згинальних моментів у верхній поличці колектору (різниця від 15% до 4 разів у різних точках).

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.1.2-14:2018. Система надійності та безпеки в будівництві. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. [Чинний від 2018-09-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 48 с. (Державні будівельні норми України).
2. ДБН В.1.2-2:2014. Система надійності та безпеки в будівництві. Навантаження і впливи. Основні положення. [Чинний від 2014-07-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 58 с. (Державні будівельні норми України).
3. ДБН В.1.2-5:2017. Науково-технічний супровід об'єктів будівництва. Основні положення. [Чинний від 2017-10-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 19 с. (Державні будівельні норми України).
4. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. [Чинний до 2009-07-01]. Київ : Мінбуд України, 2006. 81 с. (Державні будівельні норми України).
5. ДБН В.2.6-98:2019. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. [Чинний від 2020-05-01]. Київ : Мінрегіон України, 2020. 182 с. (Державні будівельні норми України).

#### REFERENCES

1. DBN V.1.2-14:2018. Systema nadiinosti ta bezpeky v budivnytstvi. Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud (System of reliability and safety in construction. General principles of ensuring reliability and structural safety of buildings and structures). [Chynnyi vid 2018-09-01]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2018. 48 s. (Derzhavni budivelni normy Ukrainy).
2. DBN V.1.2-2:2014. Systema nadiinosti ta bezpeky v budivnytstvi. Navantazhennia i vplyvy. Osnovni polozhennia (Reliability and safety system in construction. Loads and impacts. Basic provisions). [Chynnyi vid 2014-07-01]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2014. 58 s. (Derzhavni budivelni normy Ukrainy).
3. DBN V.1.2-5:2017. Naukovo-tekhnichnyi suprovod ob'ektiv budivnytstva. Osnovni polozhennia (Scientific and technical support of construction projects. Basic provisions). [Chynnyi vid 2017-10-01]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2017. 19 s. (Derzhavni budivelni normy Ukrainy).
4. DBN V.2.3-14:2006. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannia (Transport structures. Bridges and pipes. Design rules). [Chynnyi do 2009-07-01]. Kyiv : Minbud Ukrainy, 2006. 81 s. (Derzhavni budivelni normy Ukrainy).
5. DBN V.2.6-98:2019. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktсии. Osnovni polozhennia (Constructions of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions). [Chynnyi vid 2020-05-01]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2020. 182 s. (Derzhavni budivelni normy Ukrainy).

*Стаття надійшла 27.02.2026*

*Гаврилюк О.В., Жук В.В.*

#### **АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗБЕТОННОГО КОЛЕКТОРУ З УРАХУВАННЯМ ВЗАЄМОДІЇ З ГРУНТОВОЮ ОСНОВОЮ**

Робота присвячена аналізу напружено-деформованого стану (НДС) залізобетонного колектору прямокутного перерізу, що споруджується в межах будівництва Сирецько-Печерської лінії метрополітену в м. Києві. Метою дослідження є верифікація проектних рішень шляхом проведення дублюючого розрахунку та порівняння результатів спрощених інженерних підходів із комплексною 2D-моделлю, що враховує взаємодію елементів в системі «грунтова основа – інженерна споруда». Для оцінки НДС використано три розрахункові схеми: континуальну 2D-модель у ПК «Midas GTS NX» (система «грунтова основа – інженерна споруда» як єдине ціле) та спрощені 2D/3D-моделі у ПК «Ліра-САПР» з використанням коефіцієнтів жорсткості основи. Враховано постійні (вага ґрунту, покриття) та тимчасові навантаження від транспорту («НК-100», «qA15») для різних комбінацій розрахункових сполучень. Встановлено суттєві розбіжності між результатами уточненої та спрощеної моделей. Виявлено, що спрощені методи призводять до значної недооцінки зусиль у критичних зонах. Зокрема, згинальні моменти у верхній полиці колектору за уточненим розрахунком виявилися вищими на 15–24% у прогоні та у 4,5 рази - у кутових зонах примикання до стінок. Це зумовлено тим, що континуальна модель враховує реальну геометрію вузлів та складний механізм перерозподілу

напружень у ґрунтовому масиві навколо жорсткої конструкції. Доведено, що використання спрощених моделей на пружній основі призводить до некоректного розподілу внутрішніх зусиль по периметру рами. Для високоточного розрахунку глибоко залягаючих залізобетонних колекторів рекомендовано застосування числового моделювання в континуальній постановці, що забезпечує надійність прийнятих армувальних рішень.

**Ключові слова:** залізобетонний колектор, взаємодія «основа–споруда», напружено-деформований стан, числове моделювання, континуальна модель, коефіцієнт жорсткості основи.

Gavryliuk O.V., Zhuk V.V.

#### ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A REINFORCED CONCRETE COLLECTOR CONSIDERING SOIL-STRUCTURE INTERACTION

The paper analyzes the stress-strain state (SSS) of a rectangular reinforced concrete collector, constructed during the development of the Syretsko-Pecherska metro line in Kyiv. The study aims to verify design solutions by performing duplicate calculations and comparing simplified engineering approaches with a comprehensive 2D model that accounts for the "soil-structure" interaction. Three calculation schemes were employed to evaluate the SSS: a continuum 2D model in "Midas GTS NX" software (considering the "soil-structure" system as a single unit) and simplified 2D/3D models in "Lira-SAPR" software using subgrade reaction coefficients. The study accounted for dead loads (soil weight, pavement) and live loads from vehicles ("NK-100", "qA15") across six load combinations. Significant discrepancies were found between the results of the refined and simplified models. Simplified methods were shown to lead to a substantial underestimation of forces in critical zones. Specifically, bending moments in the collector's top slab were 15–24% higher in the span and 4.5 times higher in the corner joints compared to simplified analytical results. This is because the continuum model accounts for the actual geometry of the joints and the complex mechanism of stress redistribution within the soil mass surrounding a rigid structure. The study confirms that simplified models based on an elastic foundation lead to incorrect distribution of internal forces along the frame perimeter. For high-precision calculations of deep-seated reinforced concrete collectors, numerical modeling in a continuum formulation is recommended to ensure the reliability of reinforcement solutions.

**Keywords:** reinforced concrete collector, soil-structure interaction (SSI), stress-strain state (SSS), numerical simulation, continuum model, subgrade reaction modulus.

УДК 624.1

Гаврилюк О.В., Жук В.В. **Аналіз напружено-деформованого стану залізобетонного колектору з урахуванням взаємодії з ґрунтовою основою** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех.збірн. – К.: КНУБА – 2026. – Вип. 116. – С. 318-326.

Проведено порівняльний аналіз напружено-деформованого стану залізобетонного колектору за даними числового моделювання у ПК «Midas GTS NX» та «Lira-SAPR». Виконано розрахунки трьох моделей (континуальної та спрощених) з урахуванням шести комбінацій навантажень. Верифіковано проєктні рішення, визначено вплив взаємодії в системі «основа–споруда» на розподіл внутрішніх зусиль та обґрунтовано необхідність використання уточнених 2D-моделей для глибоко залягаючих конструкцій.

Табл. 2. Іл. 6. Бібліогр. 5 назв.

UDC 624.1

Gavryliuk O.V., Zhuk V.V. **Analysis of the stress-strain state of a reinforced concrete collector considering soil-structure interaction** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-&-Technical collected articles. – Kyiv.: KNUBA, 2026. – Issue 116. – P. 318-326.

A comparative analysis of the stress-strain state of a reinforced concrete collector was performed using numerical modeling in "Midas GTS NX" and "Lira-SAPR". Calculations of three models (continuum and simplified) were carried out considering six load combinations. The study verified design solutions, determined the impact of soil-structure interaction on internal force distribution, and justified the necessity of using refined 2D models for deep-seated structures.

Tabl. 2. Fig. 6. Ref. 5.

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** асистент кафедри геотехніки ГАВРИЛЮК Олександр Володимирович.

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, Повітряних Сил пр., 31, Київський національний університет будівництва і архітектури.

**E-mail:** gavryliuk.ov@knuba.edu.ua

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0001-7252-0679>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки ЖУК Вероніка Володимирівна

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, Повітряних Сил пр., 31, Київський національний університет будівництва і архітектури.

**E-mail:** zhuk.vv@knuba.edu.ua

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-1114-3192>