

## ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ СИСТЕМИ «СПОРУДА – ГРУНТОВИЙ МАСИВ» ПРИ РОЗРАХУНКУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ, ЩО ВЗАЄМОДІЮТЬ З ГРУНТОМ

Гуслиста Г.Е., к.т.н.

*ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»,  
м. Дніпропетровськ, Україна*

Анотація: Розглядаються різні види нелінійностей, які притаманні системі «споруда – ґрунтовий масив», та досліджується їх вплив на результати скінченно-елементного аналізу залізобетонних конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом.

Аннотация: Рассматриваются различные виды нелинейностей, свойственные системе «сооружение – ґрунтовый массив», и исследуется их влияние на результаты конечно-элементного анализа железобетонных конструкций, взаимодействующих с ґрунтом.

Abstract: The article is devoted to consideration of soil and reinforced concrete physical nonlinearity, structural nonlinearity and genetic nonlinearity at numerical simulation of system “structure – soil massif”.

### **Постановка проблеми**

Зазвичай розрахунок конструкцій виконується методами лінійної будівельної механіки. Але ж дуже часто виникають задачі, які орієнтовані на уточнене визначення особливостей поведінки системи, зокрема на стадіях, що передують руйнуванню. Ці задачі повинні розв'язуватись в нелінійній постановці.

Розрізняють такі основні види нелінійних задач [1, 2]:

- *Фізично нелінійні задачі.* До них належать задачі, в яких закони деформування матеріалів конструкцій не відповідають закону Гука, тобто залежність між напруженнями та деформаціями є нелінійною. Закони деформування можуть бути симетричними та несиметричними – з різними границями опору розтягу та стиску.

- *Геометрично нелінійні задачі.* В цих задачах відсутня пряма пропорційність між деформаціями та переміщеннями. Це дозволяє враховувати вплив зміни форми та розмірів конструкції на її напружено-деформований стан.

- *Конструктивно нелінійні задачі (контактні задачі).* Задачі цього типу враховують можливу зміну розрахункової схеми в процесі деформування конструкції. Наприклад, можуть виникати нові зв'язки або, навпаки, руйнуватись старі.

- *Генетично нелінійні задачі.* Ці задачі містять в собі нелінійності, пов'язані з накопиченням напружень та деформацій в процесі зміни

конструкції при її створенні. Цей тип нелінійності можна розглядати, як варіант конструктивної нелінійності, оскільки розглядаються системи з розрахунковою схемою, що змінюється, але ці зміни відбуваються не внаслідок впливу навантажень, а цілеспрямовано, за задумом проектувальника.

Всі згадані вище види нелінійностей притаманні системі «споруда – ґрунтовий масив», що розглядається при розрахунку конструкцій, що взаємодіють з ґрунтовим масивом. Фізична нелінійність обумовлена тим, що більшість таких конструкцій є залізобетонними, а залізобетон вже на ранніх стадіях деформування проявляє нелінійні властивості. Також нелінійні властивості проявляє ґрунт при досить великих навантаженнях. Конструктивна нелінійність наявна завдяки можливості порушення контакту між конструкцією і ґрунтовим масивом в процесі деформування (особливо для гнучких конструкцій). Також в цих задачах необхідне врахування генетичної нелінійності, а саме врахування вже існуючого напружено-деформованого стану ґрунтового масиву ще до початку зведення споруди. І крім цього, в найскладнішому випадку, якщо споруда розташована на зсувонебезпечному схилі, необхідно також враховувати можливі зсувні процеси, тобто зміну геометрії розрахункової схеми, а отже, геометричну нелінійність.

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Аналіз наукової літератури, присвяченої врахуванню різного роду нелінійностей при розрахунку конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом, показав, що в основному дослідження стосувались фізичної нелінійності, пов'язаної з нелінійністю залізобетону і ґрунту [3, 4, 5]. При цьому іншим типам нелінійностей увага не приділялась, але ж виявилось, що нехтування ними може призвести до результатів, що зовсім не відповідають реальній роботі конструкції [6, 7].

#### **Мета досліджень**

Виконати розрахунки конструкцій, що взаємодіють з ґрунтовим масивом, з урахуванням та без урахування різного роду нелінійностей і оцінити їх вплив на результати розрахунку.

#### **Викладення основного матеріалу досліджень**

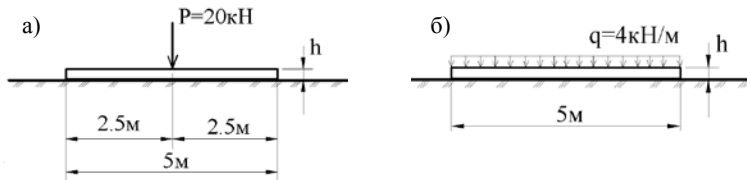
В якості найпростішого об'єкту досліджень були обрані залізобетонні балки різної гнучкості на ґрунтовій основі. Гнучкість балок оцінювалась показником гнучкості, що визначався за відомою формулою [3]:

$$t \approx 10 \frac{El^3}{E_k h^3},$$

де  $E$  и  $E_k$  - модуль деформації ґрунту і матеріалу конструкції;  $l$  и  $h$  - довжина і товщина конструкції. Характеристики балок: довжина  $l = 5$  м, висота перерізу  $h = 0,5$  м, модуль деформації  $E_k = 27 \cdot 10^6$  кН/м<sup>2</sup> (бетон класу В20). Показник гнучкості варіювався в залежності від модуля деформації ґрунту  $E$ , з яким контактує балка. В залежності від показника гнучкості під

час досліджень були виділені такі категорії балок: абсолютно гнучкі, балки скінченної жорсткості та абсолютно жорсткі.

Балки завантажувались зосередженим і рівномірно розподіленим навантаженням. Розрахункові схеми балок приведені на рис. 1.



*Рис. 1. Розрахункові схеми балок на ґрунтовій основі:*

*а) навантаження у вигляді зосередженої сили;*

*б) рівномірно розподілене навантаження.*

Розрахунок проводився методом скінченних елементів (МСЕ) із застосуванням ПК «Ліра» в лінійній постановці та з урахуванням нелінійностей: фізичної, конструктивної і генетичної. Моделювання проводилось згідно з рекомендаціями розробленої методики спільного статичного розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив» [8]. Балки моделювались стрижневими скінченими елементами (СЕ), а ґрунтовий масив – пластинчастими СЕ.

#### *Дослідження впливу конструктивної нелінійності*

Найважливішою особливістю задач з конструктивною нелінійністю є наявність в системі односторонніх зв'язків, тобто зв'язків, що працюють або тільки на розтяг, або тільки на стиск (контактні задачі). До класу контактних задач слід віднести і задачі розрахунку конструкцій, що взаємодіють з ґрунтовим масивом.

Контактні елементи-стрижні (СЕ №262), передбачені в ПК «ЛІРА», є двовузловими СЕ одностороннього (що сприймає або розтяг, або стиск) пружного зв'язку між вузлами. Кожен контактний стрижень, який додається між вузлом СЕ-моделі балки і вузлом СЕ-моделі ґрунтового масиву в системі «споруда – ґрунтовий масив» працює тільки на стиск і при виникненні розтягувальних напружень (у випадку відриву конструкції від ґрунту) виключається з роботи [9]. Однак, слід при цьому зауважити, що не завжди задачі такого типу розв'язуються з урахуванням порушення контакту між конструкцією та ґрунтом. Але ж урахування цього фактору дозволяє наблизити результати розрахунку до адекватного відтворення справжньої роботи конструкції.

Аналіз результатів розрахунку (табл. 1) свідчить про те, що врахування даного типу нелінійності є актуальним для гнучких конструкцій. Неврахування можливого відриву конструкції від поверхні ґрунту дає помилку в розрахунку 11,2 % у порівнянні з експериментальними даними, приведеними в науковій літературі [3].

*Таблиця 1*

*Результати розрахунку балок на ґрунтовій основі з урахуванням  
та без урахування конструктивної нелінійності*

Умови моделювання	Значення згинального моменту в середині балки, кН·м					
	абсолютно гнучка балка			абсолютно жорстка балка		
	ПК Ліра	експеримент	розходження, %	ПК Ліра	експеримент	розходження, %
без урахування конструктивної нелінійності	1,90	2,14	11,2	16,15	16,00	0,9
з урахуванням конструктивної нелінійності	2,11		1,4	15,70		1,9

*Дослідження впливу фізичної нелінійності залізобетону і ґрунту*

Залізобетонна балка і ґрунтовий масив при цьому моделювались за допомогою спеціально передбачених в ПК «Ліра» нелінійних СЕ [9].

Для моделювання ґрунтового масиву застосовувались фізично нелінійні СЕ ґрунту. При розв'язанні задачі плоскої деформації застосовувались СЕ №281, 282, 284, призначені для моделювання односторонньої роботи ґрунту та стиск з урахуванням зсуву за схемою плоскої деформації у відповідності з законом Кулона-Мора для максимального дотичного напруження:

$$\sigma_1 - \sigma_2 \leq -\sin(\varphi) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) + 2c \cdot \cos(\varphi),$$

де  $\sigma_1 \geq \sigma_2$  - головні напруження,  $c$  - питоме зчеплення ґрунту,  $\varphi$  - кут внутрішнього тертя. Врахування фізично нелінійних властивостей залізобетону здійснювалось шляхом застосування фізично нелінійних СЕ, властивості яких змінюються згідно з заданим законом деформування матеріалу (діаграма  $\sigma - \varepsilon$ ).

Навантаження на балку покроково збільшувалось аж до руйнування балки. Криві деформування залізобетонних балок з різним процентом армування ( $\mu = 0,63\%$ ,  $\mu = 1,26\%$ ) при лінійному і нелінійному розрахунках приведені на рис. 2.

Отримані в результаті скінченно-елементного аналізу епюри згинальних моментів та прогинів (рис. 3) свідчать про те, що різниця у результатах лінійного і нелінійного розрахунків залізобетонних балок на ґрунтовій основі значна. Вона позначається як на величинах внутрішніх зусиль (зокрема, згинальних моментів), так і на величинах прогинів. Причому, зі збільшенням рівня навантаження різниця в значеннях, отриманих при лінійному і

нелінійному розрахунках теж збільшується. У деяких випадках змінюється навіть характер епюр. Отримані результати підтверджуються результатами досліджень, приведеними в [4].

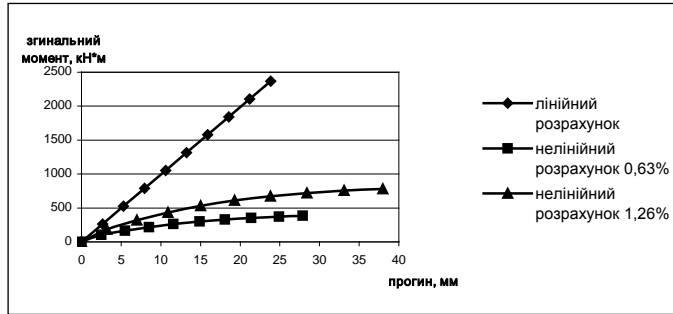


Рис. 2. Криві деформування гнучких залізобетонних балок під дією рівномірно розподіленого навантаження

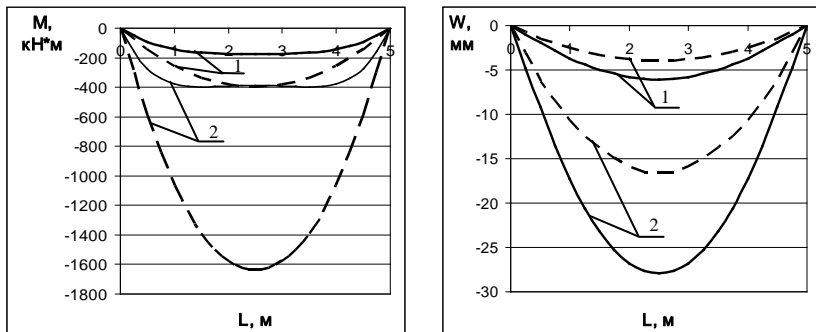


Рис. 3. Епюри згинальних моментів і прогинів для гнучкої балки на ґрунтовій основі ( $\mu = 0,63\%$ ) під дією рівномірно розподіленого навантаження: 1 -  $q = 757$  кН/м, 2 -  $q = 3115$  кН/м  
(лінійний розрахунок – штрихова лінія, нелінійний - суцільна)

#### Дослідження впливу генетичної нелінійності

Ґрунтовий масив ще до початку зведення на ньому будь-якої конструкції вже перебуває в певному напружено-деформованому стані (від дії власної ваги ґрунту). Отже, процес СЕ-моделювання має проводитись поетапно. На першому етапі обов'язково має бути змодельований тільки ґрунтовий масив під дією навантаження від власної ваги ґрунту. Моделювання всіх інших конструкцій, що зводяться на даному ґрунтовому масиві, має відбуватись вже

на наступних етапах. Для поетапного моделювання в ПК «Ліра» застосовується процесор МОНТАЖ, який дозволяє моделювати процес зведення споруди, коли на різних етапах з'являються (монтуються) або видаляються (демонтуються) елементи [9, 10].

Неврахування генетичної нелінійності стає особливо відчутним при моделюванні системи «споруда – ґрунтовий масив» з урахуванням фізичної нелінійності залізобетону та ґрунту (рис. 4).

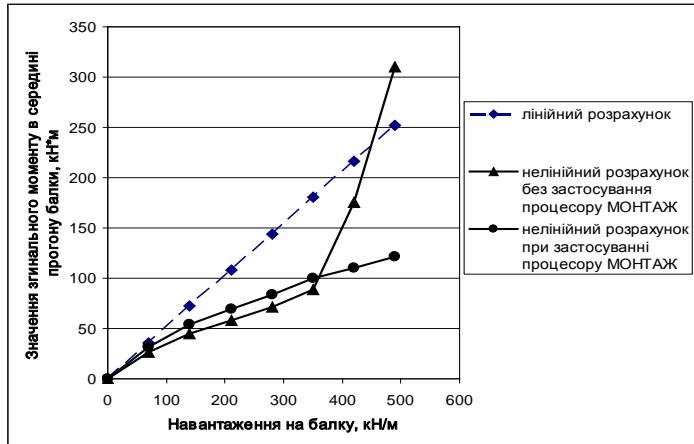


Рис. 4. Результати лінійного та нелінійного розрахунків залізобетонної балки на ґрунтовій основі під дією рівномірно розподіленого навантаження  $q$ .

#### **Висновки та перспективи подальших досліджень**

1. Врахування можливості порушення контакту між конструкцією та ґрунтовим масивом (врахування конструктивної нелінійності) дозволяє отримати на 11% точніший результат, ніж без урахування цього фактору. Це є особливо актуальним для гнучких конструкцій.
2. При врахуванні фізично нелінійних властивостей залізобетону та ґрунту під час розрахунку конструкцій спостерігається трансформація епюр внутрішніх зусиль. Згинальні моменти при цьому в 3 – 4 рази зменшуються, а прогини в 2 – 5 разів збільшуються.
3. Ігнорування поетапності створення розрахункової схеми (генетичної нелінійності), коли на першому етапі моделюється тільки ґрунтовий масив з певним вже існуючим напружено-деформованим станом, призводить до значних помилок при розрахунку залізобетонних конструкцій з урахуванням фізично нелінійних властивостей залізобетону та ґрунту.
4. Розв'язання задач взаємодії залізобетонних конструкцій споруд з ґрунтовим масивом в нелінійній постановці дозволяє отримувати результати, які є більш адекватними реальній роботі таких конструкцій. В зв'язку з цим перспективними є дослідження взаємодії більш складних

залізобетонних конструкцій різних типів з ґрунтовим масивом (в тому числі протизсувних) з урахуванням нелінійностей різних видів.

**Ключові слова:** конструкції, що взаємодіють з ґрунтом, система «споруда – ґрунтовий масив», комп’ютерні моделі конструкцій, фізична нелінійність, конструктивна нелінійність, генетична нелінійність.

#### ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. - Киев: «Сталь», 2002. – 600 с.: ил.
2. Лукаш П.А. Основы нелинейной строительной механики. – М.: Стройиздат, 1978. – 204 с.
3. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 679 с.: ил.
4. Соломин В.И., Шматков С.Б. Методы расчета и оптимальное проектирование железобетонных фундаментных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 208 с., ил.
5. Савицький М.В., Гуслиста Г.Е. Дослідження роботи конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом, з урахуванням фізичної нелінійності залізобетону // Строительство. Материаловедение. Машиностроение: Сб. науч. тр. Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. – Выпуск №37: «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения». – Днепропетровск: ПГАСА, 2006. – С. 418 – 425.
6. Гуслиста Г.Е., Нікіфорова Т.Д., Савицький М.В. Розрахунок конструкцій заглиблених споруд з урахуванням технології їхнього зведення // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури: Зб. наук. пр. – 2006. – №6. – С. 30-34.
7. Гуслиста Г., Савицький М. Урахування різних видів нелінійностей при комп’ютерному моделюванні заглиблених споруд // Теоретичні основи будівництва: Збірник наукових праць Придніпровської державної академії будівництва та архітектури та Варшавського технічного університету. – Випуск 15. – Варшава, 2007. – С. 225 – 230.
8. Гуслиста Г.Е. Методика спільного статичного розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив» для будівель, розташованих на схилах // Строительство. Материаловедение. Машиностроение: Сб. науч. тр. Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. – Выпуск №56: «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения». – Днепропетровск: ПГАСА, 2010. – С. 128 – 137.
9. ЛИРА® 9.4. Руководство пользователя. Основы. Учебное пособие / [Стрелец-Стрелецкий Е.Б., Боговис В.Е., Гензерский Ю.В. и др.]; под ред. А.С. Городецкого. – К.: Издательство «ФАКТ», 2008. – 164 с.
10. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. – К.: Изд-во «Факт», 2005. – 344 с.