

## Особливості напружено-деформованого стану несучого каркасу житлової будівлі в умовах значної різниці жорсткості елементів системи «основа – фундамент - будівля»

Олександр ЛИТВИН<sup>1</sup>, Віталій РУЧКІВСЬКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037,

<sup>1</sup> lytvyn.ov@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-2818-3457>

<sup>2</sup> ruchkivskyi.vv@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-8982-2884>

**Анотація.** У статті наведено результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану (НДС) фундаментів багатоповерхового житлового будинку з об'єктами соціально-культурного призначення та підземним паркінгом в Шевченківському районі м. Києва. Особливістю об'єкта є комбінована система фундаментів, у якій частина вертикальних несучих конструкцій по периметру каркасу спирається безпосередньо на огороження котловану, а решта - на пальовий фундамент з буроін'єкційних паль діаметром 620 мм та довжиною 18 м, які об'єднані монолітним плитним ростверком.

Розрахунки виконано методом скінченних елементів у тривимірній постановці з урахуванням просторової взаємодії ґрунтового масиву, пальового фундаменту, ростверку, огороження котловану та надземного каркасу будівлі. Модель включала 344 246 елементів і 337 486 вузлів. Ґрунтова основа моделювалася як пружне багатошарове середовище відповідно до даних інженерно-геологічних вишукувань. Навантаження відповідали ДБН В.1.2-2:2006 та ДБН В.1.2-14:2009 (загальна вага будівлі від статичних навантажень – 207 249 кН).

Аналіз результатів показав нерівномірний розподіл зусиль у палях: максимальні зусилля в кутових і периферійних зонах сягали 120–270 тс, у центральній зоні – 80–120 тс. У плитному ростверку максимальні згинальні моменти становили 120 тс·м/м (вісь X) та 165 тс·м/м (вісь Y). Прогнозоване максимальне осідання в центральній частині (зона ядра жорсткості) склало 50 мм, мінімальне по краях – 32 мм. Відносна різниця осідань  $i = 0,008$  перевищує нормативне значення ( $i_{\text{нор}} = 0,002$ ) майже в



**Олександр ЛИТВИН**  
доцент кафедри геотехніки  
Ph.D.



**Віталій РУЧКІВСЬКИЙ**  
доцент кафедри геотехніки  
к.т.н.

чотири рази. Така деформаційна несумісність між жорстким огороженням котловану та більш податливим центральним пальовим фундаментом спричиняє концентрацію напружень у місцях з'єднання пілонів і плит перекриття з огороженням котловану, що створює ризик появи незворотних деформацій у вигляді тріщин.

За результатами дослідження сформульовано рекомендації щодо забезпечення надійності фундаментів: або влаштування єдиного фундаменту під усі вертикальні несучі елементи, або застосування додаткових конструктивних заходів для сприйняття значних зусиль у зонах концентрації напружень.

**Ключові слова.** Пальовий фундамент, числове моделювання, нерівномірне осідання, взаємодія «основа – фундамент - споруда», огороження котловану.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В умовах щільної міської забудови великих міст, де вартість земельних ділянок є надзвичайно високою, забудовники прагнуть максимально використати площу відведеної території, наблизившись до існуючої забудови та мінімізуючи витрати на влаштування фундаментів. Особливо актуальним це стає при будівництві з розробкою глибоких котлованів з влаштуванням підпірних стін. Такі конструкції часто використовують не лише як тимчасові підпірні стіни для утримання стін котлованів при будівництві нульового циклу, а й як постійні фундаменти для крайніх вертикальних несучих елементів каркасу будівлі що споруджується. У результаті формується складна фундаментна система, у якій частина несучих конструкцій будівлі спирається безпосередньо на огороження котловану (підпірну стіну), а решта - на пальовий фундамент. Це призводить до суттєвої різниці жорсткості окремих елементів системи «основа - фундамент - надземні конструкції» і, як наслідок, до нерівномірного розподілу зусиль та осідань.

Такий підхід, з одного боку, дозволяє отримати економічний ефект та раціонально використати підземний простір і конструкції огороження котловану, а з іншого боку створює нові інженерні виклики, пов'язані з забезпеченням сумісності деформацій і надійності всієї споруди на весь термін експлуатації.

Якість геотехнічних проектів значною мірою залежить від повноти даних інженерно-геологічних вишукувань, коректного визначення параметрів ґрунтів та адекватного чисельного моделювання взаємодії елементів системи «основа – фундамент - надземні конструкції». Напружено-деформований стан (НДС) цієї системи суттєво залежить від характеру навантажень, послідовності зведення будівлі, жорсткості несучих конструкцій та особливостей ґрунтової основи.

У попередній роботі (Бойко та ін, 2020) на прикладі 17-поверхового будинку з

комбінованим фундаментом встановлено перевищення допустимої відносної різниці осідань і запропоновано конструктивні заходи (коробчастий фундамент, деформаційний шов), що покращили роботу каркасу. Проте в тому об'єкті різниця жорсткості визначалася поєднанням довгих буронабивних паль (Ø620 мм, L=18 м) з короткими задавленими (350×350 мм, L=6 м), тоді як у даній роботі всі палі однотипні, а джерелом несумісності деформацій є принципово різний характер роботи огороження котловану та центрального пальового ростверку.

Разом з тим, у розглянутому в даній роботі житловому будинку з об'єктами соціально-культурного призначення та підземним паркінгом в Шевченківському районі м. Києва конструктивне рішення інше. Усі палі фундаменту виконані буроін'єкційними (Ø620 мм, L=18 м), а частина вертикальних несучих конструкцій каркасу безпосередньо спирається на огороження котловану. Така схема призводить до ще більшої різниці жорсткості між огороженням котловану та центральним пальовим фундаментом.

Сучасні дослідження підтверджують, що взаємодія пальового фундаменту з огорожувальними конструкціями котловану в умовах щільної міської забудови є складною задачею, яка вимагає тривимірного чисельного моделювання (Носенко та ін, 2025). Зокрема, показано, що значна різниця жорсткості елементів може призводити до суттєвих різниць осідань і концентрації зусиль у зонах примикання (Chenyang Yuan та ін. 2023)

Таким чином, подальше дослідження НДС пальового фундаменту в умовах суттєвої різниці жорсткості елементів системи «основа – фундамент - будівля» є актуальним. На відміну від об'єкта, дослідженого раніше (Бойко та ін., 2020), де різниця жорсткості визначалася поєднанням різнотипних паль, у розглянутому в даній роботі будинку всі палі однотипні (Ø620 мм, L=18 м), а джерелом деформаційної несумісності є принципово різний характер роботи жорсткого огороження котловану

та більш податливого центрального пальового ростверку. Це формує якісно іншу картину НДС і потребує окремого дослідження для обґрунтування надійності подібних складних фундаментних систем.

Теоретичну основу розрахунку складають фундаментальні роботи з взаємодії паль з нелінійно-деформованою основою (Бойко, 1988; Сахаров А.С та ін.), які заклали підґрунтя для просторового МСЕ-моделювання геотехнічних систем з урахуванням неоднорідності основи та жорсткості ростверку.

### МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є оцінка напружено-деформованого стану (НДС) пальового фундаменту та каркасу багатоповерхового житлового будинку в Шевченківському районі м. Києва в умовах значної різниці жорсткості елементів системи «основа - фундамент - надземні конструкції».

### ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Досліджуваний об'єкт - багатоповерховий житловий будинок з підземним паркінгом у Шевченківському районі м. Києва: монолітний залізобетонний каркас з ядрами жорсткості, фундамент комбінований - основні пілони і стіни спираються на плитний ростверк що об'єднує буроін'єкційні палі ( $\text{Ø}620$  мм,  $L=18$  м), крайні несучі елементи - безпосередньо на огороження котловану. Саме така схема зумовлює принципову різницю жорсткості між жорстким огороженням котловану та більш податливим центральним пальовим фундаментом.

Розрахунки напружено-деформованого стану (НДС) виконані в тривимірній постановці методом скінченних елементів з урахуванням просторової взаємодії елементів системи «грунтова основа - пальовий фундамент - надземні конструкції». Грунтова основа моделювалася як пружне багатошарове середовище відповідно до даних інженерно-

геологічних вишукувань. Конструкції паль, ростверку, огороження котловану, пілонів, стін ядра жорсткості і плит перекриття описувалися рівняннями теорії пружності.

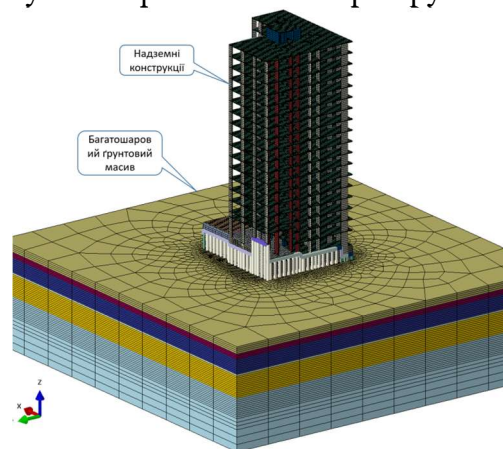


Рис.1. Скінченно-елементна модель будинку, прийнята для розрахунку.

Fig.1. Finite element model of the building which adopted for calculation.

Вертикальні елементи каркасу (пілони, стіни, ядра жорсткості) моделювалися універсальними чотирьох вузловими скінченними елементами оболонки. Горизонтальні елементи (плити перекриття, ростверк) – три та чотирьох вузловими елементами оболонки.

Палі моделювались просторовими стрижневими елементами. Для ґрунтового масиву використовувалися шести та восьми вузлові об'ємні ізопараметричні скінченні елементи.

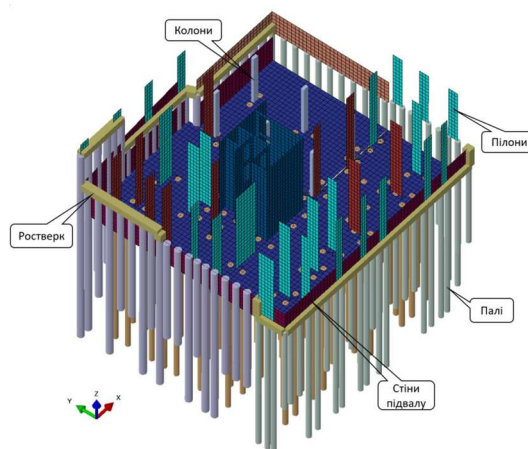


Рис.2. Фрагмент розрахункової схеми з огороженням котловану та вертикальними елементами каркасу.

Fig.2. Fragment of the calculation scheme with the pit enclosure and vertical frame elements.



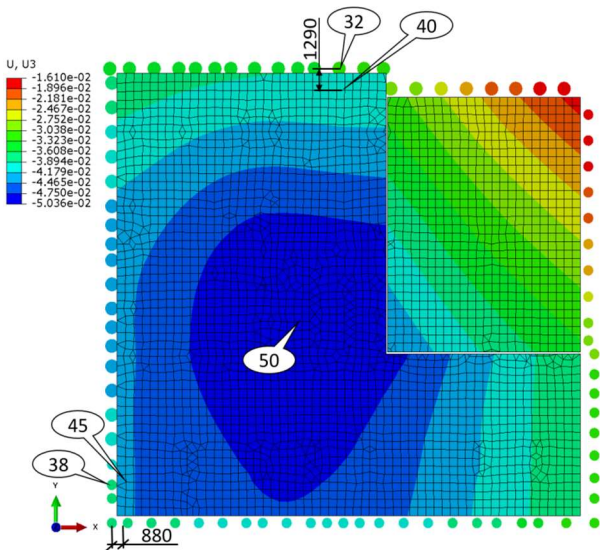


Рис.4. Ізополя вертикальних переміщень плитного ростверку, мм.  
 Fig.4. Isofield of vertical displacements of the plate grillage, mm.

Максимальне осідання прогнозується в центральній частині ростверку (зона ядра

жорсткості) і становить 50 мм (рис.4). По краях плити осідання зменшується до 32 мм. Відносна різниця осідань у межах фундаментів складала:

$$i = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{L} = \frac{45 - 38}{880} = 0.008, \quad (1)$$

Значна різниця жорсткості огороження котловану та центрального пального фундаменту призводить до концентрації напружень у місцях з'єднання пілонів і плит перекриття над підвалом з огороженням (рис.5). У цих зонах прогнозується поява незворотних деформацій у вигляді тріщин. Отримані результати свідчать про суттєвий вплив різниці жорсткості елементів фундаментної системи на НДС всієї будівлі і необхідність застосування додаткових конструктивних заходів для забезпечення нормативних вимог щодо деформативності.

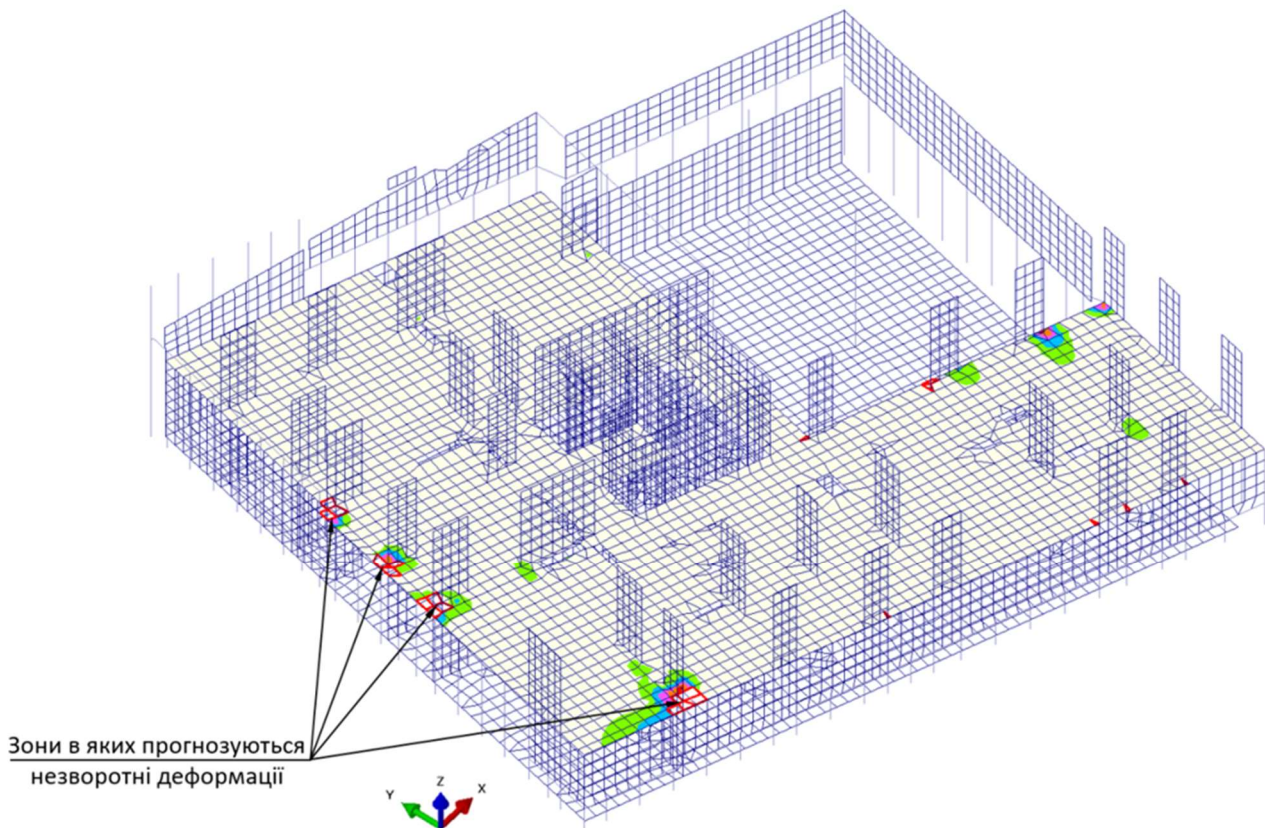


Рис. 5. Зони в яких прогнозується поява незворотних деформацій у вигляді тріщин.  
 Fig. 5. Zones in which the appearance of irreversible deformations in the form of cracks is predicted.

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

За результатами тривимірного скінченно-елементного моделювання напружено-деформованого стану системи «грунтова основа - пальовий фундамент - надземні конструкції» встановлено, що прийнята схема фундаменту забезпечує сприйняття загального навантаження від будівлі. Буроін'єкційні палі діаметром 620 мм і довжиною 18 м мають характерний нерівномірний розподіл зусиль: максимальні зусилля (120–270 т) виникають у кутових та периферійних зонах, у центральній частині – 80-120 т.

Максимальне осідання фундаментної плити прогнозується в центральній зоні (район ядра жорсткості) і становить 50 мм, зменшуючись до 32 мм по краях. Відносна різниця осідань досягає  $i = 0,008$ , що майже в чотири рази перевищує нормативне значення ( $i_{\text{нор}} = 0,002$  згідно з ДБН В.2.1-10-2018).

Головною проблемою розглянутої схеми фундаменту є суттєва різниця жорсткості між огороженням котловану та центральним пальовим фундаментом. Це спричиняє концентрацію напружень у місцях примикання пілонів і плит перекриття до огороження та створює ризик появи незворотних деформацій у вигляді тріщин у конструкціях підвалу та першого поверху.

Отримані результати свідчать, що хоча пальовий фундамент забезпечує несучу здатність, обрана схема опирання несучих елементів каркасу будівлі на підпірну стіну котловану не гарантує дотримання нормативних вимог щодо сумісності деформацій.

Для забезпечення надійності експлуатації будівлі рекомендується влаштувати єдиний фундамент під усі вертикальні несучі елементи каркасу або застосувати додаткові конструктивні заходи (посилене армування, ригелі тощо) у зонах концентрації напружень. Також доцільно розглянути влаштування деформаційного шва між огороженням котловану та

© О. Литвин, В. Ручківський

Опубліковано Київським Національним університетом будівництва і архітектури

основним каркасом будівлі.

Проведене дослідження підтверджує високу ефективність тривимірного чисельного моделювання для обґрунтування складних фундаментних систем в умовах щільної міської забудови.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко, І. П., Сахаров, В. О., & Литвин, О. В. (2020). Взаємодія несучих конструкцій будинку з палевою основою. *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*, 40, 21–27.  
[DOI: 10.32347/0475-1132.40.2020.21-27](https://doi.org/10.32347/0475-1132.40.2020.21-27).
2. Бойко, І. П. (1988). *Пальові фундаменти на нелінійно-деформівній основі* [Дисертація доктора технічних наук, Київський інженерно-будівельний інститут].
3. Сахаров, А. С., Бойко, І. П., Козак, А. Л., & Дельник, А. Е. (1986). Методика чисельного моделювання нелінійного деформування основи на прикладі заглиблених штампів. *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*, 19, 57–59.
4. Мінрегіонбуд України. (2018). *Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення* (ДБН В.2.1-10-2018).
5. Носенко, В. С., Маламан, А. Р., & Сорока, П. (2025). Оцінка переміщень підпірних стін та оточуючих будинків при влаштуванні глибокого котловану в умовах щільної міської забудови. *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*, 50, 192–199.  
[DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.192-199](https://doi.org/10.32347/0475-1132.50.2025.192-199).
6. Yuan, C., Xie, Y., & Ou, M. (2023). Adaptive optimization method for piled raft foundations based on variable pile spacing. *Applied Sciences*, 13(3), 1648.  
[DOI: 10.3390/app13031648](https://doi.org/10.3390/app13031648)

## REFERENCES

1. Boiko, I. P., Sakharov, V. O., & Lytvyn, O. V. (2020). Vzaiemodiia nesuchykh konstruktsii budynku z palevoiu osnovoiu [Interaction of load-bearing structures of the house with a pile base]. *Osnovy ta fundamenti: Naukovo-tekhnichniy zbirnyk*, 40, 21–27.  
[DOI: 10.32347/0475-1132.40.2020.21-27](https://doi.org/10.32347/0475-1132.40.2020.21-27).
2. Boiko, I. P. (1988). *Svaini fundamenti na nelineino-deformivnii osnovi* [Pile foundations

- on a nonlinearly deformable base] [Doctoral dissertation, Kyivskiy inzhenerno-budivelnyy instytut].
3. Sakharov, A. S., Boiko, I. P., Kozak, A. L., & Delnyk, A. E. (1986). *Metodyka chyselnoho modeliuvannia neliniinoho deformuvannia osnovy na prykladi zahlyblyenykh shtampiv* [Methodology of numerical modeling of nonlinear deformation of the base on the example of embedded stamps]. *Osnovy ta fundamenti: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, 19, 57–59.
  4. Minrehionbud Ukrainy. (2018). *Osnovy i fundamenti budivel ta sporud. Osnovni polozhennia* (DBN V.2.1-10-2018) [Bases and foundations of buildings and structures. Basic provisions].
  5. Nosenko, V. S., Malaman, A. R., & Soroka, P. (2025). Otsinka peremishchen pidpirnykh stin ta otochuiuchykh budynkiv pry vlashtuvanni hlybokoho kotlovanu v umovakh shchilnoi miskoi zabudovy [Assessment of displacements of retaining walls and surrounding buildings during deep excavation in dense urban development]. *Osnovy ta fundamenti: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, 50, 192–199.  
[DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.192-199](https://doi.org/10.32347/0475-1132.50.2025.192-199)
  6. Yuan, C., Xie, Y., & Ou, M. (2023). Adaptive optimization method for piled raft foundations based on variable pile spacing. *Applied Sciences*, 13(3), 1648.  
[DOI: 10.3390/app13031648](https://doi.org/10.3390/app13031648)

**Features of the stress-strain state of the supporting frame of a residential building in conditions of a significant difference in the stiffness of the elements of the “base – foundation – building” system**

*Oleksandr LYTVYN  
Vitalii RUCHKIVSKYI*

**Summary.** The paper presents the results of numerical modeling of the stress-strain state (SSS) of the foundations of a multi-storey residential building with social and cultural facilities and an underground parking in the Shevchenkivskiy district of Kyiv. The peculiarity of the object is a combined foundation system, in which part of the vertical load-bearing structures along the perimeter of the frame rests directly on the excavation retaining wall, while the rest rests on a pile foundation consisting of bored injection piles with a

diameter of 620 mm and a length of 18 m, connected by a monolithic raft foundation.

The calculations were performed using the finite element method in a three-dimensional formulation, taking into account the spatial interaction of the soil mass, pile foundation, raft, excavation retaining structure, and the above-ground building frame. The model included 344,246 elements and 337,486 nodes. The soil base was modeled as a multi-layered elastic medium based on the data of engineering-geological surveys. The loads corresponded to DBN V.1.2-2:2006 and DBN V.1.2-14:2009 (the total weight of the building from static loads is 207,249 kN).

Analysis of the results showed an uneven distribution of forces in the piles: the maximum forces in the corner and peripheral zones reached 120–270 tf, while in the central zone they ranged from 80–120 tf. In the raft foundation, the maximum bending moments were 120 tf·m/m (X-axis) and 165 tf·m/m (Y-axis). The predicted maximum settlement in the central part (in the area of the stiffness core) was 50 mm, and the minimum at the edges was 32 mm. The relative difference in settlements  $i = 0.008$  exceeds the normative value ( $i_{\text{nor}} = 0.002$ ) by almost four times. This deformational incompatibility between the rigid retaining wall and the more flexible central pile foundation causes stress concentration at the junctions of the pylons and floor slabs with the retaining wall, creating a risk of irreversible deformations in the form of cracks.

Based on the research results, recommendations were formulated to ensure the reliability of the foundations: either to arrange a single foundation under all vertical load-bearing elements, or to apply additional structural measures to perceive significant forces in the stress concentration zones.

**Key words.** Pile foundation, numerical modeling, differential settlement, soil-structure interaction, excavation retaining wall.

Стаття надійшла до видання:

16.05.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування:

20.05.2026.

Стаття опублікована:

30.05.2026