

УДК 624.131.524

**М.О. Березань\***

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8203-2798>

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Черкаський державний технологічний університет, бул. Шевченка, 460, м. Черкаси, Україна, 18006.

**С.В. Юрченко**

ст. викл., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1740-8080>

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Черкаський державний технологічний університет, бул. Шевченка, 460, м. Черкаси, Україна, 18006.

\*автор-кореспондент, e-mail: [berezan07@ukr.net](mailto:berezan07@ukr.net)

## **Особливості розрахунку одноповерхових промислових каркасних будинків на дію карстового провалу**

Цитувати як:

Березань, М.О., Юрченко, С.В. (2025). Особливості розрахунку одноповерхових промислових каркасних будинків на дію карстового провалу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 24, 63-72. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-05](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-05)

© 2025, Березань М.О., Юрченко С.В.

*У статті розглянуто проблему забудови закарстованих територій промисловими каркасними будинками, виконаний аналіз розповсюдження карсту як в Україні, так і всіх континентах. Карстові впливи на будинки мають небезпечний характер. Досвід будівництва і експлуатації показав можливість забезпечення надійності як окремих будинків, так і забудови промислових підприємств на територіях з карстово-суффозійними процесами.*

*Розвиток промислового будівництва на закарстованих територіях зумовлює необхідність розроблення спеціальних конструктивних систем і протикарстових захисних рішень, які забезпечують надійність і безпеку експлуатації будівель за умов невизначеності місцезнаходження можливих провалів та їх впливу на фундаменти.*

*Розглянуто основні вимоги до застосування конструктивних заходів захисту промислових каркасних будівель, при цьому акцентовано на переважному використанні стрічкових монолітних фундаментів під ряди колон.*

*Запропоновано методику розрахунку напружено-деформованого стану поздовжньої рами одноповерхового каркасного будинку, зведеного на стрічковому фундаменті, за умов впливу карстового провалу, що виникає у найменш сприятливому положенні — під місцем спирання колони.*

*Представлені формули, за якими визначаються згинаючі моменти та просадки, як на ділянці втрати контакту підовши стрічкового фундаменту з основою, так і за її межами. На основі отриманих формул виконаний чисельний аналіз показав, що максимальні значення додаткового згинаючого моменту в опорному перерізі колони при діаметрах провалів 4...10 м від поздовжнього зусилля*

в колоні відповідає несиметричності провалу 0,37...0,4, для рівномірно розподіленого навантаження від ваги фундаменту і ґрунту на уступах – 0,2.

Визначено умови, за яких розрахунок необхідно вести з урахуванням жорсткості надфундаментних конструкцій каркасу. Для випадку, коли колона знаходиться над центром провалу, представлено вираз, із якого можна знайти граничний діаметр карстового провалу.

Відзначено, що при провалах більше 10 м необхідно вводити в фундаментній частині додаткові конструктивні елементи захисту – підруги, балки, вертикальні в'язі по колонах.

*Ключові слова:* карстовий провал, конструктивний захист, стрічковий фундамент, розрахункова схема, методика розрахунку.

## Вступ

**Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.** Карстові процеси мають глобальне поширення та спостерігаються на всіх континентах. Вони характерні, зокрема, для Динарських Альп (Європа), плато Налларбор (Австралія), територій США, Мексики, В'єтнаму та інших регіонів світу. На території України карст розвинений у межах Карпат, Поділля, Донбасу та Криму. Загальна площа поширення карстових процесів становить близько 60% території держави, при цьому в окремих адміністративних областях інтенсивність їх прояву сягає 60–100%. Найбільшу небезпеку становлять ділянки розвитку відкритих форм карсту - вирв, колодязів і провалів, які займають близько 27% загальної площі карстоутворень.

В зону карстового впливу можуть попадати об'єкти будь-якого призначення, в тому числі і промислові будівлі. Досвід будівництва й експлуатації показав можливість забезпечення надійності як окремих будинків, так і забудови промислових підприємств на територіях з карстово-суфозійними осіданнями. Деякі з можливих варіантів рішень із улаштування фундаментів промислових каркасних будинків представлені у джерелах [1-4].

Проте, незважаючи на наявний досвід, актуальною залишається проблема розроблення достовірних і ефективних методів оцінки впливу карстових провалів на роботу фундаментів та несучих конструкцій виробничих будинків, а також забезпечення їх безпечної експлуатації в умовах невизначеності місцезнаходження та параметрів можливих провалів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є розроблення ефективних методів розрахунку та конструктивних рішень, що забезпечують надійну роботу промислових каркасних будинків за умов впливу карстових провалів.

Основними завдання досліджень було: розробити розрахункову модель поздовжньої рами будинку за умови виникнення провалу у найбільш

несприятливому положенні, отримати вирази для визначення згинальних моментів і просядок при втраті контакту стрічкового фундаменту з основою, виконати чисельний аналіз напружено-деформованого стану рами та встановити умови, за яких необхідно враховувати жорсткість надфундаментних конструкцій каркасу, визначити граничні параметри карстового провалу, що призводять до втрати несучої здатності фундаменту.

### **Матеріали та методи**

Дослідження здійснювалися із застосуванням аналітичних методів, що спираються на фундаментальні положення фізики, механіки, опору матеріалів і будівельної механіки та використовуються для побудови математичних моделей об'єктів, а також визначення їх напруженого стану, деформацій, стійкості й міцності.

У випадках виникнення проблеми стійкості об'єктів на карсті їх зазвичай вирішували шляхом застосування інженерно-геологічних заходів, зокрема, шляхом заповнення порожнин в основі будинків будівельними розчинами [5,6]. Але розвиток промислового будівництва на закарстованих територіях вимагає застосування спеціальних конструктивних рішень будинків та захисних заходів, які б забезпечували їхню безаварійну та безпечну експлуатацію. Характерною рисою проєктування конструктивних протикарстових заходів захисту є те, що вони повинні забезпечувати надійність будинків в умовах невизначеності місцезнаходження можливих провалів з різною ймовірністю їх утворення та впливу на фундаменти протягом усього терміну експлуатації будинку.

Конструкція будинку повинна унеможливити руйнування споруди або її фрагментів при утворенні карстового провалу навіть під несучою колоною [7]. Конструктивний захист найбільш ефективно зосереджувати у фундаментній частині. Перевагу слід віддавати будинкам на стрічкових монолітних фундаментах.

Жорсткість і міцність фундаменту кутових і крайових ділянок каркасної будівлі можуть бути збільшені влаштуванням консольних випусків фундаменту за його межі. Їх розміри повинні бути порівняні з розмірами очікуваних карстових провалів на ділянці розташування будинку та забезпечувати його стійкість при діаметрах провалу до 9 м [7].

Розрахунок одноповерхового каркасного будинку на стрічковому фундаменті на дію карстового провалу необхідно виконувати в площині поздовжньої рами. Поперечна рама розраховується на нерівномірну просядку однієї із опор. Виконуючи розрахунок поздовжньої рами, потрібно враховувати найбільш несприятливе положення карстового провалу під фундаментом будинку.

Розглянемо випадок утворення карстового провалу безпосередньо під колоною. Так як провальні впливи мають локальний характер і

додаткові зусилля сприймаються і передаються на основу прилеглими до провалу ділянками стрічкового фундаменту, виконується розрахунок лише фрагмента рами. В цьому стані зовнішнім навантаженням на раму, від якого в стрічковому фундаменті виникають додаткові зусилля, буде поздовжня сила в колоні, під фундаментом якої утворився провал. На ділянці, де фундамент втратив контакт з основою, необхідно враховувати його власну вагу та вагу ґрунту, що лежить на уступах у вигляді рівномірно розподіленого навантаження. Таким чином, при розрахунку поздовжньої рами на провальну дію основи зовнішнє навантаження впливає тільки на конструкції, що потрапили в зону провалу.

### Результати та обговорення

Розрахункова схема поздовжньої рами на стадії деформаційного впливу основи представлена на рис.1.а, приведена для розрахунків – на рис.1.б. Для визначення напружено-деформованого стану конструкцій, які безпосередньо сприймають провальну дію основи, використовуємо диференціальні залежності між згинальним моментом, поперечною силою, переміщеннями та граничними умовами для різних ділянок фундаменту. Результатом розв’язування задачі є формули для визначення внутрішніх зусиль у стрічковому фундаменті як на ділянці провалу, так і за його межами, та значення його переміщення.

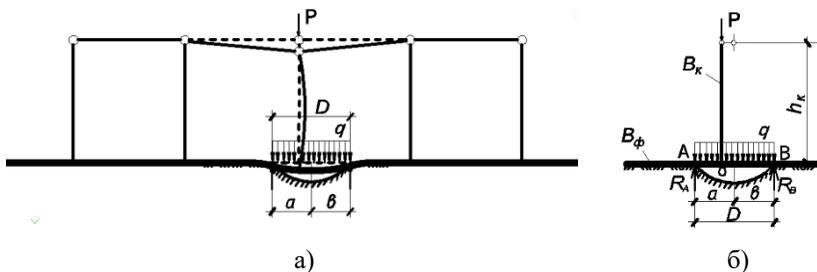


Рис. 1. Розрахункова схема: а – поздовжньої рами на стадії деформаційного впливу; б – фрагмента рами

На ділянці АО поперечна сила дорівнює опорній реакції

$$Q = R_A = B_{\phi} s a''' \quad (1)$$

Для ділянки стрічкового фундаменту, що контактує з основою, диференціальне рівняння згину буде мати вигляд

$$\frac{d^4 s_1}{dx^4} + 4\beta s_1 = 0, \quad (2)$$

де

$$\beta = \sqrt{\frac{C}{4B_\phi}}; \quad C = C_0,$$

$C_0$  – коефіцієнт жорсткості основи при рівномірному стискуванні;  
 $b$  – ширина підшови фундаменту.

Інтеграл рівняння (2) записується наступним чином

$$s = A_1 e^{\beta x_1} \sin \beta x_1 + A_2 e^{\beta x_1} \cos \beta x_1 \quad (3)$$

Інтегруючи і диференціюючи відповідно рівняння (1) і (3) і використовуючи граничні умови, отримуємо вирази для визначення внутрішніх зусиль і переміщень стрічкового фундаменту по всіх ділянках.

Згинаючий момент від зосередженої сили  $P$  у місці обпирання колони на фундамент

$$M_o = \frac{R_A(1 + \beta a)^2 + R_B(1 + \beta b)^2}{2\beta(2 + \beta D)} + \frac{M_o^k(1 + \beta b)}{2 + \beta D}, \quad (4)$$

де

$$M_o^k = \frac{Pab(b^2 - a^2)}{(a^3 + b^3) + \frac{hD^2}{n}}. \quad (5)$$

Коефіцієнт  $n$  визначається як співвідношення жорсткостей колони і стрічкового фундаменту

$$n = \frac{B_k}{B_\phi} \quad (6)$$

Від рівномірно розподіленого навантаження на стрічковий фундамент

$$M_o = \frac{R_A(1 + \beta a)^2 + R_B(1 + \beta b)^2}{2\beta(2 + \beta D)} - \frac{q[2\beta(a^3 + b^3) + 3(a^2 + b^2)]}{6(2 + \beta D)} + \frac{M_o^k(1 + \beta b)}{2 + \beta D}, \quad (7)$$

де

$$M_o^k = \frac{qD^2 \left[ (b^3 - a^3) + 3ab(b - a) \right]}{8 \left[ (a^3 + b^3) + \frac{h_k D^2}{n} \right]} \quad (8)$$

Для випадку, коли центр провалу знаходиться під колоною, тобто

$a = b$ , вирази (4) і (7), за якими визначаються згинальні моменти у фундаменті приймають вигляд

$$M_o = \frac{P}{8\beta}(2 + \beta D) \quad (9)$$

$$M_o = \frac{qD^2}{8} + \frac{qD(6 - \beta^2 D^2)}{12\beta(2 + \beta D)} \quad (10)$$

У формулах (4 і (7) опорні реакції в точках А і В обчислюються відповідно за виразами

$$R_A = \frac{Pb}{D}(1 + \gamma_1), \quad (11)$$

$$R_B = \frac{Pa}{D}(1 - \gamma_2), \quad (12)$$

де коефіцієнти  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  визначаються за наступними формулами

$$\gamma_1 = \frac{a(b^2 - a^2)}{(a^3 + b^3) + \frac{h_k D^2}{n}} \quad (13)$$

$$\gamma_2 = \frac{b(b^2 - a^2)}{(a^3 + b^3) + \frac{h_k D^2}{n}} \quad (14)$$

Величина  $\gamma_1$  у формулі (13) являє собою ступінь впливу жорсткості колони на опорну реакцію  $R_A$ . Чисельний аналіз показує, що вплив на величину  $\gamma_1$  має висота колони  $h_k$  і співвідношення жорсткостей  $B_k$  і  $B_\phi$ . Розглядаючи раму з висотою колони  $h_k = 4$  м,  $D = 10$  м і  $n = 1$  (екстремальні умови), знаходимо, що максимальне значення моментної складової  $\gamma_1$  при зосередженому навантаженні не перевищує 15% від складової сили  $P$  і 22% при рівномірно розподіленому навантаженні. Зі зменшенням  $n$  спостерігається значне зменшення величини  $\gamma_1$ . Практично при  $n = 0,01$  жорсткістю колони при визначенні внутрішніх зусиль в стрічковому фундаменті можна знехтувати. Перевірка надійності будівлі на стадії експлуатації виконується за несучою спроможністю і деформаціями фундаменту.

Перша умова має вигляд

$$M_{max} \leq [M], \quad (15)$$

де  $M_{max}$  - максимальний згинальний момент у фундаменті, який визначається за формулами (4) і (7);

$[M]$  – граничне значення згинального моменту, згідно [8].

За другою умовою несуча здатність визначається із умови

$$D \leq [D], \quad (16)$$

де  $D$  – діаметр провалу, що визначений згідно інженерно-геологічних вишукувань;

$[D]$  – граничне значення діаметра провалу, за якого вичерпується несуча спроможність стрічкового фундаменту.

Граничне значення діаметра карстового провалу знаходиться із кубічного рівняння

$$[D]^3 + d[D]^2 + m[D] + c = 0, \quad (17)$$

де

$$d = \frac{3(\beta P + 2q)}{\beta q}, \quad (18)$$

$$m = \frac{12(\beta P - 2\beta^2 M + q)}{\beta^2 q}, \quad (19)$$

$$c = \frac{12(P - 4\beta M)}{\beta^2 q} \quad (20)$$

Перевірка за деформаціями виконується за умовою

$$S_{max} \leq [S], \quad (21)$$

де  $S_{max}$  – максимальний прогин фундаменту;

$[S]$  – граничне осідання фундаменту згідно [9].

Якщо хоч одна із умов (15), (16) і (21) не виконується, необхідно збільшити жорсткість фундаменту.

### Висновок

1. Представлена методика дозволяє виконувати розрахунки стрічкового фундаменту одноповерхового промислового каркасного будинку як на стадії проектування, так і в період експлуатації для перевірки його несучої спроможності.

2. Якщо в процесі експлуатації виявляється, що в основі фундаментів можуть появлятися провали, значення яких перевищують несучу спроможність стрічкового фундаменту, а умови дозволяють виконати захисні заходи, позитивний ефект може бути досягнуто за рахунок введення в каркас будинку або в його фундаментну частину додаткових конструктивних елементів – балок, підпруг. Крім того, може бути збільшена висота фундаменту та площа підшви.

### **Конфлікти інтересів**

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

### **Фінансування**

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

### **Доступність даних**

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

### **Використання штучного інтелекту**

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

### **References**

1. Prefabricated reinforced concrete cantilever-beam foundation with a base plate. Utility model patent No. 42791. Berezan M.O. Publ. 07/27/2009, Bull. No. 14.
2. Prefabricated reinforced concrete beam foundation with supporting block pillows. Utility model patent No. 73075. Berezan M.O., Rudenko Yu.S. Publ. 09/10/2012.; Bull. No. 17.
3. Prefabricated reinforced concrete foundation with supporting trusses. Utility model patent No. 98645. Berezan M.O., Selenkov V.M. Publ. 05/12/2015.; Bull. No. 24.
4. Caudron, M., Al Heib, M., & Emeriault, F. (2008). Collapses of Underground Cavities and Soil-Structure Interactions: Influences of the Position of the Structure Relative to the Cavity. arXiv preprint arXiv:0810.5297.
5. Kharchenko, I. Y., Kharchenko, A. I., Panchenko, A. I., Erofeev, V. T., Mirsayapov, I. T., Khozin, V. G., Tarakanov, O. V., & Zavalishin, E. V. (2024). Injection Technologies for Elimination of Karst-Suffosion Hazard and Soil Subsidence in the Foundation of Buildings and Structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 20(6), 593-612.
6. Petrash R.V. Strengthening existing foundations using drilling mud technology. / R.V. Petrash, O.V. Petrash // Collection of scientific papers (industry mechanical engineering, construction). – Poltava: PoltNTU, 2009. – Issue 2(24). – P. 136-140.
7. DSTU-N BV.1.1-41:2016. Guidelines for the design of buildings and structures in karst areas. Kyiv. State Enterprise "UkrNDNTs", 2017.
8. DBN V.2.6-98:2009 "Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions". Kyiv, Minregionalstroy of Ukraine.2011.
9. DBN V.2.1-10:2018. Foundations and foundations of buildings and structures. Basic provisions. Kyiv. Minregionalstroy of Ukraine. 2018.

### **Список використаної літератури**

- 1.Збірний залізобетонний консольно-балочний фундамент з опорною плитою. Патент на корисну модель № 42791. Березань М.О. Опубл. 27.07.2009, Бюл. №14.
2. Збірний залізобетонний балочний фундамент з опорними блок-

подушками. Патент на корисну модель № 73075. Березань М.О., Руденко Ю.С. Опубл. 10.09.2012.; Бюл. № 17.

3. Збірний залізобетонний фундамент з опорними фермами. Патент на корисну модель № 98645. Березань М.О., Селенков В.М. Опубл. 12.05.2015.; Бюл. № 24.

4. Caudron, M., Al Heib, M., & Emeriault, F. (2008). Collapses of Underground Cavities and Soil-Structure Interactions: Influences of the Position of the Structure Relative to the Cavity. arXiv preprint arXiv:0810.5297.

5. Kharchenko, I. Y., Kharchenko, A. I., Panchenko, A. I., Erofeev, V. T., Mirsayapov, I. T., Khozin, V. G., Tarakanov, O. V., & Zavalishin, E. V. (2024). Injection Technologies for Elimination of Karst-Suffosion Hazard and Soil Subsidence in the Foundation of Buildings and Structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 20(6), 593-612.

6. Петраш Р.В. (2009). Підсилення існуючих фундаментів за допомогою бурозмішувальної технології. / Р.В. Петраш, О.В. Петраш // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*, 2(24), 136-140.

7. ДСТУ-Н БВ.1.1-41:2016. Настанова щодо проектування будівель і споруд на закарстованих територіях. Київ. ДП «УкрНДНЦ», 2017.

8. ДБН В.2.6-98:2009 "Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення". Київ, Мінрегіонбуду України. 2011.

9. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. Київ. Мінрегіон України. 2018.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 14.11.2025	Received 14.11.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 22.11.2025	Received in revised form 22.11.2025
Прийнято 24.11.2025	Accepted 24.11.2025
Опубліковано 25.12.2025	Published 25.12.2025

### **M.O. Berezan\***

PhD, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8203-2798>

Department of Industrial and Civil Engineering

Cherkasy State Technological University, 460 Shevchenko Blvd., Cherkasy, Ukraine, 18006.

### **S.V. Yurchenko**

Assoc. Prof., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1740-8080>

Department of Industrial and Civil Engineering

Cherkasy State Technological University, 460 Shevchenko Blvd., Cherkasy, Ukraine, 18006.

\*corresponding author, e-mail: berezan07@ukr.net

## **Features of the calculation of one-story industrial frame buildings for the effect of a karst collapse**

How to Cite:

Berezan M.O., Yurchenko S.V. (2025). Features of the calculation of one-story industrial frame

buildings for the effect of a karst collapse. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 24, 63-72. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-05](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-05)

*Abstract. The article considers the problem of building karst areas with industrial frame buildings, analyzes the distribution of karst both in Ukraine and on all continents. Karst effects on buildings are dangerous. Construction and operation experience has shown the possibility of ensuring the reliability of both individual buildings and the construction of industrial enterprises in areas with karst-suffosion processes.*

*The development of industrial construction in karst areas necessitates the development of special structural systems and anti-karst protective solutions that ensure the reliability and safety of building operation under conditions of uncertainty about the location of possible failures and their impact on the foundations.*

*The main requirements for the application of structural measures to protect industrial frame buildings are considered, with an emphasis on the preferential use of strip monolithic foundations under rows of columns.*

*A method for calculating the stress-strain state of the longitudinal frame of a one-story frame house erected on a strip foundation under the influence of a karst sinkhole that occurs in the least favorable position - under the column support.*

*Formulas are presented by which bending moments and subsidences are determined, both in the area of loss of contact of the strip foundation sole with the base and beyond it. Based on the obtained formulas, a numerical analysis was performed showing that the maximum values of the additional bending moment in the column support section with sinkhole diameters of 4...10 m from the longitudinal force in the column correspond to the sinkhole asymmetry of 0.37...0.4, for a uniformly distributed load from the weight of the foundation and soil on the ledges - 0.2.*

*The conditions under which the calculation must be carried out taking into account the stiffness of the frame superfoundation structures are determined. For the case when the column is above the center of the sinkhole, an expression is presented from which the limiting diameter of the karst sinkhole can be found.*

*It is noted that for sinkholes of more than 10 m, it is necessary to introduce additional structural protection elements in the foundation part - braces, beams, vertical ties on the columns.*

*Keywords: karst sinkhole, structural protection, strip foundation, calculation scheme, calculation methodology.*