

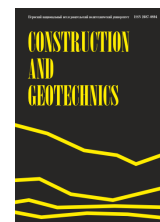


**пермский
политех**

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 16, № 2, 2025

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2025.2.02

УДК 624.159.2

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАРСТОВОГО ПРОВАЛА НА КОНСТРУКЦИИ МАЛОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ

Е.Н. Акбулякова, В.С. Нефедов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерция

О СТАТЬЕ

Получена: 08 декабря 2024

Одобрена: 07 марта 2025

Принята к публикации:

2 июня 2025

Ключевые слова:

карстовая воронка, карст, конструкции, метод конечных элементов, несущая способность, напряженно-деформированное состояние.

АННОТАЦИЯ

Целью исследования являлось определение напряженно-деформированного состояния конструкций малоэтажного здания при образовании карстовой воронки под колоннами и столбчатыми фундаментами. Для достижения поставленной цели авторами были решены следующие задачи: 1) выполнен обзор изученности вопроса; 2) выполнен вариантный расчет напряженно-деформированного состояния каркаса при образовании карстовой воронки под колоннами; 3) проанализированы полученные результаты, сформулированы выводы по работе. Объектом изучения являлось трехэтажное здание котельной. Карстующиеся породы в основании фундамента здания – известняк с прослоями доломита. Средний диаметр карстовой воронки на изучаемой территории составляет 2,27 м. Проведение натурных экспериментов с формированием карстового провала не представляется возможным, поэтому данная задача была решена с использованием численных методов. Большое внимание уделяется вариантному расчету в программном комплексе «ЛИРА» по моделированию образования карстовых воронок под колоннами и исключению из работы колонн вследствие провала грунта под подколонником. Расчет показал, что при различных вариантах расположения карстовой воронки возникает перераспределение усилий в конструкциях здания и аварийного обрушения не происходит. При этом нагрузки распределяются на соседние элементы каркаса, а для исключения разрушения каркаса здания предусмотрены подстропильные фермы. Конструкции фундамента исследуемого здания при 30 вариантах расположения карстовой воронки диаметром 2,27 м способны воспринять действующие на них нагрузки и обеспечить безопасную эксплуатацию рассматриваемого сооружения. Самым неблагоприятным местом расположения карстовой воронки будет являться колонна в осях «7/А», потому что внутренние и внешние нагрузки на данном участке максимальны. Статья представляет интерес для проектировщиков, инженеров-геотехников, строителей.

© Акбулякова Евгения Николаевна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: aspirant123@mail.ru.

Нефедов Виктор Сергеевич – магистр, e-mail: nefvik@bk.ru.

Evgeniya N. Akbulyakova – Ph. D. in Technical Science, Associate Professor, e-mail: aspirant123@mail.ru.

Viktor S. Nefedov – Master Student, e-mail: nefvik@bk.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

THE ASSESSMENT OF CALCULATIONS OF THE IMPACT OF A SINKHOLE ON THE CONSTRUCTION OF A LOW-RISE BUILDING

E.N. Akbulyakova, V.S. Nefedov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 08 December 2024
Approved: 07 March 2025
Accepted for publication:
02 June 2025

Keywords:

karst sinkhole, karst, constructions,
finite element method, bearing ca-
pacity, stress-strain state.

ABSTRACT

The aim of the study was to determine the stress-strain state of low-rise building structures when a karst sinkhole forms under columns and columnar foundations. The authors solved the following tasks to achieve the stated goal: 1) a review of the study of the issue was carried out; 2) a variant calculation of the stress-strain state of the frame during the formation of a karst sinkhole under the columns was carried out; 3) the obtained results were analyzed, conclusions on the work were formulated. The object of study was a three-story boiler house building. The karst rocks at the base of the building's foundation are limestones with dolomite interlayers. The average diameter of the karst sinkhole in the studied area is 2.27 m. It is not possible to carry out full-scale experiments with the formation of a karst sinkhole, therefore this problem is solved using numerical methods. Much attention is given to calculations in the «LIRA» software package on modeling karst sinkholes under columns and excluding columns from operation due to soil failure under the column. The calculation showed that with various placement options for the karst sinkhole, a redistribution of forces in the building structures occurs, and emergency collapse does not happen. In this case, the loads are distributed to adjacent frame elements, and rafter trusses are provided to prevent destruction of the building frame. Foundation of the building are capable of withstanding the loads acting on them and ensuring safe operation of the considered structure with 30 placement options for the karst sinkhole with a diameter of up to 2.27. The column in axes «7/A» will be most unfavorable location for the karst sinkhole because internal and external loads in this area are maximum. The article is of interest to designers, geotechnical engineers, and builders.

Введение

Карстовые процессы имеют широкое распространение в России, Китае, странах Европы, Северной и Южной Америки [1–6]. Образование карстовых воронок под фундаментом крайне неблагоприятно влияет на несущую способность фундамента [7–11]. Для обеспечения безопасной эксплуатации сооружений на закарстованных территориях необходим учет взаимодействия ослабленной карстом зоны и строительной конструкции. Вопросам расчета несущей способности фундаментов в карстовых зонах с учетом наличия карстовых полостей посвящены работы [12–19]. Для предотвращения обрушения конструкций здания при образовании карстовой воронки необходимо учитывать взаимодействие строительной конструкции и ее основания. Проведение натурных экспериментов с формированием карстового провала не представляется возможным, поэтому данную задачу решают с использованием численных методов, реализованных в современных программных комплексах [20]. Поэтому расчет в программных комплексах напряженно-деформированного состояния конструкций фундаментов и каркаса здания в случае возникновения карстовой воронки является актуальной проблемой геотехнического проектирования.

Численные расчеты широко применяются в современной практике строительства и могут быть использованы для прогноза влияния карстового провала на конструкции здания. В программном комплексе «ЛИРА» можно выполнять численные расчеты прочности и устойчивости, исследования напряженно-деформированного состояния и проектирование конструкций различного назначения. Этот программный комплекс позволяет автоматизировать процесс проектирования в соответствии с действующими нормативными доку-

ментами. Расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций производят на основании прогнозирования размеров карстовых воронок и вероятности их образования в основании проектируемого сооружения. Для этого выполняют расчет карстовой воронки в наиболее неблагоприятных местах под конструкциями здания. При расчете расположение карстовых воронок может варьироваться и назначаться исходя из наиболее неблагоприятных условий работы конструкций проектируемого здания.

Целью данной работы является пространственный расчет напряженно-деформированного состояния каркаса исследуемого здания для разных вариантов расположения карстовой воронки. Для достижения поставленной цели авторами были решены следующие задачи: 1) выполнен обзор изученности вопроса; 2) выполнен вариантный расчет напряженно-деформированного состояния каркаса при образовании карстовой воронки под колоннами в программном комплексе «ЛИРА»; 3) проанализированы полученные результаты, сформулированы выводы по работе.

Объект исследования

Расчеты выполнены для здания котельной с сетями инженерно-технического обеспечения. Здание трехэтажное, без подвала. Размеры здания 66×30 м. Уровень ответственности здания – нормальный. Несущие конструктивные элементы здания: столбчатые монолитные фундаменты под колонны, вертикальные несущие элементы (колонны) и объединяющие их в единую пространственную систему горизонтальные элементы перекрытия и покрытия. Каркас стальной с жесткими узлами крепления, состоит из стоек и пролетных балок. Для исключения разрушения каркаса здания в результате образования карстовой воронки предусмотрены дополнительные конструкции – подстропильные фермы.

В геологическом строении участка изысканий до разведанной глубины 23,0 м принимают участие (сверху вниз):

- суглинков пылеватый, тугопластичный, с линзами песка пылеватого;
- песок пылеватый, средней плотности, влажный, с прослоями супеси пластичной;
- песок средней крупности, средней плотности, влажный, с включениями до 10 % дресвы и щебня известняка;
- песок мелкий, средней плотности, влажный, с прослоями супеси пластичной, с включениями до 10% дресвы известняка;
- известняк карстующийся, малопрочный, трещиноватый, с прослоями доломита.

В соответствии с СП 22.13330.2016 и СП 11-105 изучаемая территория относится к категории V-Г со средним диаметром карстовой воронки 2,27 м и интенсивностью провалообразования до 0,01 случая на 1 км² в год. Указанный размер диаметра карстовой воронки был принят для расчетов в данном исследовании.

Методика расчета напряженно-деформированного состояния конструкций при образовании карстовой воронки

Численный расчет напряженно-деформированного состояния каркаса был выполнен в программном комплексе «ЛИРА». Пространственная расчетная модель каркаса и фундаментов здания была построена по геометрическим параметрам исследуемого объекта. Далее был выполнен вариантный расчет по моделированию образования карстовых воронок под колон-

нами и столбчатыми фундаментами. При расчетах отдельные колонны и столбчатые фундаменты последовательно «выключались» из работы вследствие провала грунта под ними. Схема расчета с исключением из работы колонны и подколонника по оси «А/1» приведена на рис. 1.

1. Собственный вес

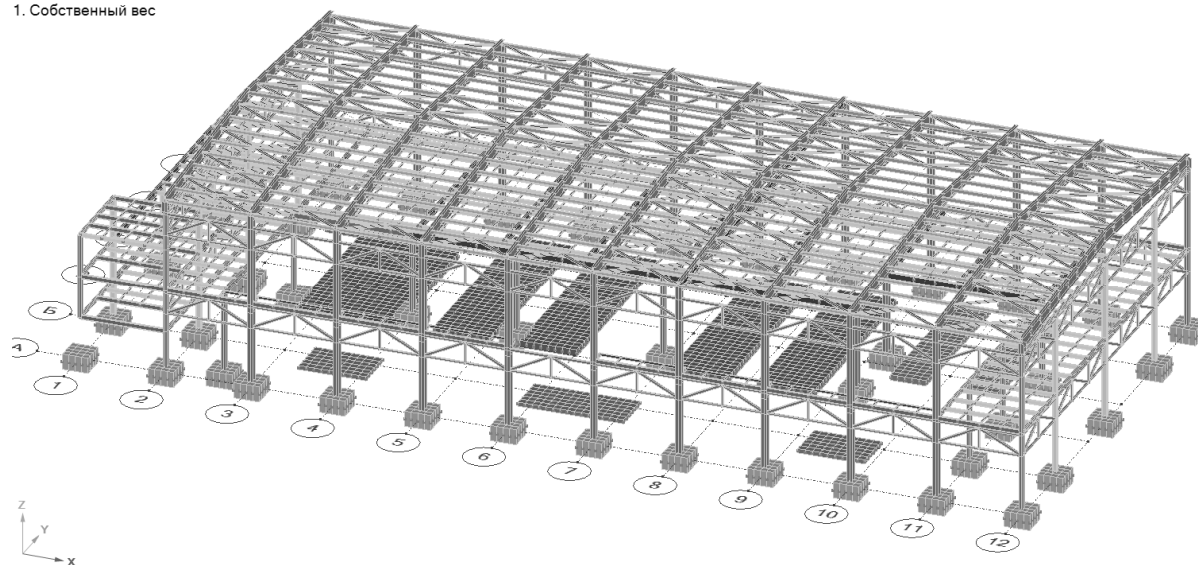


Рис. 1. Выключение из работы колонны по оси «А/1»

Fig. 1. Disabling the column along the «A/1» axis

Расчет был выполнен для 30 вариантов расположения карстовой воронки. Расчетный диаметр карстовой воронки при расчетах принят равным 2,27 м. Суть расчета заключалась в том, что при моделировании карстовой воронки для каждого из вариантов происходит проседание фундамента и «выключение» из работы элементов каркаса конструкции.

Результаты расчетов и их анализ

При образовании карстовой воронки и «выключении» из работы колонны и подколонника по оси «А/1» усилия перераспределяются на соседние конструкции, формируется новое напряженно-деформированное состояние (рис. 2, 3).

Расчеты для 30 вариантов расположения карстовой воронки показали, что максимальные вертикальные и горизонтальные перемещения каркаса не превышают нормативных значений, основной каркас здания котельной остается в равновесии. Прочностные свойства элементов каркаса соответствуют принятым нагрузкам, процент использования металлоконструкций элементов каркаса не превышает 100 %, что удовлетворяет требованиям прочности и устойчивости.

Осадки и крен конструкций фундаментов удовлетворяют нормативным требованиям. Расчетное сопротивление грунта основания больше давления под подошвой фундамента, несущая способность грунта основания обеспечена. Осадки фундаментов здания котельной меньше допустимых нормативных значений. Относительная разность осадок фундаментов здания котельной меньше допустимых нормами значений.

Прогибы в плитах перекрытия не превышают предельно допустимых значений. Коэффициент использования бетонных и железобетонных конструкций по первой и второй группам предельных состояний составил меньше единицы. Следовательно, при образовании карстового провала для 30 вариантов расчета конструкции здания не перегружены.

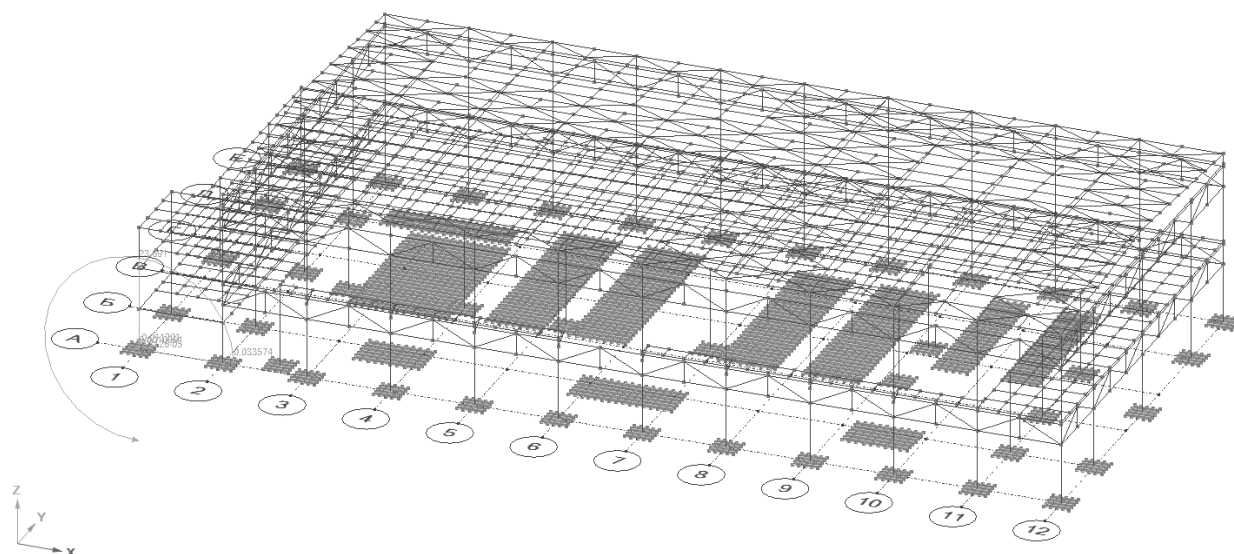


Рис. 2. Узловые реакции колонны по оси «А/1» при образовании карстовой воронки

Fig. 2. Nodal reactions of the column in the «A/1» axes during the formation of a karst sinkhole

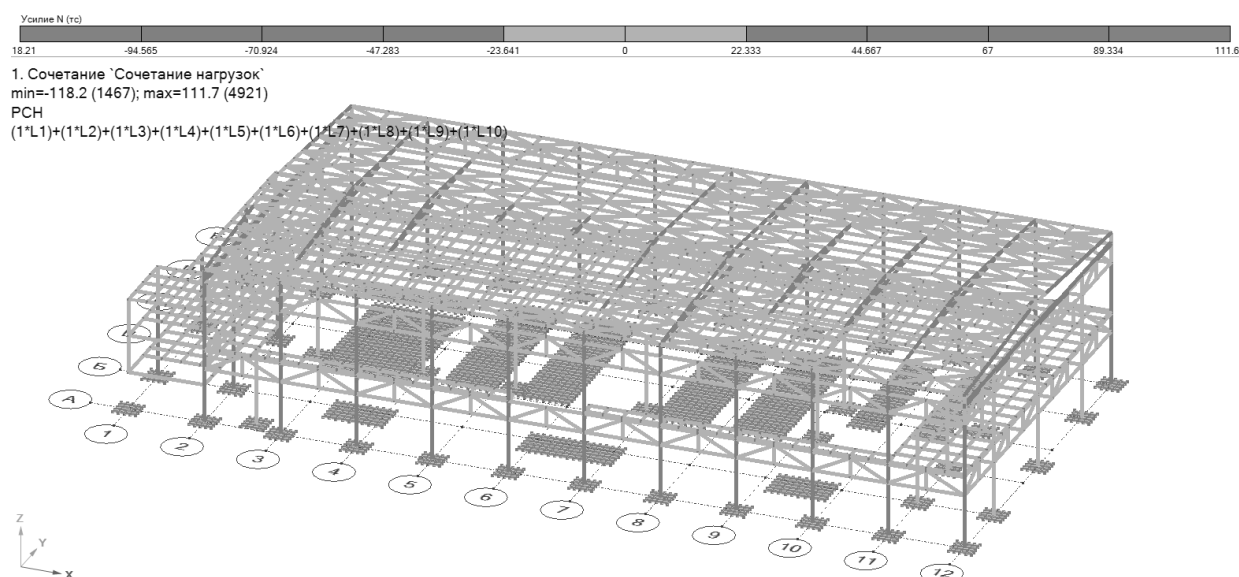


Рис. 3. Сочетание нагрузок «прогрессирующее разрушение» при образовании карстового провала под колонной по оси «А/1»

Fig. 3. Combination of loads «progressive destruction» during the formation of a karst sinkhole under the column along the «A/1» axis

Анализ расчетов всех вариантов расположения карстовой воронки под фундаментами показал, что самым неблагоприятным местом расположения карстовой воронки будет являться участок по оси «7/А». Это связано с тем, что внутренние и внешние нагрузки на данном участке имеют максимальные значения, усилие на данном участке равно 123,1 тс. Однако даже для этого участка устойчивость конструкций фундаментов и каркаса здания обеспечивается.

Таким образом, программный комплекс «ЛИРА» хорошо подходит для решения задач прогноза напряженно-деформированного состояния конструкций малоэтажного здания при различных вариантах расположения карстовой воронки заданного диаметра. Металлический каркас исследуемого здания способен компенсировать неблагоприятное воздействие при возможном образовании карстовой воронки диаметром до 2,27 м.

Заключение

На основании выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Численные расчеты в программном комплексе «ЛИРА» показали, что при 30 вариантах расположения карстовой воронки в основании проектируемого здания возникает перераспределение усилий в металлических конструкциях и аварийного обрушения не происходит. Металлический каркас исследуемого здания способен компенсировать неблагоприятное воздействие при возможном образовании под столбчатым фундаментом карстовой воронки диаметром до 2,27 м.

2. Самым неблагоприятным местом расположения карстовой воронки будет участок под колонной по оси «7/А», так как внутренние и внешние нагрузки на данном участке имеют максимальные значения. Однако даже для этого участка устойчивость конструкций каркаса здания обеспечивается. Процент использования металлических конструкций элементов каркаса не превышает 100 %, следовательно, принятые элементы каркаса удовлетворяют требованиям прочности и устойчивости.

3. Осадки и крен конструкций фундаментов удовлетворяют нормативным требованиям. Расчетное сопротивление грунта основания больше давления под подошвой фундамента, несущая способность грунта основания обеспечена. Осадки фундаментов здания котельной меньше допустимых нормативных значений. Относительная разность осадок фундаментов здания котельной меньше допустимых нормами значений.

4. Таким образом, программный комплекс «ЛИРА» хорошо подходит для решения задач прогноза напряженно-деформированного состояния конструкций малоэтажного здания при различных вариантах расположения карстовой воронки заданного диаметра.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Numerical investigation on the mechanical behaviour of karst sinkholes / M.H. Soliman, R. Shamet, Y.J. Kim, H. Youn, B.H. Nam // Environmental Geotechnics. – 2019. – Vol. 8, iss. 6. – P. 367–381. DOI: 10.1680/jenge.18.00063
2. Sinkhole stability chart for geotechnical investigation / K. Park, M. Soliman, Y.J. Kim, B.H. Nam // Transportation Geotechnics. – 2024. – Vol. 45. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101191
3. A multi-geophysical approach to assess potential sinkholes in an urban area / R. Liu, H. Sun, J. Qin, Z. Zheng // Engineering Geology. – 2023. – Vol. 318. DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107100
4. Evaluation of groundwater flow through a high rockfill dam foundation in karst area in response to reservoir impoundment / Y.F. Chen, J. Yuan, G. Wang, J. Xu, R. Hu, Zh.Yang // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2022. – Vol. 160. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105268
5. Кочев, А.Д. Изучение механизма образования карстово-суффозионных воронок в г. Москве / А.Д. Кочев // Инженерная геология. – 2021. – Т. XVI, № 4. – С. 34–45. DOI: 10.25296/1993-5056-2021-16-4-34-45
6. Шарاپов, Р.В. Показатели наблюдения и оценки карстовых процессов / Р.В. Шарাপов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 1. – С. 28–34.

7. Bearing behavior of rock socketed pile in limestone stratum embedded with a karst cavity beneath pile tip / G. Han, H. Zhang, Zh. Wang, Y. Wang, N. Geng, P. Guo, X. Li, Y. Zhao, H. Lin, Y. Wang // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 18. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02203
8. Performance of a deep excavation and the influence on adjacent piles: A case history in karst region covered by clay and sand / Y. Yang, C. Chen, Ch. Liu, L. Huang, W. Chen, N. Lin, J. Cui, W. Xie // *Underground Space*. – 2023. – Vol. 8. DOI: 10.1016/j.undsp.2022.03.004
9. Intelligent analysis method for the global vertical displacement field of foundation pits in dense karst cave areas / J. Liao, Ch. Lin, Ch. Lan, Y. Wu, Zh. Liu, C. Zhou // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2024. – Vol. 137, Part B. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.109178
10. A system for inspecting karst voids during construction of cast-in-place pile foundations / L. Liu, Zh. Shi, Sh. Li, M. Peng, F. Tao // *Engineering Geology*. – 2023. – Vol. 320. DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107124
11. Detection of karst voids at pile foundation by full-waveform inversion of single borehole sonic data / L. Liu, Zh. Shi, G.P. Tsofilas, M. Peng, Y. Wang // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2022. – Vol. 152. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.107048
12. Результаты экспериментальных исследований взаимодействия моделей перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания при влиянии карстово-обвальных процессов / С.И. Евтушенко, Е.В. Зеленин, Б.Ю. Барыкин, А.Б. Барыкин // *Construction and Geotechnics*. – 2024. – Т. 15, № 3. – С. 26–41. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.3.03
13. Тер-Мартirosян, А.З. Оценка влияния карстово-суффозионных процессов на здания и сооружения различного назначения / А.З. Тер-Мартirosян, Г.О. Анжело, Ю.В. Ванина // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2024. – № 9. – С. 34–40. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.09.34-40
14. Вайнштейн, М.С. Расчеты многоэтажных жилых зданий для строительства в Москве с учетом потенциальной опасности проявления карстовых процессов / М.С. Вайнштейн // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2013. – № 5. – С. 47–49.
15. Золотозубов, Д.Г. Расчеты армированных грунтовых оснований при возникновении карстовых провалов / Д.Г. Золотозубов, А.Б. Пономарев // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. – 2010. – № 18(37). – С. 19–22.
16. Барыкин, А.Б. Разработка методики расчета перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании, осложненного карстово-провальными процессами / А.Б. Барыкин, Б.Ю. Барыкин, Е.В. Зеленин // *Вестник МГСУ*. – 2024. – Т. 19, № 9. – С. 1494–1504. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1494-1504
17. Готман, А.Л. Метод расчета свайных ленточных фундаментов при образовании карстового провала / А.Л. Готман, Р.Н. Магзумов // *Вестник МГТУ*. – 2014. – № 2. – С. 74–83.
18. Лодыгина, Н.Д. Расчет свайных фундаментов на прочность и устойчивость с учетом карстовых процессов / Н.Д. Лодыгина // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. – 2016. – № 1(27). – С. 14–18.
19. Егерова, Э.Н. Расчет несущей способности фундамента на закарстованной территории / Э.Н. Егерова, В.А. Кирпичникова // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2023. – № 1. – С. 51–57. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.01.51-57
20. Влияние способа моделирования свайного фундамента на напряженно-деформированное состояние каркаса здания сложной геометрической формы / Э.К. Агаханов,

Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, М.К. Агаханов // Системные технологии. – 2023. – № 1(46). – С. 131–139. DOI: 10.55287/22275398_2023_1_131.

References

1. Moataz H Soliman, Ryan Shamet, Yong Je Kim, Heejung Youn, Boo Hyun Nam. Numerical investigation on the mechanical behaviour of karst sinkholes. *Environmental Geotechnics*. 2019, vol.8, issue 6, pp. 367-381.
2. Kyungwon Park, Moataz Soliman, Yong Je Kim, Boo Hyun Nam. Sinkhole stability chart for geotechnical investigation. *Transportation Geotechnics*, 2024, vol. 45.
3. Rui Liu, Huaifeng Sun, Jianwen Qin, Ziqiang Zheng. A multi-geophysical approach to assess potential sinkholes in an urban area. *Engineering Geology*, 2023, vol. 318.
4. Yi-Feng Chen, Jingjing Yuan, Guohui Wang, Jianhua Xu, Ran Hu, Zhibing Yang. Evaluation of groundwater flow through a high rockfill dam foundation in karst area in response to reservoir impoundment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, vol. 160.
5. Kochev A.D. Izucheniye mexanizma obrazovaniya karstovo-suffuzionnyx voronok v g. Moskve. [Study of the mechanism of formation of karst-suffusion craters in Moscow]. *Inzhenernaya geologiya*, 2021, vol. XVI, no. 4, pp. 34–45.
6. Sharapov R.V. Pokazateli nablyudeniya i ocenki karstovy`x processov [Indicators of monitoring and evaluation of karst processes]. *Mashinostroenie i bezopasnost` zhiznedeyatel`nosti*, 2013, vol. 1, pp. 28-34.
7. Gang Han, Hui Zhang, Zherun Wang, Yanyan Wang, Ningning Geng, Panpan Guo, Xian Li, Yanlin Zhao, Hang Lin, Yixian Wang. Bearing behavior of rock socketed pile in limestone stratum embedded with a karst cavity beneath pile tip. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, vol. 18.
8. Yubing Yang, Caiyuan Chen, Chao Liu, Longtian Huang, Wei Chen, Nengyou Lin, Jie Cui, Wandong Xie. Performance of a deep excavation and the influence on adjacent piles: A case history in karst region covered by clay and sand. *Underground Space*, 2023, vol. 8.
9. Jin Liao, Chunxiu Lin, Chunhui Lan, Yongtao Wu, Zhen Liu, Cuiying Zhou. Intelligent analysis method for the global vertical displacement field of foundation pits in dense karst cave areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, vol. 137, part B.
10. Liu Liu, Zhenming Shi, Shaojun Li, Ming Peng, Fengjuan Tao. A system for inspecting karst voids during construction of cast-in-place pile foundations. *Engineering Geology*, 2023, vol. 320.
11. Liu Liu, Zhenming Shi, Georgios P. Tsoflias, Ming Peng, Yao Wang. Detection of karst voids at pile foundation by full-waveform inversion of single borehole sonic data. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, vol. 152.
12. Evtushenko C.I., Zelenin E.V., Barykin B.Yu., Barykin A.B. The results of experimental studies of the interaction of models of a cross-girder foundation and an inclined base under the influence of karst-collapse processes. *Construction and Geotechnics*, 2024, vol. 15, no. 3, pp. 26-41. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.3.03.
13. Ter-Martirosyan A. Z., Anzhelo G. O., Vanina Yu. V. Otsenka vliyaniya karstovo-suffuzionnykh processov na zdaniya i sooruzheniya razlichnogo naznacheniya [Assessment of the impact of karst-suffusion processes on buildings and structures for various purposes]. *Promy`shlennoe i grazhdanskoe stroitel`stvo*, 2024, vol. 9, pp. 34-40. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.09.34-40

14. Vajnshtejn M.S. Raschety mnogoetazhnykh zhilykh zdaniy dlya stroitel'stva v Moskve s uchetom potencial'noj opasnosti proyavleniya karstovykh processov [Calculations of multi-storey residential buildings for construction in Moscow, taking into account the potential danger of karst processes]. *Promy'shlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2013, vol. 5, pp. 47-49.

15. Zolotozubov, D.G., Ponomarev A.B. Raschety armirovannykh gruntovykh osnovanij pri vozniknovenii karstovykh provalov [Calculations of reinforced soil foundations in the event of sinkholes]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*, 2010, vol. 18(37), pp. 19-22.

16. Barykin A.B., Barykin B.Yu., Zelenin E.V. Razrabotka metodiki rascheta perekrestno-balochnogo fundamenta na naklonnom osnovanii, oslozhnennogo karstovo-proval'nymi processami [Development of a methodology for calculating a cross-girder foundation on an inclined base complicated by sinkhole processes]. *Vestnik MGSU*, 2024, vol. 19, no. 9, pp. 1494-1504. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1494-1504.

17. Gotman A.L., Magzumov R.N. Metod rascheta svainykh lentochnykh fundamentov pri obrazovanii karstovogo provala [A method for calculating pile belt foundations during the formation of a karst sinkhole]. *Vestnik MGSU*, 2014, no. 2, pp. 74-83.

18. Lodygina, N. D. Raschet svajny'x fundamentov na prochnost' i ustojchivost' s uchetom karstovy'x processov. [Calculation of pile foundations for strength and stability, taking into account karst processes]. *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2016, vol. 1(27), pp. 14-18.

19. Egereva, E.N., Kirpichnikova V.A. Raschet nesushhei sposobnosti fundamenta na zakarstovannoi territorii [Calculation of the bearing capacity of the foundation in a paved area]. *Promy'shlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2023, vol. 1, pp. 51-57. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.01.51-57.

20. Agaxanov E.K., Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Agaxanov M.K. Vliianie sposoba modelirovaniia svainogo fundamenta na napriazhenno-deformirovannoe sostoyanie karkasa zdaniia slozhnoi geometricheskoi formy [The influence of the pile foundation modeling method on the stress-strain state of the building frame of complex geometric shape]. *Sistemny'e tekhnologii*, 2023, vol. 1(46), pp. 131-139. DOI: 10.55287/22275398_2023_1_131.