УДК 624.15:628.2
doi: 10.33622/0869-7019.2023.01.51-57

Расчет несущей способности фундамента на закарстованной территории

Эльвира Николаевна ЕГЕРЕВА, кандидат физико-математических наук, доцент, egerevaen@mail.ru

Варвара Алексеевна КИРПИЧНИКОВА, студентка, varya.kirpichnikova@list.ru

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. *Рассмотрена особенность расчета несущей способности плитного монолитного фундамента здания канализационных очистных сооружений, расположенных в г. Севастополе в условиях строительства на закарстованной территории. Данная тема заслуживает особого внимания, поскольку карстовые районы широко распространены на территории России и относятся к особым условиям строительства. Для предотвращения обрушения здания канализационных очистных сооружений в случае образования карстовой воронки и сейсмических воздействий необходимо учитывать взаимодействие строительной конструкции и ее основания. С этой целью выполняли численный расчет и моделировали возможность образования карстовой воронки в наиболее неблагоприятных местах. В качестве компенсирующих конструктивных мероприятий предложено устройство монолитных плитных фундаментов. По результатам численного расчета несущей конструкции на аварийную ситуацию, проведенного в программном комплексе LIRA Soft, выявлено, что обрушение здания не произойдет в результате перераспределения возникающих усилий. Монолитные железобетонные конструкции фундамента способны воспринять все действующие на них нагрузки и обеспечить безопасную эксплуатацию рассматриваемого сооружения. В статье показано, что перемещений, больших по значению, чем исходные, при нормальной работе объекта у несущих конструкций не происходит в результате перераспределения усилий. Также установлено, что максимальное давление под фундаментной плитой не превышает расчетного сопротивления грунта. Таким образом, плитный монолитный железобетонный фундамент способен компенсировать неблагоприятное воздействие при возможном образовании карстово-суффозионных провалов.*

Ключевые слова: *канализационные очистные сооружения, расчет фундамента, плитный монолитный железобетонный фундамент, карстовый провал, карстовая воронка, перераспределение усилий, программный комплекс LIRA Soft*

Для цитирования: *Егерева Э. Н., Кирпичникова В. А.* Расчет несущей способности фундамента на закарстованной территории // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 1. С. 51–57. doi: 10.33622/0869-7019.2023.01.51-57

CALCULATION OF THE BEARING CAPACITY OF THE FOUNDATION IN THE KARSTED TERRITORY

Elvira N. EGEREVA, egerevaen@mail.ru

Varvara A. KIRPICHNIKOVA, varya.kirpichnikova@list.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. *The peculiarity of the calculation of the bearing capacity of a slab monolithic foundation of a sewage treatment plant located in the city of Sevastopol in the conditions of construction on a karsted territory is considered. This topic deserves special attention, since karst areas are widespread on the territory of Russia and belong to areas with special construction conditions. To prevent the collapse of a sewage treatment plant building in the event of the formation of a sinkhole and seismic impacts, it is necessary to take into account the interaction of the building structure and its base. For this purpose, a numerical calculation was performed and the possibility of the formation of a sinkhole in the most unfavorable places was modeled. As compensating constructive measures, the installation of monolithic slab foundations is proposed. According to the results of the numerical calculation of the bearing structure of the building for an emergency, carried out in the LIRA Soft software package, it was revealed that the collapse of the building will not occur as a result of the redistribution of the emerging forces. Monolithic reinforced concrete structures of the foundation are able to perceive all the loads acting on them and ensure the safe operation of the structure considered. The article shows that displacements greater in value than the initial ones do not occur as a result of the redistribution of forces during the normal operation of the object in bearing structures. It is also established that the maximum pressure under the foundation plate does not exceed the calculated resistance of the soil. Thus, a slab monolithic reinforced concrete foundation is able to compensate for the adverse impact of the possible formation of karst-suffusion sinkholes.*

Keywords: *sewage treatment plants, foundation calculation, slab monolithic reinforced concrete foundation, karst sinkhole, karst funnel, redistribution of forces, software package LIRA Soft*

For citation: Egereva E. N., Kirpichnikova V. A. Calculation of the Bearing Capacity of the Foundation in the Karsted Territory. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2023, no. 1, pp. 51–57. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2023.01.51-57

© ЕГЕРЕВА Э. Н., КИРПИЧНИКОВА В. А., 2023

Введение

При проектировании зданий и сооружений необходимо оценивать устойчивость территорий и проводить их инженерно-геологическое районирование. Возникновение опасных геологических и инженерно-геологических процессов нарушает безаварийную эксплуатацию надземных и подземных сооружений. Так, на территории некоторых стран мира образуются карстовые воронки, расположение которых невозможно предсказать из-за множества задействованных параметров и сложных механизмов, контролирующих их эволюцию и разрушение. Карстовым провалом принято считать замкнутую впадину обычно воронкообразной формы, которая образуется за счет выноса выщелоченной на поверхности породы через подземные каналы в растворенном состоянии.

Поскольку карстовые воронки могут возникать стихийно, без каких-либо предупреждающих признаков, и приводить к серьезным экономическим потерям и жертвам, они представляют значительный риск во многих областях и даже представляют угрозу жизни людей.

Потребность в мероприятиях по мониторингу и предотвращению образования карстовых воронок возрастает с увеличением инженерного воздействия во многих регионах. Однако в настоящее время имеются пробелы в оценке выполнения некоторых мероприятий. Так, в работе [1] методом конечных элементов исследована верхняя граница провала карстовой воронки, вызванного подземной пещерой. Данное исследование служит ориентиром для предотвращения аналогичных геологических опасностей в районах исследования.

Восстановительные мероприятия от карстовых провалов на железных дорогах, в сельскохозяйственных районах и вблизи городских зон с помощью высокоточного нивелирования и наземного лазерного сканирования рассмотрены в работах [2—5].

Оценка эффективности работ по ликвидации последствий активных карстовых провалов в городских районах, которые образуются в результате рытья траншей, приведены в статьях [6—9]. Довольно низкая производительность рассмотренного способа, часто применяемого для устранения просадочных структур, обусловлена сложной структурой провала с резкими изменениями удельного сопротивления грунта.

Подробное исследование карстового разрушения в Сан-Вито в южной Италии, которое представляет собой особый тип провала с обрушением покрытия, показано в статье [10]. Карстовое обрушение представляет собой полукруглую замкнутую впадину диаметром 200 м и с внутренними стенами высотой до 25 м, расположенную в предгорной зоне вдоль внутренней границы аллювиальной равнины р. Сарно. Был проведен гидрогеологический анализ грунта. В исследовании предпринята попытка определить генетический механизм и включить реконструкцию подробной стратиграфической модели подповерхностного слоя, показывающей, что заполнение впадины имеет толщину около 45 м и состоит из хорошо слоистых илисто-глинистых озерных отложений, перемежающихся слоями тефры.

В статьях [11, 12] исследованы монолитные соединения сборного фундамента с колонной, которые легко монтируются и разбираются и, следовательно, могут быть заменены или отремонтированы в случае чрезмерного повреждения при образовании карстовой воронки под сооружением.

В работах [13—16] рассмотрены происхождение карстовых воронок и их влияние на жизнь людей, отмечена связь с другими геоопасными явлениями в различных странах мира (с особым упором на массовые движения на склонах), а также выполнены численные и аналитические исследования характеристик сопротивления грунта, склонного к внутренней эрозии и последующему образованию воронок, посредством анализа недр и обработки данных. В статьях [17—20] изучены возможности оснащения производственных строений с усилением конструкций в случае их недостаточной несущей способности при нормальных условиях.

Материалы и методы

Проверку несущей способности плитного монолитного фундамента здания канализационных очистных сооружений «Южные», расположенного в г. Севастополе, выполняли для определения способности выдерживать возникающую нагрузку в случае проявления поверхностной карстовой воронки диаметром 3 м и глубиной 10 м. В связи с этим рассматривали следующие задачи:

- определение геометрических параметров фундамента здания;
- проведение мероприятий по предотвращению обрушения конструкций в случае образования карстовой воронки и сейсмических воздействий, заключающихся в перераспределении усилий под подошвой фундамента.

Объект капитального строительства расположен на территории юго-западного Крыма, в предгорье Крымских гор. Согласно геоморфологическому районированию, исследуемая территория представляет собой тектонические эрозионно-денудационные горы на складчатом основании.

Рассматриваемое одноэтажное, отдельно стоящее здание

прямоугольной формы размером 24×48 м, каркасного типа. Высота здания в коньке — 12,745 м, шаг колонн — 6 м, высота до низа ферм покрытия — 9,84 м. За относительную отметку 0,000 принята абсолютная отметка чистого пола первого этажа 39,25 м по Балтийской системе.

Каркас здания металлический, основные колонны приняты двухветвевыми из двутавра 40К1 (ГОСТ 57837). Марка стали для колонн принята С255. Крепление металлических колонн к фундаментам осуществляли посредством четырех фундаментных болтов диаметром 48 мм (ГОСТ 2479.1). Фахверковые колонны приняты из квадратных труб 200×8, марка стали С255. Фундамент здания состоит из монолитных железобетонных плит толщиной 600 мм из бетона В30, W8, F150, глубина заложения от −3,45 до −3,95 м.

Подземная часть представлена каналами, с расположенным в них технологическим оборудованием. Стены каналов и подколонники в подземной части выполнены из монолитного железобетона В30, W8, F150. Под всей площадью здания, за исключением технологических железобетонных каналов, предусмотрена обратная засыпка песком средней крупности с послойным уплотнением. Ширина деформационных швов в фундаментных плитах, стенах и перекрытиях подземной части — 50 мм. Полы и перекрытия каналов подземной части — монолитные железобетонные плиты толщиной 250 мм, из бетона В30, W8, F150.

Расчет несущей конструкции здания в пространственной модели проводили в программном комплексе LIRA Soft. Нагрузки, входящие в состав расчетных сочетаний, представлены в *табл. 1.*

Так как исследуемый объект находится в сейсмоопасном районе, расчет здания выполнен на основные и особые сочетания нагрузок с учетом расчетной сейсмической нагрузки. Сейсмичность в этом районе составляет 7 баллов, вероятность возможного появления землетрясения в течение 50 лет — 10 %. При этом для расчета здания на особые сочетания нагрузок расчетные значения умножили на коэффициент надежности.

1. Наименование нагрузок, входящих в состав расчетов, на 1 м^2, кН

Нагрузки	Нормативное значение	Коэффициент надежности	Расчетное значение
Постоянные нагрузки			
Собственный вес	76,982	1,05	80,831
Конструкция чистого пола (цементно-песчаная стяжка)	2,648	1,3	3,442
Вес и давление грунта (обратная засыпка)	17,652	1,15	20,3
Временные длительные нагрузки			
Лаборатории, хозяйственно–бытовые помещения	1,961	1,2	2,353
Коридоры, холлы	2,942	1,2	3,53
Кратковременные нагрузки			
Снеговая нагрузка	0,49	1,4	0,686
Нагрузки от транспортных средств	6,865	1,2	8,238
Ветровая нагрузка	0,294	1,4	0,412

Участок изысканий относится к III категории инженерно-геологических условий и характеризуется наличием насыпных грунтов. Карстовые процессы представляют опасность для инженерно-геологических работ в данном районе. При этом на территории распространены трещинно-пластовые и карстово-пластовые воды.

Район строительства относится к IV категории устойчивости по интенсивности образования карстовых провалов — от 0,01 до 0,05 случая на 1 км^2 в год. Средний диаметр провалов возможен до 3 м, а глубина может доходить до 10 м.

Расчетная схема сооружения представлена в виде пространственной стержневой модели, при моделировании которой использованы стержневые и плитные конечные элементы строительных конструкций здания, соединенные между собой шарнирно либо с помощью жесткой заделки *(рис. 1).*

Пространственная жесткость каркаса обеспечивается созданием рам, жестко сопряженных с фундаментами, а также системой горизонтальных, вертикальных связей и распорок в продольном направлении. Фундаменты запроектированы с учетом особенностей инженерно-геологических условий и конструктивной схемы данной модели. Под колоннами выполнен плитный монолитный железобетонный фундамент с плитой толщиной 600 мм из бетона В30, W8, F150. Расчет на образование провала грунтовых масс диаметром 3 м в осях 5/Д проводили методом конечных элементов.

Насыпной грунт, неоднородный по составу и плотности сло-

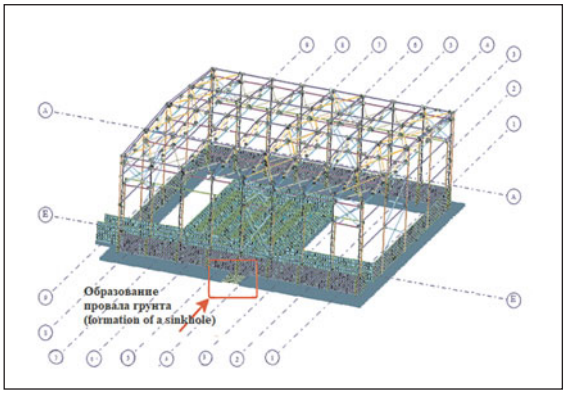

Рис. 1. ***Расчетная схема, смоделированная с учетом образования карстовой воронки***

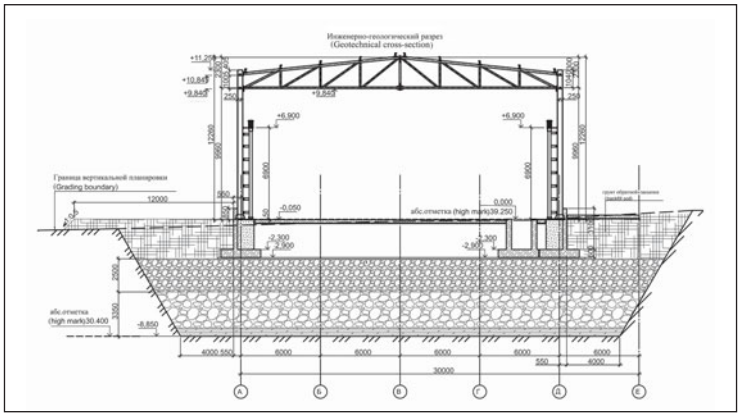

Рис. 2. ***Инженерно-геологический разрез***

жения, распространен по всей территории площадки (ГОСТ 25100, ГОСТ 20522). Расчетное сопротивление грунта основания R под фундаментами здания механической очистки принято по наиболее неблагоприятному месту:

$$R = \frac{\gamma_{c1}\gamma_{c2}}{k}[M_\gamma k_z b\gamma_{II} + M_q d_1\gamma'_{II} + (M_q - 1)d_b\gamma'_{II} + M_c C_{II}] = 392{,}266 \text{ кПа},$$

где γ_{c1}, γ_{c2} — коэффициенты условий работы; k — коэффициент, который характеризует прочность грунта и определяется при непосредственных испытаниях, $k = 1$; M_γ, M_q, M_c — коэффициенты, принимаемые согласно нормативам с учетом угла внутреннего трения грунта; k_z — коэффициент, равный $k_z = (z_0/b) + 0{,}2$ при $b > 10$ м; b — ширина подошвы фундамента, м; γ_{II} и γ'_{II} — осредненное расчетное значение удельного веса грунтов, залегающих соответственно ниже и выше подошвы фундамента, кН/м; C_{II} — удельное сцепление грунта, залегающего под подошвой фундамента, кПа; d_1 — глубина заложения фундаментов, при плитных фундаментах принимают наименьшую глубину от подошвы плиты до уровня планировки, м; d_b — глубина подвала, расстояние от уровня планировки до пола подвала, м.

В качестве мероприятий по предотвращению обрушения конструкции при образовании карстовой воронки в расчете учитывалось перераспределение усилий под фундаментной плитой в случае исключения из работы части ее поверхности.

Расчет плитного фундамента на закарстованной территории выполняли на карстовые деформации по типу «провал» в осях 5/Д. За расчетный параметр карстовой деформации принимали диаметр карстового провала 3 м *(см. рис. 1)*. Моделирование карстового провала под фундаментом выполняли путем обнуления коэффициентов постели над образовавшимся провалом, за границами провала его принимали равным коэффициенту до образования провала.

Результаты исследования

При возможном образовании карстовой воронки диаметром до 3 м неблагоприятное воздействие на объект капитального строительства компенсируется конструктивными мероприятиями в виде устройства монолитных плит железобетонного фундамента. Расчеты показали устойчивость формы конструктивной схемы здания, определили перемещения верха здания с учетом крена фундамента, а также усилия в несущих элементах каркаса. Процесс самоуплотнения грунтов, на которых расположено здание, не завершился. Использовать насыпные грунты в качестве естественного основания конструкции не рекомендуется.

В ходе бурения грунтов под здание на глубинах 4—5,1 м в дресвяных грунтах, которые представляют собой известковый щебень на суглинистом и супесчаном наполнителе, были выявлены карстово-суффозионные провалы диаметром 0,1—0,4 м. Карстовые провалы обусловлены процессом выщелачивания, выноса мелких минеральных частиц и растворимых веществ водой, фильтрующейся в толще рыхлых пород. На момент разработки котлована до низа фундаментной плиты происходит вскрытие водоупорных слоев, что приводит к активации процессов и способствует образованию карстовых пустот. Следовательно, вскрытые грунты не могут служить основанием для опирания фундамента здания. Увеличение карстовых пустот прогнозируется в связи с замещением верхнего грунтового слоя на площадке застройки.

Для организации коренного опорного основания выбран метод замещения грунта с разработкой рыхлых пород до абсолютной отметки 30,4 м *(рис. 2)*.

Основание фундамента имеет следующий состав. Грунт основания с $K_{упл}$ = 0,95 представлен в виде серо-желтого известняка, прочный, плотный, слабопористый с кавернами. В подошве использовали: дресвяно-щебнистый грунт с суглинистым заполнением бурого цвета, песок средней крупности $K_{упл}$ = 0,95 (ГОСТ 8736), толщиной слоя

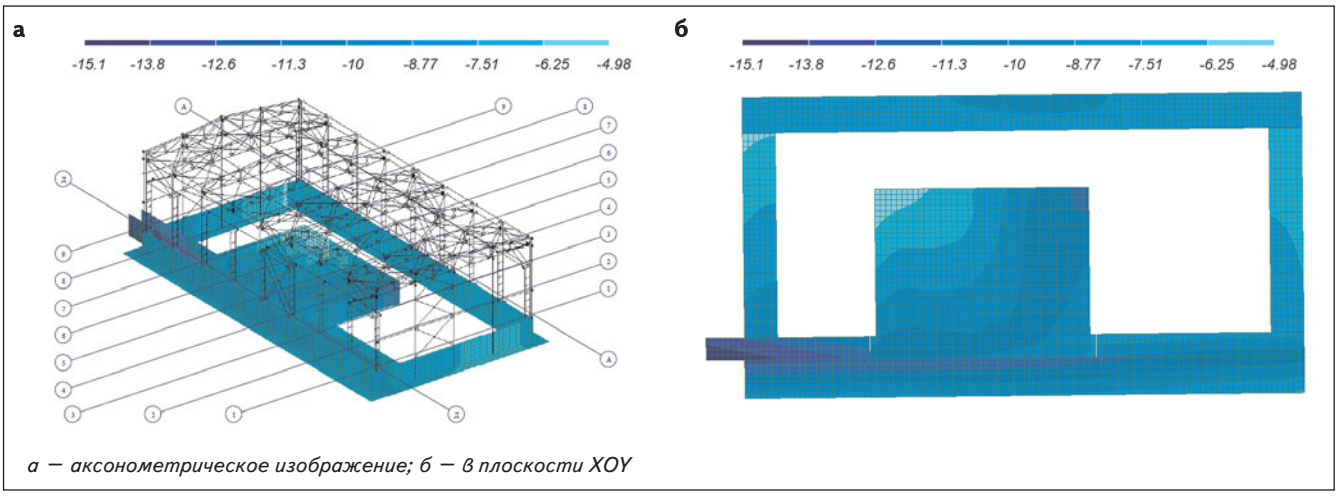

Рис. 3. ***Мозаика перемещений по Z(G) при нормальных условиях и отсутствии воронки***

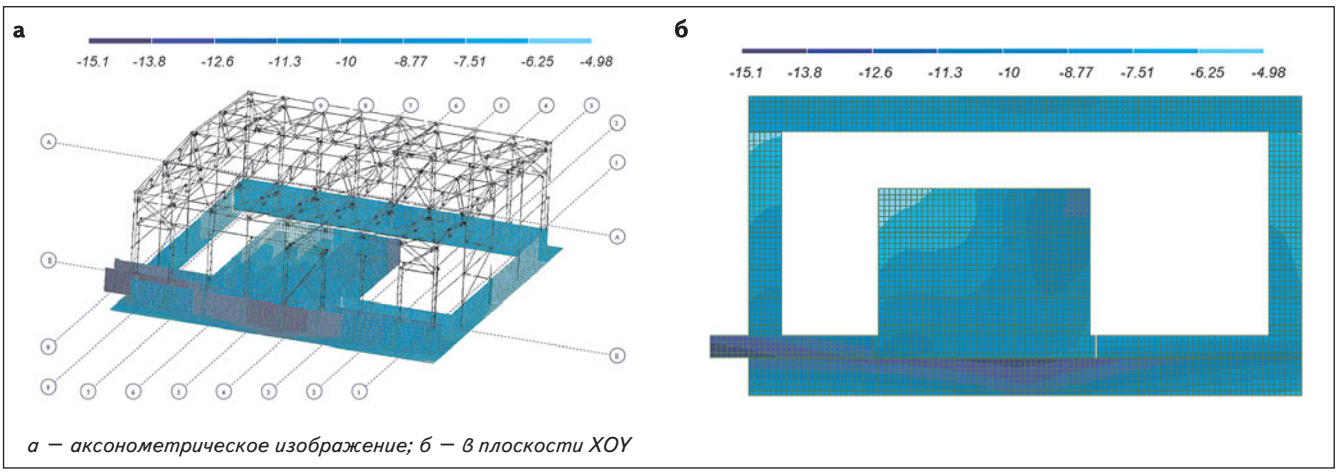

Рис. 4. ***Мозаика перемещений по Z(G) при условии образования воронки***

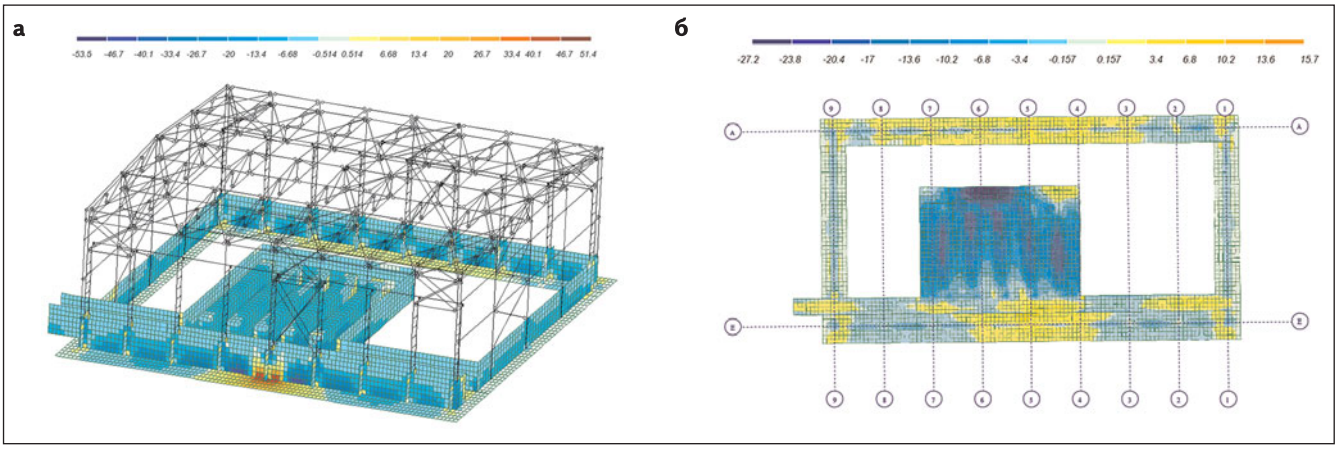

Рис. 5. ***Мозаика напряжений по N_y при нормальных условиях (а) и при образовании воронки (б)***

h = 0,3 м, геомембрану HDPE 1,5 мм, два слоя геотекстиля 300 г/м^2, щебень М600 F150 (ГОСТ 8267), клинец М600 F150 фракции 5–20, послойно уплотненный толщиной 0,3 м, а также подготовку из бетона класса В7,5 толщиной 100 мм.

Сравним результаты расчета здания при нормальных условиях и при образовании карстовой воронки *(рис. 3, 4).*

2. Результаты расчета

Параметры	При нормальных условиях	При образовании воронки
Перемещения по $Z(G)$ в месте образования провала грунтовых масс, мм	−10	−15,1
Напряжения по N_y, кПа	−266,74	504,062

При нормальных условиях и отсутствии карстовой воронки в осях 5/Д возникают перемещения по оси Z, не превышающие –10 мм *(см. рис. 3)*. На участке, где был смоделирован карстовый провал, возникают перемещения по оси Z, не более −15,1 мм *(см. рис. 4)*. В этом случае плита, обладая высокой распределительной способностью, обеспечивает нормальную работу фундамента в условиях неравномерных деформаций основания.

На участке смоделированного образования провала возникают самые большие растягивающие напряжения N_y, максимальное значение − 504,06 кПа *(рис. 5б)*. Однако при нормальных условиях работы конструкции максимальное значение напряжения составляет −266,74 кПа *(рис. 5а)*, что по модулю в 1,9 раза меньше напряжений при работе конструкции в условиях образования воронки.

Результаты расчета изменяющихся параметров рассматриваемого здания в нормальных условиях и при образовании карстовой воронки, в которых отмечены перемещения по $Z(G)$ и напряжения по N_y, приведены в *табл. 2*.

Мозаика напряжений Rz (давления на грунт) при образовании воронки показана на *рис. 6*. При образовании провала в месте его расположения контакта фундамента с основанием не происходит. Как видно из расчета, максимальное значение давления на грунт составляет 212,804 кПа.

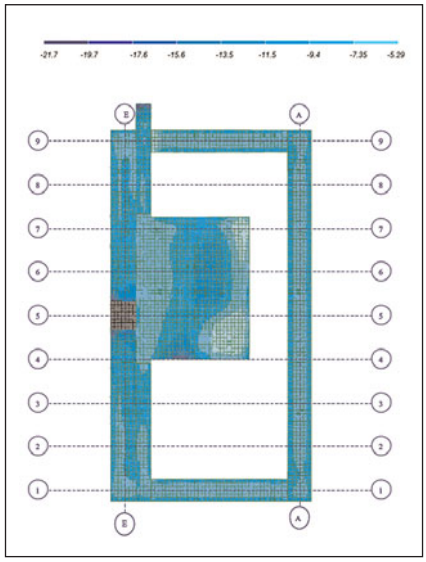

Рис. 6. ***Мозаика напряжений R_z при условии образования воронки***

Выводы

Выполненный расчет конструкции на аварийную ситуацию в условиях образования провала грунтовых масс под фундаментом диаметром 3 м и глубиной 10 м позволяет установить следующее.

1. Монолитные железобетонные конструкции фундамента способны воспринимать все действующие на них нагрузки и обеспечить безопасную эксплуатацию рассматриваемого сооружения.

2. При нормальной работе объекта перемещений, больше исходных, не происходит в результате перераспределения усилий, обрушения конструкций в данной ситуации также не возникает.

3. Максимальное давление под фундаментной плитой составляет 212,804 кПа, что не превышает расчетного сопротивления грунта $R = 392{,}266$ кПа.

4. Плитный монолитный железобетонный фундамент способен компенсировать неблагоприятное воздействие при возможном образовании карстово-суффозионных провалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Shi Y., F., R., H. Characterization of the sinkhole failure mechanism induced by concealed cave: a case study [Характеристика механизма разрушения карстовой воронки, вызванного скрытой полостью]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, vol. 119. doi:10.1016/j.engfailanal.2020.105017
2. Gutiérrez F., Benito-Calvo A., Carbonel D. et al. Review on sinkhole monitoring and performance of remediation measures by high-precision leveling and terrestrial laser scanner in the salt karst of the Ebro Valley, Spain [Мониторинг карстовых провалов и выполнения восстановительных мероприятий с помощью высокоточного нивелирования и наземного лазерного сканера в соляном карсте долины Эбро, Испания]. *Engineering Geology*, 2019, vol. 248, pp. 283–308. doi: 10.1016/j.enggeo.2018.12.004
3. Xu J., He J., Zhang L. Collapse prediction of karst sinkhole via distributed Brillouin optical fiber sensor [Прогнозирование обрушения карстовой воронки с помощью распределенного волоконно-оптического датчика Бриллюэна]. *Measurement*, 2017, vol. 100, pp. 68–71. doi: 10.1016/j.measurement.2016.12.046
4. Sevil J., Gutiérrez F., Carnicer C. et al. Characterizing and monitoring a high-risk sinkhole in an urban area underlain by salt through non-invasive methods: Detailed mapping, high-precision leveling and GPR [Характеристика и мониторинг карстовой ямы высокого риска в городской местности, залегающей под слоем соли, с помощью неинвазивных методов: детального картирования, высокоточного нивелирования и георадара]. *Engineering Geology*, 2020, vol. 272. doi: 10.1016/j.enggeo.2017.10.009

5. Lazorenko G., Kasprzhitskii A., Khakiev Z., Yavna V. Dynamic behavior and stability of soil foundation in heavy haul railway tracks: a review [Динамическое поведение и устойчивость грунтового основания на железнодорожных путях большой протяженности: обзор]. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 205, pp. 111–136. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.184
6. Elbaz K., Shen S., Tan Y., Cheng W. Investigation into performance of deep excavation in sand covered karst: a case report [Расследование проведения глубоких земляных работ в карсте, покрытом песком: отчет о конкретном случае]. *Soils and Foundations*, 2018, vol. 58(4), pp. 1042–1058. doi: 10.1016/j.sandf.2018.03.012
7. Nam B., Shamet R. A preliminary sinkhole raveling chart [Предварительная схема перемещения карстовой воронки]. *Engineering Geology*, 2020, vol. 268. doi: 10.1016/j.enggeo.2020.105513
8. Santolo A., Forte G., Santo A. Analysis of sinkhole triggering mechanisms in the hinterland of Naples (southern Italy) [Анализ механизмов, запускающих карстовые воронки во районах Неаполя (южная Италия)]. *Engineering Geology*, 2018, vol. 237, pp. 42–45. doi: 10.1016/j.enggeo.2018.02.014
9. Sevil J., Gutiérrez F., Zarroca M. et al. Sinkhole investigation in an urban area by trenching in combination with GPR, ERT and high-precision leveling. Mantled evaporite karst of Zaragoza city, NE Spain [Исследование провалов в городской местности путем рытья траншей в сочетании с георадаром, ERT и высокоточным выравниванием. Покрытый эвапоритовым карстом город Сарагоса, Северо-Восточная Испания]. *Engineering Geology*, 2017, vol. 231, pp. 9–20. doi: 10.1016/j.enggeo.2017.10.009
10. Tamalavage A., Hengstum P., Louchouarn P. et al. Organic matter sources and lateral sedimentation in a Bahamian karst basin (sinkhole) over the late Holocene: Influence of local vegetation and climate [Источники органического вещества и латеральное осаждение в Багамском карстовом бассейне (воронке) в позднем голоцене: влияние местной растительности и климата]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, vol. 506, pp. 70–83. doi: 10.1016/j.palaeo.2018.06.014
11. Santo A., Santangelo N., Falco M. et al. Cover collapse sinkhole over a deep buried carbonate bedrock: the case study of Fossa San Vito (Sarno Southern Italy) [Провал обвала покрытия над глубоко погребенной карбонатной породой: тематическое исследование Фосса Сан-Вито (Сарно, Южная Италия)]. *Geomorphology*, 2019, vol. 345. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.106838
12. Pul S., Senturk M., Ilki A., Hajirasouliha I. Experimental and numerical investigation of a proposed monolithic-like precast concrete column-foundation connection [Экспериментальное и численное исследование предлагаемого монолитного соединения «колонна–фундамент из железобетона»]. *Engineering Structures*, 2021, vol. 246. doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113090
13. Liu T., Xie Y., Feng Z. et al. Better understanding the failure modes of tunnels excavated in the boulder-cobble mixed strata by distinct element method [Лучшее понимание режимов разрушения туннелей, вырытых в смешанных слоях валуна и булыжника методом отдельных элементов]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, vol. 116. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104712
14. Schwendel A. C., Cooper A. H. Meander chute cutoff at an alluvial river facilitated by gypsum sinkholes [Перекрытие извилистого желоба в аллювиальной реке, чему способствуют гипсовые воронки]. *Geomorphology*, 2021, vol. 393. doi: 10.1016/j.geomorph.2021.107944
15. Shamet R., Hyun Nam B. Geotechnical Investigation of karst sinkholes using an empirically-based CPT raveling chart [Геотехническое исследование карстовых провалов с использованием эмпирической карты перемещения CP]. *Transportation Geotechnics*, 2021, vol. 31. doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100648
16. Fabregat I., Gutiérrez F., Roqué C. et al. Subsidence mechanisms and sedimentation in alluvial sinkholes inferred from trenching and ground penetrating radar (GPR). Implications for subsidence and flooding hazard assessment [Механизмы оседания и осаждения в аллювиальных воронках, полученные с помощью траншейного и проникающих радаров (георадар). Последствия для оценки опасности проседания грунта и затопления]. *Quaternary International*, 2019, vol. 525, pp. 1–15. doi: 10.1016/j.quaint.2019.09.008
17. Egereva E., Barmenkov A., Barmenkova A., Tsoroev A. Evaluation of possibility of using crane-beams with increased load capacity in the existing industrial building [Оценка возможности использования кран-балок с повышенной грузоподъемностью в существующем промышленном здании]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 918. doi: 10.1088/1757-899X/918/1/012021
18. Romanov D., Kaufmann G., Al-Halbouni D. Basic processes and factors determining the evolution of collapse sinkholes – a sensitivity study [Основные процессы и факторы, определяющие развитие обвальных воронок]. *Engineering Geology*, 2020, vol. 270. doi: 10.1016/j.enggeo.2020.105589
19. Parise M. Sinkholes, subsidence and related mass movements [Провалы, оседание грунта и связанные с этим массовые перемещения]. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 2020, vol. 11. doi: 10.1016/j.proeps.2015.06.009
20. Gökkaya E., Gutiérrez F., Ferk M., Görüm T. Sinkhole development in the Sivas gypsum karst, Turkey [Развитие воронки в гипсовом карсте Сивас, Турция]. *Geomorphology*, 2021, vol. 386. doi: 10.1016/j.geomorph.2021.107746