

Исследование влияния карстовых процессов на напряженно-деформированное состояние каркаса здания

УДК 624.04

Кравченко Галина Михайловна

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: galina.907@mail.ru

Труфанова Елена Васильевна

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: el.trufanova@mail.ru

Матвейкин Артем Михайлович

Магистрант, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (г. Ростов-на-Дону); e-mail: matwei.a@mail.ru

Статья получена: 13.10.2018. Рассмотрена: 19.10.2018. Одобрена: 21.10.2018. Опубликована онлайн: 26.12.2018. ©РИОР

Аннотация. В статье рассмотрены природные условия возникновения карста, факторы его развития и влияние данного геологического процесса на напряженно-деформированное состояние каркаса здания. В программном комплексе SCAD разработаны 10 вариантов моделей каркасно-монолитного многоэтажного здания, учитывающие варьирование локализации карста. Учет влияния карстовых процессов на напряженно-деформированное состояние каркаса здания позволило рассчитать перемещения фундаментной плиты в зависимости от расположения воронки, выявить наибольшие перемещения и подобрать армирование, обеспечивающее необходимую прочность каркаса здания при любом неблагоприятном карстовом процессе.

Ключевые слова: карстовые провалы, напряженно-деформированное состояние, конеч-

но-элементная модель, метод конечных элементов, каркас здания, вариация моделей.

Карстовый процесс является функцией нескольких основных условий, включающих наличие растворимых водопроницаемых карбонатных и сульфатных пород, а также движущихся подземных вод, агрессивных к этим породам. Эти условия зависят от ряда факторов, определяющих питание карстовых вод, их движение и разгрузку, и, в конечном итоге, активность и скорость развития карстового процесса. К первой группе факторов относят климатические (атмосферные осадки, их состав, дефицит влажности воздуха, испарение, конденсация и др.), ко второй — геологическое строение и геоморфологические условия (состав пород, их трещиноватость и пр.), рельеф,

STUDY OF THE INFLUENCE OF KARST PROCESSES ON STRESS-STRAIN STATE OF THE BUILDING FRAME

Kravchenko Galina

Candidate of Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: galina.907@mail.ru

Trufanova Elena

Candidate of Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: el.trufanova@mail.ru

Matveykin Artem

Master student, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: matwei.a@mail.ru

Manuscript received: 13.10.2018. **Revised:** 19.10.2018. **Accepted:** 21.10.2018. **Published online:** 26.12.2018. ©RIOR

Abstract. The article deals with the natural conditions of the karst, the factors of its development and the impact of this geological process on the stress-strain state of the building frame. In the software complex SCAD developed 10 versions of models of frame-monolithic multi-storey building, taking into account the variation of karst localization. Taking into account the influence of karst processes on the stress-strain state of the frame of the building allowed to calculate the movement of the base plate, depending on the location of the funnel, to identify the greatest movement and choose the reinforcement that provides the necessary strength of the frame of the building in any adverse karst process.

Keywords: karst dips, stress-strain state, finite element model, finite element method, building frame, model variation.

степень его расчлененности, и к третьей группе — гидрогеологические условия (химический состав, динамика и режим подземных вод) [1; 2].

Карстовые провалы сопровождаются внезапным обрушением толщи грунта. Диаметры воронок могут достигать нескольких десятков метров. Поэтому данное явление представляет наибольшую опасность для большинства зданий и сооружений [3].

На территории России достаточно много областей, подверженных карстовым процессам, интенсивность которых постоянно возрастает. Поэтому вопрос проектирования и исследования напряженно-деформированного состояния элементов каркаса с учетом образования карстовых провалов является актуальным.

Целью работы является выявление наибольших деформаций, оптимального армирования фундаментной плиты, колонн и диафрагм жесткости каркаса здания с учетом многовариантного образования карстовых воронок в основании.

Для проведения исследования влияния карстовых процессов на напряженно-деформированное состояние каркасно-монолитного здания разработаны модели в программном комплексе SCAD без учета и с учетом образования карстовых воронок. Конечно-элементная модель по плитно-стержневой схеме представлена на рис. 1.

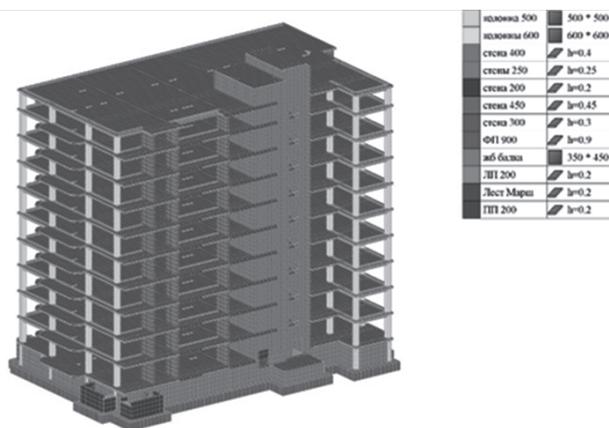


Рис. 1. Конечно-элементная модель каркаса здания

При создании диафрагм жесткости и плит перекрытий использовались трех узловые оболочечные конечные элементы с 18 степенями свободы и четырех узловые оболочечные ко-

нечные элементы с 24 степенями свободы; для колонн — пространственные стержни с 12 степенями свободы [4; 5].

Сопряжение балок и плит перекрытий выполнено при помощи абсолютно жестких вставок. Оси балок сбиты относительно осей плит перекрытия на величину эксцентриситета, равного полуразности высоты балки и толщины плиты перекрытия.

Материал конструктивных элементов — бетон класса В25 плотностью $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$ с модулем упругости $E = 30\,000 \text{ МПа}$ и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,2$. Используемые типы жесткостей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Жесткости конструктивных элементов расчетной схемы

№	Название	Сечение
1	Колонны 500	$\varnothing 500 \times 500 \text{ мм}$
2	Колонны 600	$\varnothing 600 \times 600 \text{ мм}$
3	ФП 900	$t = 900 \text{ мм}$
4	ПП 200	$t = 200 \text{ мм}$
5	ДЖ_200	$t = 200 \text{ мм}$
6	ДЖ_250	$t = 250 \text{ мм}$
7	ДЖ_300	$t = 300 \text{ мм}$
8	ДЖ_400	$t = 400 \text{ мм}$
9	ДЖ_450	$t = 450 \text{ мм}$
10	ЛП_200	$t = 200 \text{ мм}$
11	ЛМ_150	$t = 150 \text{ мм}$
12	ЖБ балка	$\varnothing 350 \times 450 \text{ мм}$

Естественное основание соответствует модели Винклера с коэффициентом постели 245 т/м^3 [6; 7]. Для проведения численного эксперимента по влиянию локализации карстовой воронки на базе полученной конечно-элементной модели разработана модель с образованием карстового процесса путем удаления коэффициента постели из заданной области основания.

План многоэтажного здания имеет нессиметричную форму, поэтому локализация карста предполагалась в угловых точках здания, по центру периметра и под наиболее нагруженными колоннами (рис. 2).

В режиме «Вариация моделей» выполнен анализ напряженно-деформированного состояния элементов каркаса.

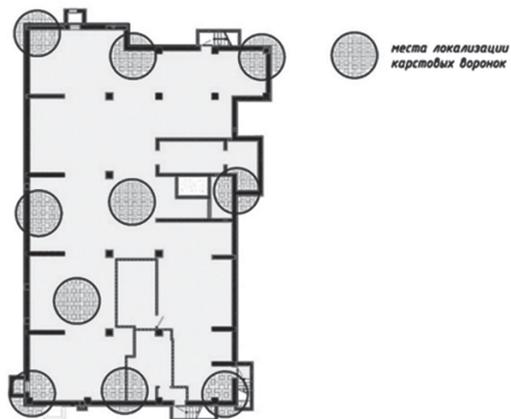


Рис. 2. Места локализации карстовых воронок

Наибольший разброс перемещений определен по оси *Y* и составляет около 69%, при этом максимальные перемещения не превышают предельного значения. Максимальные горизонтальные перемещения каркаса без воронок по направлению *Y* составляют 4,77 мм (рис. 3, *a*), с карстовой воронкой в правом нижнем углу — 15,45 мм (рис. 3, *б*).

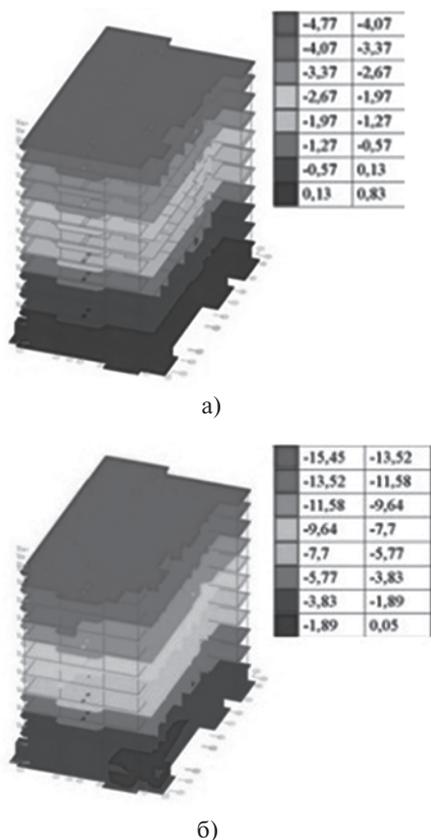


Рис. 3. а) перемещения по оси *Y* расчетной схемы без карстовых воронок; б) перемещения по оси *Y* расчетной схемы с воронкой в правом нижнем углу

Анализ вертикальных перемещений показал, что в случае без карстовых провалов изополя перемещений соответствуют крену здания в поперечном направлении. Максимальные перемещения в схемах с воронками обнаружены с карстовым провалом в левом верхнем углу и составляют 128 мм (рис. 4, *a*), что на 26% больше перемещений в схеме без воронок (рис. 4, *б*) [8].

Относительная разница осадок без карстовых воронок составляет 0,0011, а с карстовыми воронками 0,0029. При этом максимальное предельно допустимое значение 0,003.

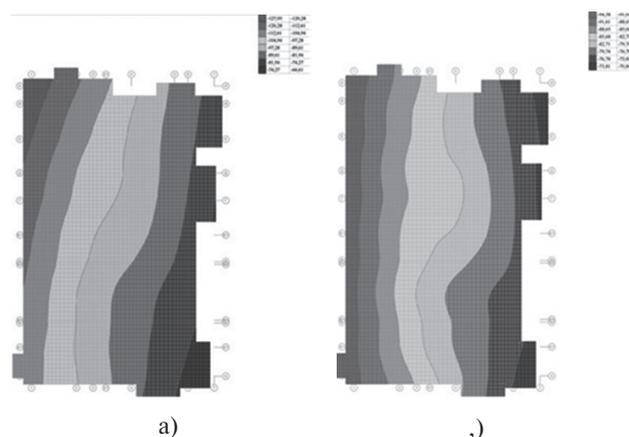


Рис. 4. а) вертикальные перемещения фундаментной плиты с воронкой в левом верхнем углу; б) вертикальные перемещения фундаментной плиты без воронок

Результаты армирования фундаментной плиты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение интенсивности армирования фундаментной плиты

Интенсивность армирования	Исходная схема	Вариация моделей
интенсивность S1 (площадь нижнего армирования по оси <i>X</i>) см ²	45,42	49,69
интенсивность S2 (площадь верхнего армирования по оси <i>X</i>) см ²	25,92	30,45
интенсивность S3 (площадь нижнего армирования по оси <i>Y</i>) см ²	43,83	49,21
интенсивность S4 (площадь верхнего армирования по оси <i>Y</i>) см ²	29,49	35,3

Интенсивность армирования в режиме «вариация моделей» увеличилась в среднем на 12,5%.

Результаты армирования колонн подвала здания представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение интенсивности армирования колонн подвала здания

Интенсивность армирования	Исходная схема	Вариация моделей
интенсивность S1 (площадь верхнего армирования) см ²	12,33	18,4
интенсивность S2 (площадь нижнего армирования) см ²	12,85	18,65
интенсивность S3 (площадь бокового армирования) см ²	10,32	16,75
интенсивность S4 (площадь бокового армирования) см ²	10,32	16,75

На рис. 5 представлено распределение армирования для колонн в осях 4/Б, 4/В, 3/В, 3/Г. Максимальное различие армирования составляет 38%.

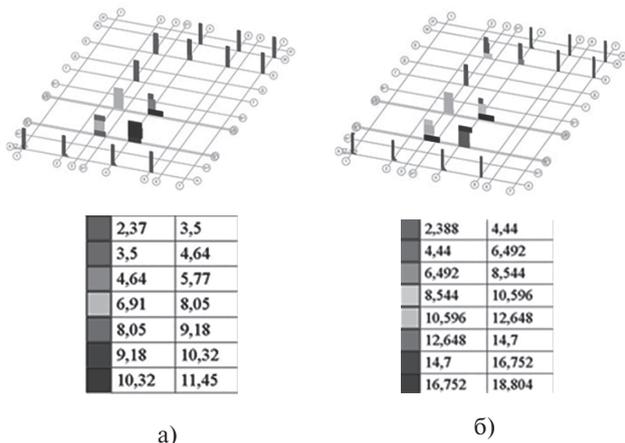


Рис. 5. а) интенсивность армирования S3, S4 колонн подвала для схемы без воронок; б) интенсивность армирования S3, S4 колонн подвала для схемы с карстовыми провалами

Результаты распределения арматуры в диафрагмах жесткости и стенах подвального этажа представлены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнение интенсивности армирования диафрагмы жесткости

Интенсивность армирования	Исходная схема	Вариация моделей
интенсивность S1 (площадь нижнего армирования по оси X) см ²	45,72	54,8
интенсивность S2 (площадь верхнего армирования по оси X) см ²	41,28	51,33
интенсивность S3 (площадь нижнего армирования по оси Y) см ²	22,02	47,71
интенсивность S4 (площадь верхнего армирования по оси Y) см ²	16,72	48,07

Интенсивность армирования диафрагм жесткости и стен подвала представлена на рис. 6, а, б. Наибольший разброс армирования составил 65,9%.

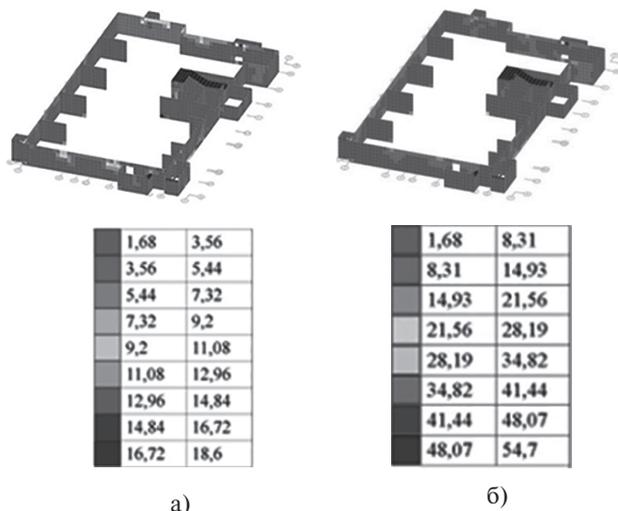


Рис. 6. Интенсивность армирования S4 (площадь верхнего армирования) диафрагм жесткости и стен подвала для схемы: а) без воронок; б) с карстовыми воронками

Анализ полученных результатов показал, что образование карстовой воронки под фундаментной плитой здания приводит к увеличению вертикальных и горизонтальных перемещений.

При сравнении результатов армирования диафрагм жесткости и стен подвального этажа, проведенных на базе обобщенных расчетных сочетаний усилий, выявлено, что при образовании карста увеличились зоны максимального армирования и площадь требуемого армирования на 65%.

Площадь требуемого армирования колонн в пределах подвального этажа при возникновении карстового провала в основном увеличилась минимум на 25%, в наиболее нагруженных колоннах на 60%.

Исследование влияния карстовых процессов на напряженно-деформированное состояние каркаса здания позволило сравнить перемещения фундаментной плиты в зависимости от расположения воронки, выявить наибольшие перемещения и подобрать такое армирование, которое обеспечит необходимую прочность каркаса здания при любом неблагоприятном карстовом процессе.

Литература

1. Дублянский В.Н. Распространение карстующих пород на земном шаре [Текст] / В.Н. Дублянский, Г.Н. Дублянская, Н.Л. Мясоедова // Сергеевские чтения. Вып. 6. Инж. геология и охрана геол. среды. Современное состояние и перспективы развития. — М.: ГЕОС, 2004. — С. 130–135.
2. Сорочан Е. Анализ аварий сооружений на закарстованных территориях [Текст] / Е. Сорочан // Российская геотехника — шаг в XXI век. — 2007. — № 2. — С. 154.
3. Толмачев В.В. Оценка карстовых рисков как один из принципов устойчивого развития карстовых регионов [Текст] / В.В. Толмачев // Труды конгресса Международного научно-промышленного форума «Великие реки-2013». — Т. 1. — Нижний Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2014. — С. 96–99.
4. Кравченко Г.М. Исследование напряженно-деформированного состояния каркаса здания с учетом совместной работы системы «здание — основание — грунт» [Текст] / Г.М. Кравченко, Н.А. Савельева, Э.Р. Шарипов // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Концепция динамического равновесия в новых технологиях». — 2017. — С. 42–45.
5. Кравченко Г.М. Определение напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты по различным моделям основания [Текст] / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, В.Н. Колтырина // Научные основы современного прогресса: Сборник статей международной научно-практической конференции: В 2 ч. — 2017. — С. 50–54.
6. Кравченко Г.М. Исследование неравномерной осадки основания спортивно-оздоровительного комплекса Технопарка РГСУ методом конечных элементов [Текст] / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, В.А. Думбай, Ю.А. Камеш // Инженерный вестник Дона. — 2016. — № 1. — С. 42.
7. Кравченко Г.М. Влияние модели основания грунта на напряженно-деформированное состояние фундаментной плиты [Текст] / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, Т.Р. Кубашов // В сборнике «Строительство-2015: современные проблемы строительства»: материалы международной научно-практической конференции. Ростовский государственный строительный университет, Союз строителей Южного Федерального округа, Ассоциация строителей Дона. — 2015. — С. 481–483.
8. Кравченко Г.М. Расчет здания общежития Технопарка Ростовского государственного строительного университета (РГСУ) с применением различных моделей основания [Текст] / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, Д.И. Назаренко, Э.Р. Шарипов // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 3. — С. 112.

References

1. Dublyanskiy V.N., Dublyanskaya G.N., Myasoedova N.L. Rasprostraneniye karstuyushchikh porod na zemnom share [Distribution of karsting rocks on the globe]. *Sergeevskie chteniya. Inzhenernaya geologiya i okhrana geol. sredy. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya* [Sergeyev readings. Issue 6. Ing. geology and security geol. environment. The current state and development prospects]. Moscow, GEOS Publ., 2004, pp. 130–135.
2. Sorochan E. Analiz avariyy sooruzheniy na zakarstovannykh territoriyakh [Analysis of accidents of structures in karst areas]. *Rossiyskaya geotekhnika — shag v 21 vek* [Russian geotechnics — a step into the 21st century]. 2007, I. 2, p. 154.
3. Tolmachev V.V. Otsenka karstovyykh riskov kak odin iz printsiptov ustoychivogo razvitiya karstovyykh regionov [Karst risk assessment as one of the principles of sustainable development of karst regions]. *Trudy kongressa Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki-2013»* [Proceedings of the congress of the International Scientific and Industrial Forum “Great Rivers 2013”]. NNGASU Publ., Nizhniy Novgorod, V. 1, 2014, pp. 96–99.
4. Kravchenko G.M., Savel'eva N.A., Sharipov E.R. Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya karkasa zdaniya s uchetom sovmestnoy raboty sistemy «zdaniye — osnovaniye — grunt» [Study of the stressfully — deformed state of the building frame taking into account the joint work of the system “building — foundation — ground”]. *Sbornik statey po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Konseptsiya dinamicheskogo ravnovesiya v novykh tekhnologiyakh»* [Collection of articles on the materials of the international scientific-practical conference “Concept of dynamic equilibrium in new technologies”]. 2017, pp. 42–45.
5. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Koltyrina V.N. Opredeleniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya fundamentnoy plity po razlichnym modelyam osnovaniya [The definition of the stress — strain state of the base plate according to different models of the foundation]. *Nauchnye osnovy sovremennoy progressa; sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Scientific Foundations of Modern Progress; collection of articles of the International Scientific and Practical Conference]. 2017, pp. 50–54.
6. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Dumbay V.A., Kamesh Yu.A. Issledovaniye neravnomernoy osadki osnovaniya sportivno-ozdorovitel'nogo kompleksa Tekhnoparka RGSU metodom konechnykh elementov [Investigation of the uneven precipitation of the foundation of the sports complex of Technopark RGSU by the finite element method]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2016, I. 1, p. 42.
7. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Kubashov T.R. Vliyanie modeli osnovaniya grunta na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye fundamentnoy plity [The influence of the soil foundation model on the stress-strain state of the base plate]. *V sbornike: «Stroitel'stvo-2015: sovremennyye problemy stroitel'stva»: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Rostovskiy gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet, Soyuz stroiteley Yuzhnogo Federal'nogo okruga, Assotsiatsiya stroiteley Dona* [In the collection: “Construction-2015: Modern Problems of Construction”: materials of the international scientific-practical conference. Rostov State University of Civil Engineering, Union of Builders of the Southern Federal District, Don Association of Builders]. 2015, pp. 481–483.
8. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Nazarenko D.I., Sharipov E.R. Raschet zdaniya obshchezhitiya Tekhnoparka Rostovskogo Gosudarstvennogo Stroitel'nogo Universiteta (RGSU) s primeneniem razlichnykh modeley osnovaniya [Calculation of the building of the hostel of Technopark of the Rostov State Construction University (RGSU) using different models of the base]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2015, I. 3, p. 112.