

УДК 624.04

**ИМИТАЦИОННОЕ 3D
МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРСТОВЫХ
ПРОЦЕССОВ***Кравченко Г. М., Матвейкин А. М.*

Донской государственной технической
университет, Ростов-на-Дону, Российская
Федерация

galina.907@mail.rumatwei.a@mail.ru

В статье рассматривается проблема карстовых процессов, меняющих рельеф площадки строительства. Актуальность исследования обусловлена необходимостью проектирования зданий и сооружений в сложных геологических условиях. Разработана конечноэлементная модель многоэтажного каркасно-монолитного здания по плитно-стержневой схеме. Выполнены численное 3D моделирование карстовых процессов и анализ напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты в определенном временном интервале. Имитация образования карстовых воронок соответствует пошаговому изменению физико-механических характеристик грунтового основания в 3D модели. Разработаны рекомендации по усилению грунтового основания в зоне образования карстовых воронок.

Ключевые слова: карст, карстовые провалы, напряженно-деформированное состояние фундаментной плиты, метод конечных элементов, имитационное моделирование.

Введение. В условиях современного строительства возникает необходимость проектирования фундаментов в сложных инженерно-геологических условиях. В случае, если речь идет о водопроницаемых карбонатных и сульфатных породах, следует учитывать влияние на строительство карстовых процессов, которые определяются движением карстовых вод [1]. Так, например, карстовые провалы обуславливают внезапное обрушение толщи грунта. Диаметры воронок могут достигать нескольких десятков метров, поэтому названное явление представляет опасность для большинства фундаментов зданий и сооружений [2, 3].

В основании фундаментов возникает сложное напряженно-деформированное состояние (НДС), обусловленное с одной стороны, площадью фундамента и нагрузкой, передающейся от здания или сооружения, с другой — особенностями процесса формирования массива в районе строительства. Грунт основания представляет собой неоднородную среду, в которой параметры, характеризующие его свойства, имеют различные значения в различных точках массива [4].

UDC 624.04

**SIMULATION 3D MODELLING OF
KARST PROCESSES***Kravchenko G.M., Matveykin A.M.*

Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russian Federation

galina.907@mail.rumatwei.a@mail.ru

The article deals with the problem of formation of karst processes changing the relief of the construction site. The relevance of the study is due to the need to design buildings and structures in complex geological conditions. A finite element model of a multi-storey frame-monolithic building according to the plate-rod scheme was developed. Numerical 3D modeling of karst processes and the analysis of the stress-strain state of the foundation slab in the time interval are performed. Simulation of the formation of sinkholes corresponds to a step-by-step change in the physical and mechanical characteristics of the soil base in the 3D model. Recommendations for strengthening the soil base in the zone of formation of sinkholes have been developed.

Keywords: karst, karst holes, stress-strain state of the foundation slab, finite element method, simulation modeling.

Количественная оценка осадки и несущей способности основания фундаментов представляет известную сложность при геомеханических и геотехнических расчетах (исключение — простые системы, отраженные в нормативных документах).

3D моделирование карстовых процессов. При передаче на грунт напряжений от сооружений большой площади в плане формируется сложное неоднородное НДС, которое сложно описать аналитическими методами. В работе применяется метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет учитывать сложную геометрическую форму плитного фундамента, неоднородность основания, нелинейную деформацию грунтов во времени при их взаимодействии с фундаментом. Используется программный комплекс (ПК) SCAD — современный инструмент для автоматизированного проектирования прочности и устойчивости конструкций, а также их численного исследования [5, 6].

Для математического моделирования НДС грунтов под подошвой фундамента с учетом образования карстовых воронок необходимо разработать геомеханическую модель массива грунта с учетом физико-механических характеристик залегающих слоев [7].

ПК SCAD оперирует плоскими и объемными конечными элементами, необходимыми для моделирования соответствующего объекта.

Объектом исследования является многоэтажное каркасно-монолитное здание с размерами фундаментной плиты в плане 46×16 м. Для создания математической модели в SCAD разработана конечноэлементная схема, которая представляет собой пространственную плитно-стержневую систему (рис. 1).

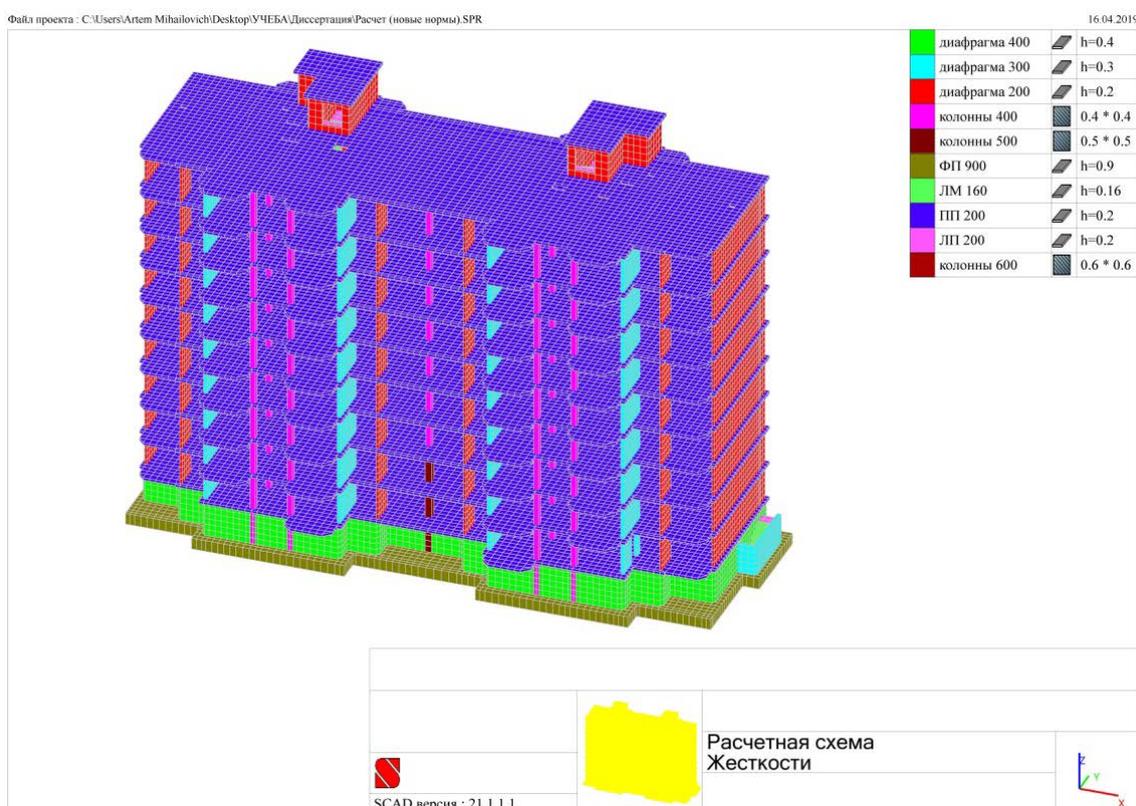


Рис. 1. Конечноэлементная модель каркаса здания

Материал конструктивных элементов — бетон класса В25 плотностью $\rho = 2,5 \text{ т/м}^3$ с модулем упругости $E = 30000 \text{ МПа}$ и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,2$. Сечения колонн — от 400×400 до 600×600 мм. Толщина диафрагм жесткости — от 200 до 400 мм. Толщина плит перекрытия — 200 мм. Толщина фундаментной плиты — 900 мм.

Моделирование грунта основания выполнено в SCAD по пространственной схеме с использованием объемных конечных элементов [8]. Физико-механические свойства грунта заданы на основе инженерно-геологических изысканий на площадке строительства. Распределенная нагрузка от верхнего строения приложена к плите фундамента. Общая площадь плиты здания $S_{об} = 711,32 \text{ м}^2$, давление на плиту — 202,44 кПа.

Результаты определения физико-механических свойств грунтов по инженерно-геологическому разрезу и слою инженерно-геологических элементов (ИГЭ) в различных скважинах представлены на рис. 2.

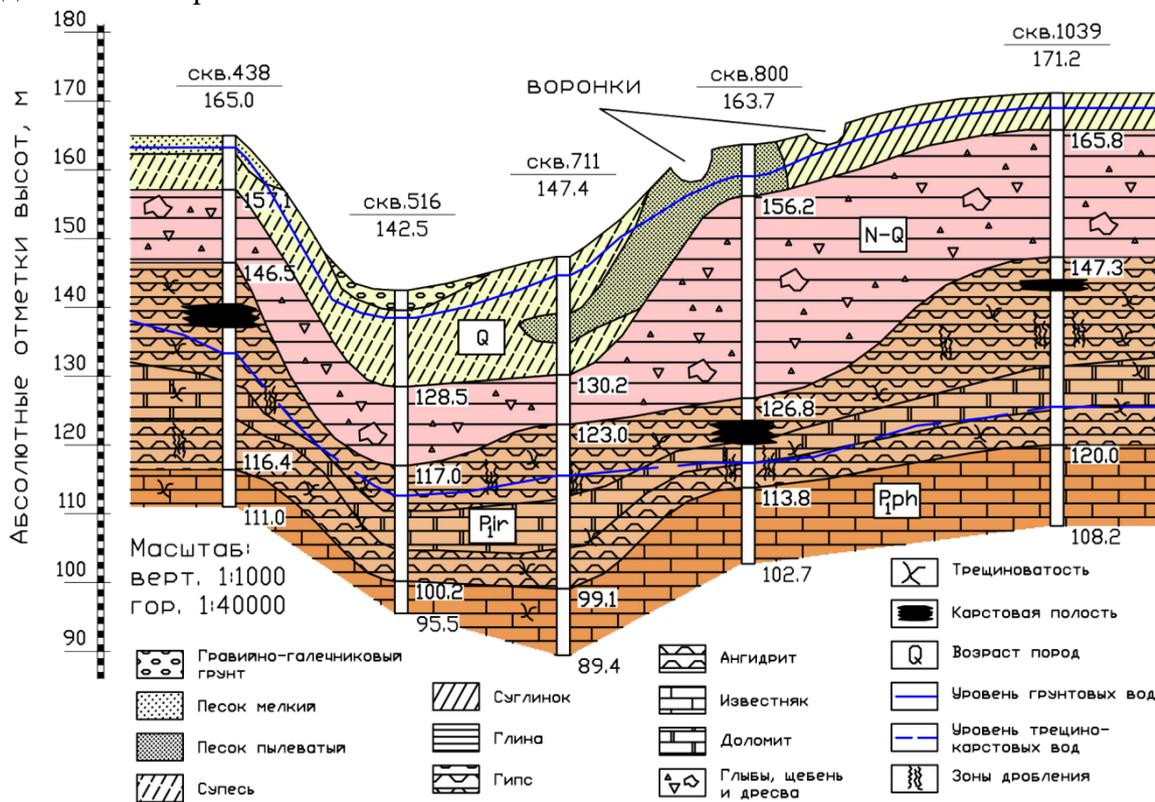


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез грунта основания

Характеристики грунтов в линейном состоянии представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики грунтов

ГЭ	Наименование	Объемный вес грунта, т/м ³	Модуль деформации E, т/м ²	Коэффициент Пуассона
	Песок мелкий плотный	1,9	2242	0,33
	Суглинок тугопластичный	1,94	1427	0,36
	Глина тугопластичная	1,82	2100	0,38
	Гипс	2,2	8155	0,27

В общем случае грунт является нелинейно деформируемым материалом, в котором зависимость между нагрузкой и осадкой площадки имеет криволинейное очертание. НДС грунта описывается сложной упругопластической моделью, в основе которой лежит понятие предела текучести, т. е. границы области упругого состояния, определяемой уровнем напряжений, достигаемых при повторном нагружении. В пространстве главных напряжений предел текучести формирует по-

верхность текучести. Уравнение поверхности текучести принимается в зависимости от критерия прочности [9].

При создании конечноэлементной модели фундаментной плиты и основания использовались изопараметрические объемные конечные элементы.

Грунтовые условия максимально приближены к реальным, поэтому каждый слой грунта имеет переменную толщину и физико-механические характеристики (рис. 3).

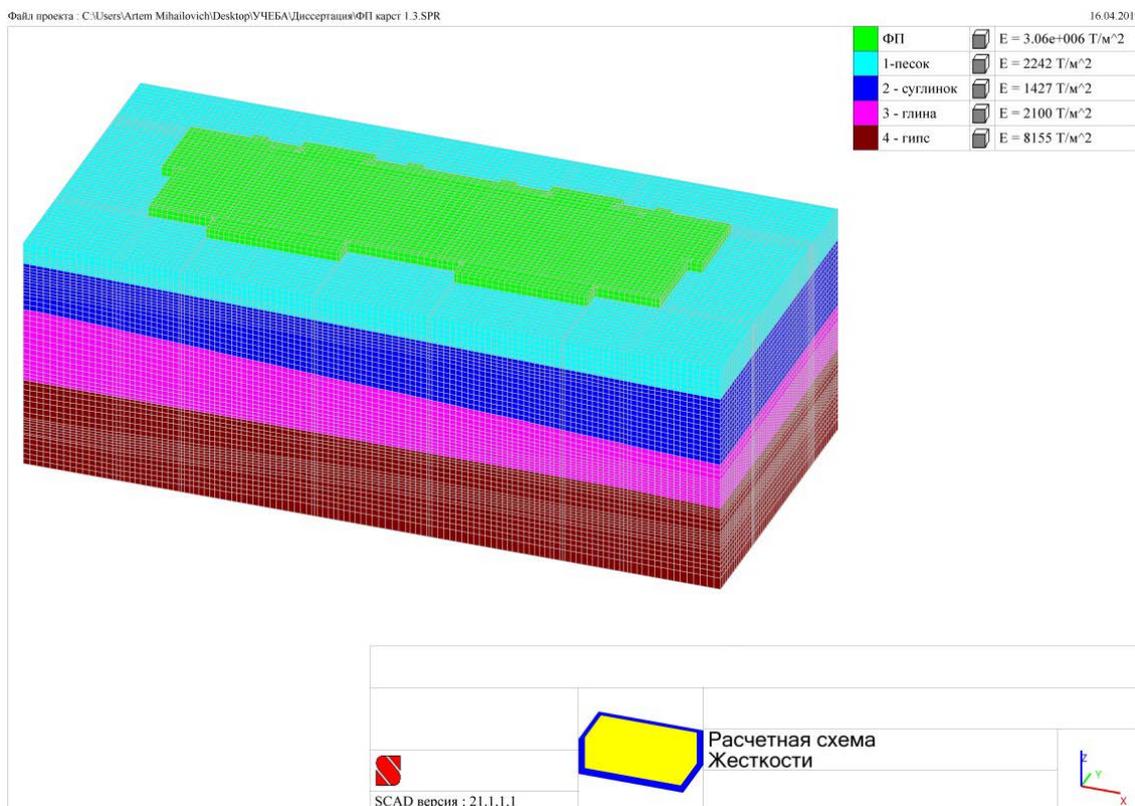


Рис. 3. Объемная модель фундаментной плиты и грунтового основания

При анализе результатов расчета без карстового провала основания выявлена вертикальная максимальная осадка фундаментной плиты 9,4 см, что не превышает максимально допустимый показатель 15 см. Изолинии перемещений сконцентрированы в центральной части плиты и уменьшаются к краевым точкам. Относительная разность осадок составила 0,0017, что не превышает максимально допустимого значения 0,003. Деформация фундаментной плиты — равномерная и симметричная (рис. 4).

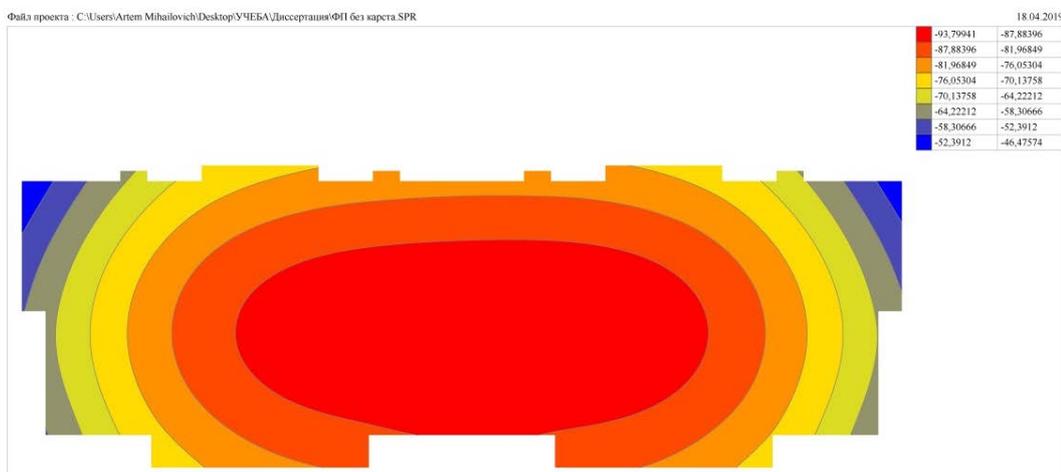


Рис. 4. Вертикальная осадка фундаментной плиты без карста

Карст представляет собой совокупность геологических процессов, обусловленных растворением горных пород, в результате которых происходит образование полостей, трещин и провалов, поэтому имитация образования карстовых воронок соответствует пошаговому изменению физико-механических характеристик грунтового основания в 3D модели (рис. 5).

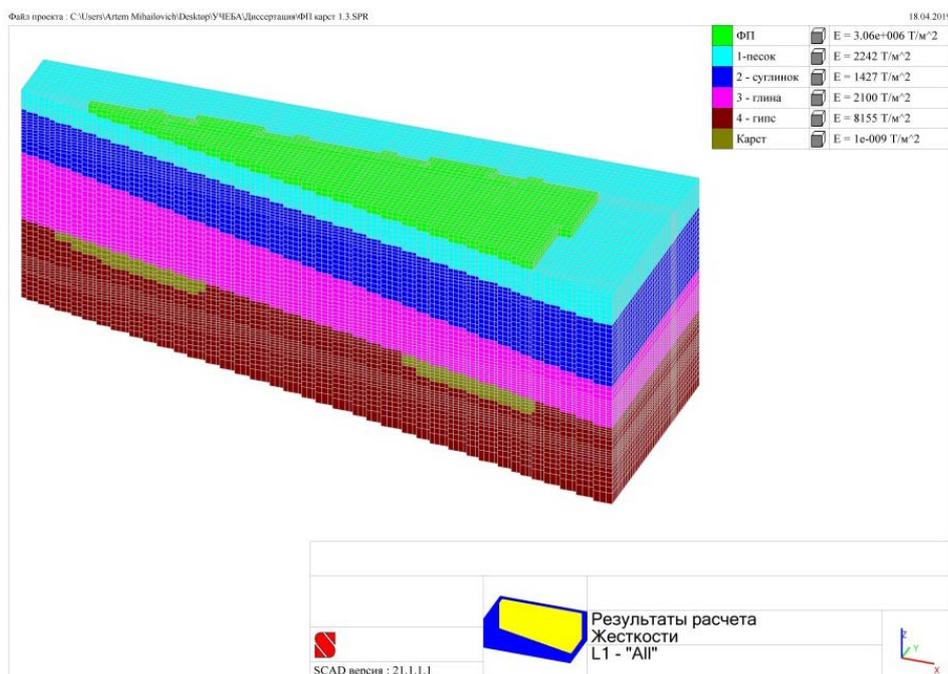


Рис. 5. Имитационная модель карстового провала

Анализ результатов расчета с учетом образования карстового провала основания показал, что вертикальная максимальная осадка фундаментной плиты увеличилась на 89 % и составила 17,8 см. Это превышает максимально допустимую осадку основания, равную 15 см. Изолинии перемещений сдвинулись в сторону образования провала (рис. 6).

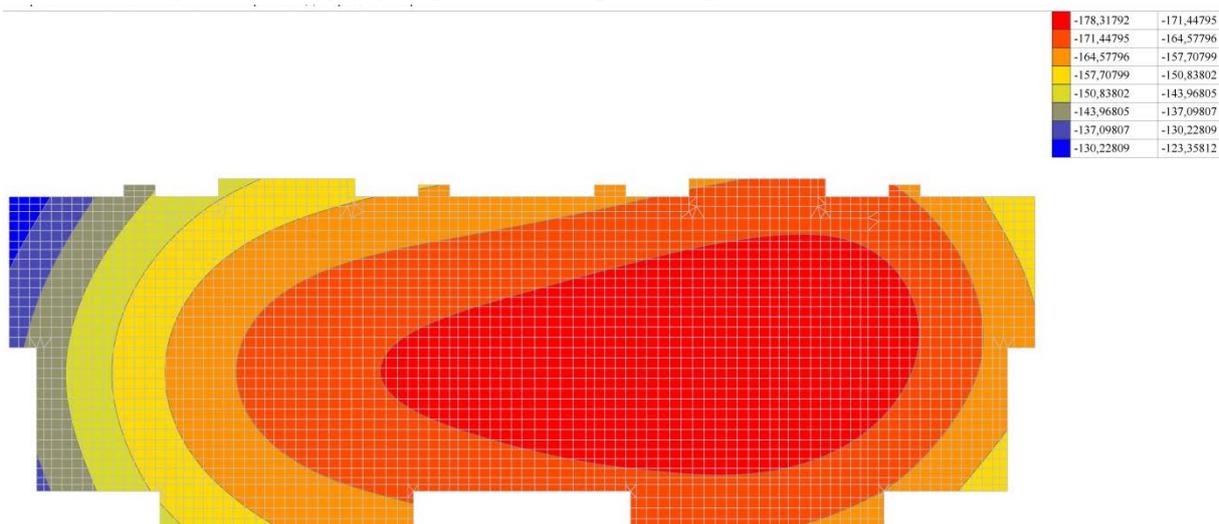


Рис. 6. Вертикальная осадка фундаментной плиты с карстом

В связи с этим возникает необходимость усиления основания, которое выполняется одним из двух методов. Первый: в зоне карстообразования проводится бурение скважин и в полость карста нагнетается укрепляющий материал. Второй: в скважины устанавливают арматурный каркас и нагнетают под давлением цементный раствор.

Для контроля осадки сложного в плане сооружения необходимо производить постоянный геотехнический мониторинг [10].

Заключение. Рассмотрена проблема образования карстовых процессов и их свойства менять рельеф площадки строительства.

Методом конечных элементов в объемной постановке выполнено численное 3D моделирование карстовых процессов и анализ напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты во временном интервале. Имитация образования карстовых воронок соответствует пошаговому изменению физико-механических характеристик грунтового основания в 3D модели. В расчетах использованы реальные инженерно-геологические условия образования сульфатного карста. Разработаны рекомендации по усилению грунтового основания в зоне образования карстовых воронок.

Библиографический список

1. Дублянский, В. Н. Распространение карстующих пород на земном шаре / В. Н. Дублянский, Г. Н. Дублянская, Н. Л. Мясоедова // Сергеевские чтения. Выпуск 6. Инж. геология и охрана геол. среды. Современное состояние и перспективы развития. — Москва : ГЕОС, 2004. — С. 130–135.
2. Сорочан, Е. А. Анализ аварий сооружений на закарстованных территориях / Е. А. Сорочан // Российская геотехника — шаг в 21 век. — 2007. — № 2. — С. 154.
3. Толмачёв, В. В. Оценка карстовых рисков как один из принципов устойчивого развития карстовых регионов / В. В. Толмачёв // Великие реки — 2013 : междунар. науч.-пром. форум. — Нижний Новгород : ННГАСУ, 2014. — Т. 1. — С. 96–99.
4. Кравченко, Г. М. Исследование напряженно-деформированного состояния каркаса здания с учетом совместной работы системы «здание — основание — грунт» / Г. М. Кравченко, Н. А. Савельева, Э. Р. Шарипов // Концепция динамического равновесия в новых технологиях : мат-лы междунар. науч.-практ. конф. — Казань : Омега Сайнс, 2017. — С. 42–45.
5. Кравченко, Г. М. Определение напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты по различным моделям основания / Г. М. Кравченко, Е. В. Труфанова, В. Н. Колтырина // Научные основы современного прогресса : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. — Казань : Омега Сайнс, 2017. — С. 50–54.
6. Проектирование современных высотных зданий / Сью Пэйфу [и др.]. — Москва : АСВ, 2008. — 469 с.
7. Шерешевский, И. А. Конструирование жилых и общественных зданий и сооружений / И. А. Шерешевский. — 3-е изд., перераб. и доп. — Санкт-Петербург : Юнита, 2001. — 167 с.
8. Вычислительный комплекс SCAD / В. С. Карпиловский [и др.]. — Москва : СКАД СОФТ, 2009. — 647 с.
9. Тоталь, С. А. Моделирование карстообразования [Электронный ресурс] / С. А. Тоталь, Ф. Морандини, Ж. Массона. — Режим доступа: <https://edrid.ru/rid/216.013.83da.html> (дата обращения 14.09.19).
10. Гилемханов, Р. Оценка напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты с учетом карстовых провалов в среде SCAD Office / Р. Гилемханов, А. Алишер // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2016. — № 4 (43). — С. 2304.