



УДК 624.042 (470.341-25)

Д. А. КОЖАНОВ, канд. физ.-мат. наук, декан общетехнического факультета, доц. кафедры теории сооружений и технической механики;  
С. Ю. ЛИХАЧЕВА, канд. физ.-мат. наук, проф. кафедры теории сооружений и технической механики

### АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛНОРАЗМЕРНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел. (831) 430-54-88;  
эл. почта: pbk996@mail.ru

*Ключевые слова:* метод конечных элементов, численная модель, цифровые двойники, модель здания, напряжения и деформации, экспликация.

---

*Приводятся результаты твердотельного трехмерного моделирования методом конечных элементов I, II и IX корпусов ННГАСУ. В качестве нагрузки учитывается собственный вес зданий. Построенные модели можно дополнить любой другой статической или динамической нагрузкой. В моделях учтены реальные поэтажные текущие планы и экспликации помещений корпусов, материал несущих конструкций, габаритные размеры, толщина стен, проходы и переходы, оконные проемы и т. д. В корпусах с цокольным этажом модели учитывают подвальные помещения. Количество конечных элементов составляло от 4 000 000 до 9 000 000 единиц для модели каждого здания.*

---

В процессе эксплуатации здания и сооружения подвергаются нагрузкам как естественной природы (собственный вес, полезные нагрузки, ветровые и сейсмические нагрузки), так и антропогенной, вызванной деятельностью человека, например, строительными работами, движением транспорта и др. [1]. Избыточные нагрузки могут стать причиной повреждения конструкций здания, снизив его эксплуатационную надежность: уменьшить устойчивость [2], ухудшить несущую способность стен и перекрытий. Признаками снижения эксплуатационной надежности здания является появление трещин элементов несущего каркаса, отделяемых от тела здания и т. п. Поэтому напряженно-деформированное состояние зданий и сооружений, их элементов, следует постоянно или периодически контролировать, чтобы определить, насколько они опасны как для конструкции в целом, так и для ее частей [3].

Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций здания проводят в том случае, если есть основания предполагать, что это воздействие может привести к его повреждению. Такое исследование представляет собой многоэтапный процесс, начинающийся на стадии проектирования новых зданий и сооружений в условиях действия существующих источников нагрузок или новых систем, которые могут оказывать существенное воздействие на возведенные конструкции. На разных этапах проектирования разрабатывают и уточняют расчетные модели, в которых учитывают различные источники внешних нагрузок, пути их распространения и особенности



конструкции здания. Выходом модели является величина НДС в разных точках конструкции.

Созданные цифровые двойники зданий и сооружений, а именно их конечно-элементные модели, предоставляют уникальные возможности для снижения риска техногенных катастроф, разрушения зданий, относящихся к объектам культурного наследия путем определения напряженно-деформированного состояния силовых элементов зданий и сооружений.

При реализации текущего исследования использованы научные подходы и методы механики сплошных сред, математической статистики, метода конечных элементов (КЭ). Зная уровень и величину внешних воздействий, передаваемых на несущие конструкции зданий и сооружений, возможно создание актуальных цифровых двойников, которые позволяют спрогнозировать будущее техническое состояние рассматриваемых зданий и сооружений при строительстве, например, новых линий метро или трамвайных путей, строительстве новых жилых комплексов, что особенно актуально в случае, если в существующей застройке имеются здания, относящиеся к объектам культурного наследия (ОКН).

Например, на ул. Ильинской, находящейся в исторической части г. Нижнего Новгорода, располагается большое количество ОКН как регионального, так и федерального значения. При этом территория подвержена высокой антропогенной вибрационной нагрузке, связанной с располагающейся на ней трамвайной линией, уплотнительной застройкой и реконструкцией зданий и сооружений, строительством новых объектов при реализации программы комфортной городской среды и др. Частота проезда трамваев достигает 300 ед./сутки. Вибрационные воздействия от них явно ощущаются и без специализированного оборудования как на уровне фундамента, так и на самых верхних этажах зданий, расположенных по ул. Ильинская.

Созданная в ННГАСУ лаборатория непрерывного контроля технического состояния зданий и сооружений позволила провести широкий спектр исследований несущих строительных конструкций зданий, находящихся по адресу:

- 1) г. Н. Новгород, ул. Ильинская, 67, корпус II ННГАСУ;
- 2) г. Н. Новгород, ул. Ильинская, 65 (дом купца Рычина, первое здание Мариинского института благородных девиц, 1852) – корпус I ННГАСУ;
- 3) г. Н. Новгород, ул. Ильинская, 61 (дом купца Маркова, 1905 г.) – корпус IX ННГАСУ.

По имеющимся планам зданий и экспликации по этажам были построены геометрические модели в системе ANSYS (лицензия ANSYS Academic Multiphysics Campus Solution (10/100), ANSYS Customer Number: 1051709). Общий геометрический вид несущих конструкций зданий представлен на рис. 1–3. Для создания КЭ моделей использовался трехмерный твердотельный конечный элемент с тремя степенями свободы *Solid 185*. Проведенная дискретизация геометрических моделей после процедур оптимизации привела к численным моделям объемом от 4 000 000 до 9 000 000 КЭ для модели каждого здания. Материал несущих стен – кирпичная кладка [4–13], перекрытия – железобетонные плиты или деревянные балки (в зависимости от корпуса). Модуль упругости кирпичной кладки был принят – 3,52 МПа, коэффициент Пуассона – 0,15. Текущие выбранные механические характеристики могут быть изменены на этапе запуска модели к расчету, как и величина внешних нагрузок. Основные

трудозатраты были при подготовке геометрической модели и ее дальнейшей дискретизации [14]. После подготовки численных моделей [15–22] был получен командный файл для создания численной модели каждого корпуса путем его чтения в системе ANSYS, что позволяет в несколько десятков раз ускорить процесс построения модели в зависимости лишь от мощности вычислительного сервера или компьютера.

По результатам проведенных численных расчетов на основании информации о собственном весе конструкции на объекты были получены поля распределения напряжений поэтажно для каждого из рассматриваемых зданий (рис. 4–6).

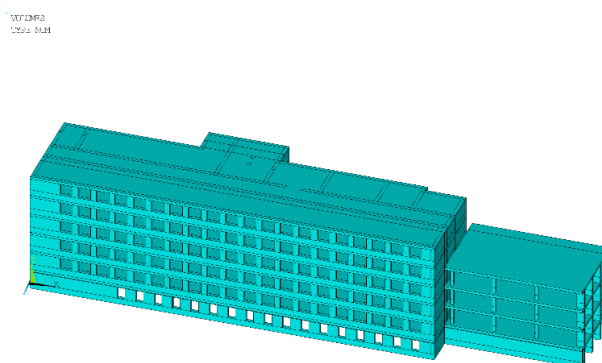


Рис. 1. Модель здания, расположенного по адресу ул. Ильинская, 67

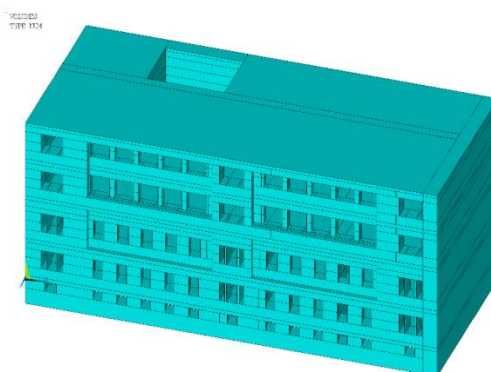


Рис. 2. Модель здания, расположенного по адресу ул. Ильинская, 65

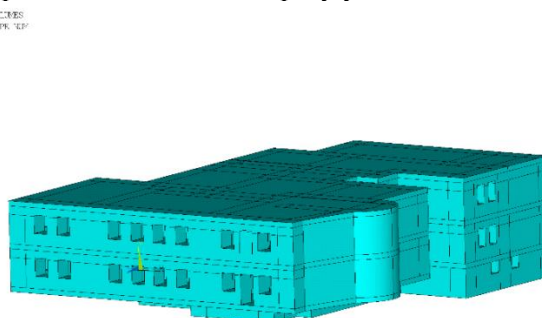


Рис. 3. Модель здания, расположенного по адресу ул. Ильинская, 61

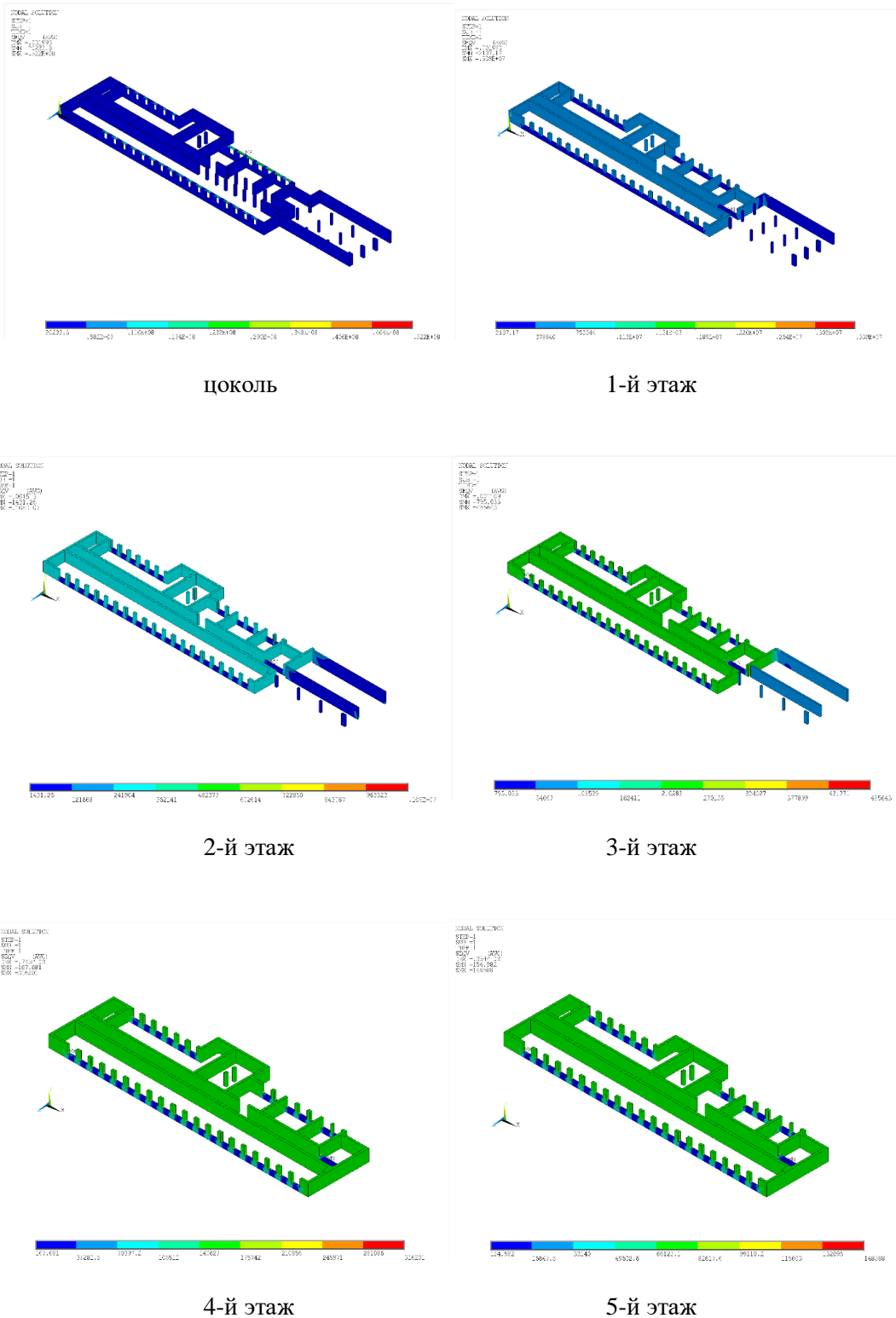


Рис. 4. Поля распределения напряжений по Мизесу (4-я теория прочности) здания, расположенного по адресу г. Н. Новгород, ул. Ильинская, 67

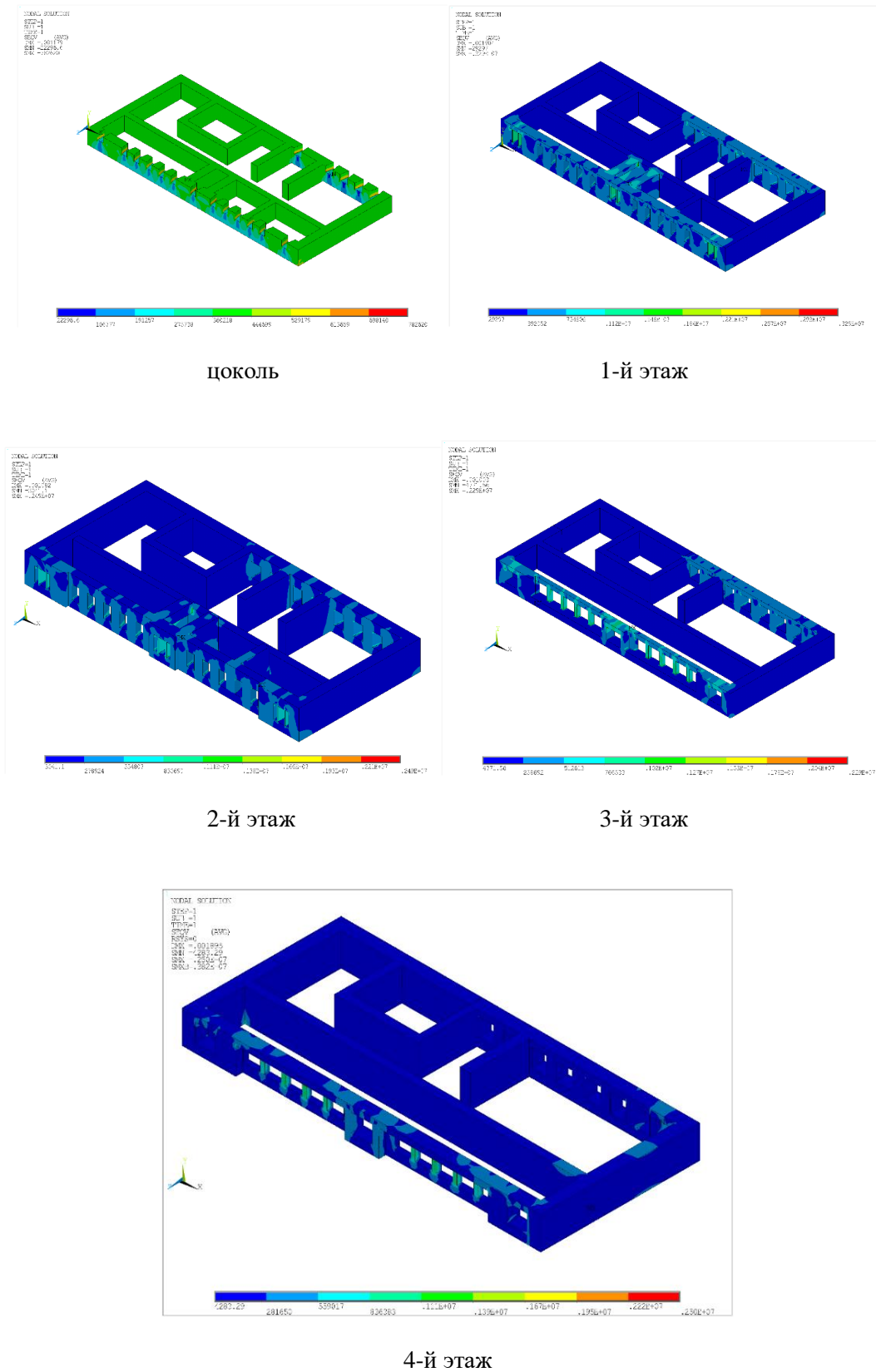


Рис. 5. Поля распределения напряжений по Мизесу (4-я теория прочности) здания, расположенного по адресу: г. Н. Новгород, ул. Ильинская, 65

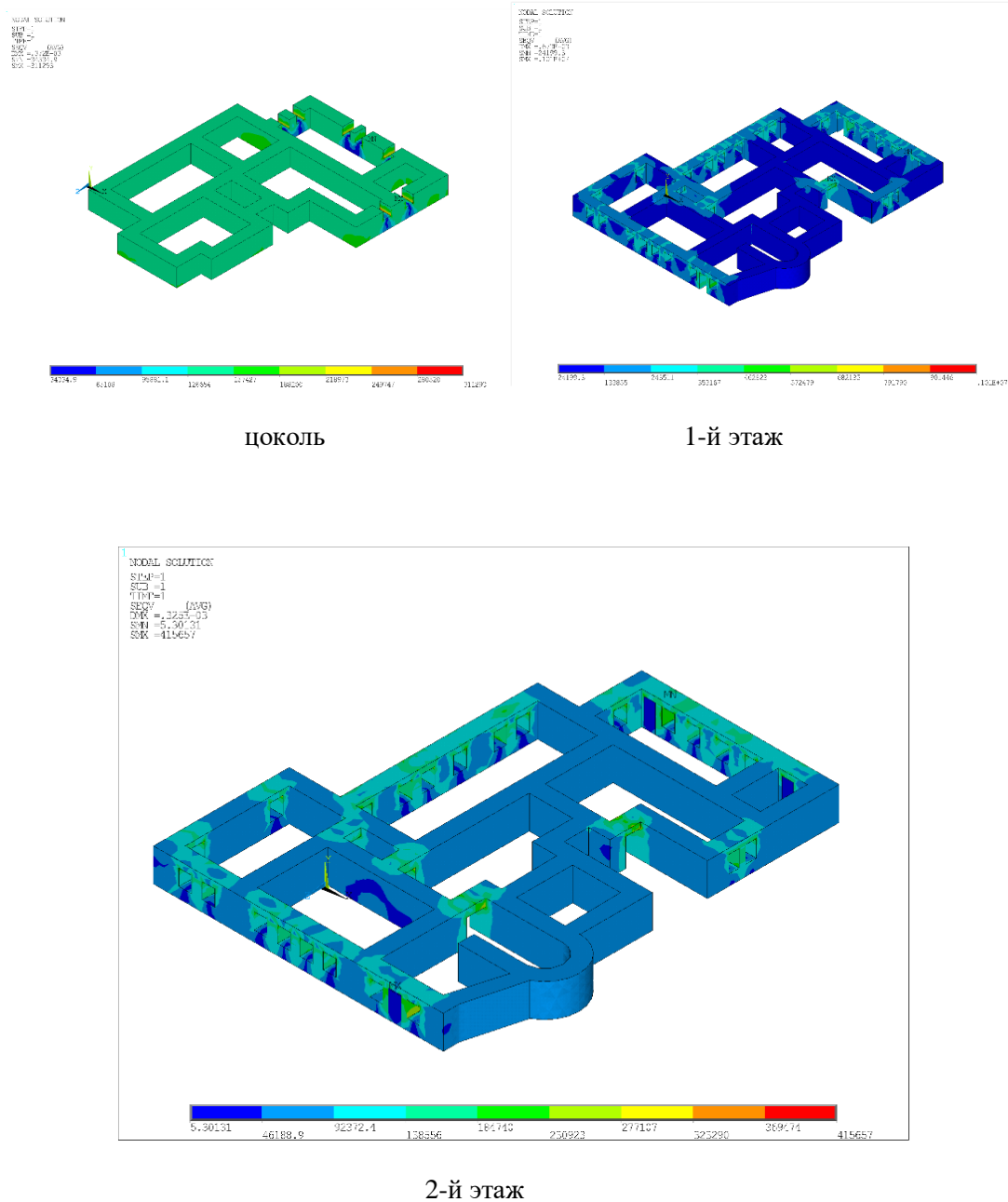


Рис. 6. Поля распределения напряжений по Мизесу (4-я теория прочности) здания, расположенного по адресу: г. Н. Новгород, ул. Ильинская, 61

Величины максимальных эквивалентных напряжений по 4-й теории прочности зданий поэтажно приведены в таблице.



### Максимальные эквивалентные напряжения по 4-й теории прочности

Адрес здания (улица) / этаж	Величина максимальных эквивалентных напряжений, МПа
ул. Ильинская, 67 (цоколь)	5,2
ул. Ильинская, 67 (1-й этаж)	3,39
ул. Ильинская, 67 (2-й этаж)	1,08
ул. Ильинская, 67 (3-й этаж)	0,486
ул. Ильинская, 67 (4-й этаж)	0,316
ул. Ильинская, 67 (5-й этаж)	0,149
ул. Ильинская, 65 (цоколь)	0,783
ул. Ильинская, 65 (1-й этаж)	3,29
ул. Ильинская, 65 (2-й этаж)	2,49
ул. Ильинская, 65 (3-й этаж)	2,29
ул. Ильинская, 65 (4-й этаж)	2,5
ул. Ильинская, 61 (цоколь)	0,311
ул. Ильинская, 61 (1-й этаж)	1,01
ул. Ильинская, 61 (2-й этаж)	0,416

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что при учете собственного веса здания максимальные напряжения в несущих конструкциях зданий возникают в местах их ослабления (дверные проемы, оконные проемы и т. д.). Величина максимальных напряжений в локальных областях превышает предел прочности кирпичной кладки, что приводит к образованию локальных трещин, что можно наблюдать в реальном времени. Полученные модели, их командные файлы можно использовать для дальнейших исследований в области анализа и учета других видов нагрузок.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Динамика строительных конструкций при экстремальных природных воздействиях : колебания, прочность, ресурс / П. А. Хазов, Д. А. Кожанов, А. М. Анущенко, А. А. Сатанов ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, – 2022. – 96 с. – ISBN 978-5-528-00475-4. – Текст : непосредственный.
2. Устойчивость центрально-сжатых прямолинейных упругих стержней переменного сечения / П. А. Хазов, С. Ю. Лихачева, Д. А. Кожанов [и др.] – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2020. – № 2 (54). – С. 15–23.
3. Оценка прочности и устойчивости композитных сталежелезобетонных элементов с совместным применением стержневых и твердотельных расчетных моделей / А. А. Лапшин, П. А. Хазов, С. Ю. Лихачева, Д. А. Кожанов. – Текст : непосредственный //



Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 3 (59). – С. 9–16.

4. Моделирование процесса деформирования периодического элемента каменной кладки в условиях кратковременного сжатия / А. А. Васильева, Ю. А. Пронина, С. Ю. Лихачева, Д. А. Кожанов. – Текст : непосредственный // Сборник докладов II Международной научно-практической конференции. Экологическая безопасность и устойчивое развитие урбанизированных территорий / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2019. – С. 167–173. – Текст : непосредственный.

5. Кожанов, Д. А. Применение системы ANSYS для моделирования процесса деформирования и разрушения каменных кладок / Д. А. Кожанов, С. Ю. Лихачева. – Текст : непосредственный // Сборник докладов 25-й Юбилейной Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам КОГРАФ-2015 / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2015. – С. 68–72.

6. Кожанов, Д. А. Моделирование диаграммы деформирования каменной кладки с применением системы ANSYS / Д. А. Кожанов, С. Ю. Лихачева. – Текст : непосредственный // Материалы докладов всероссийской научно-практической конференции с международным участием – 2015. – Пермь, 2015. – С. 58–62.

7. Кожанов, Д. А. Моделирование структуры каменной кладки методом конечных элементов с применением системы ANSYS / Д. А. Кожанов, С. Ю. Лихачева – Текст : непосредственный // Грани науки 2015 : материалы докладов 4-ой Всероссийской интернет конференции. – Казань, 2015. – С. 190–191.

8. Кожанов, Д. А. Использование вложенных в ANSYS моделей материалов, для описания деформирования каменных кладок / Д. А. Кожанов, С. Ю. Лихачева. – Текст : непосредственный // Сборник докладов V Всероссийского фестиваля науки / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2015. – С. 86–90.

9. Кожанов, Д. А. Применение моделей материалов и типов конечных элементов в ANSYS для описания деформирования кирпичных кладок / Д. А. Кожанов, С. Ю. Лихачева. – Текст : непосредственный // Современные концепции научных исследований : материалы IV Международной научно-практической конференции / Нижегородский филиал МИИТ. – Нижний Новгород, 2015. – С. 228–230.

10. Кожанов, Д. А. Моделирование процессов деформирования каменных кладок с применением ПК ANSYS / Д. А. Кожанов, С. Ю. Лихачева. – Текст : непосредственный // Труды научного конгресса 13-го Российского архитектурно-строительного форума / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2015. – С. 68–71.

11. Кожанов, Д. А. Основные этапы создания модели кирпичной кладки в системе ANSYS / Д. А. Кожанов, С. Ю. Лихачева. – Текст : непосредственный // Труды научного конгресса 14-го Российского архитектурно-строительного форума / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2016. – С. 102–105.

12. Моделирование процесса деформирования периодического элемента каменной кладки в условиях кратковременного сжатия / Д. А. Кожанов, А. А. Васильева, Ю. А. Пронина, С. Ю. Лихачева. – Текст : непосредственный // Сборник докладов IX Всероссийского фестиваля науки в 2-х томах ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2019. – Том 1. – С. 23–28.

13. Моделирование работы кладки опилкобетонных кирпичей в расчете зданий и сооружений / А. А. Васильева, Ю. А. Пронина, Д. А. Кожанов, С. Ю. Лихачева. – Текст : непосредственный // Великие реки 2020 : труды научного конгресса 22-го Международного научно-промышленного форума / Нижегородский государственный





архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2020. – С. 396–400.

14. Физическое и численное моделирование стальных и сталежелезобетонных конструкций из труб / И. В. Шкода, П. А. Хазов, А. П. Помазов [и др. ] ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2023. – 135 С. Текст : непосредственный.

15. Yang Deng. Seismic safety assessments of historical timber buildings using updated finite element models : case study of Yingxian wooden pagoda, China / Yang Deng, Yuhang Li , Aiqun Li // Journal of Building Engineering. – 2023. – № 63. – 105454. – 10.1016/j.job.2022.105454.

16. Yasunori Mizushima. Blind analysis on the shaking table test of a 7-story reinforced concrete building using a detailed finite element model / Yasunori Mizushima, Takuya Kinoshita // Journal of Building Engineering. – 2022. – № 52. – 104368. – 10.1016/j.job.2022.104368.

17. Finite Element and Equivalent Frame modeling approaches for URM buildings : implications of different assumptions in the seismic assessment / Francesco Parisse, Rui Marques, Serena Cattari, Paulo B. Lourenço // Journal of Building Engineering. – № 61. – 2022. – 105230. – 10.1016/j.job.2022.105230.

18. Fangzhou Liu. Finite element modelling for the dynamic analysis of hollow-core concrete floors in buildings / Fangzhou Liu, Jean-Marc Battini, Costin Pacoste // Journal of Building Engineering. – 2020. – № 32. – 101750. – 10.1016/j.job.2020.101750.

19. Integrated framework to structurally model unreinforced masonry Italian medieval churches from photogrammetry to finite element model analysis through heritage building information modeling / David Pirchio, Kevin Q. Walsh, Elizabeth Kerr [et al] // Engineering Structures. – 2021. – № 241. – 112439. – 10.1016/j.engstruct.2021.112439.

20. Низомов, Дж. Н. Численное решение динамической задачи модели фрагмента здания с учетом податливости основания и жесткости связей / Дж. Н. Низомов, Л. Ш. Шарипов, И. С. Муминов. – Текст : непосредственный // Политехнический вестник. Серия : Инженерные исследования. – 2020. – № 1 (49). – С. 154–159.

21. Низомов, Д. Н. Численное моделирование динамической системы «Платформа–Модель здания» / Д. Н. Низомов, И. К. Каландарбеков, И. И. Каландарбеков. – Текст : непосредственный // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 3 (68). – С. 66–72.

22. О развитии адаптивных математических моделей, численных и численно-аналитических методов как основы и составной части систем мониторинга несущих конструкций уникальных зданий и сооружений / А. М. Белостоцкий, П. А. Акимов, В. Н. Сидоров, Т. Б. Кайтуков. – Текст : непосредственный // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году : сборник научных трудов Российской академии архитектуры и строительных наук. – Москва, 2018. – С. 71–78.

**KOZHANOV Dmitriy Aleksandrovich, candidate of physical and mathematical sciences, dean of the general technical department, associate professor of the chair of structural theory and technical mechanics; LIKHACHYOVA Svetlana Yurevna, candidate of physical and mathematical sciences, professor of the chair of structural theory and technical mechanics**

#### **ANALYSIS OF THE STRESS AND STRAIN OF BUILDINGS BASED ON FULL-SIZE SOLID FINITE ELEMENT MODELS**



Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering  
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia. Tel.: +7 (831) 432-05-76;  
e-mail: pbk996@mail.ru

*Key words:* finite element method, numerical model, digital twins, building model, stress and strain, explication.

---

*The results of solid three-dimensional modeling using the finite element method of the first, second and ninth buildings of NNGASU are presented. The dead weight of the buildings is taken as the load. The constructed models can be supplemented with any other static or dynamic load. The models take into account real current floor plans and explications of building premises, material of load-bearing structures, overall dimensions, wall thickness, passages and transitions, window openings, etc. In buildings with a basement, the models take into account the basements. The number of finite elements ranged from 4,000,000 to 9,000,000 units for each building model.*

---

## REFERENCES

1. Khazov P. A., Kozhanov D. A., Anushchenko A. M., Satanov A. A. Dinamika stroitelnykh konstruksiy pri ekstremalnykh prirodnykh vozdeystviyakh: kolebaniya, prochnost, resurs [Dynamics of building structures under extreme natural influences: vibrations, strength, resource] ; Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod : NNGASU. – 2022. – 96 p. – ISBN 978-5-528-00475-4.
2. Likhachyova S. Yu., Khazov P. A., Kozhanov D. A., Anushchenko A. M., Onishchuk E. A., Lobov D. M. Ustoychivost tsentralno-szhatykh pryamolineynykh uprugikh sterzhney peremennogo secheniya [Stability of centrally compressed straight-lined elastic rods of variable cross-section]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal] / Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2020. № 2 (54). – P. 15–23.
3. Lapshin A. A., Khazov P. A., Likhachyova S. Yu., Kozhanov D. A. Otsenka prochnosti i ustoychivosti kompozitnykh stalezhelezobetonnykh elementov s sovместnym primeneniem sterzhnevnykh i tvyordotelnykh raschyotnykh modeley [Assessment of the strength and stability of composite steel-concrete elements with joint use of rod and solid-state calculation models]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal] / Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2021. – № 3 (59). – P. 9–16.
4. Vasileva A. A., Pronina Yu. A., Likhachyova S. Yu., Kozhanov D. A. Modelirovanie protsessa deformirovaniya periodicheskogo elementa kamennoy kladki v usloviyakh kratkovremennogo szhatiya [Modeling the deformation process of a periodic masonry element under short-term compression conditions] / Ekologicheskaya bezopasnost i ustoychivoe razvitie urbanizirovannykh territoriy [Environmental Safety and Sustainable Development of Urbanized Territories]. Sbornik dokladov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2019. – P. 167–173.
5. Kozhanov D. A., Likhachyova S. Yu. Primenenie sistemy ANSYS dlya modelirovaniya protsessa deformirovaniya i razrusheniya kamennykh kladok [Application of the ANSYS system to simulate the process of deformation and destruction of masonry] / Sbornik dokladov 25-y yubileynoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po graficheskim informatsionnym tekhnologiyam i sistemam COGRAF-2015. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod. – 2015. – P. 68–72.
6. Kozhanov D. A., Likhachyova S. Yu. Modelirovanie diagrammy deformirovaniya kamennoy kladki s primeneniem sistemy ANSYS [Modeling the deformation diagram of masonry using the ANSYS system] // Materialy dokladov vserossiyskoy nauchno-praktich. konferentsii s mezhdunarod. uchastiem. – Perm. – 2015. – P. 58–62.
7. Kozhanov D. A., Likhachyova S. Yu. Modelirovanie struktury kamennoy kladki metodom konechnykh elementov s primeneniem sistemy ANSYS [Modeling the structure of



masonry using the finite element method using the ANSYS system] / Grani nauki 2015 [Frontiers of Science] : materialy dokladov 4-oy Vserossiyskoy internet konferentsii. – Kazan. 2015. – P. 190–191.

8. Kozhanov D. A., Likhachyova S. Yu. Ispolzovanie vlozhennykh v ANSYS modeley materialov dlya opisaniya deformirovaniya kamennykh kladok [Using material models embedded in ANSYS to describe the deformation of masonry] / Sbornik dokladov V Vserossiyskogo festivalya nauki. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod : NNGASU. – 2015. – P. 86–90.

9. Kozhanov D. A., Likhachyova S. Yu. Primenenie modeley materialov i tipov konechnykh elementov v ANSYS dlya opisaniya deformirovaniya kirpichnykh kladok [Application of material models and finite element types in ANSYS to describe the deformation of brickwork] / Sovremennye kontseptsii nauchnykh issledovaniy [Modern concepts of scientific research] : materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Nizhegorodskiy filial MIIT. – Nizhny Novgorod. – 2015. – P. 228–230.

10. Kozhanov D. A., Likhachyova S. Yu. Modelirovanie protsessov deformirovaniya kamennykh kladok s primeneniem PK ANSYS [Simulation of deformation processes of masonry using ANSYS] / Trudy nauchnogo kongressa 13-go Rossiyskogo arkhitekturno-stroit. foruma. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod : NNGASU. – 2015. – P. 68–71.

11. Kozhanov D. A., Likhachyova S. Yu. Osnovnye etapy sozdaniya modeli kirpichnoy kladki v sisteme ANSYS [The main stages of creating a brickwork model in ANSYS] / Trudy nauchnogo kongressa 14-go Rossiyskogo arkhitekturno-stroit. foruma. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod: NNGASU. – 2016. – P. 102–105.

12. Kozhanov D. A., Vasileva A. A., Pronina Yu. A., Likhachyova S. Yu. Modelirovanie protsessa deformirovaniya periodicheskogo elementa kamennoy kladki v usloviyakh kratkovremennogo szhatiya [Modeling the deformation process of a periodic masonry element under short-term compression conditions] / Sbornik dokladov IX Vserossiyskogo festivalya nauki v 2-kh tomakh ; Collection of reports of the IX All-Russian Science Festival in 2 volumes. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod : NNGASU. – 2019. Vol. 1. – P. 23–28.

13. Vasileva A. A., Pronina Yu. A., Kozhanov D. A., Likhachyova S. Yu. Modelirovanie raboty kladki opilkobetnykh kirpichey v raschyote zdaniy i sooruzheniy [Modeling the work of laying sawdust concrete bricks in the calculation of buildings and structures] // Velikie reki 2020 : trudy nauch. kongressa 22-go Mezhdunarod. nauch.-promyshlennogo foruma / Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod : NNGASU. – 2020. – P. 396–400.

14. Shkoda I. V., Khazov P. A., Pomazov A. P., Sitnikova A. K., Kozhanov D. A. Fizicheskoe i chislennoe modelirovanie stalnykh i stalezhelezobetnykh konstruktsiy iz trub [Physical and numerical modeling of steel and steel-reinforced concrete pipe structures]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod : NNGASU. – 2023. – 135 p.

15. Yang Deng, Yuhang Li, Aiqun Li. Seismic safety assessments of historical timber buildings using updated finite element models: Case study of Yingxian wooden pagoda, China. Journal of Building Engineering. – 2023. – № 63. – 105454 – 10.1016/j.job.2022.105454.

16. Yasunori Mizushima, Takuya Kinoshita. Blind analysis on the shaking table test of a 7-story reinforced concrete building using a detailed finite element model. Journal of Building Engineering. – 2022. – № 52. – 104368. – 10.1016/j.job.2022.104368.

17. Francesco Parisse, Rui Marques, Serena Cattari, Paulo B. Lourenço. Finite Element and Equivalent Frame modeling approaches for URM buildings: Implications of different assumptions in the seismic assessment. Journal of Building Engineering. – № 61. – 2022. – 105230. – 10.1016/j.job.2022.105230.

18. Fangzhou Liu, Jean-Marc Battini, Costin Pacoste. Finite element modelling for the dynamic analysis of hollow-core concrete floors in buildings. Journal of Building Engineering. – 2020. – № 32. – 101750. – 10.1016/j.job.2020.101750.



19. David Pirchio, Kevin Q. Walsh, Elizabeth Kerr, Ivan Giongo, Marta Giaretton, Brad D. Weldon, Luca Ciocci, Luigi Sorrentino. Integrated framework to structurally model unreinforced masonry Italian medieval churches from photogrammetry to finite element model analysis through heritage building information modeling. *Engineering Structures*. – 2021. – № 241. – 112439. – 10.1016/j.engstruct.2021.112439.

20. Nizomov J. N., Sharipov L. Sh., Muminov I. S. Chislennoe reshenie dinamicheskoy zadachi modeli fragmenta zdaniya s uchyotom podatlivosti osnovaniya i zhyostkosti svyazey [Numerical solution of the dynamic problem of a building fragment model taking into account the flexibility of the base and the rigidity of the connections]. *Politekhnicheskiy vestnik. Seriya : Inzhenernye issledovaniya* [Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research]. – 2020. – № 1 (49). – P. 154–159.

21. Nizomov D. N., Kalandarbekov I. K., Kalandarbekov I. I. Chislennoe modelirovanie dinamicheskoy sistemy "Platforma-Model zdaniya" [Numerical modeling of the dynamic system "Platform-Building Model"]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. – 2018. – № 3 (68). – P. 66–72.

22. Belostotsky A. M., Akimov P. A., Sidorov V. N., Kaytukov T. B. O razvitiy adaptivnykh matematicheskikh modeley, chislennykh i chislenno-analiticheskikh metodov kak osnovy i sostavnoy chasti sistem monitoringa nesushchikh konstruktsiy unikalnykh zdaniy i sooruzheniy [On the development of adaptive mathematical models, numerical and numerical-analytical methods as the basis and component of monitoring systems for load-bearing structures of unique buildings and structures] / *Fundamentalnye, poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomy obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitelstva i stroitelnoy otrasli RF v 2017 godu* [Fundamental, exploratory and applied research of the RAACS on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2017]. *Sbornik nauchnykh trudov Rossiyskoy akademii arkhitektury i stroitelnykh nauk*. Moscow, 2018. – P. 71–78.

© Д. А. Кожанов, С. Ю. Лихачева, 2023

Получено: 13.10.2023 г.