

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА  
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.048

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-87-94

Оригинальная статья / Original Paper

**Цифровое моделирование прогрессирующего обрушения высотного здания**

Э.К. Агаханов<sup>1</sup>, Г.М. Кравченко<sup>2</sup>, М.И. Кадомцев<sup>2</sup>, Е.В. Труфанова<sup>2</sup>, Н.А. Савельева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дагестанский государственный технический университет,

<sup>1</sup>367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

<sup>2</sup>Донской государственный технический университет,

<sup>2</sup>344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

**Резюме. Цель.** В статье обоснована необходимость цифрового моделирования аварийного воздействия при исследовании устойчивости здания к прогрессирующему обрушению путем создания имитатора локального разрушения. **Метод.** Для обеспечения уникального архитектурного облика проектируемого многофункционального высотного комплекса разработана сложная форма с выемками, в которых располагаются лифтовые шахты. Соблюдается принцип управления конструкции за счет притока внешней энергии. Преобразование энергии и необходимая защита обеспечивается наличием в пространственном каркасе здания уравнивающих связей около архитектурных выемок, позволяющих стабилизировать состояние сложной системы. Пространственная жесткость конструктивной схемы высотного здания обеспечивается применением симметрично расположенных диафрагм и ядер жесткости, жестких узлов для сопряжения с несущими конструкциями аутригерных систем. **Результат.** Алгоритм расчета на прогрессирующее обрушение включает расчет напряженно-деформированного состояния элементов каркаса здания при нормальной эксплуатации. Создается аналог аварийного воздействия путем исключения из расчетной модели несущего элемента, мгновенное удаление которого моделируется усилием с обратным знаком, определенное по результатам расчета в стадии нормальной эксплуатации. **Вывод.** Напряженно-деформированное состояние каркаса, возникающее при локальном разрушении, является критерием устойчивости к прогрессирующему обрушению. Исследован вопрос о необходимости и устанавливаемой форме аутригерных этажей применительно к конкретному зданию. Приведена зависимость динамических характеристик при изменении конструктивных решений каркаса уникального здания.

**Ключевые слова:** цифровое моделирование прогрессирующего обрушения, параметрическая архитектура, высотные здания, метод конечных элементов, формы колебаний, напряженно-деформированное состояние, конструкция, аутригерный этаж

**Для цитирования:** Э.К. Агаханов, Г.М. Кравченко, М.И. Кадомцев, Е.В. Труфанова, Н.А. Савельева. Цифровое моделирование прогрессирующего обрушения высотного здания. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49 (1): 87-94. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-87-94

**Digital modeling of progressive collapse for high-rise building**

**E.K. Agakhanov, G.M. Kravchenko, M.I. Kadomtsev, E.V. Trufanova, N.A. Savelyeva**

<sup>1</sup>Daghestan State Technical University,

<sup>1</sup>70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

<sup>2</sup>Don State Technical University,

<sup>2</sup>1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia

**Abstract. Objective.** The article substantiates the need for digital simulation of emergency impact in the study of the stability of a building to progressive collapse by creating a simulator of local destruction. **Method.** To ensure the unique architectural appearance of the projected multifunctional

high-rise complex, a complex shape has been developed with recesses in which elevator shafts are located. The principle of control of the structure due to the influx of external energy is observed. Energy conversion and the necessary protection is provided by the presence in the spatial frame of the building of balancing connections near architectural recesses, which allow stabilizing the state of a complex system. The spatial rigidity of the structural scheme of a high-rise building is ensured by the use of symmetrically located diaphragms and stiffening cores, rigid nodes for interfacing with the supporting structures of outrigger systems. **Result.** The calculation algorithm for progressive collapse includes the calculation of the stress-strain state of the building frame elements during normal operation. An analogue of the emergency action is created by excluding from the design model the bearing element, the instantaneous removal of which is modeled by a force with the opposite sign, determined by the results of the calculation in the normal operation stage. **Conclusion.** The stress-strain state of the frame, which occurs during local destruction, is a criterion for resistance to progressive collapse. The question of the need and the established form of outrigger floors in relation to a specific building has been investigated. The dependence of the dynamic characteristics when changing the structural solutions of the frame of a unique building is given.

**Keywords:** digital modeling of progressive collapse, parametric architecture, high-rise buildings, finite element method, vibration modes, stress-strain state, structure, outrigger floor

**For citation:** E.K. Agakhanov, G.M. Kravchenko, M.I. Kadomtsev, E.V. Trufanova, N.A. Savelyeva. Digital modeling of progressive collapse for high-rise building. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49 (1): 87-94. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-87-94

**Введение.** В современном мире актуальной проблемой для развивающихся мегаполисов с миллионной агломерацией является нехватка офисных помещений в центральных районах города. Причинами становятся плотная городская застройка, которая исторически сложилась в центральной части города, а также большая стоимость земельных участков. Возможным решением данной проблемы является строительство высотных офисных зданий. Безусловными достоинствами такого решения становится более эффективное использование площадей дорогостоящего земельного участка и сохранение естественных природных зон квартальной застройки.

Таким образом, появляется возможность сохранить баланс между индустриализацией города и развитием «зеленых» зон рекреации. Преимуществом можно назвать и тот факт, что строительство высотного здания позволяет сократить расходы на строительство и эксплуатацию офисных площадей. Важно, что подобные здания могут стать достопримечательностью и культурным центром города.

Стремительное развитие высотного строительства обусловлено значительным рядом факторов. К таким факторам можно отнести научно-технологический прогресс как в отрасли разработки и усовершенствования строительных материалов, так и в методах и средствах их расчета. Немаловажную роль играет развитие социума. Социальные и экономические факторы обуславливают тенденцию к увеличению высотности зданий и сооружений.

**Постановка задачи.** Запрос общества, в том числе крупных инвесторов и девелоперов, находит отклик в развитии строительной отрасли. Разрабатываются современные методы информационного моделирования зданий, связь программ для передачи аналитической и архитектурной модели бесшовна. Необходимость проведения точных расчетов несущих конструкций здания влечёт за собой усовершенствование методик и расчета. Учет нелинейных свойств материала позволяет наиболее точно смоделировать работу строительных конструкций в реальной жизни. Таким образом обеспечивается высокий уровень эксплуатационных характеристик здания, снижаются затраты на его эксплуатацию. В современных зданиях и сооружениях необходимо обеспечить безопасное пребывание людей. Для этого предлагается исключить вероятность прогрессирующего обрушения зданий при аварийном воздействии и снизить последствия такого воздействия на конструкции до минимума.

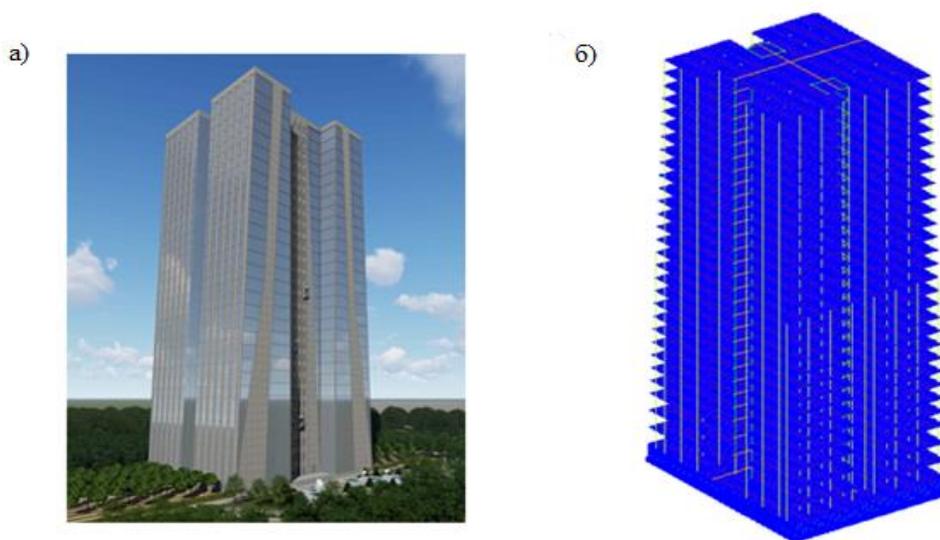
Для решения поставленной задачи предлагается цифровое моделирование аварийного воздействия и проведение серии численных экспериментов по усилению элементов каркаса уникального высотного здания.

**Методы исследования.** В инженерных науках и опыте сложился ряд рекомендаций по рациональному формообразованию. Однако, общие закономерности в науке формообразования еще не выявлены и не установлены [1]. На сегодняшний день в проектировании используется ряд критериев процедуры формообразования объектов строительства, таких как функциональность объекта, энергетический подход, экономичность строительства, эстетичность и современность облика здания и другие.

Оптимальное проектирование не только позволит внедрить энергосберегающие технологии, но и уменьшить вредное воздействие на природную среду обитания человека. Наряду с энергетическими аспектами весомый вклад в активное формообразование вносят идеи пространственности и управления конструкциями, преодоления неопределенности, обеспечение живучести и безопасности объекта архитектуры [2].

Для обеспечения уникального архитектурного облика проектируемого multifunctional высотного комплекса разработана сложная в плане форма с выемками, в которых располагаются лифтовые шахты. Соблюдается принцип управления конструкции за счет притока внешней энергии. Проходимость и преобразование энергии происходит при различных формах обратной связи в управляемой системе [3]. Преобразование энергии и необходимая защита обеспечивается наличием в пространственном каркасе здания уравнивающих связей около архитектурных выемок, позволяющих стабилизировать состояние сложной системы.

Объектом исследования является объект уникального высотного multifunctional комплекса, имеющего сложную архитектурную и пространственную конструктивную форму (рис. 1а).



**Рис. 1. Исследуемый объект:**

**а) визуализации здания; б) конечно-элементная модель**

**Fig. 1. Investigated object:**

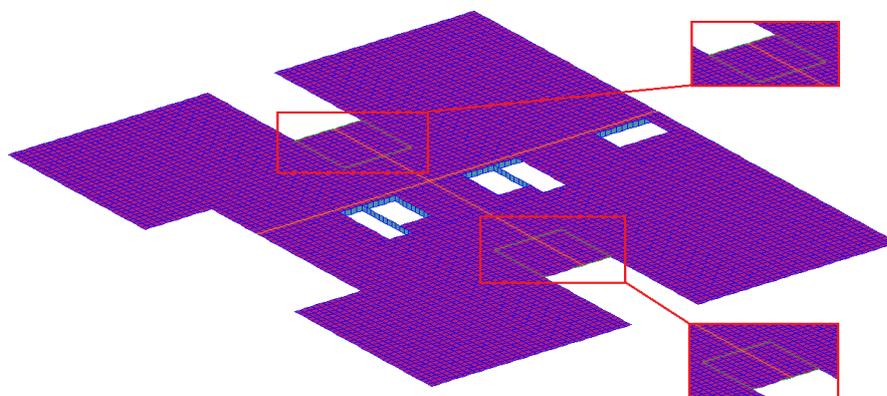
**a) visualization of the building; b) finite element model**

Моделирование каркаса уникального здания выполнено в программном комплексе Лира-САПР, основанном на методе конечных элементов. Программный комплекс реализует технологию информационного моделирования (BIM) и позволяет решать сложные задачи прочности и устойчивости конструкций [4].

Информационная модель выполнена с помощью стержневых элементов (колонны каркаса, горизонтальные элементы жёсткости, элементы аутригерных поясов) и оболочечных эле-

ментов (перекрытия, диафрагмы жесткости и стены подвала). В стадии нормальной эксплуатации материал несущих конструкций обладает линейно упругими свойствами (рис.1 б).

Для обеспечения общей горизонтальной жесткости модели здания, а также для усиления противодействия ветровым нагрузкам прямоугольных выемок по боковым фасадам здания предусмотрено устройство балок сечением 400х400мм по всей высоте здания (рис. 2).



**Рис. 2. Конечно-элементная модель плиты перекрытия**  
**Fig. 2. Finite element model of the floor slab**

Для обеспечения пространственной жесткости каркаса высотного здания применена симметричная расстановка вертикальных несущих конструкций, жесткие узлы для сопряжения несущими конструкциями, аутригерные системы [5].

Алгоритм расчета на прогрессирующее обрушение состоит из следующих этапов:

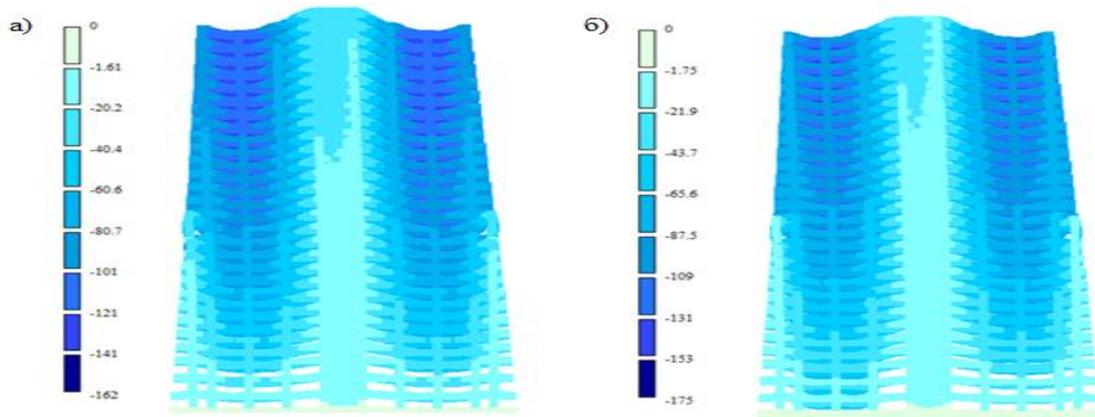
- расчет напряженно-деформированного состояния элементов каркаса здания при нормальной эксплуатации;
- из расчетной модели исключается несущий элемент, мгновенное удаление которого моделируется усилием с обратным знаком, определенное по результатам расчета в стадии нормальной эксплуатации;
- определение напряженно-деформированного состояния каркаса, возникающее при локальном разрушении;
- анализ результатов расчета (проверка несущей способности элементов, критериев устойчивости, прогибов);
- при невыполнении условий проверки выполняется корректировка исходной расчетной схемы, и вновь выполняются расчет на прогрессирующее обрушение.

Места установки аутригерных этажей носят лишь рекомендательный характер, что позволяет исследовать вопрос о необходимости и устанавливаемой форме аутригерных этажей применительно к конкретному зданию [6].

**Обсуждение результатов.** Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния каркаса уникального здания в стадии нормальной эксплуатации (рис. 3 а).

Определен самый нагруженный элемент расчетной модели - колонна первого этажа. На втором этапе выключен из работы самый нагруженный несущий элемент.

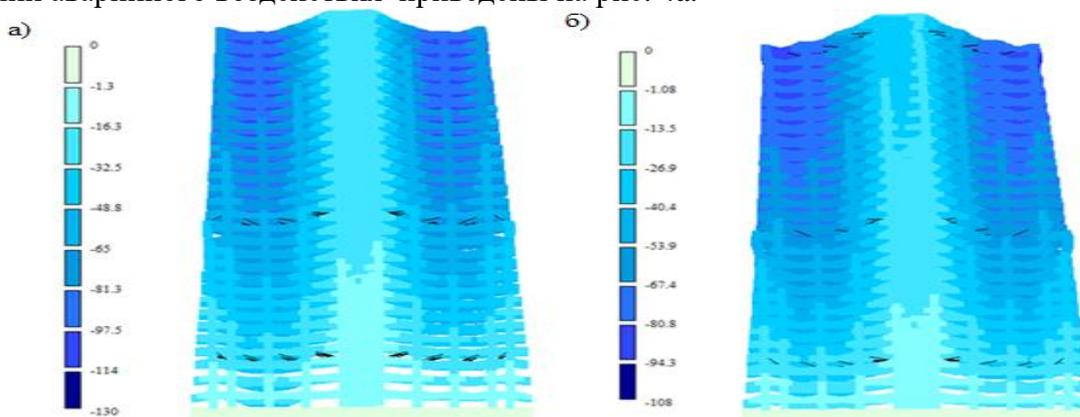
Таким образом, получена расчетная схема для имитационного моделирования прогрессирующего обрушения. Расчет выполнен шагово-итерационным методом с использованием нелинейного процессора. Шаг нагружения выбран автоматически с учетом его истории. Результаты расчета по вертикальным перемещениям с учетом цифрового моделирования аварийной ситуации по сценарию локального разрушения приведены на рис. 3б [7].



**Рис. 3. Вертикальные перемещения: а) нормальная стадия эксплуатации 1 варианта каркаса; б) аварийное воздействие на 1 вариант каркаса**  
**Fig. 3. Vertical movements: a) the normal stage of operation of the 1st frame option; b) emergency impact on frame variant 1**

Анализ результатов расчета в стадии нормальной эксплуатации и аварийном воздействии показал, что вертикальные прогибы элементов каркаса превышают допустимые.

Для обеспечения общей устойчивости каркаса здания, а также как мероприятие для защиты от возможного обрушения, решено ввести аутригерные этажи в конструктивную схему [8, 9]. Аутригерные конструкции расположены на одном из нижних этажей, а также на этаже с предусмотренным уменьшением количества колонн. Для более рационального перераспределения напряжений к жесткому ядру здания и для облегчения веса аутригерных конструкций, обеспечения унификации элементов и уменьшения экономических затрат по их возведению принято решение выполнить аутригерные этажи в форме железобетонных ферм [10, 11]. В этом случае раскосы ферм передадут сжимающие усилия на последующие колонны в направлении жесткого ядра каркаса. Результаты расчета 2 варианта конструктивной схемы при моделировании аварийного воздействия приведены на рис. 4а.



**Рис. 4. Вертикальные перемещения: а) аварийное воздействие на 2 вариант каркаса; б) аварийное воздействие на 3 вариант каркаса**  
**Fig. 4. Vertical movements: a) emergency action on the 2nd version of the frame; b) emergency action on frame option 3**

Максимальный прогиб все еще больше установленного предельно допустимого значения  $f/50$ . Решено установить дополнительный аутригерный этаж в уровне верхнего технического этажа. Результаты расчета для третьего варианта конструктивной схемы каркаса с учетом имитатора аварийного воздействия показаны на рис. 4б. Результатом введения дополнительного аутригерного этажа явилось полное соблюдение критериев проверки несущей способности элементов конструктивной системы: прогиб изгибаемых элементов не превышает  $1/50$  длины пролета; все элементы системы сохраняют устойчивость.

Выполнен модальный анализ расчетной схемы окончательного варианта каркаса здания [12-15]. Первые две формы колебаний носят поступательный характер, третья – изгибный, т.е. установка трех аутригерных этажей убрала из низших форм колебаний крутильный эффект (рис. 5).

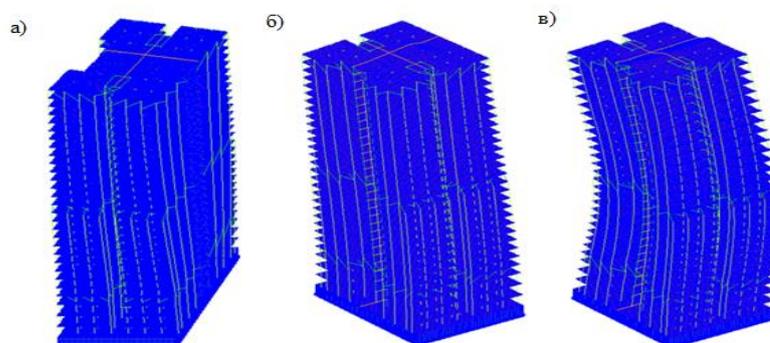


Рис. 5. Главные формы колебаний: а) 1 форма; б) 2 форма; в) 3 форма  
Fig. 5. Main modes of oscillation: a) 1 form; b) 2 form; c) 3 form

Исследована зависимость частот колебаний при изменении конструктивных решений каркаса уникального здания [16-18].

Сравнение результатов динамических характеристик трех вариантов каркаса здания представлено в графическом виде (рис. 6).

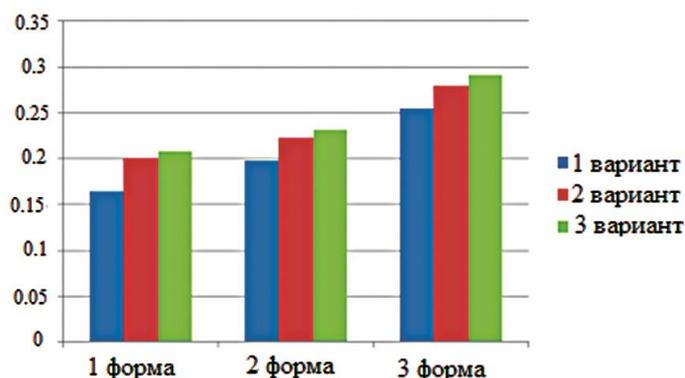


Рис. 6. Сравнение частот собственных колебаний по трем вариантам каркаса  
Fig. 6. Comparison of natural vibration frequencies for three frame options

В результате рационального конструирования каркаса уникального здания удалось снизить частоты собственных колебаний на 10-26%

**Вывод.** Для предупреждения прогрессирующего обрушения высотного здания выполнено цифровое моделирование аварийного воздействия. Разработан имитатор локального разрушения несущего элемента каркаса здания [19, 20]. При проведении серии численных экспериментов на аварийное воздействие учтена нелинейная работа материала.

В результате исследования каркаса здания с учетом аварийного воздействия разработана конструктивная схема уникального здания с тремя аутригерными этажами на отметках +13.800, +52.300, +101.300 (4-й, 15-й, 29-й этажи надземной части).

Подтверждением необходимости включения в расчетную схему данных конструкций явилось уменьшение вертикальных перемещений элементов каркаса здания и обеспечение его устойчивости. Анализ нескольких вариантов конструктивного исполнения элементов каркаса позволил выполнить требования об обеспечении общей устойчивости здания многофункционального комплекса и обеспечить выполнение требований, предусмотренных нормативно-правовыми актами.

По результаты исследований также предлагаются следующие рекомендации:

- увеличение жесткости каркаса в отношении скручивающих форм деформаций;

- выполнение мероприятий по усилению наиболее нагруженных элементов: колонн и плит перекрытий в области сопряжения плиты с колонной;
- выполнение мероприятий по усилению консольных свесов плит перекрытий.

На основании принципа системности в соответствии с теорией формообразования конструкций предложено элементы здания частично выполнить из стеклянных панелей. Это позволило сгладить строгую угловатую форму здания и визуально увеличить угол наклона боковых фасадов относительно вертикальной оси ядра жесткости.

Благодаря полученному окончательному варианту процесса формообразования, здание приобрело строгий, монументальный, но в тоже время мягкий и современный минималистический вид. Проект многофункционального комплекса способен привлечь внимание инвесторов в процессе строительства, а в будущем стать символом делового района и города.

#### Библиографический список:

1. Ereemeeva A.A., Pomorov S.B., Pojdina T.V. (2014) Parametris in architecture. Searches and solution. Barnaul, 118–122.
2. Mamieva I (2020) Analytical surfaces for parametric architecture in contemporary buildings and structures, *Academia. Architecture and Construction* №1, 150–165
3. Kravchenko G, Trufanova E, Boldyrev A (2018) Evolution of objects of parametris *Constr Archit* 6(4):44–4
4. V. Talapov BIM technology: The essence and features of building information modeling implementation, DMK-press, 410 (2015)
5. N. V. Fedorova, S. Yu. Savin. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review. *Building and Reconstruction*. – 2021. – No 3(95). – P. 76-108.
6. Kiakojour F. et al. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // *Eng. Struct. Elsevier*, 2020. Vol. 206, December 2019. P. 110061
7. Агаханов Г.Э. Решение задач механики деформируемого твердого тела с использованием фиктивных расчетных схем // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. - № 3. – 2015 с. 8-15.
8. Агаханов Э.К., Кравченко Г.М., Панасюк Л.Н., Труфанова Е.В. Реализация метода кинематической декомпозиции для расчетов в нелинейной постановке. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2014, Т. 35, №4.- с. 14-19..
9. Абдуразаков Г.М., Абакаров А.Д. Построение расчетных моделей оценки живучести рамных систем при сейсмическом воздействии в сборнике: вопросы современных технических наук: свежий взгляд и новые решения. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. 2015. с. 58-61.
10. Adam J.M. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // *Eng. Struct. Elsevier*, 2018. Vol. 173, № March. P. 122-14
11. Агаханов Э.К. О развитии комплексных методов решения задач механики деформируемого твердого тела». *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*, 2013.с. 14-19.
12. Кравченко Г.М., Коробкин А.П., Труфанова Е.В., Лукьянов В.И. Критерии оценки динамических моделей железобетонного каркаса здания, *Science Time*, 2014, с. 255-260.
13. Муртазалиев Г.М., Акаев А.И., Пайзулаев М.М. Основные соотношения начального этапа послекритического деформирования конструкций. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2013. № 28. С. 90-93.
14. Муртазалиев Г.М., Дибиргаджиев А.М Вариационные принципы механики конструкций. Сборник тезисов докладов XXXVI итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». Под ред. Т.А. Исмаилова. 2015. с. 118-119.
15. Агаханов Э.К. Развитие комплексных методов в механике деформируемого твердого тела, *Материалы Международной научно-практической конференции, ФГБОУ ВПО "ГГНТУ"*, г. Грозный, 2015. с. 99-105.
16. G. M. Kravchenko, E. V. Trufanova, D. S. Kostenko, S. G. Tsurikov. Structural concepts of high-rise buildings resistant to progressive collapse. *Materials Science Forum*. – 2018. – Vol. 931. – P. 54-59.
17. Труфанова Е.В., Панасюк Е.Л. Влияние упрощающих гипотез при моделировании объектов строительства на точность конструктивных результатов. *Наука и бизнес: пути развития*. 2013. № 8 (26). с. 11-18.
18. Bath K.-J. *Finite Element Procedures*. New Jersey: Prentice Hall, 1996.с.95-97.
19. Engel H. *Structure Systems*. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt. 1967. с.23-24.
20. Simbirkin V. Analysis of Reinforced Concrete Loadbearing Systems of Multistorey Buildings. *Modern Building Materials, Structures and Techniques: CD-ROM Proceedings of the 8th International Conference, Vilnius, May 19-21, 2004*.с.98-99.

#### References:

1. Ereemeeva AA, Pomorov SB, Pojdina TV (2014) Parametris in architecture. Searches and solution. Barnaul, 118–122
2. Mamieva I. Analytical surfaces for parametric architecture in contemporary buildings and structures, *Academia. Architecture and Construction*. 2020; 1:150–165
3. Kravchenko G, Trufanova E, Boldyrev A. Evolution of objects of parametris *Constr Archit*.2018; 6(4):44–4
4. V. Talapov BIM technology: The essence and features of building information modeling implementation, DMK-press, 2015; 410.
5. N. V. Fedorova, S. Yu. Savin. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review. *Building and Reconstruction*. 2021; 3(95): 76-108.
6. Kiakojour F. et al. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // *Eng. Struct. Elsevier*, December 2019. 2020; 206: 110061.

7. Agaxanov G.E. Reshenie zadach mekhaniki deformiruемого tverdogo tela s ispol'zovaniem fiktivny`x raschetny`x sxem / [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Texnicheskie nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2015; 3: 8-15. (In Russ)
8. Agaxanov E.K., Kravchenko G.M., Panasyuk L.N., Trufanova E.V. Realizaciya metoda kinematičeskoj dekompozicii dlya raschetov v nelinejnoj postanovke. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Texnicheskie nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2014; 35(4):14-19 (In Russ)
9. Abdurazakov G.M., Abakarov A.D. Postroenie raschetny`x modelej ocenki zhivuchesti ramny`x sistem pri sejsmičeskom vozdejstvii v sbornike: voprosy` sovremenny`x texnicheskix nauk: svezhij vzglyad i novy`e resheniya. Sbornik nauchny`x trudov po itogam mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii. 2015; 58-61. (In Russ)
10. Adam J.M. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. Eng. Struct. Elsevier, 2018; 173 (March): 122-14
11. Agaxanov E. K. O razvitii kompleksny`x metodov resheniya zadach mekhaniki deformiruемого tverdogo tela». [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Texnicheskie nauki], 2013; 14-19. (In Russ)
12. Kravchenko G.M., Korobkin A.P., Trufanova E.V., Luk`yanov V.I. Kriterii ocenki dinamicheskix modelej zhelezobetonno go karkasa zdaniya, Science Time, 2014; 255-260. (In Russ)
13. Murtazaliev G.M., Akaev A.I., Pajzulaev M.M. Osnovny`e sootnosheniya nachal`nogo e`tapa poslekritičeskogo deformirovaniya konstrukcij. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Texnicheskie nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2013;28: 90-93. (In Russ)
14. Murtazaliev G.M., Dibirgadzhiyev A.M Variacionny`e principy` mekhaniki konstrukcij. Sbornik tezisov dokladov XXXVI itogovoj nauchno-texničeskoj konferencii prepodavatelej, sotrudnikov, aspirantov i studentov FGBOU VO «Dagestanskij gosudarstvenny`j texničeskij universitet». Pod red. T.A. Ismailova. 2015;118-119. (In Russ)
15. Agaxanov E. K. Razvitie kompleksny`x metodov v mekhanike deformiruемого tverdogo tela, Materialy` Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii, FGBOU VPO "GGNTU", g. Grozny`j, 2015; 99-105. (In Russ)
16. G. M. Kravchenko, E. V. Trufanova, D. S. Kostenko, S. G. Tsurikov. Structural concepts of high-rise buildings resistant to progressive collapse. *Materials Science Forum*. 2018; 931: 54-59. (In Russ)
17. Trufanova E.V., Panasyuk E.L. Vliyanie uproshhayushhix gipotez pri modelirovanii ob`ektov stroitel`stva na točnost` konstruktivny`x rezul'tatov. [Nauka i biznes: puti razvitiya] Science and business: ways of development. 2013;8 (26): 11-18. (In Russ)
18. Bath K.-J. Finite Element Procedures. New Jersey: *Prentice Hall*, 1996; 95-97.
19. Engel H. Structure Systems. Stuttgart: *Deutsche Verlags-Anstalt*. 1967; 23-24.
20. Simbirkin V. Analysis of Reinforced Concrete Loadbearing Systems of Multistorey Buildings. Modern Building Materials, Structures and Techniques: *CD-ROM Proceedings of the 8th International Conference, Vilnius, May 19-21, 2004*; 98-99.

**Сведения об авторах:**

Агаханов Элифхан Керимханович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортные сооружения и строительные материалы», [Elifhan@bk.ru](mailto:Elifhan@bk.ru)

Кравченко Галина Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика», доцент, [galina.907@mail.ru](mailto:galina.907@mail.ru)

Кадомцев Максим Игоревич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Медиа технологии», [kadomtsev@mail.ru](mailto:kadomtsev@mail.ru)

Труфанова Елена Васильевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика», [el.trufanova@mail.ru](mailto:el.trufanova@mail.ru)

Савельева Нина Александровна, старший преподаватель кафедры «Техническая механика», [ninasav86@mail.ru](mailto:ninasav86@mail.ru)

**Information about the authors:**

Elifkhan K. Agakhanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of Transport Facilities and Building Materials, [Elifhan@bk.ru](mailto:Elifhan@bk.ru)  
Galina M. Kravchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technical Mechanics, Associate Professor, [galina.907@mail.ru](mailto:galina.907@mail.ru)

Maksim I. Kadomtsev, Cand. Sci. (Phys. and Mathem.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Media Technologies, [kadomtsev@mail.ru](mailto:kadomtsev@mail.ru)

Elena V. Trufanova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technical Mechanics, [el.trufanova@mail.ru](mailto:el.trufanova@mail.ru)

Nina A. Savelyeva, Senior Lecturer, Department of Technical Mechanics, [ninasav86@mail.ru](mailto:ninasav86@mail.ru)

**Конфликт интересов / Conflict of interest.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

**Поступила в редакцию/ Received** 24.01.2022.

**Одобрена после рецензирования / Revised** 05.02.2022.

**Принята в печать / Accepted for publication** 05.02.2022.