

УДК 693;539.4

**Страхов Дмитрий Евгеньевич**

кандидат технических наук, доцент

E-mail: [strahov@kgasu.ru](mailto:strahov@kgasu.ru)

**Гимранов Линур Рафаилович**

кандидат технических наук, доцент

E-mail: [leenur@mail.ru](mailto:leenur@mail.ru)

**Сахапова Алина Ильдаровна**

студент

E-mail: [wertea@yandex.ru](mailto:wertea@yandex.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

**Применение объемных конечных элементов,  
на примере пожарной каланчи, находящейся в г. Сарапул,  
являющейся памятником архитектуры федерального значения**

**Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследования – выявить возможности эффективного применения программных комплексов, в линейной и нелинейной постановке, для решения нетиповых задач с использованием объемных конечных элементов.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в анализе напряженно-деформированного состояния несущей системы здания Пожарной каланчи в г. Сарапул.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в выявлении закономерностей напряженно-деформированного состояния конструкций здания, зон предположительного образования трещин и пригодности здания к дальнейшей эксплуатации.

**Ключевые слова:** объёмные конечные элементы, расчетные комплексы, расчетные модели, нелинейный расчет, кирпичные своды, реконструкция.

**Введение**

На сегодняшнее время метод конечных элементов является основным и самым распространенным инструментом, лежащим в основе современных программных комплексов (таких как ANSYS, ЛИРА, MicroFe, STARK ES и т.д.). Разнообразие решаемых прикладных и наукоемких задач, в таких программных комплексах, обеспечивается широким спектром разработанных библиотек конечных элементов, включающих точечные, стержневые, пластинчатые и объемные элементы.

В большинстве рассматриваемых задач, по определению внутренних усилий в несущих элементах, при расчетах инженерных конструкций, используют стержневые и пластинчатые элементы. Данные элементы позволяют достаточно точно определять внутренние усилия в элементах, при довольно малом соотношении габаритов поперечного сечения к длине конструктивного элемента. Однако, существует определенная область практических задач в которых пластинчатые элементы недостаточно полно отражают напряженно-деформированное состояние исследуемых конструкций. К таким задачам можно отнести: задачи, в которых габариты сечения сопоставимы с длинами элементов (объемные сложные ростверки, толстые стены в основаниях высотных зданий и так далее.); задачи в которых используется ортотропный материал (кладка стен, обычная и клееная древесина, композиционные материалы); сводчатые конструкции, различных разновидностей.

Для повышения релевантности создаваемых моделей реконструируемых зданий и получаемых результатов нами предложено использовать объемные конечные элементы в виде тетраэдров и параллелепипедов [1]. Данные элементы включают в себя возможность задания линейной и нелинейной ортотропии, нелинейных характеристик, таких как анизотропия, пластичность, ползучесть. Решение таких задач известно методами

численного моделирования конструкции различной конфигурации, так и экспериментальным изучением механизмов разрушения [2-5]. Отметим, что моделирование зданий сложной конфигурации представляет собой непростую задачу [6], с необходимостью применения программных комплексов, способных моделировать сложные конструктивные элементы [7]. На определенном этапе развития возможностей расчетных систем, применение конечных элементов в виде тетраэдров и параллелепипедов вызывало значительные трудности, как в методике построения модели, так и в значительном объеме и времени производимых вычислений. На данный период времени, за счет оптимизации алгоритмов вычислений, лидеров отрасли программного обеспечения и возросших возможностей расчетных машин, применение объемных конечных элементов наиболее актуально.

### **Исследование здания Пожарной каланчи**

В выполненной работе, для более точного и детального анализа поведения несущего остова здания Пожарной каланчи в городе Сарепул, являющимся памятником архитектуры федерального значения, использовались объемные конечные элементы. Данный подход к решению поставленной задачи, был продиктован ортотропным материалом кладки и довольно габаритным поперечным сечением исследуемых элементов.

Рассматриваемое в данной работе здание пожарной каланчи, в настоящее время двухэтажное, с пятиэтажной башней вышки. Пожарная каланча находится по адресу г. Сарепул, площадь Свободы, 5. являющейся одной из высочайших точек города (96 метров над уровнем моря). В архитектурной композиции преобладает ярко выраженный центризм: все симметричные формы сходятся в одной центральной точке, которой является вышка. Центральная часть фасада здания выделена выступом, ее венчает ступенчатый фронтон. Остальные стороны каланчи имеют рельефные горизонтальные пояса и другие декоративные элементы. Вышка Сарепульской пожарной каланчи состоит из трех частей – четвериков, ее логическое завершение – смотровая площадка.

Построено здание пожарной части в русско-византийском стиле. Проект строения разработал известный архитектор И.А. Чарушин. На первом этаже здания находился манеж с восемью большими двустворчатыми воротами, на втором этаже были квартиры пожарных с семьями и пожарного мастера. Третий, четвертый и пятый этажи – башня, наверху которой находилась смотровая площадка. Строительные работы по возведению пожарной каланчи велись с 1886 года по 1887 год.

Конструктивная схема исследуемого здания – стеновая, с основными несущими наружными и внутренними кирпичными стенами. Наружные и внутренние несущие и самонесущие стены первого и второго этажа выполнены толщиной до 1000 мм. Толщина стен башни в уровне первого этажа – 1900 мм, в уровне второго и третьего этажа – 1800 мм, в уровне четвертого этажа – 1300 мм, в уровне пятого этажа – 1000 мм, в уровне смотровой площадки – 610 мм.

Расчет здания был выполнен в программном комплексе Лира-САПР [8]. Расчет велся в линейной и нелинейной постановке. Количество узлов в расчетной схеме – 59241, количество элементов – 212354.

Общий вид здания представлен на рис. 1, вид модели представлен на рис. 2-4. Расчетная модель включала в себя несущие стены, своды, деревянное перекрытие, стальные балки под своды и несущее основание. Нагрузки на исследуемое здание приняты согласно нормативам строительства [9]. Собственный вес несущих стен, сводов, учитывался в расчетной схеме. Собственный вес грунтовых насыпок прикладывался в случае перекрытия – к балкам под своды, в случае чердачного покрытия к несущим стенам в уровне примыкания чердачных балок перекрытия.

Максимальные допустимые напряжения в кирпичной кладке приняты с учетом [9], как для гомогенной модели. Результаты расчета приводятся для несущих стен по осям, принятым согласно рис. 5. Результаты статического расчета приведены на рис. 6-18. Напряжения в элементах приведены в МПа, ось X расположена вдоль длинной стороны здания.



Рис. 1. Общий вид здания

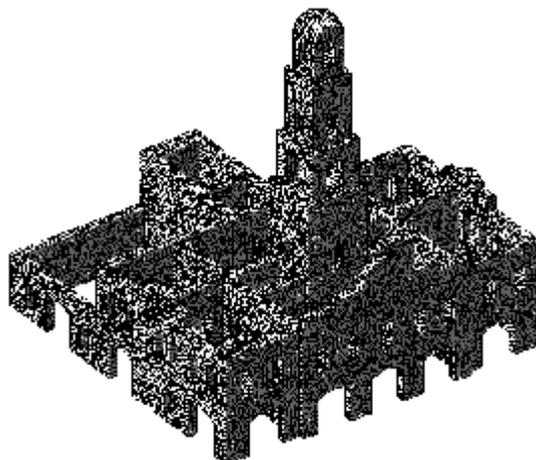


Рис. 2. Расчетная схема здания пожарной каланчи

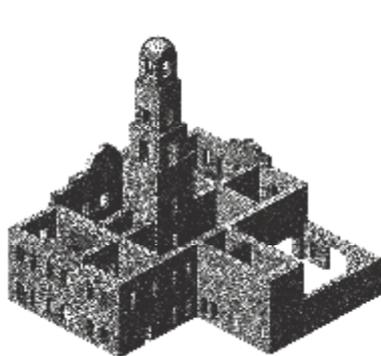


Рис. 3. Расчетная схема (вид слева)

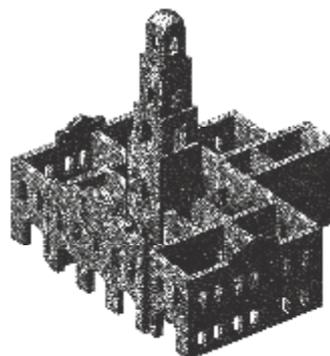


Рис. 4. Расчетная схема (вид справа)

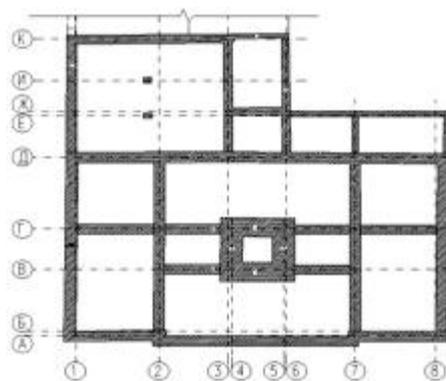


Рис. 5. План здания

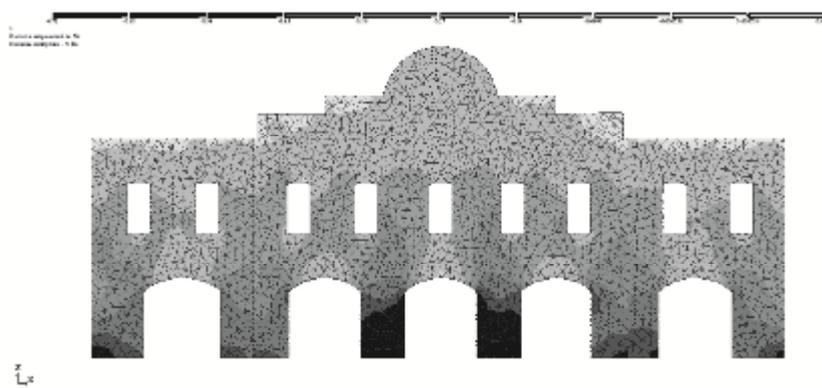


Рис. 6. Нормальные напряжения  $N_z$  в стене в осях А/1-8 с наружной стороны

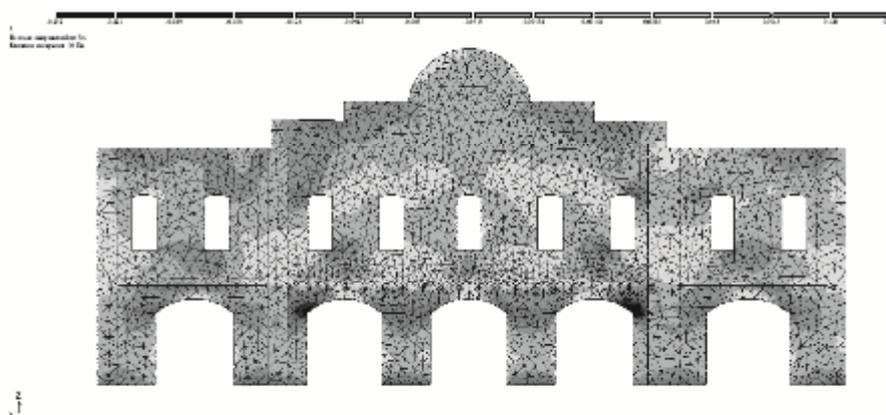


Рис. 7. Нормальные напряжения  $N_x$  в стене в осях А/8-1 с внутренней стороны

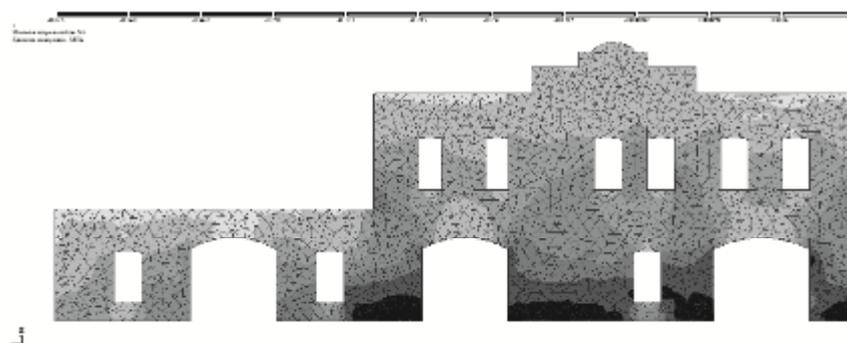


Рис. 8. Нормальные напряжения  $N_z$  в стене в осях 1/К-А с наружной стороны

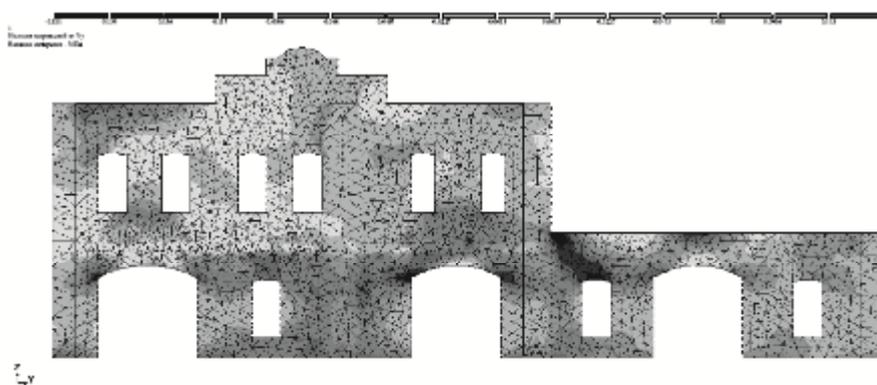


Рис. 9. Нормальные напряжения  $N_y$  в стене в осях 1/ А-К с внутренней стороны

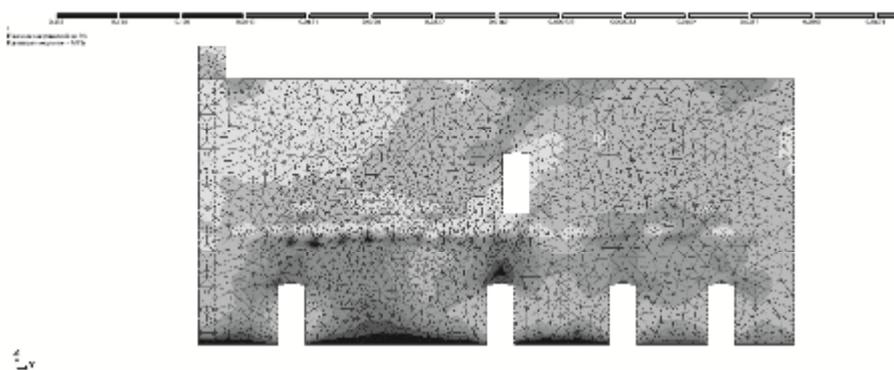


Рис. 10. Нормальные напряжения  $N_y$  в стене в осях 7/ А-Д со стороны оси 8

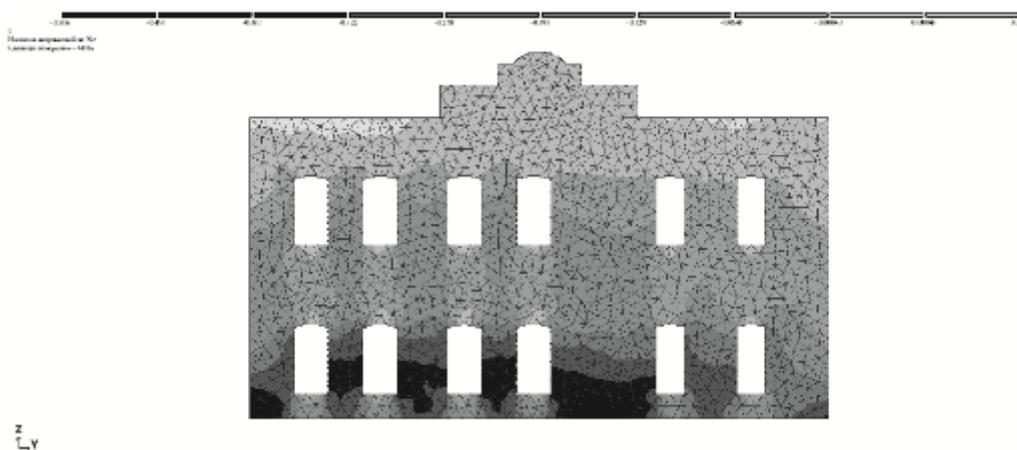


Рис. 11. Нормальные напряжения  $N_z$  в стене в осях 8/А-Д с наружной стороны

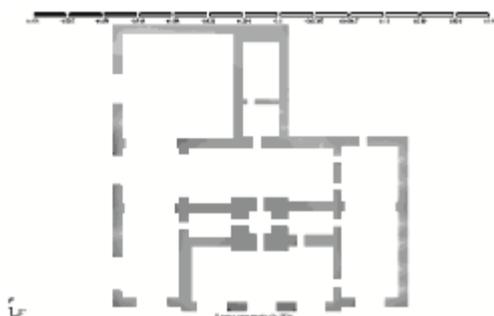


Рис. 12. Вертикальные напряжения на обрез фундамента

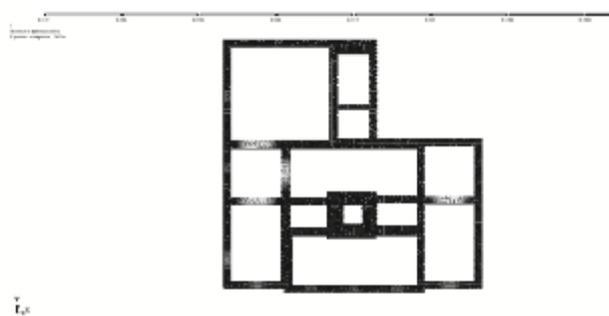


Рис. 13. Напряжения под подошвой фундамента

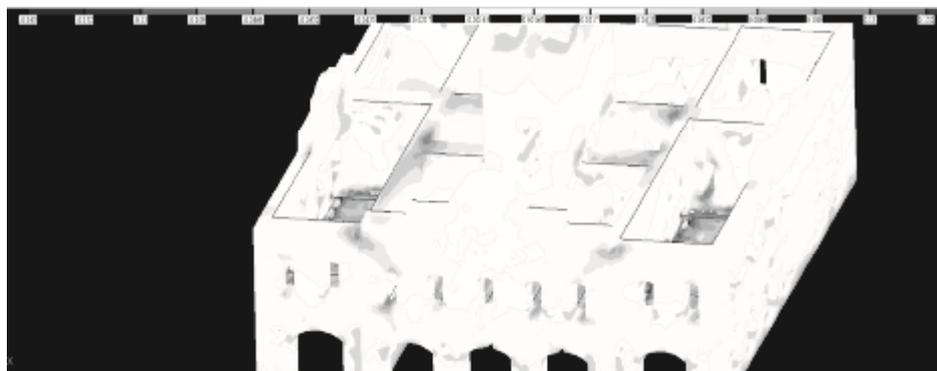


Рис. 14. Общий вид здания, зоны предположительного образования трещин

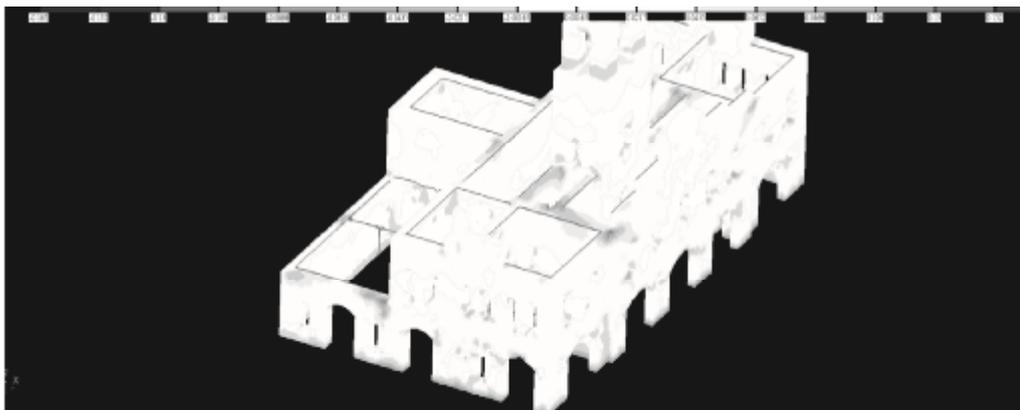


Рис. 15. Общий вид здания, зоны предположительного образования трещин

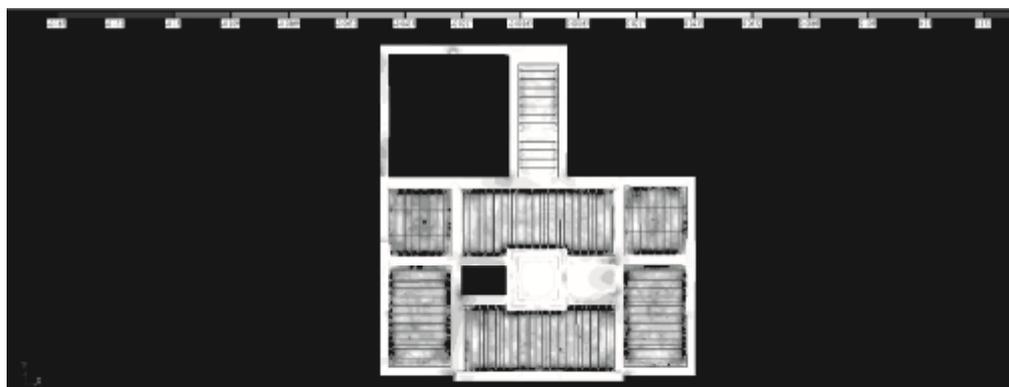


Рис. 16. Вид сверху, зоны предположительного образования трещин

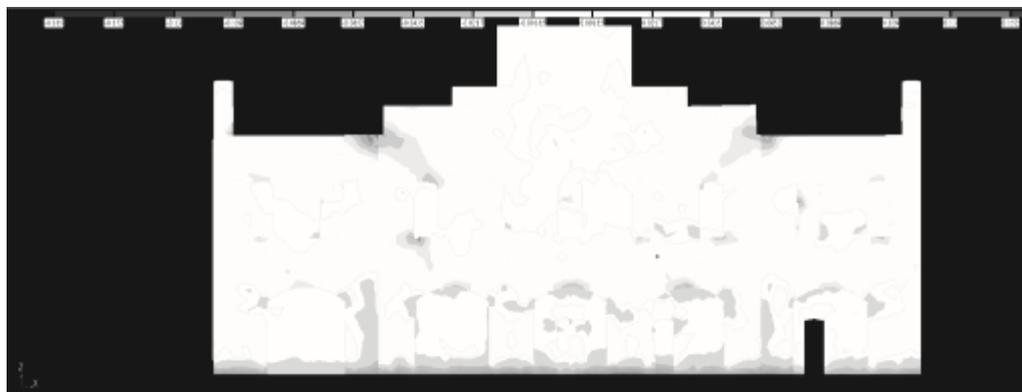


Рис. 17. Зоны предположительного образования трещин в несущих стенах здания

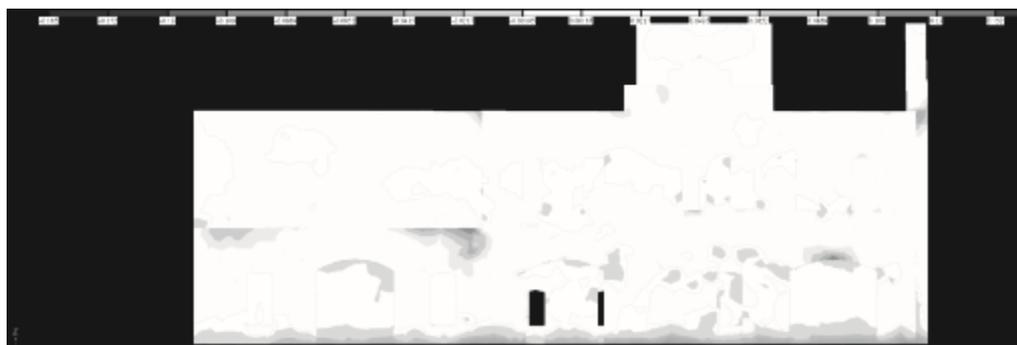


Рис. 18. Зоны предположительного образования трещин в несущих стенах здания

По результатам расчета получены напряжения в сводах, стенах и бутовом фундаменте. Участки несущих конструкций с напряжением в несущих элементах (табл.). По результатам линейного расчета прочности кирпичных стен и бутового фундамента достаточно для восприятия действующих напряжений.

Таблица

**Действующие напряжения в стенах**

Координаты стены	Напряжения (МПа)				Процент использования
	Сжатия		Растяжения		
	По высоте	Вдоль стены	По высоте	Вдоль стены	
A/1-8	0,72	0,252	0,074	0,126	80 %
B/1-8	0,461	0,316	0,06	0,04	59 %
Г/1-8	0,511	0,218	0,073	0,073	57 %
Д/1-8	0,512	0,189	0,085	0,108	68 %
К/1-6	0,707	0,119	0,03	0,03	78 %
1/К-А	0,626	0,181	0,0782	0,113	71 %
2/Д-А	0,57	0,165	0,712	0,118	73 %
3/К-А	0,45	0,179	0,001	0,0897	55 %
5/К-А	0,587	0,089	0,001	0,089	65 %
7/Д-А	0,457	0,135	0,06	0,0674	51 %

Согласно [10], в значительной части исторических зданий со сводчатыми конструкциями выявляются типовые дефекты, возникающие из-за подвижек [11, 12], разрушения опор, или растеске дополнительных проемов под пятнами сводов. Для наиболее полной оценки напряженно-деформированного состояния проведен нелинейный расчет здания. Согласно расчету, выявлены элементы с напряжениями, превышающими допускаемые значения, в которых возможно образование трещин в кирпичной кладке (рис. 14-18). Данные элементы находятся под опорными элементами балок перекрытий, и в процессе эксплуатации произошло возможное перераспределение напряжения с последующей стабилизацией образовавшихся трещин. Учет нелинейности деформирования, позволил выявить резервы несущей способности как отдельных элементов, а также их сопряжений так и всей системы в целом, с учетом возможных перераспределений усилий в несущей системе.

**Заключение**

Проведение исследования напряженно-деформированного состояния с использованием объемных конечных элементов, при создании модели Пожарной каланчи в г. Сарепул, позволило наиболее полно оценить распределение напряжений в габаритных поперечных сечениях исследуемых элементов с оценкой состояния несущих конструкций и рекомендуется для дальнейшего применения.

**Список библиографических ссылок**

1. Страхов Д. Е., Сахапова А. И. Применение объемных конечных элементов в реконструируемых зданиях архитектурного наследия // Известия КГАСУ. 2017. № 4 (42). С. 189–195.
2. Milani G. Upper bound sequential linear programming mesh adaptation scheme for collapse analysis of masonry vaults // Advances in Engineering Software. 2015. № 79. P. 91–110.
3. Tianyi Yi. PhD Thesis : Experimental Investigation and Numerical Simulation of an Unreinforced Masonry Structure with Flexible Diaphragms. Georgia Institute of Technology. 2004. 671 p.

4. Anania L., Badala A., D'Agata G. The post strengthening of the masonry vaults by the  $\Omega$ -Wrap technique based on the use of C-FRP // *Construction and Building Materials*. 2013. № 47. P. 1053–1068.
5. Cancelliere I., Imbimbo M., Sacco E. Experimental tests and numerical modeling of reinforced masonry arches // *Engineering Structures*. 2010. № 32. P. 776–792.
6. Беспалов В. В., Зимин С. С. Прочность каменной кладки сводчатых конструкций // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2016. № 11 (50). С. 37–51.
7. Зимин С. С., Беспалов В. В., Казиминова А. С. Расчетная модель каменной арочной конструкции // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2015. № 3 (113). С. 33–37.
8. Водопьянов Р. Ю., Титок В. П., Артамонова А. Е. Под редакцией академика РААСН Городецкого А. С. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2015. Руководство пользователя. Обучающие примеры. М., 2015. 460 с.
9. Bespalov V., Orlovich R., Zimin S. Stress-Strain State of Brick Masonry Vault with an Aperture. *MATEC Web of Conferences*. № 53, 001009. 6 p.
10. Бессонов Г. Б. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. М. : Союзреставрация, 1989. 171 с.
11. Павлов В. В., Хорьков Е. В. Экспериментальные исследования работы усиленных кирпичных арок при горизонтальной подвижке опор // *Известия КГАСУ*. 2014. № 2 (28). С. 90–96.
12. Соколов Б. С., Антаков А. Б. Исследования сжатых элементов каменных и армокаменных конструкций. М. : АСВ, 2010. 104 с.

**Strahov Dmitry Evgenevich**

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [strahov@kgasu.ru](mailto:strahov@kgasu.ru)

**Gimranov Linur Rafailevich**

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [leenur@mail.ru](mailto:leenur@mail.ru)

**Sahapova Alina Ildarovna**

student

E-mail: [wertea@yandex.ru](mailto:wertea@yandex.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Application of volume finite elements, on the example of fire maypole in Sarapul city – the monument of architecture of federal value****Abstract**

*Problem statement.* The purpose of the study is to identify the possibilities of effective application of software systems, in a linear and non-linear setting, for solving non-standard problems using volumetric finite elements.

*Results.* The main results of the research consist in the analysis of the stress-strain state of the bearing system of the building of the fire maypole in the city of Sarapul.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry is to identify the patterns of the stress-strain state of the building's structures, the zones of supposed crack formation and the suitability of the building for further operation.

**Keywords:** volumetric finite elements, computational complexes, design models, nonlinear calculation, brick arches, reconstruction.

### References

1. Strakhov D. E., Sahapova A. I. Application of volumetric finite elements in reconstructed buildings of architectural heritage // *Izvestiya KGASU*. 2017. № 4 (42). P. 189–195.
2. Milani G. Upper bound sequential linear programming mesh adaptation scheme for collapse analysis of masonry vaults // *Advances in Engineering Software*. 2015. № 79. P. 91–110.
3. Tianyi Yi. PhD Thesis : Experimental Investigation and Numerical Simulation of an Unreinforced Masonry Structure with Flexible Diaphragms. Georgia Institute of Technology. 2004. 671 p.
4. Anania L., Badala A., D'Agata G. The post strengthening of the masonry vaults by the  $\Omega$ -Wrap technique based on the use of C-FRP // *Construction and Building Materials*. 2013. № 47. P. 1053–1068.
5. Cancelliere I., Imbimbo M., Sacco E. Experimental tests and numerical modeling of reinforced masonry arches // *Engineering Structures*. 2010. № 32. P. 776–792.
6. Bespalov V. V., Zimin S. S. Strength of masonry of vaulted structures // *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*. 2016. № 11 (50). P. 37–51.
7. Zimin S. S., Bespalov V. V., Kazimirova A. S. Calculation model of stone arch structure // *Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2015. № 3 (113). P. 33–37.
8. Vodopyanov R. Yu., Titok V. P., Artamonova A. E. Edited by academician RAASN Gorodetsky A. S. Program package LIRA-CAD 2015. User's manual. Learning examples. M., 2015. 460 p.
9. Bespalov V., Orlovich R., Zimin S. Stress-Strain State of Brick Masonry Vault with an Aperture. MATEC Web of Conferences. № 53, 001009. 6 p.
10. Bessonov G. B. Research of deformations, calculation of bearing ability and constructive strengthening of ancient spacer systems. M. : Soyusrestovratsiya, 1989. 171 p.
11. Pavlov V. V., Khorkov E. V. Experimental studies of the work of reinforced brick arches with horizontal support of supports // *Izvestiya KGASU*. 2014. № 2 (28). P. 90–96.
12. Sokolov B. S., Antakov A. B. Studies of compressed elements of stone and armored structures. M. : ASV, 2010. 104 p.