УДК 693;539.4
Страхов Д.Е. – кандидат технических наук, доцент
E-mail: strahov@kgasu.ru
Сахапова А.И. – студент
Казанский государственный архитектурно-строительный университет
Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Применение объемных конечных элементов в реконструируемых зданиях архитектурного наследия

Аннотация

Постановка задачи. Работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния, реконструируемого объекта архитектурного наследия, сложной конфигурации, со сводчатыми конструкциями. Задача решается с применением объёмных элементов в расчетной схеме здания.

Результаты. Определяется напряженно-деформированное состояние несущей системы, закономерности влияния повреждений на несущую способность и пригодность к дальнейшей эксплуатации, с рекомендациями для дальнейшего применения.

Выводы. Установлено, что основной причиной возникновения перенапряжений сводчатых перекрытия является отсутствие распора, от демонтированных и замененных на плоские перекрытия сводов, который должен компенсироваться распором от соседних сводов, а также не сохранившихся стальных затяжек.

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

Создание адекватной, информативной модели напряженно-деформированного состояния зданий сложной конфигурации, в том числе являющихся объектами архитектурного наследия, несущими культурно-историческую ценность, является необходимой мерой при проведении реконструкции.

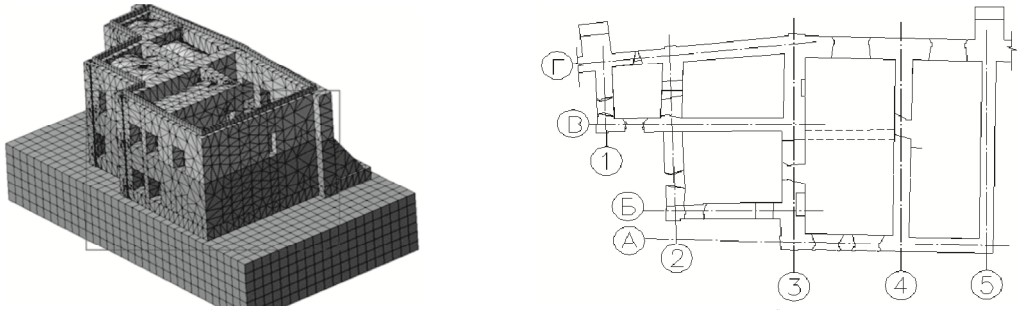
В значительной части таких зданий присутствуют сводчатые конструкции, различных разновидностей. Зачастую данные конструкции находятся в ненадлежащем состоянии в основном из-за горизонтальных и вертикальных подвижек опор, возникших в результате просадок, разрушении опор или растеске дополнительных проемов под пятой свода [1]. Исследование распределения напряжений в телах таких конструкций, и конструкций всего здания, является на сегодняшнее время достаточно актуальной задачей.

Для решения поставленной задачи известны, как методы численного моделирования сводчатых конструкции различной конфигурации [2; 3], так и экспериментальное изучение механизмов разрушения кирпичных сводов [4; 5]. Однако, следует учесть, что при учете типов опорных закреплений, и наличия затяжек, в основном не учитываются жесткости опорных стен. Между тем, подвижки опор и опорные жесткости часто имеют большое влияние на поведение, как арок, так и сводов [6]. Следует отметить, что моделирование каменных сводов представляет собой достаточно сложную задачу [7], с необходимостью использования программных комплексов, способных моделировать сложные конструкции и криволинейные упругие элементы [8].

На примере Монастырского училища Свияжского Успенско-Богородицкого мужского монастыря произведен анализ распределения напряжений в несущих элементах здания. Определены закономерности влияния повреждений на несущую способность и пригодность к дальнейшей эксплуатации.

Здание Монастырского училища Свияжского Успенско-Богородицкого мужского монастыря двухэтажное. Построено на рубеже XII-XVIII вв., в период обновления и благоустройства основной обители, продолжавшийся с конца XVII и до середины XVIII вв. Здание расположено на западном прясле монастырской ограды, представляет собой прямоугольное в плане строение с выступами со стороны главного восточного фасада и изломом западного фасада, обусловленном направлением монастырской ограды. В 1957 г. северная часть здания была перестроена, сводчатые перекрытия в этой части здания были заменены плоскими. В остальных помещениях здания перекрытия сводчатые. Кровля вальмовая, четырехскатная. Конструктивная схема здания стеновая, с основными несущими наружными и внутренними продольными и поперечными кирпичными стенами. Наружные несущие и самонесущие стены выполнены толщиной 620-1200 мм. Фундаменты – ленточные, из бутового камня на известковом растворе.

Расчет здания был выполнен в программном комплексе ANSYS. Общий вид модели представлен на рис. 1. Расчетная модель включала в себя несущие стены, своды, бутовый фундамент, и несущее основание. Нагрузки приняты согласно нормативам строительства СП 20.13330.2016 «Свод Правил. Нагрузки и воздействия». Упругие характеристики кладки приняты как для гомогенной модели, с учетом [9]. Максимальные допустимые напряжения в кирпичной кладке приняты согласно СП 15.13330.2012 «Свод Правил. Каменные и армокаменные конструкции».



а) б)

Рис. 1. Здание монастырского училища: а) расчетная схема; б) план

Результаты статического расчета с учетом упругого основания приведены на рис. 2-17. Напряжения в элементах приведены в МПа, ось X – вдоль длинной стороны здания.

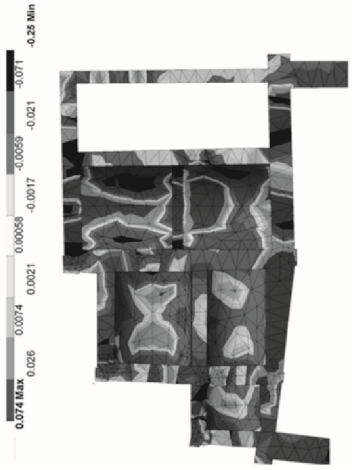


Рис. 2. Нормальные напряжения вдоль оси X вид снизу (1 этаж)

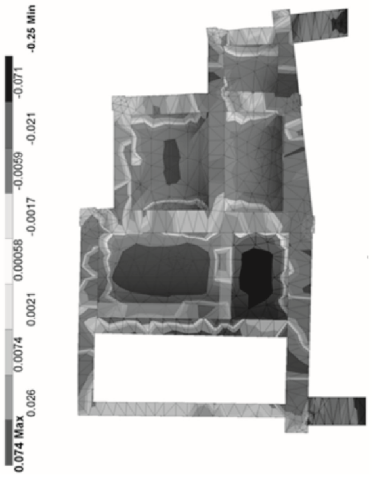


Рис. 3. Нормальные напряжения

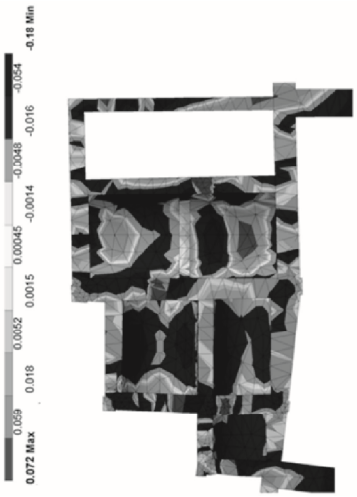


Рис. 4. Нормальные напряжения вдоль оси Y вид снизу (1 этаж)

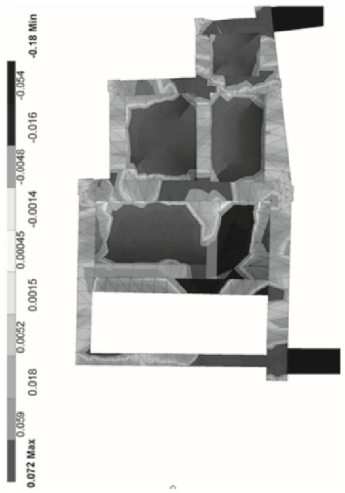


Рис. 5. Нормальные напряжения вдоль оси Y вид сверху (1 этаж)

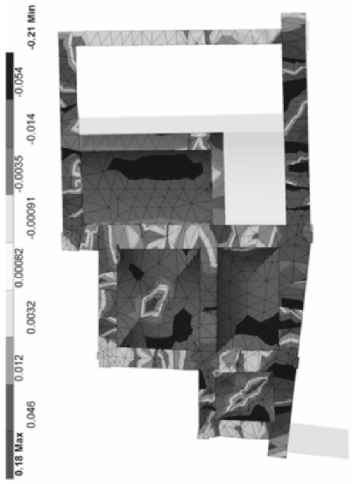


Рис. 6. Нормальные напряжения вдоль оси X вид снизу (2 этаж)

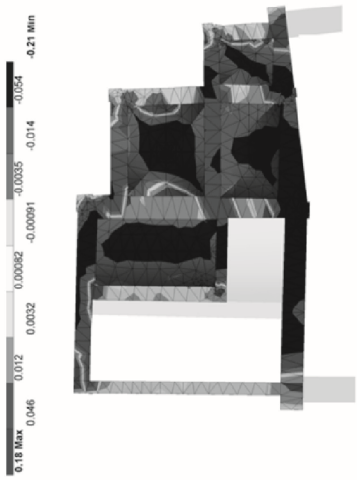


Рис. 7. Нормальные напряжения вдоль оси X вид сверху (2 этаж)

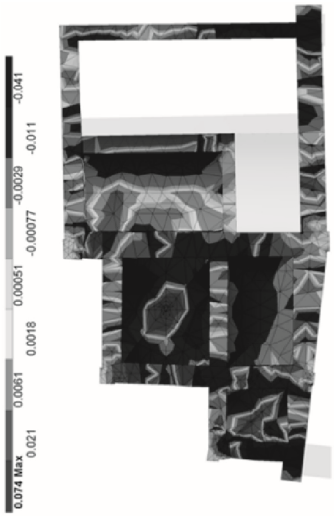


Рис. 8. Нормальные напряжения вдоль оси Y вид снизу (2 этаж)

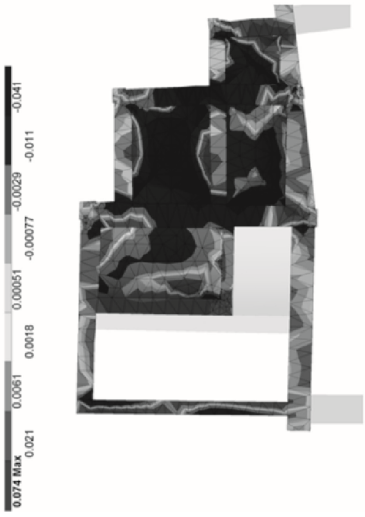


Рис. 9. Нормальные напряжения вдоль оси Y вид сверху (2 этаж)

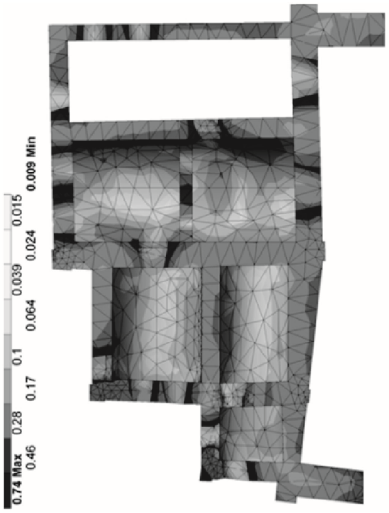


Рис. 10. Эквивалентные напряжения вид снизу (1 этаж)

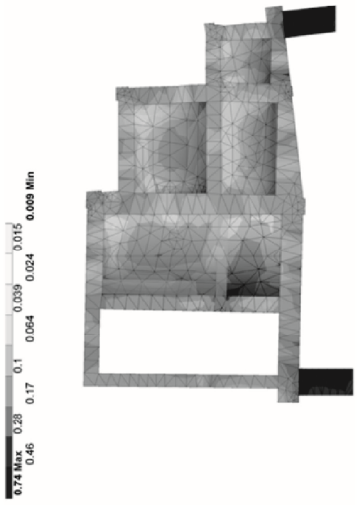


Рис. 11. Эквивалентные напряжения вид сверху (1 этаж)

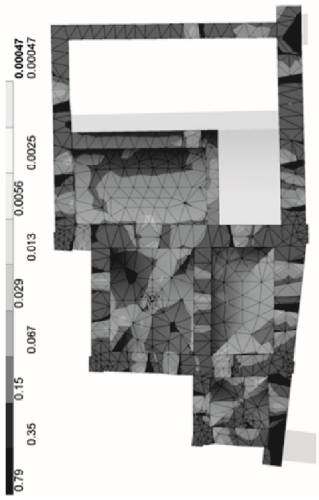


Рис. 12. Эквивалентные напряжения вид снизу (2 этаж)

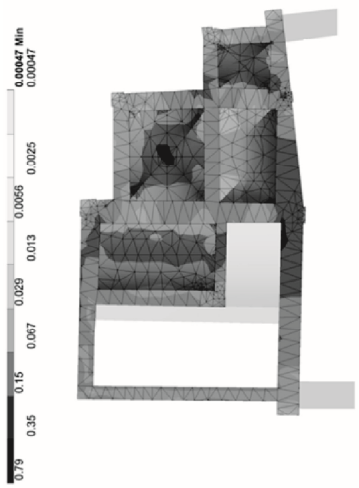


Рис. 13. Эквивалентные напряжения вид сверху (2 этаж)

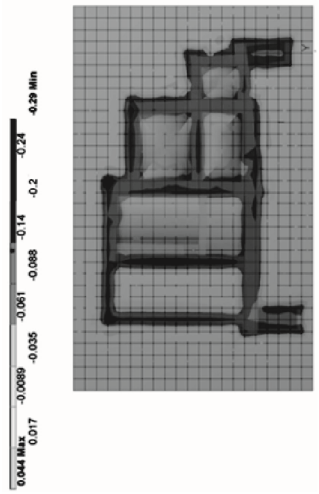


Рис. 14. Напряжения, возникающие под подошвой фундамента

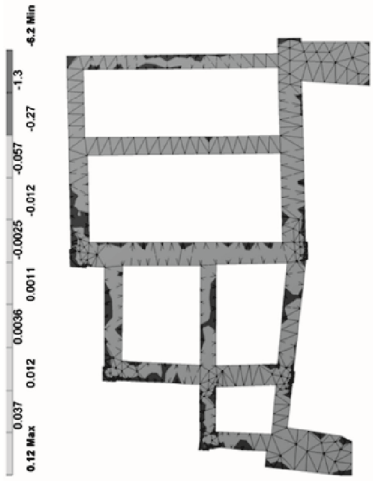


Рис. 15. Эквивалентные напряжения в бутовом фундаменте

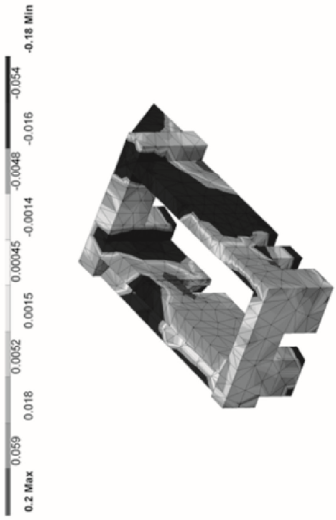


Рис. 16. Нормальные напряжения вдоль оси Y в стенах 4/А-Г и 5/А-Г

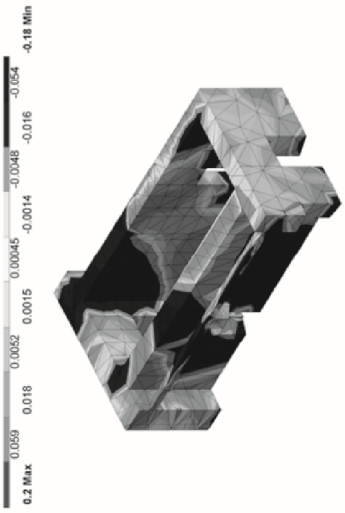


Рис. 17. Нормальные напряжения вдоль оси Y в стенах 4/А-Г и 5/А-Г

По результатам расчета получены напряжения в сводах, стенах и бутовом фундаменте. Участки несущих конструкций с перенапряжением несущих элементов (табл. 1-4). Прочности кирпичных стен и бутового фундамента достаточно для восприятия действующих напряжений.

Таблица 1

Действующие напряжения в сводах первого этажа по оси X (вдоль буквенных осей)

Координаты свода	Напряжения (МПа)				
	Сжатия		Растяжения		Перенапряжение
3-4/А-Г	0,25	Рис. 4	0,074	Рис. 3	85 %

Таблица 2

Действующие напряжения в сводах первого этажа по оси Y (вдоль цифровых осей)

Координаты свода	Напряжения (МПа)				
	Сжатия		Растяжения		Перенапряжение
3-4/А-Г	0,18	Рис. 6	0,072	Рис. 5	80 %

Таблица 3

Действующие напряжения в сводах второго этажа по оси X (вдоль буквенных осей)

Координаты свода	Напряжения (МПа)				
	Сжатия		Растяжения		Перенапряжение
1-2/В-Г	0,21	Рис. 8	0,046	Рис. 7	15 %
2-3/Б-В	0,21	Рис. 8	0,046	Рис. 7	15 %

Таблица 4

Действующие напряжения в сводах второго этажа по оси Y (вдоль цифровых осей)

Координаты свода	Напряжения (МПа)				
	Сжатия		Растяжения		Перенапряжение
1-2/В-Г	0,16	Рис. 9	0,074	Рис. 10	85 %
2-3/Б-В	0,16	Рис. 9	0,074	Рис. 10	85 %

Установлено, что основной причиной возникновения перенапряжений сводчатых перекрытия является отсутствие распора от демонтированных и замененных на плоские перекрытия, сводов в осях 4-5, которые должны компенсироваться распором от сводов в осях 3-4, а также не сохранившихся стальных затяжек. Перенапряжение отдельных несущих конструкций в указанных выше местах привело к возникновению дефектов в виде трещин.

Дополнительным поверочным расчетом установлено, что при восстановлении сводов в осях 4-5 и наличия в расчетной схеме стальных затяжек, перенапряжения в несущих элементах отсутствуют.

Таким образом, решение задач реконструкции объектов архитектурного наследия, с применением объёмных элементов в расчетной схеме здания, показало свою эффективность в анализе напряженно-деформированного состояния и рекомендуется для дальнейшего применения.

Список библиографических ссылок

1. Бессонов Г. Б. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. М. : Союзреставрация, 1989. 171 с.
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. Experimental Investigation and Numerical Simulation of an Unreinforced Masonry Structure with Flexible Diaphragms. Georgia : Georgia Institute of Technology, 2004. 671 p.
4. Anania L., Badala A., D'Agata G. The post strengthening of the masonry vaults by the Ω-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. Павлов В. В., Хорьков Е. В. Экспериментальные исследования работы усиленных кирпичных арок при горизонтальной подвижке опор // Известия КГАСУ. 2014. № 2 (28). С. 90–96.
7. Беспалов В. В., Зимин С. С. Прочность каменной кладки сводчатых конструкций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 11 (50). С. 37–51.
8. Зимин С. С., Беспалов В. В., Казимирова А. С. Расчетная модель каменной арочной конструкции // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2015. № 3 (113). С. 33–37.
9. Bespalov V., Orlovich R., Zimin S. Stress-Strain State of Brick Masonry Vault with an Aperture // MATEC Web of Conferences. 2016. № 53. P. 6.
10. Соколов Б. С., Антаков А. Б. Исследования сжатых элементов каменных и армокаменных конструкций. М. : АСВ, 2010. 104 с.

Strakhov D.E. – doctor of technical sciences, associate professor
E-mail: strahov@kgasu.ru
Sakhapova A.I. – student
Kazan State University of Architecture and Engineering
The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Application of volume finite elements in the reconstructed buildings of architectural heritage

Abstract

Problem statement. The work is devoted to the study of the stress-strain state, the reconstructed object of the architectural heritage, a complex configuration, with vaulted structures. The problem is solved with the use of volumetric elements in the design scheme of the building.

Results. The stress-strain state of the carrier system, the regularities of the influence of damages on the bearing capacity and suitability for further operation, with recommendations for further application are determined.

Conclusions. It is established that the main reason for the overvoltage of vaulted ceilings is the absence of a rasp, from the vaults that have been dismantled and replaced by flat ceilings, which should be compensated by the distance from the neighboring vaults, as well as the remaining steel puffs.

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

References

1. Bessonov G. B. Research of deformations, calculation of bearing ability and constructive strengthening of ancient systems. M. : Soyusrestovratsiya, 1989. 171 p.
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. Experimental Investigation and Numerical Simulation of an Unreinforced Masonry Structure with Flexible Diaphragms. Georgia : Georgia Institute of Technology, 2004. 671 p.

4. Anania L., Badala A., D'Agata G. The post strengthening of the masonry vaults by the Ω-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. 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.
7. Bespalov V. V., Zimin S. S. Strength of stone masonry vaulted structures // Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy. 2016. № 11 (50). P. 37–51.
8. Zimin S. S., Bespalov V. V., Kazimirova A. S. Calculation model of stone arch construction // Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury 2015. № 3 (113). P. 33–37.
9. Bespalov V., Orlovich R., Zimin S. Stress-Strain State of Brick Masonry Vault with an Aperture // MATEC Web of Conferences. 2016. № 53. P. 6.
10. Sokolov B. S., Antakov A. B. Research masonry and reinforced masonry structures. M. : ACB, 2010. 104 p.