

МАТВЕЕВ И.В.

К.т.н., с.н.с., заведующий отделом, ГП Государственного научно – исследовательского института строительных конструкций г. Киев, Украина

КРАВЧЕНКО В.И.

С.н.с, зав.группы, ГП Государственного научно – исследовательского института строительных конструкций г. Киев, Украина

АНКЯНЕЦ Н.Ю.

Ведущий инженер, ГП Государственного научно – исследовательского института строительных конструкций г. Киев, Украина

МОЛОЧКОВА Н.Н.

К.т.н., научный сотрудник, ГП Государственного научно – исследовательского института строительных конструкций г. Киев, Украина

УДК 624.042.7.001.57

ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ СОБОРА “СОФИЯ КИЕВСКАЯ” ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Ключевые слова: пехнический мониторинг, конструктивная схема, расчетная модель “сооружение - основание”, физико-механические характеристики несущих конструкций, варианты пространственные расчеты, сейсмические воздействия.

Приведені результати досліджень роботи несучих конструкцій Софійського собору, на основі виконаного розрахунку на просторовій моделі, створеній в 2002-2004рр., з врахуванням роботи споруди і основи на статичні навантаження і сейсмічні дії від синтезованої акселерограми. Описана конструктивна система Софійського собору (ХІв).

Приведены результаты исследований работы несущих конструкций Софийского собора на основе выполненного расчета на пространственной модели, созданной в 2002-2004гг., с учетом работы сооружения и основания на статические нагрузки и сейсмические воздействия от синтезированной акселерограммы. Описана конструктивная система Софийского собора (ХІв).

Presents the results of research work supporting structures St. Sophia Cathedral on the basis of performance is based on a spatial model , created in 2002-2004 . ,With the work facilities and grounds to static loads and seismic effects of synthetic accelerograms . It describes the structural system of St. Sophia Cathedral (XI century) .

“София Киевская”- уникальный памятник архитектуры и монументальной живописи начала XI века. История сохранилась до нас около 3000м² фресок и 260м² мозаик, запечатленных на стенах Софийского собора, стоящего 1000 лет. Вопрос сбережения этого уникального сооружения от влияния внешних воздействий является серьезной научно-технической задачей. Несмотря на то, что изучение собора осуществляется уже на протяжении 150 лет, систематизированных данных о конструктивной системе собора практически не существовало.

В 2002 году перед НИИСК была поставлена задача по созданию системы технического мониторинга, как инструмента, предназначенного для обеспечения безопасной эксплуатации зданий Софийского собора и Колокольни. Работа выполнялась под эгидой Национального заповедника «София Киевская».

Технический мониторинг можно рассматривать, как систему взаимосвязанных наблюдений за развитием различных процессов в основании, фундаментах и наземных конструкциях при воздействии с окружающей средой. Его основной целью является своевременное предупреждение негативных последствий внешних воздействий на сооружение и разработка упреждающих методов защиты конструкций.

Разработка технического мониторинга Софийского собора включала следующее.

- 1 - создание пространственной расчетной модели “сооружение - основание”;
- 2 – сбор информации о возможных воздействиях на сооружение собора различных факторов (подъем

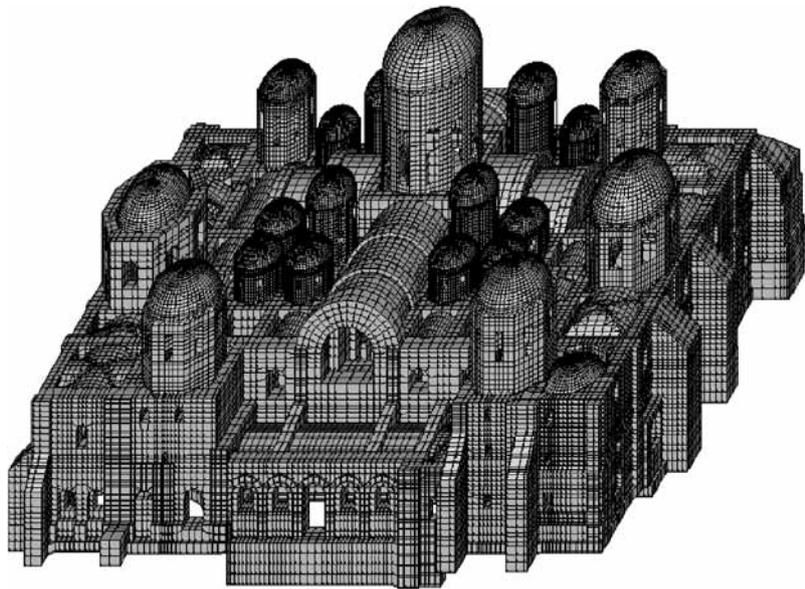


Рис. 1. Расчетная модель Собора (вид с западной стороны).

уровня грунтовых вод, сейсмическое и температурное воздействие);

- 3 - визуально – инструментальные наблюдения;
- 4 - выполнение расчетов на возможные воздействия, анализ результатов и разработка конструктивных методов защиты (при необходимости).

Основным элементом технического мониторинга является комплексная расчетная модель несущих конструкций верхнего строения, фундаментов и основания, работающих совместно. Такая модель аккумулирует данные о конструктивной схеме собора, о размерах и физико-механических характеристиках материала несущих конструкций, о нагрузках и воздействиях на несущие конструкции, литологическом строении грунтовой толщи основания и физико – механических и прочностных характеристиках составляющих его грунтов .

Для создания комплексной расчетной модели Софийского собора были использованы материалы публикации предыдущих исследователей [1, 3, 4], архивные данные [2], а так же исследования, выполненные НИИСК в процессе работы над ее созданием. На основании накопленных данных была построена расчетная модель собора, рис. 1.

С использованием такой модели были выполнены расчеты конструкций исторического сооружения на основное и особое сочетания нагрузок, в том числе и на сейсмические воздействия.

Поскольку конструктивная система 1000-летнего сооружения имеет свои уникальные особенности по сравнению с современными сооружениями, коротко рассмотрим его конструктивную схему. Современное здание Софийского Собора представляет собой инженерное сооружение с размерами в плане 44,7х61,0м. Высота от пола до верха центрального купола составляет 29м. После реконструкции XVII-XVIII вв. собор венчают 19 глав.

Для собора характерна центрическая композиция основного ядра: длина его почти равна ширине, с трех сторон его окружают два пояса галерей. Ядро расчленено 12-ю мощными, крестообразными в сечении столбами с сильно выраженными (до 75 см) лопатками, на пять продольных нефов, заканчивающихся с восточной стороны полукругиями алтарных апсид. Средний неф вдвое шире боковых нефов (7,5м). По ширине ему равен только поперечный неф, трансепт, пересекающий пять нефов по оси центрального купола. Современное здание несимметрично, главный купол с пятью апсидными полукругиями сдвинут к восточному фасаду и визуально уравнивается на западе двумя мощными объемами башен. Конструктивно кладка стен башен не перевязана с основным объемом здания, т.к. башни построены в

стык в более поздний период.

В связи с тем, что сооружение находится в процессе активной эксплуатации, у разработчиков не было возможности выполнить исследование фундаментов самостоятельно с помощью отрывки шурфов, скважин и каких-либо других визуальных исследований. Раскопами 1949г. и 1953-1954гг.[2] было установлено, что под основным пятном здания собора находится ленточный фундамент с перекрестными лентами и только под наружными галереями, которые были застроены и надстроены в более позднее время, проходят обычные продольные фундаментные ленты без поперечных фундаментов.

Отличается устройство фундаментов под наружные и внутренние стены. Под наружные стены фундаменты сложены из бутовой кладки на растворе извести с цемянкой, под внутренние - сложены насухо с выступом (обрезом) фундамента на 0,15...0,2м.

Глубина заложения наружных фундаментов составляет 1,75-2,0м от поверхности современной отмотки. Обрезы этих фундаментов находятся на глубине 0,85-1,0м от подошвы, поэтому выше обреза часть фундаментов и стен находится под культурным слоем грунта мощностью 0,8-1,0м. Внутренние фундаменты заложены на глубину от 0,7 до 1,5м от уровня древнего пола здания.

Полагают, что в конструктивной системе собора существовало 14 аркбутанов [1, 3, 4], которые впоследствии при надстройке наружных галерей были разрушены. При исследовании строительных конструкций нами было обнаружено только 13 аркбутанов. Основания их опирались на мощные фундаменты, сохранившиеся до наших дней. Фундаменты аркбутанов конструктивно связаны с фундаментами наружных стен северной и южной галерей и участвуют в совместной работе “сооружение - основание”, несмотря на то, что сами аркбутаны до наших дней не сохранились.

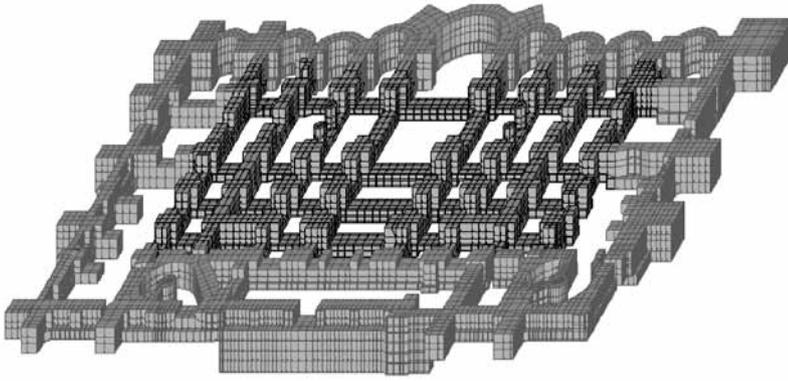


Рис. 2. Фундаментная система Софийского собора.

Согласно исследованиям, проведенным НИИСК в 2002...2003 годах, была построена концептуальная фундаментная система Софийского собора – рис. 2.

Инженерно-геологические условия площадки. Основание на площадке Софийского Собора согласно [5] является неоднородным, в пределах разведанной глубины до 33м выделено 11ИГЭ. Под насыпными грунтами на отметке от 2м до 12-13м от поверхности залегают лессовые просадочные супеси и лессовые просадочные суглинки. Грунтовые условия в зависимости от возможности проявления просадки от собственного веса грунта относятся к I типу по просадочности.

Грунтовые воды на площадке встречены на глубине 15,1-15,8м от поверхности.

Стены. Основной массив здания выполнен в технике смешанной кладки из чередующих рядов дикого камня и рядов кирпича (плинфы) на растворе извести, песка и мельчайшего кирпича (цемянки) (1:1:1). Консистенция раствора довольно плотная в связи с чем толщина швов достигает 1,5- 2,5 см. Цемянка придала раствору не только большую прочность, но и сделала его более гидравлическим.

Плинфа в древних частях Софии применялась исключительно высокого качества, глина хорошо промешана, форма очень правильная, размеры (в среднем) – 37x27x3.5 и 29x18x3.5 (половинки).

Столбы небольшого сечения, арочные проемы, окна и ниши, выкладывались только из одной плинфы [4]. Толщина наружных стен собора - 1.0...1.3м, внутренних –1.2...1.6м.

Своды. Свод центрального купола состоит из плинфы в 1 ряд на цемяночном растворе. На 2/3 высоты свод выполнен концентричными кругами, с напуском одного ряда плинфы на другой и с незначительным увеличивающимся уклоном к центру кривой купола.

Снаружи купол обмазан цемяночным раствором и покрыт специально изготовленной, и аккуратно присоединенной одна к другой лекальной плинфой, соответствующей сферической поверхности купола. Сверху плинфа обмазана тонким слоем цемяночного раствора.

Конструкции средних и малых куполов Софийского собора аналогичны центральному.

Перекрытия. Первый и второй этажи собора пере-

крываются сводчатыми перекрытиями. В древнейшей части собора они выполнены из хорошо обожженного кирпича - плинфы на известково-цемяночном растворе.

Поскольку здание собора за свою многовековую историю неоднократно подвергалось частичному разрушению, перестройке и усилению основных конструкций, то современное здание представляет собой единую систему, объединяющую древнее ядро Софии и более поздние постройки, усиленные системой конструктивной защиты такой, как контрфорсы и тяжи, которые также учтены при построении пространственной модели.

Прочность конструкций. Были проведены исследования по определению прочности материала несущих конструкций Софийского собора и определены модули упругости для расчетной модели.

Для фундаментной системы под наружные стены, состоящей из бутовой кладки на растворе принят модуль упругости $E=1 \times 10^6 \text{ т/м}^2$, для внутренних фундаментов галерейного типа - модуль упругости составляет $E=6.5 \times 10^5 \text{ т/м}^2$. По данным испытаний начальный модуль упругости кладки стен колеблется в пределах $E=1.87 \times 10^5 \dots 2.24 \times 10^5 \text{ т/м}^2$, с учетом времени работы плинфы и кирпича в сжатом состоянии - для стен собора принят модуль упругости $E=1 \times 10^5 \text{ т/м}^2$.

Нагрузки. В нагрузках на конструкции сооружения учтен собственный вес кладки, вес штукатурки, толщина которой составляет 4 ...15 см, вес полов второго этажа, а так же полезная нагрузка на перекрытия второго этажа. Вес от деревянного покрытия собора приложен на несущие конструкции стен. Снеговая нагрузка учтена согласно [6,7].

В качестве сейсмического воздействия использована акселерограмма, синтезированная для Вышгорода (окраины Киева).

Рассмотрим влияние **сейсмического воздействия** на конструктивную систему Софийского собора.

В связи со значительным объемом рассматриваемой задачи (140459 узлов и 128365 конечных элементов), остановимся на анализе результатов действия статических нагрузок и динамических воздействий, приложенных вдоль оси ОХ, ОZ.

При учете статических воздействий – максимальные усилия в фундаментной системе составляют: $\sigma_x = 402 \text{ т/м}^2$, $\sigma_y = 213 \text{ т/м}^2$, $\sigma_z = 530 \text{ т/м}^2$, в конструкциях стен $\sigma_x = 145 \text{ т/м}^2$, $\sigma_y = 153 \text{ т/м}^2$, $\sigma_z = 163 \text{ т/м}^2$.

Наиболее значительное влияние на конструкции собора оказывает сейсмическое воздействие, направленное против оси ОХ.

Рассмотрим дополнительные усилия в конструкциях, возникшие только от этих воздействий (без учета статических). Для фундаментной системы нормальные напряжения составляют: $\sigma_x = 94 \text{ т/м}^2$, $\sigma_y = 280 \text{ т/м}^2$, $\sigma_z = 45 \text{ т/м}^2$, для стен: $\sigma_x = 3.2 \text{ т/м}^2$, $\sigma_y = 3.2 \text{ т/м}^2$,

$$\sigma_z = 4.7 \text{ т/м}^2.$$

Наиболее уязвимыми для сейсмических воздействий в такой конструктивной системе могут быть бани, поэтому рассмотрим усилия и деформации бань собора.

Центральная баня имеет максимальные перемещения от сейсмических воздействиях вдоль оси ОХ - 31мм, вдоль оси ОУ - 27мм. Нормальные напряжения - незначительны.

Баня, расположенная над северной башней. Перемещения ОХ составляют - 8,7мм, вдоль оси ОУ - 13мм. Усилия составляют: $\sigma_x = -3,7 \text{ т/м}^2$, $\sigma_y = -1,6 \text{ т/м}^2$, максимальное $Q_y = 8.2 \text{ т/м}$.

Баня, расположенная над южной башней. Перемещения вдоль ОХ составляют - 8,8мм, вдоль оси ОУ - 42мм. Усилия незначительны.

Баня в центральной части южной галереи. Перемещения вдоль ОХ составляют - 22мм, вдоль оси ОУ - 48мм. Максимальная поперечная сила $Q_x = 1.6 \text{ т/м}$.

Блок бань, расположенный слева от центральной апсиды. Перемещения вдоль ОХ составляют - 22мм, вдоль оси ОУ - 19мм. Максимальная поперечная сила $Q_y = 107 \text{ т/м}$ (наиболее высокая баня из данной группы).

Блок бань, расположенный справа от центральной апсиды. Перемещения вдоль ОХ составляют - 23мм, вдоль оси ОУ - 36мм. Максимальная поперечная сила $Q_y = 103 \text{ т/м}$ (также наиболее высокая баня из данной группы).

Бани, расположенные у восточной стены слева от центральной апсиды. Максимальные перемещения вдоль ОХ составляют - 35мм, вдоль оси ОУ - 19мм. Максимальная поперечная сила $Q_y = 8.7 \text{ т/м}$.

Бани, расположенные у восточной стены справа от центральной апсиды. Максимальные перемещения вдоль ОХ составляют - 35мм, вдоль оси ОУ - 41мм. Максимальная поперечная сила $Q_x = 38 \text{ т/м}$.

На рисунке 3 представлены деформации Собора вдоль оси ОХ при статических воздействиях.

На рисунке 4 приведены значения перемещений эле-

ментов конструкций при статических и динамических воздействиях, направленных против оси ОХ.

ВЫВОДЫ

Софийский собор – сложное инженерное сооружение, состоящее из конструкций, построенных в основном в XI веке, а также из конструктивных элементов, достроенных в XVII...XIX веках во время реконструкции. Современное здание собора объединено тяжкими, металлическими связями, поддерживающими контрфорсами в единую систему, работающую совместно. В здании собора имеется ряд трещин и разломов, образовавшихся вследствие неравномерных деформаций просадочных грунтов, а так же, как показали расчеты, в результате распорных усилий, возникающих в арочной системе.

Разработка системы технического мониторинга связана с необходимостью сохранения сооружения и своевременной защиты от возможных вредных воздействий окружающей среды, в том числе просадки грунтового основания и сейсмических воздействий.

Расчеты на сейсмические воздействия выполнялись с использованием имеющихся в наличии акселерограмм, синтезированных для г. Вышгорода - окрестности г. Киева. Расчеты показали, что при длительности действия акселерограммы в 41 секунду, увеличиваются напряжения в фундаментной системе собора, возникают значительные перемещения (амплитуды колебаний) в конструкциях бань, и некоторые из них могут достигнуть 40 см в горизонтальном направлении. Анализ возникающих при этом напряжений показывает, что они могут привести к появлению дополнительных деформаций и разрушений в конструкциях бань при сейсмических нагрузках.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асеев Ю.С. Архитектура древнего Киева.-К.: Будівельник, 1982.-160с.
2. Каргер. М.К. Отчет об археологических исследованиях в Софийском заповеднике в 1949г. Рукопись. Архив Софийского архитектурно-исторического заповедника.
3. Каргер. М.К. Древний Киев т. I ,т. II, - Москва-Ленинград: Издательство Академии наук СССР, 1961г.
4. Кресальный М.И. Софійський заповідник в Києві.Архітектурно-історичний нарис. - Київ.: Державне видавництво літератури з будівництва і архітектури УРСР, 1960р.
5. Техническое заключение об инженерных изысканиях на территории Государственного архитектурно-исторического заповедника "Софийский музей" в г.Киеве. Книга II.Инженерно- геологические условия участка заповедника /рабочий проект/- Киев,УкрГГИИНТИЗ., 1983.
6. СНиП 2.01.07-85.- Нагрузки и воздействия.- М., 1986.
7. ДБН В 1.2-2.2006. Навантаження і впливи. - К., 2007.

РИСУНКИ К СТАТЬЕ МАТВЕЕВ И.В., КРАВЧЕНКО В.И., МОЛОЧКОВА Н.Н., АНКЯНЕЦ Н.Ю.
«ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ СОБОРА «СОФИЯ КИЕВСКАЯ»
ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ»

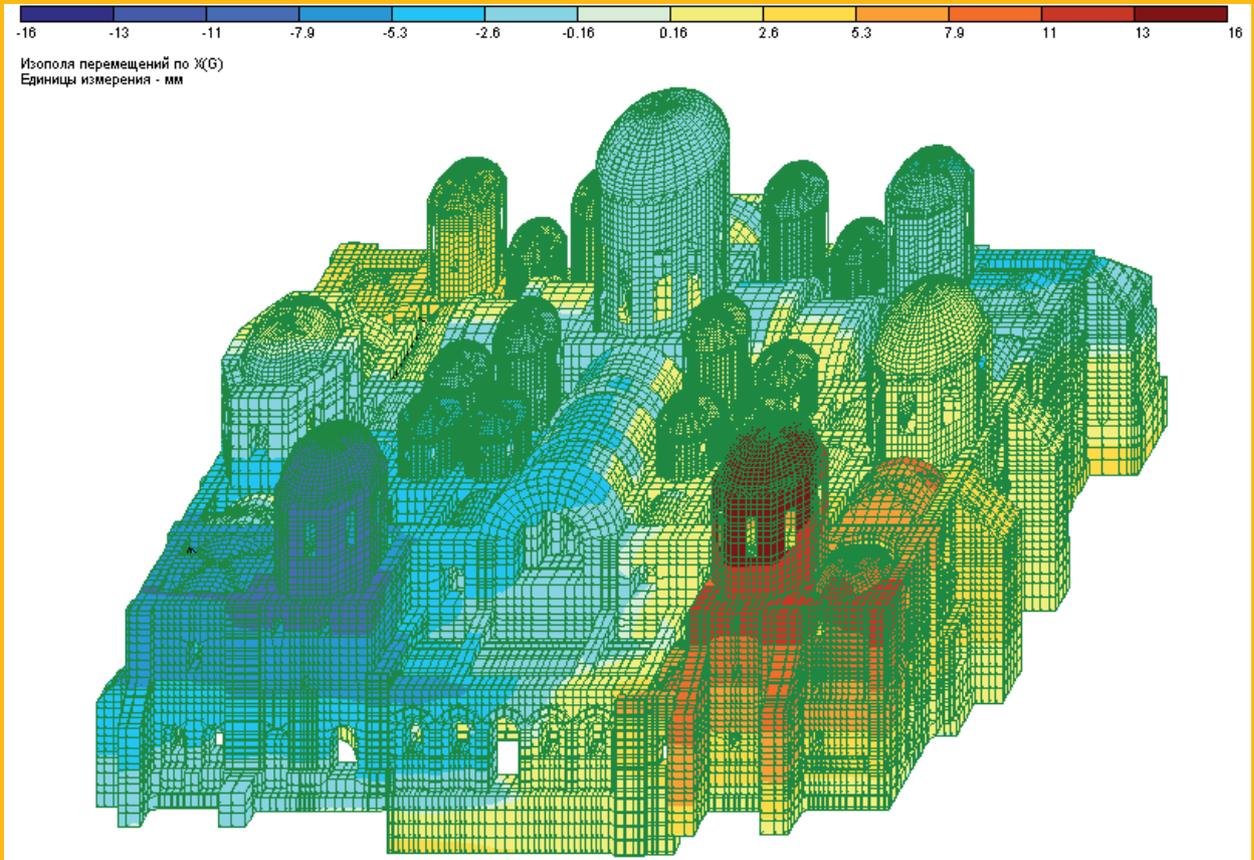


Рис. 3. Деформации Собора вдоль оси OX при статических воздействиях.

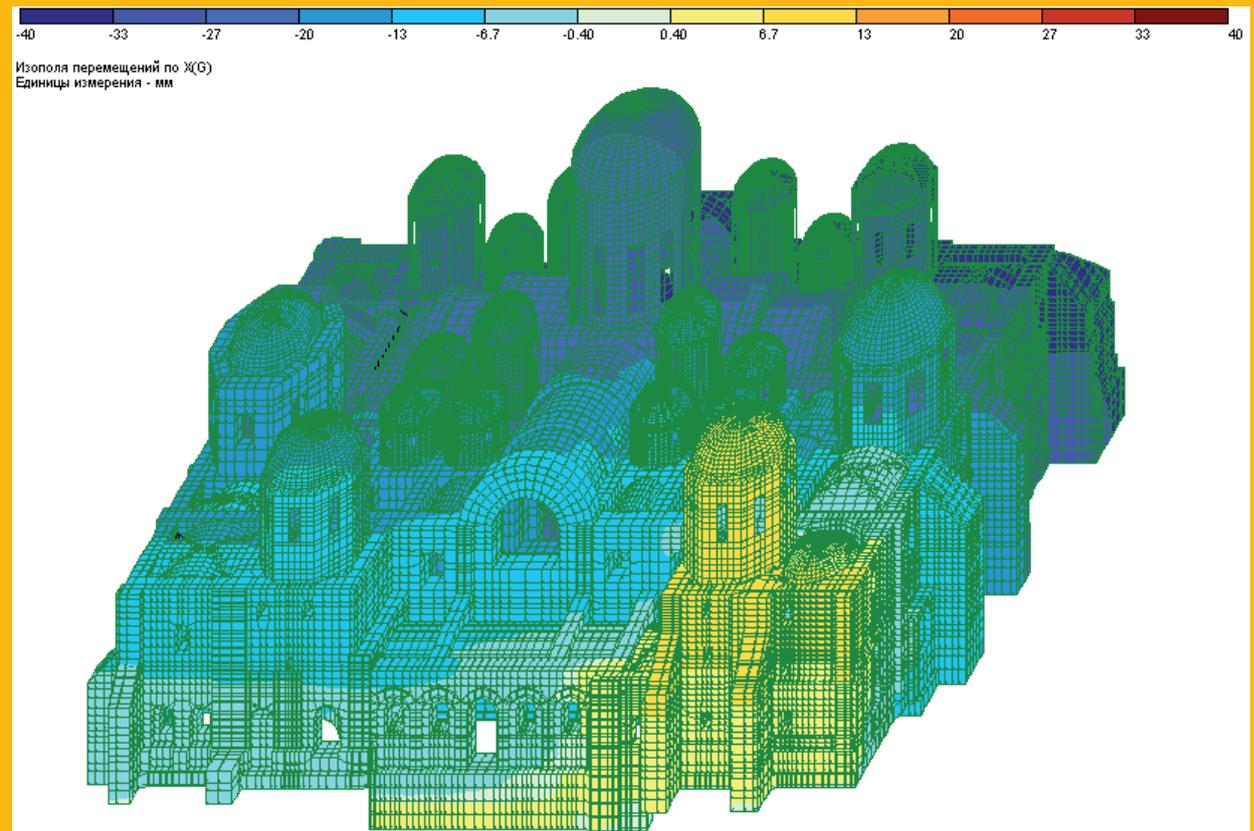


Рис. 4. Перемещения элементов конструкций при статических и динамических воздействиях, направленных против оси OX.