

УДК 624.02.001.24

**Ю.А. Варфоломеев, Н.А. Елфимова**

Варфоломеев Юрий Александрович родился в 1953 г., окончил в 1975 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерных конструкций и архитектуры Архангельского государственного технического университета, заслуженный деятель науки РФ. Имеет около 300 научных трудов в области обеспечения долговечности древесины в строительстве экологически безопасными методами.



Елфимова Наталья Алексеевна родилась в 1979 г., окончила в 2001 г. Архангельский государственный технический университет, ассистент кафедры инженерных конструкций и архитектуры АГТУ.



### **ВЛИЯНИЕ ДЕРЕВЯННОГО ШПИЛЯ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КУПОЛА КОЛОКОЛЬНИ СОЛОВЕЦКОГО КРЕМЛЯ**

Проведено теоретическое исследование влияния деревянного шпиля четырехъярусной колокольни Соловецкого кремля на напряженное состояние купола из полнотелого керамического кирпича; установлено влияние ветровых нагрузок, особенно пульсационных.

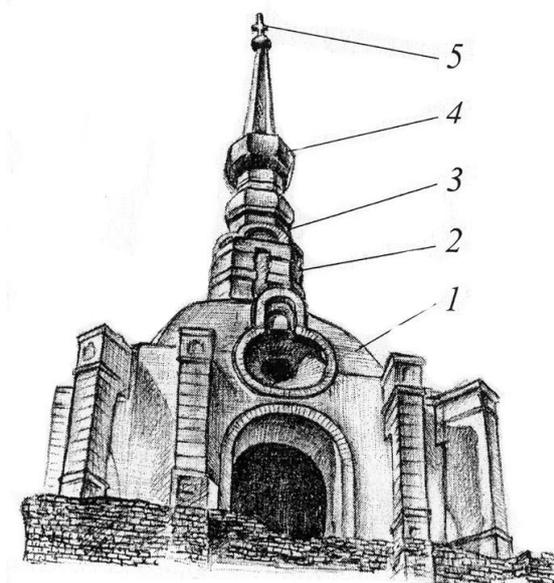
*Ключевые слова:* деревянный шпиль, купол, эрозия, эксплуатационная нагрузка, усилия.

Четырехъярусная по высоте колокольня из полнотелого керамического кирпича, уложенного на известковом растворе, построена на территории Соловецкого кремля в XVIII в. Ее верхняя часть в виде полукупольного покрытия 4-го яруса звона с расположенным на нем барабаном-восьмериком является наиболее сложной конструкцией (рис. 1). В барабан заделан деревянный шпиль (4) с навершием в виде креста (5). Общая высота колокольни, включая крест, составляет 48,4 м. Отметка опорной части барабана (2) – 36,4 м, отметка основания купола в 4-м ярусе (1) – 23,35 м. Высота: барабана со шпилем – 19,1 м, барабана – 8,4 м, купола – 7,0 м; глубина заделки шпиля в барабан – 1,4 м; ширина основания – 7,6 м\*.

---

\* Пространственные и геометрические характеристики колокольни приняты по материалам архитектурного проекта ПО «Союзреставрация», выполненного в 1988 г. для Соловецкого государственного историко-архитектурного и природного музея-заповедника.

Рис. 1. Общий вид четвертого яруса колокольни Соловецкого кремля: 1 – купол; 2 – опорная часть барабана; 3 – верхняя часть барабана; 4 – деревянный шпиль; 5 – крест



Несколько десятилетий колокольня стояла без кровли. От непосредственного воздействия атмосферных осадков в суровых климатических условиях верхний слой кирпича на наружной поверхности купола сильно потрескался. Вследствие эрозии на некоторых участках (глубина до 100 мм) он состоит из отслоившихся обломков толщиной 5 ... 20 мм. Металлические затяжки в куполе разрушены, его состояние признано аварийным.

При разработке проекта реставрации объекта мнения исследователей, принимавших участие в экспертизе, разделились в оценке роли деревянного шпиля на напряженное состояние купола. Многие эксперты неправильно оценивали влияние, особенно, ветровых пульсационных нагрузок, действующих на Соловецких островах, на деревянный шпиль переменного сечения.

Цель настоящей работы – исследовать влияние эксплуатационных нагрузок деревянного шпиля на напряженное состояние купола колокольни.

Напряженно-деформированное состояние купола рассчитывали поэтапно, с выделением основных технологических элементов, которые представляют собой конструкцию (или ее часть), работающую как единая система. Элементы имеют постоянные жесткостные и деформационные характеристики в одной из плоскостей (как минимум) или по одной оси.

При расчете использовали модель полукупольного покрытия (квадратная в плане). Стойка переменной жесткости моделирует двухуровневый восьмерик с установленным на нем деревянным шпилем. Модель представляла собой стержень, жестко заделанный одним концом, он состоит из 3-х частей:

опорная часть восьмерика (высота 3,86 м, ширина 2,50 м), выполненная сплошной кладкой (2);

средняя часть (высота 3,54 м, ширина по наружному обмеру 1,5 м) с толщиной кладки 0,7 м (3);

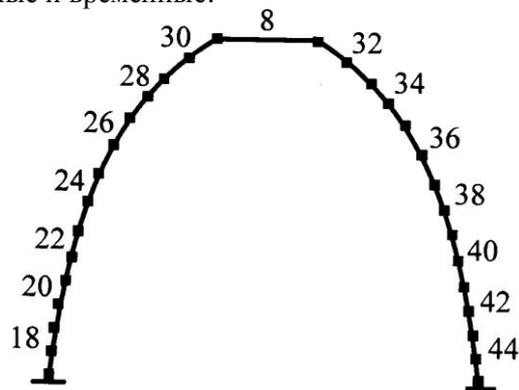
верхняя часть (4) в виде деревянного шпиля переменной ширины (высота 11,8 м).

Жесткостные характеристики сечений определяются материалами кладки. Модуль упругости кирпичной кладки принят равным 970 МПа [2], коэффициент Пуассона (как для керамического кирпича) минимальный, т.е. 0,08. Учитывая условия закрепления барабана, значительное увеличение ширины сечения купола по высоте, постоянную величину жесткости кладки, использовали для расчетов схему жесткой заделки навершия колокольни.

Купол представлен в виде плоской стержневой системы (рис. 2). Жесткость стержневой определяли по высоте и ширине площадки базового сечения. Жесткость в направлении перпендикулярно плоскости не учитывали, поскольку в дальнейшем предполагалось рассматривать пространственную модель купола колокольни и учет взаимосвязи всех конструктивных элементов. Нагрузки от навершия колокольни прикладывали в опорные узлы барабана, используя результаты расчета стойки переменной жесткости.

Согласно СНИП 2.01.07–85\* нагрузки, с учетом допущений и ограничений, подразделяли на постоянные и временные.

Рис. 2. Расчетная плоская стержневая схема полукупольного покрытия 4-го яруса звона с номерами элементов



К постоянным относятся:

нагрузка от деревянного шпиля с крестом [3]  $N_{шп} = 113,39$  кН;

нагрузка от кирпичной кладки  $N_{кл} = 592,02$  кН.

Суммарная нагрузка от навершия колокольни составляет  $N_{сум} = 705,40$  кН.

К временным относятся ветровые и снеговые нагрузки. Ветровую нагрузку определяли в виде суммы статической и пульсационной составляющих.

Статическая составляющая

$$\omega_m = \omega_0 k C,$$

где  $\omega_0$  – нормативное значение ветрового давления; Соловецкие острова относятся к IV ветровому району, значит  $\omega_0 = 0,48$  кН/м<sup>2</sup>;

$k$  – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте;

$C$  – аэродинамический коэффициент; согласно допущений и ограничений, введенных при формировании указанной модели, принят как для призматического сооружения прямоугольного сечения.

Пульсационную составляющую рассчитывали программным методом в среде Structure CAD, конструктивные элементы купола – в программном комплексе SCAD-Office, версия 7.31.

Снеговую нагрузку на навершие колокольни не учитывали ввиду незначительного отклонения граней шпиля от вертикали.

Результаты расчета стойки переменной жесткости представлены в табл. 1.

Результаты выполненного исследования напряженно-деформированного состояния стойки переменной жесткости показали, что продольная сила  $N$  от деревянного шпиля достигает 113,39 кН (или 16,1 % от продольной силы конструкций навершия). Поэтому при расчете купола следует обязательно учитывать нагрузки от деревянного шпиля и барабана. При условии жесткой заделки в кирпичную кладку барабана на глубину 1,4 м деревянный шпиль работает как гибкая стойка переменного сечения.

Таблица 1

**Максимальные усилия в элементах расчетной схемы стойки переменной жесткости**

Усилие	MAX+					MAX-				
	Расчетное значение	Порядковый номер элемента	сечения	загружения	Форма шага	Расчетное значение	Порядковый номер элемента	сечения	загружения	Форма шага
Продольная сила $N$ , кН	0	3	3	3	$S_1$	- 621,37	1	1	1	-
Изгибающий момент $M$ , кН·м	3,95	3	3	3	«	- 1502,19	1	1	3	$S_1$
Поперечная сила $Q$ , кН	158,03	1	1	3	«	0	3	3	1	-

Примечание. 1. Максимальные усилия определены для отдельных элементов расчетной схемы в сечениях : в крайних точках стержня (1) и (3). 2. Расчетные усилия определены при загрузении постоянными нагрузками (1), статической ветровой (2), динамическим пульсационным воздействием (3) ветра (усилия от пульсационного воздействия перекрывают значения аналогичных усилий от статической ветровой нагрузки). 3.  $S_1$  – первая форма шага колебаний системы.

Для колокольни рассматриваемой конструкции необходимо учитывать не только ветровую нагрузку, но и ее пульсационную составляющую. Наибольшие усилия в опорном сечении стойки переменной жесткости возникают при пульсации ветра. Поскольку в программном комплексе SCAD динамические загрузки определяются автоматически, расчетные усилия в элементах стойки переменного сечения, передаваемые на

конструкции купола, принимаем по результатам расчета статической ветровой составляющей. В этом случае изгибающий момент в заделке с учетом влияния конструкции деревянного шпиля достигает 786,52 кНм.

При расчете стойки переменной жесткости принято, что узел сопряжения деревянного шпиля и кирпичного барабана не является жесткой заделкой, а восприятие и передача усилий происходит по всем элементам с учетом заданной жесткости каждого элемента.

При составлении плоских стержневых расчетных схем купола нагрузки на них принимали по результатам ранее произведенного расчета стойки переменной жесткости.

1. Нагрузка от веса деревянного шпиля и барабана (завершение купола) принята по рассчитанной  $N_{\text{сум}} = 705,4$  кН, поскольку это дает более точные результаты, чем приняты в расчетной схеме стойки переменной жесткости (по среднему сечению).

Нагрузка, прикладываемая в один верхний узел плоской расчетной схемы (1-й вариант расчета), равна  $N_{\text{сум}}/2$ .

2. Статическая ветровая нагрузка принята по опорным реакциям в заделке завершения купола. Опорный момент от статической ветровой нагрузки представлен в виде пары сил. Возникающий при пульсации статической ветровой составляющей наибольший изгибающий момент в опоре барабана

$$M_{\text{max}}^{\text{оп}} = 786,52 \text{ кНм.}$$

В расчетной схеме изгибающий момент в опоре барабана изображен в виде пары сил  $Q_1^{\text{ст.в}}$ , плечом пары сил является ширина нижнего сечения барабана  $b_{\text{сеч}}$ :

$$Q_1^{\text{ст.в}} = \frac{M_{\text{max}}^{\text{оп}}}{b_{\text{сеч}}} = \frac{786,52}{2,5} = 314,61 \text{ кН.}$$

Поперечная сила в опоре барабана от статической ветровой составляющей

$$Q_{\text{оп}}^{\text{ст.в}} = 80,0 \text{ кН.}$$

В данном случае аэродинамический коэффициент  $C$  принят как для сводчатого покрытия (п. 3 прил. 4[1]), ширина грузовой площади – по наиболее широкой части купола, равна 7,6 м. Статическая ветровая нагрузка приложена как распределенная на стержень. Коэффициент надежности для ветровой нагрузки  $\gamma_f = 1,4$ .

Расчет пульсационной составляющей ветровой нагрузки как динамического воздействия также производили в среде SCAD.

3. Нормативное значение снеговой нагрузки находили по формуле

$$s = s_0 \mu,$$

где  $s_0$  – нормативное значение веса снегового покрова на  $1 \text{ м}^2$  горизонтальной поверхности Земли;

$\mu$  – коэффициент перехода от веса снегового покрова на поверхности

Земли к снеговой нагрузке на покрытие.

Для определения влияния деревянного шпиля на напряженное состояние купола рассмотрим два основных варианта загрузки плоских расчетных схем.

*Схема 1-1.* Плоская стержневая система находится под действием постоянной нагрузки от собственного веса купола и веса барабана с деревянным шпилем. Временные нагрузки включают статическое ветровое нагружение на купол (давление ветра + отсос), усилия от расчета стойки переменной жесткости (опорные реакции), в том числе горизонтальная составляющая (поперечная сила).

На купол действует снеговая нагрузка по наиболее неблагоприятному варианту загрузки, когда снеговой мешок находится на поверхности барабана. Снеговую нагрузку на три нижних элемента не прикладывают, поскольку угол их наклона близок к  $90^{\circ}$ . Два указанных варианта приложения снеговой нагрузки являются взаимоисключающими. В связи с этим рассмотрена модель купола, эксплуатируемого в настоящее время без включения в работу металлических тяжей.

*Схема 1-2.* Использована для определения количественных показателей снижения усилий в полукупольном покрытии 4-го яруса звона при

Таблица 2

Максимальные усилия в элементах расчетных схем купола

Усилие	MAX+					MAX-				
	Расчетное значение	Порядковый номер элемента		Форма шага	Расчетное значение	Порядковый номер элемента		Форма шага		
Схема 1-1										
$N$ , кН	114,11	8	3	3	–	–769,32	43	1	1	–
$M$ , кН·м	589,32	30	3	3	–	–565,23	32	3	3	–
$Q$ , кН	175,25	31	1	1	–	–641,42	8	3	3	–
Схема 1-2										
$N$ , кН	70,93	20	3	3	$S_1$	–565,64	33	1	1	–
	21,17	5	1	3	«	–396,21	5	1	1	–
$M$ , кН·м	21,81	9	1	3	«	–249,35	33	1	3	$S_1$
	8,86	5	3	3	«	–4,10	5	3	5	–
$Q$ , кН	66,58	33	1	3	«	–26,77	20	3	1	–
	18,35	5	1	3	«	–8,15	5	3	5	–

демонтаже деревянного шпиля с крестом. Конструкция барабана включена в расчетную схему методом копирования схемы стойки переменной жесткости с удалением из нее деревянного шпиля и последующим пересчетом динамического нагружения.

При расчете описанных плоских стержневых моделей купола учитывали: снеговую нагрузку по двум вариантам; динамическое воздействие пульсационной ветровой составляющей; уровень снижения усилий в куполе при демонтаже деревянного шпиля.

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Анализ расчетных сочетаний усилий для схем 1-1 и 1-2 показал, что максимальные усилия в элементах купола возникают при одновременном воздействии на конструкции ветровой нагрузки (пульсационная составляющая) и снегового нагружения. Поэтому в дальнейшем требуется учесть одновременное действие двух указанных факторов.

Из сравнения максимальных усилий от постоянных нагрузок в схемах 1-1 и 1-2 (существующее состояние купола с учетом снеговой нагрузки без тяжей) следует, что  $N_{\max}^{1-1} = -769,32$  кН, а  $N_{\max}^{1-2} = -565,64$  кН. Наибольшая сжимающая сила в схеме 1-2 возникает в элементе нижней части барабана, а в схеме 1-1 – в приопорном сечении купола колокольни. В аналогичном сечении схемы 1-2 (элемент 5)  $N_5^{1-2} = -396,21$  кН, что свидетельствует о снижении сжимающих усилий на 48,17 %. При этом максимальные положительные изгибающие моменты от пульсационной ветровой составляющей  $M_{\max}^{1-1} = 589,32$  кН·м и  $M_{\max}^{1-2} = 21,81$  кН·м; отрицательные – соответственно  $M_{\max}^{1-1} = -565,23$  кН·м и  $M_{\max}^{1-2} = -249,35$  кН·м. Аналогично имеем для  $Q_{\max}^{1-1} = 175,25$  кН и  $Q_{\max}^{1-2} = 66,58$  кН;  $Q_{\max}^{1-2} = -641,42$  кН и  $Q_{\max}^{1-2} = -26,77$  кН. Таким образом, наиболее нагруженным элементом является нижнее сечение барабана.

#### Вывод

Расчетные исследования напряженного состояния покрытия 4-го яруса звона колокольни Соловецкого кремля показали, что демонтаж деревянного шпиля с крестом на первом этапе реставрации позволит снизить максимальные положительные изгибающие моменты в эксплуатируемом аварийном куполе в 27 раз, отрицательные – в 2,3 раза, сжимающие усилия – в 1,9 раза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 2.01.07–85 (2003). Нагрузки и воздействия [Электронный ресурс]. – Электронная библиотека Вологодского ЦНТИ, июль 2004. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. СНиП II-22–81 (1995). Каменные и армокаменные конструкции [Электронный ресурс]. – Электронная библиотека Вологодского ЦНТИ, июль 2004. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
3. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений расчетно-теоретический / под. ред. А.А. Уманского. – М.: Стройиздат, 1972. – 600 с.
4. Модели и методы оптимизации. – Новосибирск: Изд-во Ин-та математики – 1994. – 150 с.

Архангельский государственный  
технический университета

Поступила 2.03.05

*Yu.A. Varfolomeev, N.A. Elfimova*

**Influence of Wooden Spire on Stress Condition of Belltower Dome in Solovetsky Kremlin**

Theoretical research on influence of wooden spire on four-level belltower of the Solovetsky Kremlin on the stress condition of dome made of corpulent ceramic brick is carried out. The influence of wind loads is determined, especially pulsating ones.