

*На правах рукописи*

Handwritten signature and initials in blue ink, positioned to the left and right of a vertical line that extends downwards.

**КАЛДАР-ООЛ Анай-Хаак Бугалдаевна**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА  
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОРОБОВЫХ СВОДОВ  
В ЗДАНИЯХ-ПАМЯТНИКАХ АРХИТЕКТУРЫ – ОБЪЕКТАХ  
КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,  
здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Глухих Владимир Николаевич;**

кандидат технических наук, доцент

**Корзон Сергей Александрович**

Официальные оппоненты: **Корсун Владимир Иванович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра Великого»,  
Высшая школа промышленно-гражданского  
и дорожного строительства, профессор;

**Беленцов Юрий Алексеевич**  
доктор технических наук,  
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный  
университет путей сообщения Императора  
Александра I», кафедра «Строительные материалы  
и технологии», профессор;

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский  
центр «Строительство».

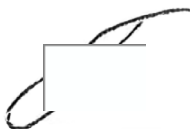
Защита диссертации состоится «16» февраля 2021 г. в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.03** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 220).

Тел./ Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialty/personal/kaldar-ool-anay-haak-bugaldaevna>.

Автореферат разослан «22» декабря 2020 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук,  
доцент



Попов Владимир Мирович

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В XVIII – XIX веках коробовые своды широко применялись при возведении зданий и сооружений, в основном в большепролетных междуэтажных перекрытиях и покрытиях гражданских и промышленных зданий, в культовом зодчестве, а также в качестве пролетных строений мостов.

Сохранение конструкций памятников архитектуры требует проведения соответствующих научно-исследовательских работ, целенаправленных на изучение их напряженного состояния и несущей способности. Трудности при определении несущей способности кирпичных сводов коробового очертания связаны не только с недостаточным развитием практических методов их расчета, но и со способами определения физико-механических характеристик кирпичной кладки как неоднородного, упругопластического и двухкомпонентного материала, находящегося в сложном напряженном состоянии.

Достоверная количественная оценка несущей способности конструкций возможна только при учете в исходных данных реальных прочностных характеристик материалов, фактического технического состояния и особенностей работы конструкций. В период эксплуатации зданий и сооружений свойства материалов и физическое состояние конструктивных элементов под воздействием неблагоприятных факторов природного, технологического и функционального характера могут меняться, и на момент обследования представляют некоторую неопределенность. При производстве капитальных и ремонтно-восстановительных работ требуется временное размещение ремонтно-строительного инвентаря, складирование строительных материалов и изделий, что практически создает дополнительную нагрузку на несущие конструкции перекрытия.

В существующих нормативных документах по проектированию каменных и армокаменных конструкций, помимо физико-механических свойств армированных и неармированных материалов и изделий, расчетов стен, простенков и столбов, приводятся методы расчета только тонкостенных сводов двоякой кривизны. Нормативы для криволинейных перекрытий из кирпичной кладки, в частности, для коробовых сводов, фактически отсутствуют.

Создание приближенной методики расчета коробовых сводов с учетом свойств анизотропии применительно для зданий и сооружений, относящихся к памятникам архитектуры, упругопластических свойств двухкомпонентного материала, величины возможных дополнительных нагрузок, является весьма **актуальным**. При этом согласно Федеральному закону «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» от 25.06.2002г. № 73-ФЗ данная тематика научного исследования имеет **важное государственное значение**.

**Степень разработанности темы исследования.** В литературных источниках имеются данные по ряду исследований, посвященных расчету сводов XVIII – XIX веков, приведены некоторые рекомендации по соотношению основных параметров. Теоретическую основу расчета криволинейных конструкций, в частности сводчатых перекрытий, составляют работы таких ученых как А.Т. Бедило, В.Р. Бернгардт, С.А. Бернштейн, А.С. Вольмир, В.Г. Васильев, В.Г. Залесский, В.К. Качурин, Г.Г. Кривошеин, Н.К. Лахтин, Б.К. Михайлов, П. Михайлов, М.М. Орлов, А. Полещук, Б. Правдзик, М.К. Приоров, П.В. Прейс, И.М. Рабинович, А.Р. Ржаницын, М.Е. Романович, В.Г. Тюрин, О.М. Федорович, Ф.С. Ясинский и др.

Внимания заслуживают теоретические исследования, посвященные расчету и усилению сводчатых конструкций, к ним относятся работы Н.С. Хамиджанова, Р.Б. Орловича, В.Н. Деркача и В.И. Морозова. В работе Н.С. Хамиджанова приводятся экспериментально-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния куполов меридионально-коробового очертания из кирпичной кладки. Исследования Р.Б. Орловича посвящены усилению и расчету прочности и трещиностойкости сводчатых конструкций из кирпичной кладки. Оригинальность работы В.И. Морозова заключается в следующем: в торцовых бетонных элементах корпусов высокого давления в виде осесимметричной толстой плиты при действии равномерно распределенной нагрузки возникает сжатый сферический купол, и, рассматривая задачу плоской деформации в виде сферического свода, были предложены методы их расчета с использованием общеизвестных критериев прочности Баландина и Друкера-Бранцагса-Брауна. В работах В.Н. Деркача рассматриваются эффективные методы усиления сводчатых конструкций из кирпичной кладки на основе композитов в виде ламелей, матов и сеток, изготавливаемых из углеродных, арамидных и стекловолокон.

Наиболее известными зарубежными авторами по методике расчета арок и сводов различного очертания являются А. Föppl, R. Abdank, E. Autenrieth, K. Brabandt, P. Block, D. Rüdiger, I. Stefanou, K. Sab, M.F. Sanchez-Arcas, F. Derand, Y.B. Goudin, J. Dallot, G. Milani, J. Pirlet, У.Д. Ренкин. Экспериментальными исследованиями каменных сводов и арок конструкций, занимались следующие авторы: I. Cancelliere, E. Rizzi, E. Viola, S. De Santis, A. D'Ambrisi, M. Betti, G. Felice. В указанных работах приводятся методы расчета несущей способности каменных арок и сводов различного очертания, а также исследования поведения сводов на основе численных моделей.

В работах вышеуказанных исследователей недостаточно изучено влияние очертания коробовых сводов на характеристики напряженно-деформированного состояния конструкций из кирпичной кладки. В связи с этим возникла необходимость усовершенствования существующих графоаналитических методик расчетов, учитывающих величину действующих нагрузок и более

точную геометрию, а также исследования прочностных и деформативных характеристик с учетом свойств анизотропии и появляющихся в процессе эксплуатации различных дефектов кирпичного коробового свода в зданиях и сооружениях, относящихся к памятникам архитектуры.

**Целью диссертационной работы** является разработка и развитие аналитического и численного методов расчета коробовых сводов из кирпичной кладки с учетом свойств анизотропии и деформаций для оценки их фактического технического состояния.

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ известных методов расчета сводчатых конструкций.
2. Усовершенствовать методику аналитического построения оси коробового свода для задач оценки напряженного состояния конструкции.
3. Исследовать влияние анизотропии материалов свода на его напряженное состояние методами теории упругости анизотропного тела.
4. Разработать методику расчета коробового свода с учетом возможных повреждений в виде трещин, просадки и горизонтального смещения опор на напряженное состояние с использованием программного комплекса (ПК) Abaqus 6.14.
5. Выполнить на основе натурного эксперимента исследования деформаций коробового свода от приложенных нагрузок и сопоставить с результатами расчета.

**Объектом исследования** является коробовый свод из кирпичной кладки в зданиях и сооружениях, относящихся к объектам культурного наследия (памятники истории и культуры) народов Российской Федерации.

**Предметом исследования** являются характеристики напряженного и деформированного состояния коробового свода с учетом свойств анизотропии и проявления наиболее часто встречающихся повреждений кирпичной кладки.

**Научную новизну результатов исследования составляют:**

1. Обоснование достаточности использования двух параметров упругости цилиндрически анизотропного тела на основе решения дифференциального уравнения для коробового свода из кирпичной кладки.
2. Предложенная уточненная методика оценки напряженного состояния коробового свода как ортотропного тела с цилиндрической анизотропией.
3. Результаты теоретической оценки влияния возможных повреждений в виде радиальной трещины, просадки, смещения опор на напряженное состояние коробового свода из кирпичной кладки.
4. Данные экспериментальных исследований деформаций коробового свода при действии дополнительной нагрузки.

**Теоретическая значимость** работы заключается:

- в выводе аналитического уравнения оси свода с учетом использования результатов реальных обмеров;

- в получении аналитической зависимости для определения напряженного состояния коробового свода, позволяющего оценить его техническое состояние;
- в разработке алгоритма расчета с учетом анизотропии материалов кирпичной кладки.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается:

- в разработке аналитического способа построения образующей свода;
- в развитии методики расчета на учёт свойств анизотропии материалов конструкции;
- в исследовании возможных деформаций конструкций, необходимых при обследовании коробовых сводов, используемых в зданиях и сооружениях, относящихся к памятникам архитектуры;
- во внедрении результатов работы в практику технической диагностики конструкций, что подтверждается актами о внедрении Российского этнографического музея города Санкт-Петербурга и ООО «ИСП «Геореконструкция».

**Методы исследования.** В работе применены теоретические и экспериментальные методы исследования, включающие учет свойств анизотропии на напряженное состояние и несущую способность конструкции, сопоставление полученных аналитических и численных результатов с экспериментальными данными.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритм аналитического расчета коробового свода в системе Mathcad.
2. Метод расчета коробового свода в виде кривого криволинейно-анизотропного бруса в программной системе Mathcad.
3. Результаты численного расчета коробового свода при наличии возможных повреждений в виде радиальной трещины, осадки опор и их горизонтального смещения на базе конечно-элементной модели в ПК Abaqus 6.14.
4. Сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Область исследования** соответствует паспорту специальности ВАК 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения, и относится к пункту 3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций, наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности».

**Обоснованность и достоверность полученных результатов** достигается использованием общих гипотез строительной механики, теории упругости анизотропного тела, сравнением результатов аналитического, численного расчетов с полученными экспериментальными данными.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались на 62-64-й научно-технических конференциях молодых ученых (СПбГАСУ,

2009 – 2011 г.г.); 66-67-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов СПбГАСУ (СПбГАСУ, 2010 г.); VIII Международной конференции «Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте» (ПГУПС, 2011 г.); I Международном конгрессе молодых ученых (аспирантов, докторантов) и студентов, посвященном 180-летию СПбГАСУ (СПбГАСУ, 2012 г.).

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в 10 научных работах, в том числе в 4-х рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК, и 1 статья в издании, входящая в международные базы цитирования Scopus и Web of Science. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Объем, структура и условные обозначения в диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и 11 приложений. Объем диссертационного исследования составляет 192 страниц машинописного текста, в данный объем входят 126 страниц основного текста, содержащего 112 рисунков, 40 таблиц.

На рисунке 1 представлена блок-схема исследования коробового свода из кирпичной кладки.

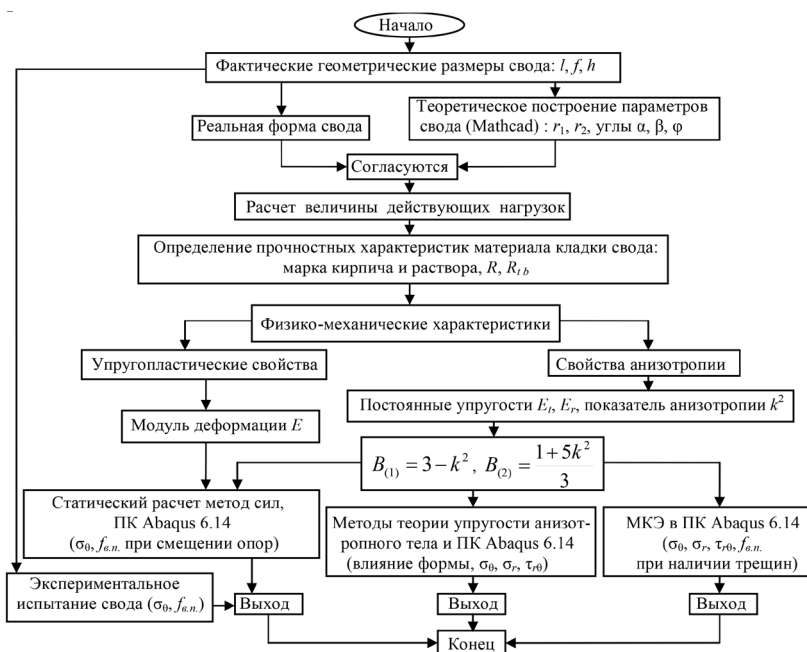


Рис. 1. Блок-схема исследования кирпичного коробового свода

## II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена актуальность и краткая характеристика работы.

В **первой главе** работы приводятся примеры применения сводов в строительных конструкциях прошлых веков и описывается история развития методов их расчета (конец XVIII – начало XIX вв.), в результате анализа которых выявлена нерациональность использования графоаналитического метода.

В главе приведена история применения коробовых сводов в зодчестве; представлены графоаналитические схемы построения оси коробовых сводов, их очертание; описания материалов, из которых выполнялись своды.

Во **второй главе** разработана методика построения геометрического очертания оси свода по фактическим параметрам пролета  $L$  и стрелы подъема  $f$  свода с использованием программы Mathcad.

**2.1. Аналитическая зависимость оси свода** как функции текущего угла  $\varphi$  в параметрическом виде  $y(\varphi) = f(x(\varphi))$  (рис. 2):

$$x(\varphi) = \begin{cases} r_2 \cdot \sin(-\alpha) + r_1 \cdot \cos \beta - r_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right), & \text{если } -\frac{\pi}{2} < \varphi \leq -\alpha \\ r_2 \cdot \sin \varphi, & \text{если } \varphi \leq |\alpha| \\ r_2 \cdot \sin \alpha - r_1 \cdot \cos \beta + r_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right), & \text{если } \alpha < \varphi \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} ; \quad (1)$$

$$y(\varphi) = \begin{cases} r_1 \cdot \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right), & \text{если } -\frac{\pi}{2} \leq \varphi < -\alpha \\ \left[ (r_2 \cdot (\cos \varphi - 1) + f) \right], & \text{если } -\alpha < \varphi \leq \alpha \\ r_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right), & \text{если } \alpha < \varphi \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} , \quad (2)$$

где  $r_1, r_2$  – малый и большой радиусы свода,  $\alpha, \beta$  – постоянные углы.

Разработана методика построения трехцентровых коробовых кривых в среде Mathcad. Для построения оси коробовой кривой достаточно знать пролет  $L$  и стрелу подъема  $f$  свода.

**2.2. Определение основных геометрических параметров свода.** По результатам экспериментального обследования надподвального сводчатого перекрытия здания Этнографического музея города Санкт-Петербурга были определены геометрические характеристики: длина пролета  $L=7972$  мм, стрела подъема  $f=1190$  мм, толщина свода в замке  $h=850$  мм.

Аналитически полученные значения геометрии оси свода согласуются со значениями, полученными в результа-

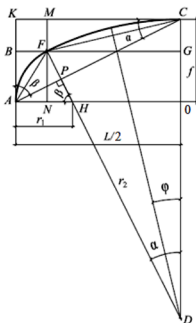


Рис. 2. Способ построения трехцентрового коробового свода



те реальных обмеров (рис. 3). Различие составляет 0,1 – 3,5 см. Максимальное отличие не более 4% от аналитического значения.

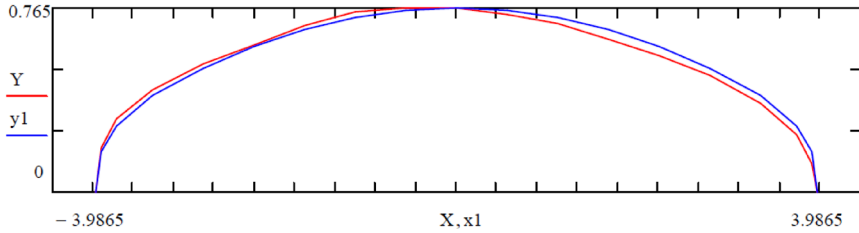
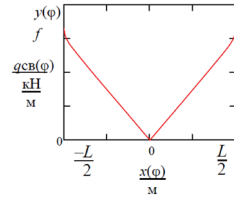


Рис. 3. Нижняя поверхность свода, полученная по реальным обмерам (X, Y) и соответствующая нижняя ось свода, определенная в Mathcad (x1, y1)

**2.3. Полученная зависимость оси свода позволяет определить величину действующих нагрузок на свод** в среде Mathcad (собственный вес свода  $q_{с.в.}$ ; вес забутки  $q_3$ ; равномерно-распределенную нагрузку по верх забутки  $q_{р.н.}$ ; различные виды временных нагрузок  $F$ ).

Величина нагрузки от собственного веса свода зависит от формы оси и высоты поперечного сечения свода и принята как меняющаяся по нелинейному закону (рис. 4):

$$q_{с.в.}(\varphi) = \begin{cases} |r_1 \cdot (\varphi + \alpha) \cdot A \cdot \gamma - r_2 \cdot \alpha \cdot A \cdot \gamma|, & \text{если } -\frac{\pi}{2} \leq \varphi < -\alpha \\ |r_2 \cdot \varphi \cdot A \cdot \gamma|, & \text{если } -\alpha \leq \varphi \leq \alpha \\ r_1 \cdot (\varphi - \alpha) \cdot A \cdot \gamma + r_2 \cdot \alpha \cdot A \cdot \gamma, & \text{если } \alpha < \varphi \leq \frac{\pi}{2} \end{cases}, \quad (3)$$



где  $A$  – площадь поперечного сечения свода,  $\gamma$  – объемный вес материала.

Выражения и эпюры внутренних сил от собственного веса свода в основной системе (рис. 5).

Рис. 4. График нарастания нагрузки от собственного веса свода

$$Mq_{с.в.}(\varphi) = \begin{cases} - \left[ \begin{aligned} & (r_2 \cdot \alpha \cdot A \cdot \gamma) \cdot \left[ r_2 \left( \sin \alpha - \sin \frac{\alpha}{2} \right) + r_1 \left( \sin \varphi - \sin \alpha \right) \right] \\ & - r_1 \left( (\varphi + \alpha) \cdot A \cdot \gamma \right) \cdot r_1 \left( \sin \varphi - \sin \frac{\varphi}{2} \right) \end{aligned} \right], & \text{если } -\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq -\alpha \\ - (r_2 \cdot \varphi \cdot A \cdot \gamma) \cdot r_2 \cdot \left( \sin \varphi - \sin \frac{\varphi}{2} \right), & \text{если } -\alpha \leq \varphi \leq \alpha \\ - \left[ \begin{aligned} & (r_2 \cdot \alpha \cdot A \cdot \gamma) \cdot \left[ r_2 \left( \sin \alpha - \sin \frac{\alpha}{2} \right) + r_1 \left( \sin \varphi - \sin \alpha \right) \right] \\ & - r_1 \left( (\varphi + \alpha) \cdot A \cdot \gamma \right) \cdot r_1 \left( \sin \varphi - \sin \frac{\varphi}{2} \right) \end{aligned} \right], & \text{если } \alpha \leq \varphi < \frac{\pi}{2} \end{cases};$$

$$Nq_{c.c.}(\varphi) = \begin{cases} \left[ r_2 \cdot \alpha \cdot A \cdot \gamma - A \cdot \gamma \cdot r_1 \cdot (\varphi + \alpha) \right] \cdot \sin \varphi, & \text{если } -\frac{\pi}{2} \leq \varphi < -\alpha \\ -\left| r_2 \cdot \varphi \cdot A \cdot \gamma \right| \cdot \sin \varphi, & \text{если } -\alpha \leq \varphi \leq \alpha \\ -\left[ r_2 \cdot \alpha \cdot A \cdot \gamma + A \cdot \gamma \cdot r_1 \cdot (\varphi - \alpha) \right] \cdot \sin \varphi, & \text{если } \alpha < \varphi \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} ;$$

$$Qq_{c.c.}(\varphi) = \begin{cases} \left[ r_2 \cdot \alpha \cdot A \cdot \gamma - A \cdot \gamma \cdot r_1 \cdot (\varphi + \alpha) \right] \cdot \cos \varphi, & \text{если } -\frac{\pi}{2} \leq \varphi < -\alpha \\ -(r_2 \cdot \varphi \cdot A \cdot \gamma) \cdot \cos \varphi, & \text{если } -\alpha \leq \varphi \leq \alpha \\ -\left[ r_2 \cdot \alpha \cdot A \cdot \gamma + A \cdot \gamma \cdot r_1 \cdot (\varphi - \alpha) \right] \cdot \cos \varphi, & \text{если } \alpha < \varphi \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} .$$

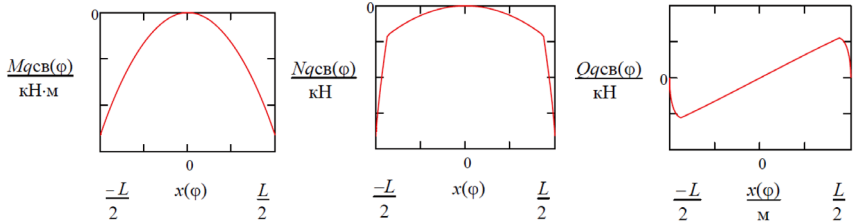


Рис. 5. Эпюры внутренних сил от собственного веса свода

Для определения веса забутки получены наружные радиусы свода:

$$r_{1t} = r_1 + \frac{h}{2}; \quad r_{2t} = r_2 + \frac{h}{2}.$$

Площадь забутки определена из следующего логического выражения 4.

$$A(\varphi) = \begin{cases} r_{2t}^2 \cdot \int_{-\alpha}^0 \cos \xi \cdot (1 - \cos \xi) \cdot d\xi + & \text{если } -\frac{\pi}{2} < \varphi \leq -\alpha \\ + \left[ \int_{\varphi}^{-\alpha} r_{1t} \cdot \cos \xi \cdot \left[ r_{2t} \cdot (1 - \cos \alpha) + r_{1t} \cdot (\cos \alpha - \cos \xi) \right] d\xi \right], & \\ r_{2t}^2 \cdot \left[ \int_{\varphi}^0 \cos \xi \cdot (1 - \cos \xi) \cdot d\xi \right], & \text{если } -\alpha \leq \varphi \leq 0 \\ r_{2t}^2 \cdot \left[ \int_0^{\varphi} \cos \xi \cdot (1 - \cos \xi) \cdot d\xi \right], & \text{если } 0 \leq \varphi \leq \alpha \\ r_{2t}^2 \cdot \int_0^{\alpha} \cos \xi \cdot (1 - \cos \xi) \cdot d\xi + & \text{если } \alpha < \varphi \leq \frac{\pi}{2} \\ + \left[ \int_{\alpha}^{\varphi} r_{1t} \cdot \cos \xi \cdot \left[ r_{2t} \cdot (1 - \cos \alpha) + r_{1t} \cdot (\cos \alpha - \cos \xi) \right] d\xi \right], & \end{cases} \quad (4)$$

где  $\xi$  – переменная, по которой происходит интегрирование.

График этого выражения приведен на рисунке 6. Величина нагрузки от забутки (рис. 7):

$$q_3(\varphi) = A(\varphi) \cdot \gamma \cdot b. \quad (5)$$

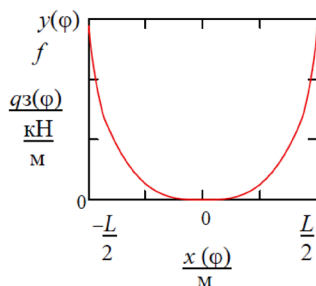
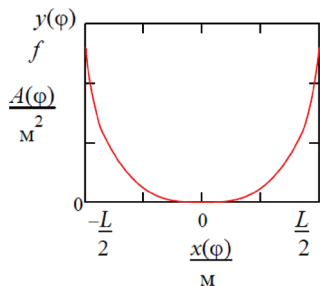


Рис. 6. График изменения площади забутки Рис. 7. График нагрузки от веса забутки

Влияния внутренних усилий от веса забутки, равномерно-распределенной и временно-дополнительной нагрузок оценивались аналогично, как и в случае от собственного веса, и приводятся в диссертации.

Общеизвестно, что забутка необходима для совместной работы щековой стенки и свода, она в какой-то степени повышает жесткость конструкции. Разница результатов расчетов нагрузки от забутки по графоаналитическому способу и по предлагаемой формуле оси кривой составляет 25%.

Для выполнения поверочного расчета свода учтены фактически действующие нагрузки. Сбор нагрузок на 1 п.м. коробового свода: собственный вес свода (в ключе)  $q_{с.в.} = 15,3 \cdot 1,1 = 16,83$  кН/м; вес забутки  $q_3$  в сечении переменная; равномерно-распределенная нормативная нагрузка  $q_{р.н.} = 3,376$  кН/м; временная дополнительная нагрузка  $F$  по расчету.

Дополнительная нагрузка от стеллажного оборудования должна быть приложена к правой части свода вдоль продольной оси конструкции. Вес стеллажного оборудования передается на свод, как две линейно-распределенные нагрузки  $F_1 = F_2$ .

**2.4. Определение прочностных характеристик кирпичной кладки коробового свода.** Экспериментальная прочность кладки определена по следующим методикам:

- разрушающим методом определена прочность кирпича и раствора кладки по верхней поверхности свода. Отобранные образцы испытывались в лаборатории СПбГАСУ по ГОСТ 8462-85 и 5802-86;
- ультразвуковым методом с помощью прибора УК-14П определена прочность кирпича и раствора кладки по нижней поверхности свода;
- по упругому отскоку с помощью молотка Шмидта определена прочность кирпича и раствора кладки по нижней поверхности свода по ГОСТ 22690-88.

Результаты испытаний приведены в диссертации приложениях Е, Е1, Е2. По полученным значениям характеристик прочности кирпича и раствора определено расчетное сопротивление кладки при сжатии в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение значений расчетного сопротивления кладки

| Расчетное сопротивление кладки | По СП 15.13330.2012 | По формуле Л.И. Онищика  |                 |      | Расхождение в % |
|--------------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------|------|-----------------|
|                                |                     | Методом упругого отскока | Расхождение в % | УЗК  |                 |
| $R$ (МПа)                      | 1,126               | 0,915                    | 18,7            | 1,07 | 4,97            |

Расчетное сопротивление при изгибе  $R_{ib}=0,25$  МПа.

**2.5. Анизотропия упругости кирпичных коробовых сводов.** Коробовый свод рассматривается как ортотропное тело с цилиндрической анизотропией. С целью изучения напряженного состояния сложных криволинейных тел, состоящих из кирпичей и растворных швов, требуется найти упругие постоянные для новой системы координат.

Цилиндрически анизотропные материалы по исследованиям В.Н. Глухих отличаются параметрами упругости ( $B_{(1)}, B_{(2)}$ ) и поделены на 2 группы: для первой группы характеризуется тремя экстремумами при повороте осей от радиального направления к тангенциальному:  $B_{(1)} = 3 - k^2$ ; вторая группа с двумя экстремумами:  $B_{(2)} = 1 + 5k^2 / 3$ , где показатель анизотропии:  $k^2 = E_t / E_r$ .

При возникающих затруднениях в определении постоянных упругости, например, кирпичей, растворных швов, кирпичной кладки результат вычислений можно оценивать с использованием графика, приведенного на рисунке 8, где точка  $O_1$ , в частности, характеризует изотропные свойства материала. Обе наклонные прямые описывают свойства упругости анизотропных материалов, относящихся к двум группам.

Оба параметра входят множителями в дифференциальное уравнение четвертого порядка в частных производных для ортотропного тела в полярных координатах и зависят только от соотношений постоянных упругости в главных направлениях анизотропии. Зависимости ( $B_{(1)}, B_{(2)}$ ) связывают между собой модули упругости 1 и 2 рода и коэффициенты поперечной деформации для анизотропных тел.



Рис. 8. Взаимосвязь показателя анизотропии от параметров упругости ортотропного тела

Известные в теории упругости формулы с учетом параметра упругости  $B_{(1)}$  анизотропных тел для модуля упругости  $E_{x'}$ , модуля сдвига  $G_{x'y'}$ , коэффициента Пуассона  $\mu_{x'y'}$  примут более простой вид:

$$\frac{1}{E_{x'}} = \frac{\cos^4 \theta}{E_r} + \frac{\sin^4 \theta}{E_t} + \frac{3-k^2}{E_t} \cdot \cos^2 \theta \sin^2 \theta; \quad (6)$$

$$\frac{1}{G_{x'y'}} = \frac{8(k^2-1)}{E_t} \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + \frac{1}{G_{rt}}; \quad (7)$$

$$\mu_{x'y'} = -E_{x'} \left[ \frac{2(k^2-1)}{E_r} \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + \frac{\mu_{rt}}{E_t} \right], \quad (8)$$

где  $G_{rt} = \frac{E_t}{3-k^2+2 \cdot \mu_{rt}}$  – модуль сдвига.

Аналогичны расчетные формулы для анизотропных материалов, относящихся ко 2 группе  $B_{(2)}$ :

$$\frac{1}{E_{x'}} = \frac{\cos^4 \theta}{E_r} + \frac{\sin^4 \theta}{E_t} + \frac{1+5k^2}{3 \cdot E_t} \cdot \sin^2 \theta \cos^2 \theta; \quad (9)$$

$$\frac{1}{G_{x'y'}} = \frac{8 \cdot (1-k^2)}{3 \cdot E_t} \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + \frac{1}{G_{rt}}; \quad (10)$$

$$\mu_{x'y'} = -E_{x'} \left[ \frac{2 \cdot (k^2-1)}{3 \cdot E_r} \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta - \frac{\mu_{rt}}{E_t} \right], \quad (11)$$

где  $G_{rt} = \frac{3 \cdot E_t}{1+5 \cdot k^2+6 \cdot \mu_{rt}}$  – модуль сдвига.

Модуль упругости кирпича определяется по формуле в справочной литературе Ф.Ф. Уманского:

$$E_0^k = 200 \div 1200 \cdot R_k, \quad (12)$$

где  $R_k$  (МПа) – предел прочности кирпича при сжатии.

Модуль упругости раствора определяется по формуле в пособии по проектированию жилых зданий:

$$E_0^p = \frac{t_p}{\lambda_p}, \quad (13)$$

где  $t_p$  – толщина растворного шва;  $\lambda_p$  – податливость при сжатии горизонтального растворного шва кратковременным нагрузкам.

Для кирпичной кладки, находящейся в сложном напряженном состоянии, при нахождении постоянных упругости в новой системе координат воспользуемся феноменологическим методом реологии.

Согласно А.Р. Ржаницына, приблизиться к действительной картине поведения материала под нагрузкой можно путем перехода к более сложным схемам, сочетающим упругие (кирпич) и вязкие (раствор) элементы, соединив их параллельно – на замке, последовательно – у опор свода, то получим реологические модели Кельвина и Максвеллова тел.

$$\text{Для параллельного соединения: } E_r = E_0^k + E_0^p. \quad (14)$$

$$\text{Для последовательного соединения: } E_t = E_0^k \cdot E_0^p / E_0^k + E_0^p. \quad (15)$$

Анизотропия модуля упругости кирпичной кладки приведена в диссертации.

**2.6. Определение деформационных характеристик кладки коробового свода.** Для определения начального модуля упругости материала использована формула, полученная Н.С. Хамиджановым (табл. 2):

$$E_0 = 187R_k + 173,2R_p + 5766. \quad (16)$$

Таблица 2

**Сравнение значений модуля начальной деформации**

| Модуль начальной деформации | По СП 15.13330.2012 | По формуле Н.С. Хамиджанова | Расхождение в % |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------|
| $E_0$ (МПа)                 | 2252                | 2883                        | 21,88           |

В дальнейших расчетах принимаем значение начального модуля упругости равным  $E_0 = 2883$  МПа.

Модуль деформации определяется по формуле, предложенной А.М. Розенблюмасом с измененным значением модуля начальной деформации (табл. 3):  $E_d = E_0 / 1 + \varphi_t$ , (17)

где  $\varphi_t$  – характеристика ползучести кладки, которая зависит от времени, принята в соответствии Eurocode 1992-1-1.

Таблица 3

**Оценка значений модуля деформации**

| Модуль деформации | По СП 15.13330.2012 | По формуле А.М. Розенблюмаса | Расхождение в % |
|-------------------|---------------------|------------------------------|-----------------|
| $E_d$ (МПа)       | 1023,63             | 1156                         | 11,45           |

В вычислениях принято значение  $E_d = 1156$  МПа.

В соответствии с СП 15.13330.2012, окончательно принимаем модуль деформации  $E = 0,8E_d = 925,55$  МПа.

**2.7. Расчет коробового свода с учетом свойств анизотропии.** Для определения главных напряжений коробового свода при действии постоянных

( $q$ ) и временных дополнительных нагрузок ( $F$ ) используется функция напряжений в следующем виде:

$$F(r) = f_0(r) + f_1(r) \cdot \cos(\theta) + f_1^*(r) \cdot \sin(\theta). \quad (18)$$

Тангенциальное напряжение в замке было исследовано с использованием формулы профессора С.Г. Лехницкого:

$$\sigma_\theta = \frac{q}{b} \cdot \left[ P + Q \cdot k \cdot \left( \frac{r}{r_t} \right)^{k-1} + R \cdot k \cdot \left( \frac{r_t}{r} \right)^{k+1} \right] + \\ + \frac{q}{r_t \cdot b \cdot g_1} \cdot \frac{r_t}{r} \cdot \left[ (1 + \beta_1) \cdot \left( \frac{r}{r_t} \right)^{\beta_1} + (1 + \beta_1) \cdot c^{\beta_1} \cdot \left( \frac{r_t}{r} \right)^{\beta_1} - (1 + c^{\beta_1}) \right] \cdot \frac{\cos(\varphi - \psi)}{\cos \psi} \cdot \cos \theta, \quad (19)$$

где  $b = 1$  – единичная ширина элемента; коэффициент  $\beta_1$ , входящий в формулу (19) по данным С.Г. Лехницкого:

$$\beta_1 = \sqrt{1 + \frac{E_t}{E_r} \cdot (1 - 2 \cdot \mu_{rt})} + \frac{E_t}{G_{rt}}. \quad (20)$$

При этом согласно параметру  $B_{(1)}$  в дифференциальном уравнении для ортотропного тела с цилиндрической анизотропией  $\frac{E_t}{G_{rt}} - 2 \cdot \mu_{rt} \frac{E_t}{E_r} = B_{(1)}$ . Известно, что по результатам исследований профессора В.Н. Глухих (СПбГАСУ) параметр  $B_{(1)} = 3 - k^2$ , тогда с учетом  $E_t / E_r = k^2$  имеем  $\beta_1 = \sqrt{1 + k^2 + 3 - k^2} = 2$ , не противоречит данным профессора С.Г. Лехницкого. При втором параметре упругости  $B_{(2)} = 1 + 5 \cdot k^2 / 3$ ;  $\beta_1 = \sqrt{1 + k^2 + \frac{1 + 5 \cdot k^2}{3}} = \frac{2\sqrt{1 + 2 \cdot k^2}}{\sqrt{3}}$ .

Расчетная схема свода в виде ортотропного бруса с цилиндрической анизотропией представлена на рисунке 9, где  $r_t = 12,58\text{м}$ ,  $r_d = 11,73\text{м}$ .

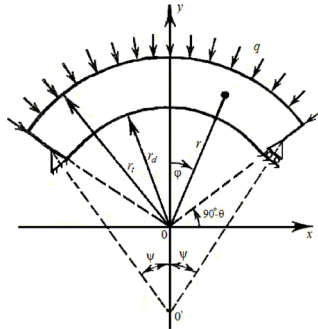


Рис. 9. Расчетная схема свода в виде криволинейного ортотропного бруса с цилиндрической анизотропией

Если опорные поверхности горизонтальные, то  $\varphi = 0$ ,  $\psi = 0$ ,  $\theta = \pi/2$ ,  $\cos(\varphi - \psi) = 0$ .

Модуль упругости кирпича марки  $M_k=102$ , полученный по формуле (12)  $E = 12036$  МПа.

Модуль упругости раствора марки  $M_p=22$ , по формуле (13)  $E=2140$  МПа.

Модули упругости кирпичной кладки по радиальному и тангенциальному направлениям определены по формулам (14), (15):  $E_r=14176$  МПа,  $E_t=1816$  МПа.

Значения модуля упругости  $E_{xy}$ , модуля сдвига  $G_{xy}$ , коэффициента Пуассона  $\mu_{xy}$  в произвольных направлениях определены по формулам (6–11).

## 2.8. Расчет коробового свода по развернутой формуле методом сил.

Для расчета коробового свода принимаем упрощенную расчетную схему (раскрытие статической неопределенности в виде бесшарнирной арки) (рис. 10).

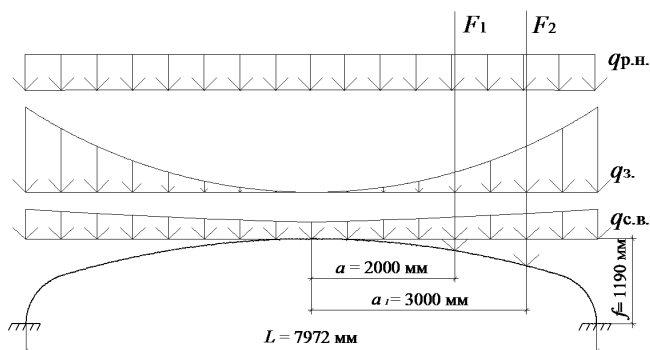


Рис. 10. Расчетная схема свода

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \text{при } x = -L/2 \text{ (левая пята): } y(-L/2) &= 0; v = y'(-L/2) = 0; \\ \text{при } x = L/2 \text{ (правая пята): } y(L/2) &= 0; v = y'(L/2) = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Первая производная:

$$y'(\varphi) = \begin{cases} (-\tan(\varphi)), & \text{если } -\pi/2 \leq \varphi < -\alpha \\ (-\tan(\varphi)), & \text{если } -\alpha < \varphi \leq \alpha \\ (-\tan(\varphi)), & \text{если } \alpha < \varphi \leq \pi/2 \end{cases} \quad (22)$$

В исследуемом трехцентровом своде на участках с разными радиусами получено равенство первых производных функции оси свода. При этом ну-



тренние усилия (изгибающий момент, продольная и поперечная силы) разрывов не имеют, так как момент не связан со второй производной от геометрии, а зависит от изменения кривизны (рис. 11).

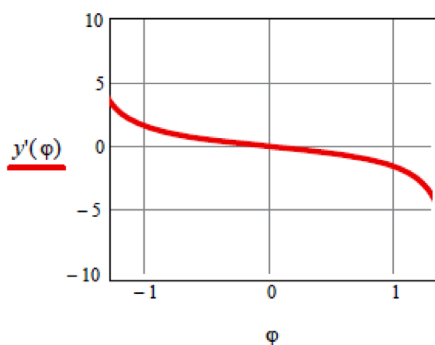


Рис. 11. График первой производной геометрии арки – функция непрерывна

Так как эпюра моментов разрыва не имеет, а напряжения в арке прямо пропорциональны изменению кривизны оси, на стыковых участках с разными радиусами кривизны напряжения практически не изменяются.

Используя выражение возможной работы Максвелла-Мора в нашем случае, определяем перемещения  $\delta_{ik}$ ,  $\Delta_{ik}$  в виде, в котором учтены не только упругое обжатие, но и влияние на искомое перемещение продольных и поперечных сил.

В *третьей главе* в ПК Abaqus 6.14 был смоделирован коробовый свод в соответствии с исходными данными, шириной в  $b = 1$  м, для сравнения аналитического расчета. Конечно-элементная схема свода и забутки представлены на рисунке 12.

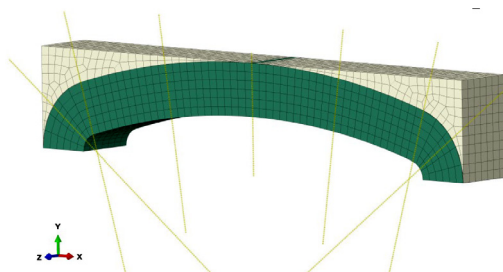


Рис. 12. Конечно-элементная модель

Схема анизотропии свода была принята цилиндрической ортотропной. Ориентация материала для пологой и опорной частей свода представлена на рисунке 13.

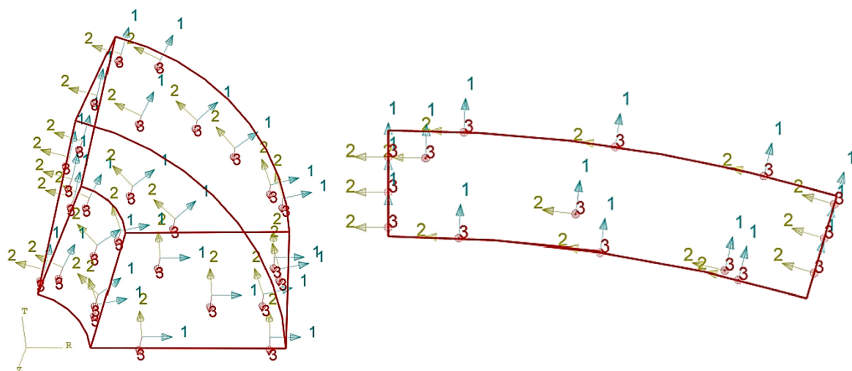


Рис. 13. Ориентация материала для опорной и пологой части свода

Свод моделировался из четырех жестко соединенных частей: двух частей, образующих пологую часть свода, и двух опорных, соответствующих кривой с малым радиусом. Была смоделирована забутка для корректного учета ее объемного веса.

Нагрузки и граничные условия представлены на рисунке 14. Собственный вес в ПК Abaqus 6.14 учитывается через задание гравитации на основе плотности материала кладки. Временная нагрузка и нагрузка от пола были приложены на горизонтальную поверхность забутки. Сосредоточенные силы были приложены к забутке по центральной оси конструкции на расстоянии от замка в 2 и 3 м согласно исходным данным. Граничные условия были приняты на основе конструкции свода: вертикальное закрепление под опорами, закрепление по оси  $X$  торцевых граней забутки, и закрепление по оси  $Z$  всей конструкции по свободным сторонам (для учета взаимодействия с сопряженными частями конструкции).

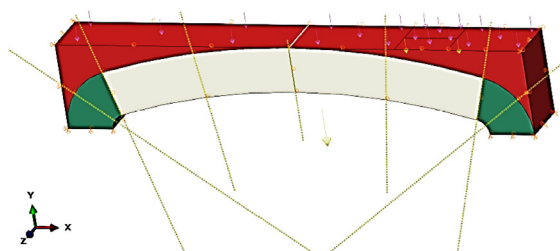


Рис. 14. Нагрузки и граничные условия

Результаты представлены на рисунках 15÷18 (Вариант  $B_{(1)} = 3 - k^2$  и сосредоточенные нагрузки в  $F_{1,2} = 5$  кН) (все комбинации).

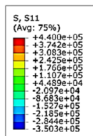


Рис. 15. Изополя напряжений  $\sigma_r$ , Па

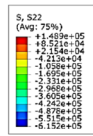


Рис. 16. Изополя напряжений  $\sigma_\theta$ , Па

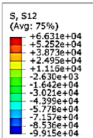


Рис. 17. Изополя напряжений  $\tau_{r\theta}$ , Па

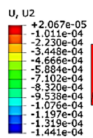


Рис. 18. Перемещения в замке, м

Графика из ПК Абакуса для  $B_{(2)} = 1 + 5k^2 / 3$ ,  $F_{1,2} = 5$  кН (рис. 19÷22):

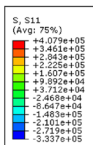


Рис. 19. Изополя напряжений  $\sigma_r$ , Па

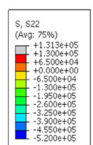


Рис. 20. Изополя напряжений  $\sigma_\theta$ , Па

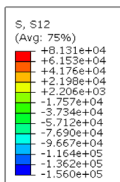


Рис. 21. Изополя напряжений  $\tau_{r\theta}$ , Па

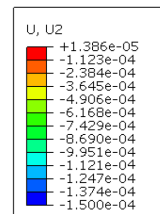


Рис. 22. Вертикальное перемещение, м

*Исследование влияния условно возможных осадок, дополнительной подвижки опор на 5 и 20 мм и радиальных трещин на напряженное состояние свода.*

На рисунках 23÷26 представлены изополя напряжений при осадке опоры на 5 мм.

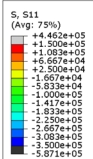


Рис. 23. Изополя напряжений  $\sigma_r$ , Па

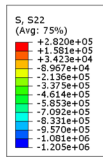


Рис. 24. Изополя напряжений  $\sigma_\theta$ , Па

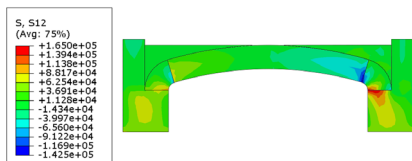


Рис. 25. Изополя напряжений  $\tau_{\varphi}$ , Па

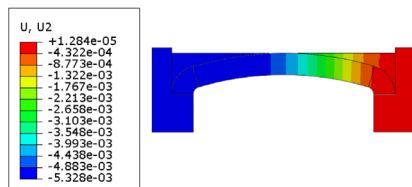


Рис. 26. Вертикальное перемещение, м

На рисунках 27÷30 представлены изополя напряжений при подвижке опор на 5 мм.

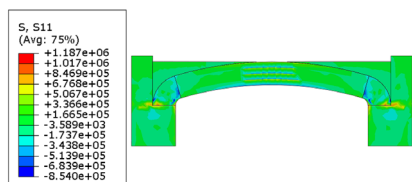


Рис. 27. Изополя напряжений  $\sigma_{\varphi}$ , Па

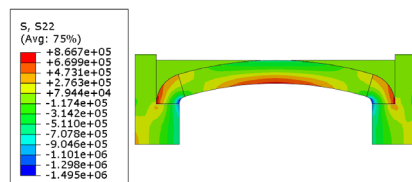


Рис. 28. Изополя напряжений  $\sigma_{\theta}$ , Па

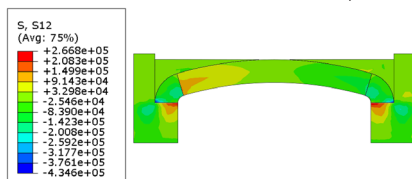


Рис. 29. Изополя напряжений  $\tau_{\varphi}$ , Па

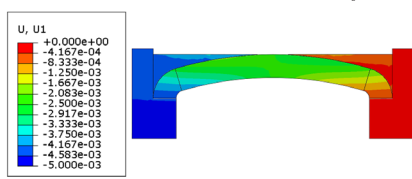


Рис. 30. Горизонтальные перемещения, м

На рисунках 31÷34 представлены изополя напряжений при учете трещин в теле свода – 1 в замке и 2 возле опор. Штрих-пунктирными линиями обозначены сквозные трещины в своде.

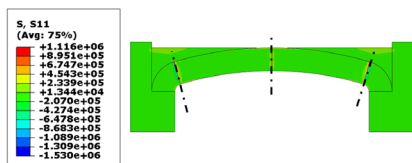


Рис. 31. Изополя напряжений  $\sigma_{\varphi}$ , Па

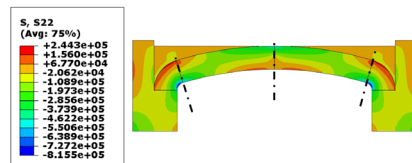


Рис. 32. Изополя напряжений  $\sigma_{\theta}$ , Па

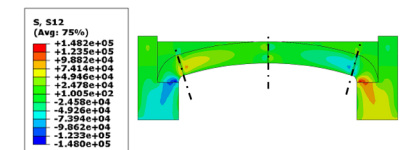


Рис. 33. Изополя напряжений  $\tau_{\varphi}$ , Па

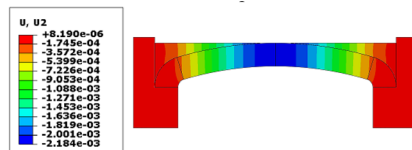


Рис. 34. Вертикальное перемещение, м

В *четвертой главе* приведена сравнительная оценка напряженно-деформированного состояния коробового свода по результатам эксперимента и теоретического расчета.

Для выявления напряжённого состояния под нагрузкой использовались механические тензометры Аистова модель ТА-2 с базой 100 мм (рис. 35). Вертикальные перемещения на оси симметрии коробового свода замерялись с помощью прогибомера 6 ПАО с ценой деления 0,01 мм. Схема расположения приборов показана на рисунке 36.

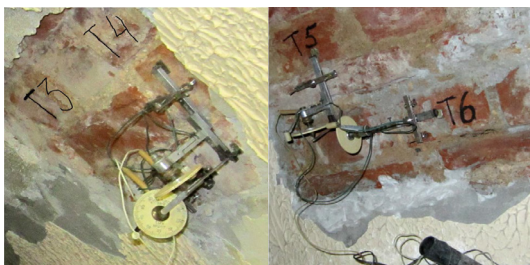


Рис. 35. Установка тензометров

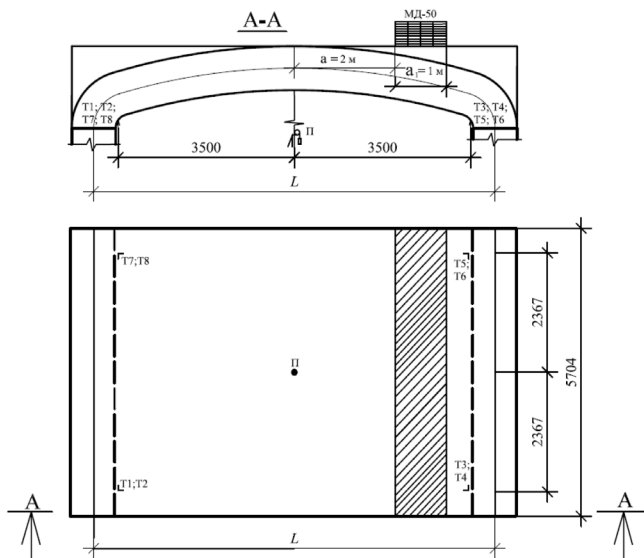


Рис. 36. Схема расположения приборов:  
 Т1÷8 – тензометры, П – прогибомер, МД-50 – металлический диск,  
 ▨ – участок нагружения

Загружение производилось металлическими грузами весом по 0,5 кН, укладываемыми на свод для создания равномерно распределенной нагрузки по полосе. Для каждой ступени нагружения величина распределенной нагрузки принималась равной  $\frac{1}{5} F_{max} = 2$  кН/м. После пяти шагов достигнута максимальная нагрузка в 10 кН/м.

Загружение начиналось по продольному сечению свода с обеих сторон к середине. Отсчеты по приборам производились после приложения нагрузки каждой ступени.

Полученные результаты экспериментальных исследований сравниваются с теоретическими данными, которые определены как аналитическим путем, так и проверочными численными расчетами свода в системе ПК Abaqus 6.14.

На рисунке 37 представлен график зависимости «нагрузка-напряжение», полученный по результатам теоретических и экспериментальных исследований.

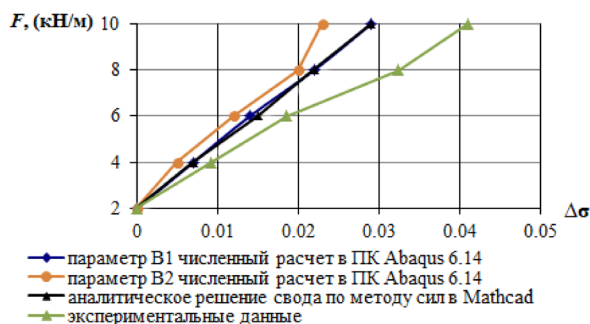


Рис. 37. Зависимость «нагрузка-напряжение»

На рисунке 38 представлен график зависимости «нагрузка-перемещение».

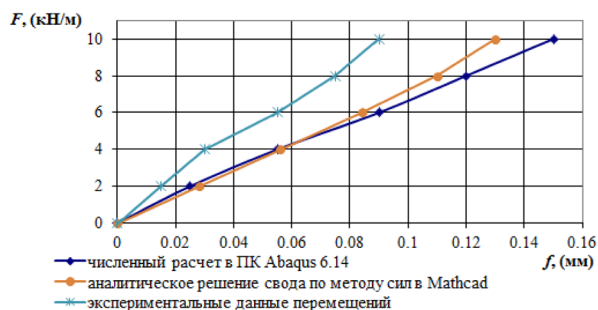


Рис. 38. Зависимость «нагрузка-перемещение»

### III. ОБЩИЕ ВЫВОодЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Получена уточненная математическая модель кривой оси коробового свода, что позволяет упростить подготовку исходных данных и выполнение поверочных расчетов.

2. Решена конкретная задача определения параметров упругости кирпичной кладки, позволяющая получить постоянные упругости материала свода для оценки напряженного состояния коробового свода как криволинейного ортотропного бруса с цилиндрической анизотропией.

3. Предложена методика расчета параметров напряженного состояния коробового свода как ортотропного тела с цилиндрической анизотропией на силовые воздействия.

4. Разработан численный метод расчета характеристик напряженного состояния коробовых сводов с учетом возможных повреждений в виде радиальной трещины, осадки опор и горизонтального смещения на основе программного комплекса Abaqus 6.14. Установлено, что:

- при просадке опор, например, на 5 мм, максимальные касательные напряжения  $\tau_{\theta}$  увеличиваются в 1,3 раза, тангенциальные напряжения  $\sigma_{\theta}$  – в 2 раза;
- при горизонтальной подвижке опоры, например, на 5 мм, касательные напряжения  $\tau_{\theta}$  увеличились вдвое. Максимальные тангенциальные напряжения  $\sigma_{\theta}$  увеличились в 3,2 раза;
- появление радиальной трещины в пятовой зоне приводит к увеличению тангенциальных напряжений  $\sigma_{\theta}$  в 1,5 раза, касательных  $\tau_{\theta}$  в 1,13 раза.

Таким образом, наличие подвижек и просадки опор свода провоцирует появление опасных участков, особенно на приопорных зонах. При этом трещины в приопорных зонах могут спровоцировать концентрацию напряжений, которые наиболее опасны при эксплуатации зданий и сооружений. Повреждения указанного типа следует учитывать в поверочных расчетах.

5. Сопоставительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований параметров напряженно-деформированного состояния коробового свода свидетельствует о близости их значений, что подтверждает адекватность предложенных методик.

По результатам выполненного исследования могут быть сформулированы следующие **практические рекомендации**:

- для учета влияния горизонтального смещения и осадки опор на напряженное состояние рекомендуется применять метод сил;
- для оценки влияния радиальной трещины на напряженное состояние свода целесообразно использовать МКЭ на базе ПК Abaqus 6.14;
- в случае стандартной формы свода (круглого очертания) возможно применение аналитического выражения, полученного методами теории упругости анизотропного тела и численным методом, например, ПК Abaqus 6.14;

- для численной оценки напряженного состояния сводчатых конструкций средствами МКЭ, в частности, средствами ПК Abaqus 6.14, рекомендуется учитывать свойства анизотропии материалов кирпичной кладки;
- выбор вариантов усиления конструкции свода возможен после определения местонахождения опасных участков.

#### **IV. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, перечень которых размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним:**

1. **Калдар-оол, А-Х.Б.** Аналитические способы построения трехцентровых коробовых кривых / С.А. Корзон, А-Х.Б. Калдар-оол // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – №1(30). – С. 112-114.
2. **Калдар-оол, А-Х.Б.** Определение несущей способности кладки в зданиях памятников архитектуры XVIII-XIX веков / А-Х.Б. Калдар-оол // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – №3(32). – С. 104-106.
3. **Калдар-оол, А-Х.Б.** Расчет коробового свода методом сил / А-Х.Б. Калдар-оол // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 4(63). – С. 135–138.
4. **Калдар-оол, А-Х.Б.** Анизотропия кирпичных коробовых сводов / В.Н. Глухих, А-Х.Б. Калдар-оол // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 6(77). – С. 130-136.

**Публикации в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования (Scopus и Web of Science):**

5. **Kaldar-ool, A-Kh.B., Babanov, V.V., Allahverdiv, B.M., Saaya, S.S.** Additional load on barrel vaults of architectural monuments // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – № 8(84). – Pp. 15–28.

**Статьи в других изданиях:**

6. **Ооржак, А-Х.Б.** Особенности расчета сводов [Текст] / С.А. Корзон, А-Х.Б. Ооржак // Актуальные проблемы современного строительства: сборник материалов 62-й Международной научно-технической конференции молодых ученых / СПбГАСУ. – В 5 ч. Ч. IV. – СПб., 2009. – С. 7-10.
7. **Ооржак, А-Х.Б.** Усиление щековой стены свода перекрытия в административном корпусе Этнографического музея [Текст] / А-Х.Б. Ооржак // Доклады 67-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета/ СПбГАСУ. – В 5 ч. Ч. IV. – СПб., 2010. – С. 52-55.
8. **Ооржак, А-Х.Б.** Методы расчета каменных цилиндрических сводов, используемых в исторической застройке [Текст] / С.А. Корзон, А-Х.Б. Ооржак // Актуальные проблемы современного строительства: 63-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых / СПбГАСУ. – В 3 ч. Ч. II. – СПб., 2010. – С. 250-253.



9. **Ооржак, А-Х.Б.** Сравнение результатов статического расчета корбовых сводов (XVIII – XXI в.) с расчетом по современным нормам [Текст] // С.А. Корзон, Б.М. Аллахвердов, А-Х.Б. Ооржак // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте. Сборник тезисов докладов VIII Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте 22-23 июня 2011 г. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения, 2011. – С. 7-8.

10. **Калдар-оол, А-Х.Б.** Определение прочностных и упругих свойств кирпичной кладки при реставрации памятников архитектуры [Текст] / С.А. Корзон, А-Х.Б. Калдар-оол // Актуальные проблемы современного строительства и архитектуры: международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов / СПбГАСУ. – В 2 ч. Ч. 1. – СПб., 2012 г. – С. 48-51.

**Патенты, базы данных и программы для ЭВМ, имеющие госрегистрацию**

11. **Калдар-оол, А-Х.Б.** Геометрический расчет свода очерченной по форме корбовой кривой: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664162: дата гос. рег. 09.11.2020/ Калдар-оол, А-Х.Б., Опбул Э.К., Дадар А.Х.

---

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 20.11.2020. Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,45. Тираж 120 экз. Заказ 111.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4. Отпечатано на МФУ.

198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.