

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 624.072.22

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-15-25>

### Современное технологическое решение перекрытия цилиндрического свода нефа при строительстве храма святителя Тихона в Санкт-Петербурге

Н.В. Розанцева , А.Д. Дроздов 

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ [nrozanceva@lan.spbgasu.ru](mailto:nrozanceva@lan.spbgasu.ru)



EDN: KJZRYO

#### Аннотация

**Введение.** Статья посвящена истории разработки и воплощения проекта строительства перекрытия нефа храма святителя Тихона, патриарха Московского и всея России, на улице Коммуны, дом № 17а, в г. Санкт-Петербурге. Храм строился и строится по заказу местной религиозной организации на пожертвования неравнодушных и прихожан. В первоначальном проекте предполагалось возведение арочного цилиндрического свода над нефом из каменной кладки, что требует сложных инженерных решений и значительных затрат труда и средств. К октябрю 2024 года стало понятно, что строительство традиционным способом не позволит освятить храм, выполнив этот проект в сжатые сроки и при ограничении средств. Целью исследования была, разработка альтернативного решения устройству арочной кирпичной кладки с затяжками по короткой стороне нефа храма.

**Материалы и методы.** После рассмотрения вариантов принято решение использовать арочные балки в качестве ребер жесткости, которые должны были взять на себя часть нагрузки, в том числе и от распора. Выдвинуто предположение о возможности замены преднапряженной арматуры верхнего ряда на комбинированную, позволяющее оптимизировать конструкцию арки. Для определения требуемых параметров произведен сбор нагрузок, и расчет напряженного состояния арки в том числе и в программе SCAD с учетом ее работы на стадии эксплуатации. Снижение зон напряжений достигнуто дополнительным армированием стержнями и хомутами.

**Результаты исследования.** Проведённые исследования позволили уменьшить расходы сохраняя конструктивную жесткость арки. В соответствии с расчетами разработаны опалубочные чертежи. Процесс переноса параметров с чертежей в реальные размеры и бетонирование был тщательно организован, использовались современные инструменты для контроля качества на каждом этапе. Монтаж готовых железобетонных конструкций оказался более технологичным и быстрым по сравнению с монолитной системой.

**Обсуждение и заключение.** Проект кирпичного свода был успешно выполнен с минимальными отклонениями. Площадь опирания конструкций и высота подъема арки полностью соответствовали расчетным значениям. Было установлено, что принятое решение позволило значительно сократить нагрузку на основание, повысить общую конструктивную жесткость, при этом освободив пространство под куполом от затяжек, снизить продолжительность строительства, что позволило уложиться в заданные сроки, и уменьшить стоимость работ.

Научная новизна применения арок со смешанной системой армирования заключается в простоте конструкции, отсутствии необходимости увеличения сечения элементов ферм и возможности использования комбинированной арматуры.

**Ключевые слова:** неф, цилиндрический свод, промежуточные опоры, арочная балка, комбинированная арматура

**Благодарности.** Авторы благодарят генерального директора ЖБИ-8 за предоставление своих мощностей и изготовление арок для храма святителя Тихона, а также авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

**Для цитирования.** Розанцева Н.В., Дроздов А.Д. Современное технологическое решение перекрытия цилиндрического свода нефа при строительстве храма святителя Тихона в Санкт-Петербурге. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(1):15–25. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-15-25>

## Modern Technological Solution for Covering the Cylindrical Vault of the Nave during the Construction of the Church of St. Tikhon in St. Petersburg

Nadezhda V. Rozantseva , Alexander D. Drozdov 

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

 [nrozanceva@lan.spbgasu.ru](mailto:nrozanceva@lan.spbgasu.ru)

### Abstract

**Introduction.** The article is dedicated to the history of the development and implementation of the project for the construction of the ceiling of the nave of the church of St. Tikhon, Patriarch of Moscow and All Russia, at 17 Commune Street, St. Petersburg. The church was built and is under construction on an order of a local religious organization with donations from whoever cares to do this and church visitors. The original project envisaged the construction of an arched cylindrical vault above a masonry nave, which called for complex engineering solutions and considerable labor and financial costs. By October 2024, it became clear that construction in the traditional way would not enable the church to be consecrated, having completed this project in a short time and with limited funds. The aim of the study was to develop an alternative solution to the construction of arched brickwork with puffs on the short side of the nave of the temple.

**Materials and Methods.** Having considered the options available, we decided to make use of arched beams as stiffeners, which were supposed to take on some of the load, including from the strut. It was assumed that it was possible to replace the prestressed reinforcement of the upper row with a combined one making it possible to optimize the arch design. In order to identify the required parameters, loads were collected and the stress strain of the arch was calculated, including in the SCAD program provided it was at the operational stage. The reduction of stress zones is achieved by additional reinforcement with rods and clamps.

**Results.** The research enabled us to reduce costs while maintaining the structural rigidity of the arch. In accordance with the calculations, the formwork drawings have been developed. The process of transferring parameters from drawings to actual dimensions and concreting was meticulously organized by means of modern quality control tools at each stage. The installation of ready-made reinforced concrete structures turned out to be more technologically advanced and faster than a monolithic system.

**Discussion and Conclusion.** The brick vault project was successfully completed with minimal deviations involved. The support area of the structures and the height of the arch rise fully corresponded to the calculated values. The solution was found to have made it possible to considerably cut down the load on the base, increase the overall structural rigidity, while freeing the space under the dome from tightening, reduce construction times making it possible to meet the deadlines as well as to reduce the costs. The scientific novelty of using arches with a mixed reinforcement system is the simplicity of the design, the absence of the need to increase the cross-section of the truss elements and the possibility of using combined reinforcement.

**Keywords:** nave, cylindrical vault, intermediate supports, arched beam, combined reinforcement

**Acknowledgements.** The authors would like to thank the General Director of ZHBI-8 for providing their facilities and manufacturing arches for the church of St. Tikhon as well as the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the above comments making it possible to improve its quality.

**For citation.** Rozantseva NV, Drozdov AD Modern Technological Solution for Covering the Cylindrical Vault of the Nave during the Construction of St. Tikhon's Church in St. Petersburg. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(1):15–25. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-15-25>

**Введение.** Испокон веков в самые тяжелые времена человечество начинало стремиться соединиться под эгидой сильного государства в единую сплоченную силу. В этот период вера выступает наибольшим подъемным и объединяющим стимулом.

Церковь обладает способностью объединять человеческое общество благодаря своей роли социального института и регулятора экономических и иных отношений. Она формирует мировоззрение людей, устанавливает моральные и этические правила, а также дарит человеку чувство безопасности и защищенности, утраченное под воздействием внешних факторов. Всё это способствует объединению людей на основе общего мировоззрения и вероисповедания, повышению социальной активности, духовному возрождению, сохранению культурного наследия и традиций, что, в свою очередь, формирует положительный имидж страны в целом, повышая ее туристическую привлекательность. Здесь же необходимо отметить и экономическую составляющую, когда возрождение веры и строительство храмов способствует созданию рабочих мест и экономическому развитию регионов.

Храм святителя Тихона, патриарха Московского и всея России, на улице Коммуны, дом 17а — один из первых храмов на территории Северо-Западного округа, посвященный реальному человеку, имеющему непосредственное отношение к Санкт-Петербургу, новомученику первых лет советской власти, который в самые тяжелые для церкви времена возглавил Патриархию. Человеку, совершившему по факту свой небольшой подвиг и посвятившему свою жизнь Русской Православной Церкви и прошедшему «Левашовскую голгофу» [1, 2] после Петроградского процесса 1922 года. В 2025 году мы отметим скорбную дату кончины святителя Тихона, Патриарха Московского и всея России.

Храм строился и строится по заказу местной религиозной организации, на пожертвования неравнодушных и прихожан церкви Курской-Коренной Иконы Божией Матери «Знамение», расположенной на соседнем участке. Строительство началось в конце 2021 года, фактически храм уже возведен, и в начале января 2025 года протоирей Александр Пашков уже провел первое богослужение. В ближайшее время будет установлен иконостас [3].

Строительство каменного храма велось в очень сложных условиях: и стесненность, когда большая часть храма оказалась возведена за пределами участка, отведенного под религиозное использование, и достаточно сложное напластование грунтов основания, и проблемы с финансированием при жестко заданных сроках строительства.

Первоначальный проект пятиглавого храма был разработан компанией ООО «АМЦ-проект»: из красного кирпича, в неоклассическом стиле, в форме корабля, с шатровым завершением колокольни и основного объема. Однако по ряду причин в него пришлось вносить вынужденные изменения. Последние были связаны с необходимостью сокращения продолжительности строительства (при сохранении конструктивной жесткости, архитектурной целостности) и удешевления проекта.

Цель исследования — разработка организации и строительства арочных балок по короткой стороне нефа как альтернативы устройства кирпичного цилиндрического свода с затяжками с учетом сохранения требуемой высоты цилиндрического кирпичного свода и конструктивной жесткости храма в целом.

Научная новизна заключается во включении новой конструкции из железобетона в ранее разработанный классический проект храма с уже поднятыми стенами. Данное решение позволило сохранить конструктивную жесткость, не применяя требуемых затяжек, тем самым освободить внутреннее пространство, снизить трудозатраты и стоимостные показатели.

**Материалы и методы.** Выполнение купольных и цилиндрических сводов из каменной кладки известно еще со времен Римской империи. Данные своды являются одними из наиболее прочных и способных воспринимать максимальные нагрузки. Существенными недостатками таких конструкций являются: высокая нагрузка на основание; полная невозможность механизации работ в процессе их возведения и тем самым сокращения трудозатрат и продолжительности строительства; необходимость выполнения работ каменщиками очень высокой квалификации; высокая стоимость таких работ.

Кладку арок и сводов необходимо выполнять от пяты к замку одновременно с обеих сторон, используя две бригады каменщиков [4]. Завершается кладка заклиниванием свода замковыми кирпичами. Кладку следует проводить небольшими участками, чтобы избежать обрушения. Все швы кладки должны быть полностью заполнены раствором. Центральная ось каждого кирпича должна быть строго перпендикулярна поверхности свода. При кладке сводов из кирпича или камней необходимо дополнительно заливать швы жидким раствором, не затирая верхнюю поверхность сводов.

Кладку сводов двойкой кривизны следует начинать не ранее чем через неделю после окончания устройства их пяты. Температура наружного воздуха должна быть выше +10 °С. Если температура воздуха составляет от +10 до +5 °С, то срок увеличивается в полтора раза, а при температуре от +5 до +1 °С — в два раза.

Распалубку участка свода можно проводить не ранее чем через 10–20 дней при температуре наружного воздуха не менее +10 °С. При более низких положительных температурах продолжительность выдерживания сводов на опалубке увеличивается.

При кладке сводов со стрелой подъема  $f/l < 1/5$  распор обязательно закрепляют затяжками и дополнительно по дуге окружности, как и в нашем случае. В пятах, где грани примыкают, устанавливаются сборные железобетонные элементы из бетона марки не ниже М200, армированные конструктивной арматурой диаметром 6–8 мм. Также можно использовать стальные элементы из уголков, листовой и полосовой стали. Через эти элементы пропускаются концы затяжек. Для повышения устойчивости опорных узлов при действии распора сводов в опорных узлах устанавливаются выносные пяты, которые образуют карниз с внутренней стороны помещения. Выносные пяты также повышают устойчивость опорных узлов. В опорных узлах свода должны быть наклонные поверхности, образуемые путём ступенчатой кладки кирпичей, которые должны быть перпендикулярны оси свода.

Технология практически не изменилась со времен начала строительства каменных храмов. Из всего перечисленного напрашивается вывод, что выполнить качественную кладку, уложиться в сжатые сроки, будучи ограниченными в средствах, достаточно проблематично. На рис. 1 представлены фотографии Храма святителя Тихона и чертеж разреза храма с учетом встраиваемой конструкции.



Рис. 1. Храм святителя Тихона, Патриарха Московского: а — внешний облик храма; б — разрез храма с учетом встраиваемой конструкции арочной балки; в — вид храма в сторону алтаря изнутри

Вопрос об устройстве полностью монолитного купольного покрытия не рассматривался. Сложность или недостаток цельно монолитных конструкций для культовых купольных сооружений заключается в том, что их возведение требует специальных навыков и технологий, они имеют более высокую себестоимость по сравнению с системой применения балочных арок.

**Первое выдвинутое предположение.** Для того чтобы отказаться от затяжек, сохранив конструктивную жесткость, нужно было усилить с определенным шагом участки конструкции свода, то есть усилить обычный каркас, скрытый в кладке заполнения, и прибегнуть к устройству выступающих из кладки свода балочных арок, которые бы стали своего рода ребрами жесткости.

**Второе предположение.** В сводах, полностью выполненных из клинкерных кирпичей, обычно возникает дополнительное распорное усилие, и требуются особые устройства для восприятия этого распора [5]. Было принято решение об усилении стены под пяты этих арок пилястрами, которые смогут выдержать давление от веса свода и воспринимать распор. Благодаря такому решению свод на перегруженном участке получает необходимое усиление, хотя в помещении и появляются лишние выступы. Основная задача, которая была поставлена проектировщикам для разработки проекта железобетонных арок, заключалась в создании арок определенной высоты с небольшой массой, т. е. с наименьшим расходом материала, монтаж которых возможен автокранами и кранами небольшой грузоподъемности при сохранении требуемой жесткости и высоты подъема купола. От высот дуги арки зависит ее несущая способность: большая — увеличивает несущую способность, т. к. увеличивается площадь сжатой зоны и момент инерции сечения, т. е. увеличивается сечение арки; слишком большая дуга арки может привести к уменьшению несущей способности из-за снижения жесткости и увеличения прогибов. Следовательно, оптимальная высота должна обеспечивать максимальную несущую способность при минимальных затратах материала и соблюдении требований по жесткости и трещиностойкости [6]. Одним из важных показателей качества и механической безопасности эксплуатации является остаточная несущая способность. Она определяется по нескольким критериям: прочности арматуры и бетона, жесткости, образованию трещин и их ширине раскрытия.

Оптимальная высота назначена исходя из величины изгибающего момента и толщины стенки, что обеспечивает минимальную стоимость арки с точки зрения расхода материала. Ширина нефа храма — длина пролета арки — принята исходя из ранее запроектированных размеров — 8,05 м, требуемый подъем арки — 1150 мм, чтобы с учетом высоты последней войти в предыдущий высотный проект свода нефа. Высота кладки свода 640 мм. Для изначального расчета высоту железобетонной арки, защемленной на двух концах, приняли не менее 1/15 пролета, т. е. приблизительно 400 мм между наружными гранями поясов. Для расчета радиуса кривизны свода арки, которая является частью конструкции, была использована формула для параболической арки. Подставив эти значения, получаем:

$$R = \frac{h^2 + \frac{\omega^2}{4}}{2h} \approx 6,85\text{ м},$$

где  $R$  — искомый радиус кривизны;  $\omega$  — ширина пролета (в данном случае ширина нефа) — 8,05 м;  $h$  — высота подъема свода от центра пролёта до вершины арки  $1,15 + 0,4 = 1,55$  м.

Из этого следует, что по 0,6 м будет приходиться на опорный узел с каждой стороны. Ширину для расчета задали из соотношения высоты к ширине — 468 мм, что обусловлено размером верхней площадки опорного элемента. Предполагаемый шаг арматуры — 200 мм. Арки запроектированы из бетона класса В40.

**Третье предположение.** В большинстве проектов при использовании железобетонных арок подобной конструкции ранее всегда применялась предварительно напряженная арматура, при использовании которой не возникают растягивающие напряжения от эксплуатационных нагрузок. При проектировании таких балочных арок исследования влияния на распределительную способность арматурной пространственной системы в процессе эксплуатации не проводились. Особенности выполнения арматуры для криволинейных пролётных арок включают использование специальной косвенно армируемой спиралью арматуры, такой как отдельные проволоки, пряди и стержни периодического профиля. Также применяются пучки с внутренними анкерами и непрерывное армирование на кассеты. Натяжение арматуры может осуществляться до бетонирования (на упоры) или после бетонирования (на бетон).

Недостатки данного решения:

- такой подход к проектированию приводил к неоправданному расходу арматурной стали;
- усложняется размещение арматуры в соответствии с эпюрами материалов, то есть выполнение обрыва арматуры там, где она не требуется по длине конструкции, становится невозможным;
- необходимо приложение больших усилий на силовые формы при натяжении арматуры и обжиге бетона при передаче усилий от упоров на бетон.

Ранее применяемые конструкции для относительно небольших пролетов были не экономичны по расходу материалов. В нашем случае арочные балки работают как единая пространственная система благодаря объединенному устройству верхнего кирпичного свода. Поэтому было принято решение использовать смешанное армирование путем замены допустимого числа высокопрочных пучков на обычную стержневую арматуру. В нижнем поясе запроектировали напрягаемую арматуру класса А-IV (А600) периодического профиля, в остальных элементах — продольная арматура А400, а для сохранения жесткого в поперечном направлении пролетного строения были предусмотрены элементы поперечной и монтажной арматуры класса А240.

Несущая способность балочной арки зависит от ее геометрических размеров, материалов изготовления и условий эксплуатации. Ключевым фактором, влияющим на этот показатель, является максимальная нагрузка, которую конструкция может выдержать без деформации или разрушения [7].

Произведен сбор нагрузок. Учитывая плотность кирпича  $\rho \approx 1800 \text{ кг/м}^3$  и объем кладки свода<sup>1</sup>:

$$V = L * \omega * H = 24 \text{ м} * 8,05 * 0,64 = 122,88 \text{ м}^3,$$

где  $\omega$  — ширина свода (равна ширине нефа).

Соответственно вес свода:

$$P = \rho * V = 221,184 \text{ т}.$$

При расчете свода была учтена возможность увеличения постоянной нагрузки, распределенной по горизонтальной проекции свода, при направлении от центра к опорам по кривой:

$$g_x = g * \left( \frac{1}{\cos \varphi} - 1 \right),$$

где  $g_x$  — дополнительная постоянная нагрузка, вызываемая уклоном покрытия в сечениях, отстоящих на расстоянии от  $x$  опоры, кгс/м;  $g$  — постоянная нагрузка в центре свода кг/м;  $\varphi$  — угол наклона к горизонту касательной к оси свода в рассматриваемом сечении.

Была поставлена задача рассчитать допустимость замены верхнего ряда пучков предварительно напряженной арматуры на стержневую арматуру<sup>2</sup> [8] с учетом дальнейшего её отгиба в опорную сжатую зону бетона. Для подтверждения выдвинутого предположения были произведены теоретические расчеты верхнего пояса по поперечному сечению арматуры:

$$A_{\text{тр}} = \frac{N_2}{R_b + 0,01R_{sc}},$$

где  $R_{sc} = 355 \text{ МПа}$  — расчетное сопротивление продольного профиля рабочей арматуры класса А400.  $A_{\text{тр}}$  — требуемая площадь продольного сечения одного стержня арматуры верхнего пояса;  $N_2$  — усилие в продольной арматуре;  $R_b$  — расчетное сопротивление бетона В40 — 51,37 МПа.

При ранее назначенной ширине элементов арки (468 мм) требуемая высота поперечного сечения верхнего пояса  $h_{\text{тр}} = A_{\text{тр}}/b$ ;  $h$  — 12 мм. Площадь продольной рабочей арматуры при усредненном коэффициенте продольного изгиба  $\varphi = 0,9$ . Принимается 8 стержней диаметром 16 мм.

<sup>1</sup> СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия.

<sup>2</sup> Крылов С.Б., Чистяков Е.А., Зенин С.А., Соколов Б.С., Шарипов Р.Ш., Кудинов О.В. Конструкции железобетонные монолитные с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном, правила проектирования: методическое пособие. Москва; 2017. 206 с.

**Результаты исследования.** Для подтверждения проведенных исследований и получения более детального ответа выполнен расчет напряженного состояния балочной арки в программном комплексе SCAD с учетом работы арки на стадии эксплуатации, соответственно нагрузки от внешних сил были заданы для этой стадии. Принятый класс бетона — В40.

Изначальной задачей было сократить количество применяемой преднапрягаемой арматуры и заменить верхний ряд предварительно напряженной арматуры на стержневую арматуру с дальнейшим отгибом её по эпюре материалов в сжатую зону бетона, что должно было уменьшить потери в расходе материала и сохранить работоспособность конструкции. По изополям видно, что аналитический расчет в целом проведен верно, и замена на арматуру класса А400 не оказывает влияния на несущую способность арки по изгибающему моменту в отличие от приопорного участка, где по изополям на плане видно напряжения в опорной зоне. Полученные результаты изополей представлены на рис. 2. Было принято решение уменьшить такие зоны напряжений путем применения дополнительного армирования обычной стержневой арматурой и хомутами, т. е. применить смешанное армирование.

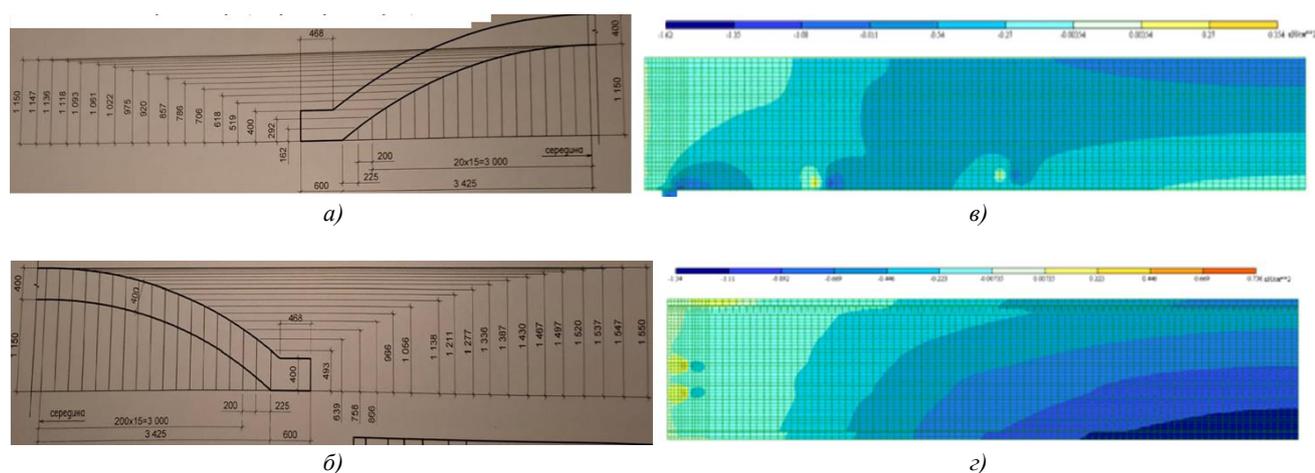


Рис. 2. Эскиз для расчета и проведение расчета балочной арки в программе SCAD: а — схема опалубки, разбивочный чертеж (левая сторона); б — опалубочный чертеж (правая сторона); в — изополя нормальных напряжений арки (продольный разрез по оси); г — изополя нормальных напряжений арки в плане

Окаймляющие стержни выполнены цельногнутыми со стыковкой их в верхней зоне опорных узлов и в нижней зоне фермы. Площадь продольных верхних стержней не менее 0,05 % от площади поперечного сечения опорных узлов, диаметр — 16 мм, при этом в местах перегибов у опорных узлов устанавливаются пространственные каркасы и дополнительная поперечная арматура в виде хомутов из стали А240, что обеспечит надежность анкеровки растянутой арматуры нижнего пояса.

В пролетной зоне принято 15 стержней поперечной арматуры с шагом 200 мм, при этом дополнительные элементы установлены с шагом 100 мм на нижнем поясе и не менее 200 мм от торца опорного узла.

Наиболее сложным вопросом при производстве подобных железобетонных конструкций стендовым способом является точность переноса параметров с чертежей в реальные размеры — это сложная и ответственная задача, требующая высокого уровня профессионализма. Даже малейшие отклонения от заданных параметров могут иметь серьезные последствия, может быть искажена геометрия готового изделия, арочная балка не будет точно соответствовать реальным требуемым параметрам. К примеру, недостаток арматуры снижает несущую способность конструкции, тогда как излишек арматуры ведет к увеличению веса и стоимости изделия.

Чтобы избежать подобных проблем, был тщательно организован процесс переноса размеров с чертежа в реальную конструкцию, принято решение формировать арку на ребре, как наиболее оптимальном положении для бетонирования и транспортировки<sup>3</sup>, произведены разбивочные работы по устройству геодезической подосновы. Чтобы минимизировать риски, связанные с возможными ошибками в процессе производства, работы выполнялись с применением построителя лазерных плоскостей «ADA 3D Liner 4V» и тахеометра «GeoMax Zoom50 1 A5 Polar», в процессе выполнения работ непрерывно выполнялся ряд действий<sup>4</sup> для соблюдения непрерывного контроля<sup>5</sup> [9].

<sup>3</sup> СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции.

<sup>4</sup> СП 126.13330.2012 Геодезические работы в строительстве.

<sup>5</sup> Летчфорд А.Н., Шинкевич В.А. *Руководство по проведению строительного контроля*. СПб.; 2016. 592 с. (ISBN 978-5-904362-07-2)

Опалубка обязана обладать прочностью, стабильностью, герметичностью, бетон должен не просачиваться, точно воспроизводить форму будущего изделия и обладать удобством в установке и снятии, чтобы минимизировать временные и трудовые затраты. Ошибки при сборке опалубки могут спровоцировать появление трещин, щелей и прочих дефектов. Т. к. опалубка была для единичного заказа, и требовалось только восемь подобных арок, плоскость выполнили из гнутой фанеры. Чтобы выдержать давление свежеслитого бетона и предотвратить деформацию и смещение, произведено раскрепление брусками.

Арматурный каркас гнули по месту с небольшим нагревом, учитывая требования к прочности и жесткости конструкции. Все компоненты выполнены по разработанному проекту с учетом строительных норм и правил. После проверки арматурного каркаса на соответствие палубочной форме он был перенесен во внутрь опалубки и закреплен с соблюдением размеров защитного слоя. Применена бетонная смесь марки В40, работы выполнены с обеспечением равномерной заливки бетона и предотвращением появления пустот. Визуализация процесса представлена на рис. 3.

Кантовали готовое изделие в проектное положение уже на стройке.



Рис. 3. Визуализация процесса создания железобетонной конструкции:  
а — арматурный каркас; б — единичная опалубка; в — готовая арочная балка на ребре

Контроль качества работ выполнялся на каждом этапе. Дополнительным бонусом можно считать, что принятое решение позволило значительно сократить нагрузку на основание, в том числе за счет сокращения высоты кладки с 1 м до 0,64 м, повысить общую конструктивную жесткость, при этом освободив пространство под куполом от затяжек.

**Обсуждение и заключение.** Проект был разработан с минимальными отклонениями и не потребовал корректировок в процессе монтажа, площадь опирания конструкций и высота подъема арки полностью соответствовала расчетным значениям. К началу монтажа арок были закончены все работы по возведению стен, приняты по акту опорные пилястры, переставные поддерживающие леса, изготовлены шаблон опалубки («кружала») и шаблон угольников для кирпичной кладки. Работы велись автомобильным краном (рис. 4). Передвижка шаблонов опалубки под кирпичную кладку свода осуществлялась лебедкой. Для создания поточного метода производства работ и сокращения продолжительности строительства работы по кладке купола нефа начаты с отступом в один день с монтажом арок. Все передвижения осуществлялись по поддерживающим лесам.

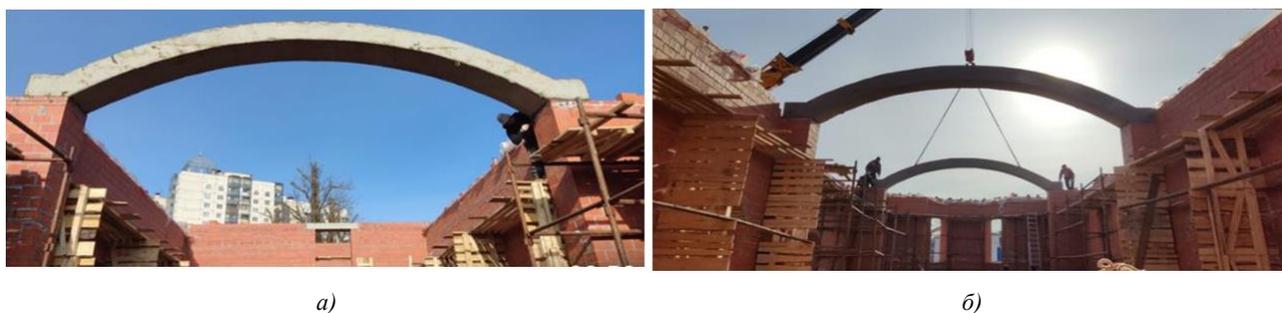


Рис. 4. Процесс монтажа арочных балок: а — установленная на опорную пилястру балка; б — крановый монтаж с наводкой

Кладка купольного свода выполнялась с установкой кирпичей «на ребро» одновременно двумя бригадами кладочников с двух сторон нефа от пят к вершине с тщательной перевязкой швов, что позволило значительно сократить трудозатраты и при этом повысить устойчивость свода. В процессе кладки велся постоянный контроль выполнения работ. Для подтверждения правильности выбранного метода производства работ проведена калькуляция затрат на кирпичную кладку свода нефа по «Единым нормам и расценкам на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы»<sup>6</sup> с учетом устройства закладных деталей и затяжек свода и монтажа арок в качестве ребер жесткости. Результаты расчетов представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Калькуляция затрат труда и машинного времени на кирпичную кладку свода

| № п/п | Обоснование (ЕНиР) | Наименование технологических процессов                  | Ед. изм.          | Объем работ | Норма времени    |                 | Затраты труда     |                  |
|-------|--------------------|---|-------------------|-------------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|
|       |                    |   |                   |             | рабочие, чел.-ч. | машины, маш.-ч. | рабочие, чел.-см. | машины, маш.-см. |
| 1     | ЕЗ-20А             | Подача и установка подмостей автомобильным краном       | 10 м <sup>3</sup> | 4,33        | 1,44             | 0,48            | 0,78              | 0,26             |
| 2     | Е15-35             | Установка шаблона опалубки в рабочее положение          | м <sup>2</sup>    | 1135,68     | 0,37             | 0               | 52,53             | 0                |
| 3     | Е1-6               | Подача раствора к месту работы                          | м <sup>3</sup>    | 174,44      | 0,84             | 0,42            | 18,32             | 9,16             |
| 4     | Е1-6               | Подача кирпича к месту работы                           | 1000 шт.          | 37,472      | 0,36             | 0,18            | 1,69              | 0,84             |
| 5     | ЕЗ-10              | Кладка свода из кирпича на цементном растворе           | м <sup>3</sup>    | 726,84      | 3,8              | 0               | 345,25            | 0                |
| 6     | ЕЗ-9               | Устройство опорных парапетов                            | м <sup>3</sup>    | 10,56       | 3,5              | 0               | 4,62              | 0                |
| 7     | ЕЗ-18              | Укладка в стены стальных элементов и деталей            | 100 кг            | 6,8         | 1,1              | 0,33            | 0,94              | 0,28             |
| 8     | Е25-7              | Разматывание и перемещение стального каната             | 100 м каната      | 0,736       | 2,6              | 0               | 0,24              | 0                |
| 9     | ЕЗ-18              | Установка затяжек из стальных элементов                 | 100 шт.           | 0,16        | 24,5             | 1,24            | 0,5               | 0,03             |
| 10    | Е25-7              | Наматывание и перемещение                               | 100 м каната      | 0,736       | 2,9              | 0               | 0,27              | 0                |
| 11    | Е25-7              | Добавлять на каждый дополнительный перерез сверх одного | 100 м каната      | 0,736       | 0,69             | 0               | 0,07              | 0                |
| 12    | Е4-1-28            | Конопатка, зачеканка и расшивка швов                    | 10 м.             | 4,8         | 1,4              | 0,56            | 0,84              | 0,34             |
| 13    | ЕЗ-10              | Опускание опалубки на клиньях                           | м <sup>2</sup>    | 1135,68     | 0,55             | 0               | 78,08             | 0                |
| 14    | Е1-6               | Перестановка подмостей краном                           | 100 т             | 0,33        | 23               | 11,5            | 0,95              | 0,47             |
| 15    | Е25-20             | Перемещение шаблона опалубки ручной лебедкой            | шт.               | 20          | 0,76             | 0               | 1,90              | 0                |
|       |                    |   |                   |             |                  |                 | <b>506,93</b>     | <b>11,39</b>     |

\*Примечание: посчитанные затраты не учитывают изготовление и разборку шаблона опалубки для свода.

<sup>6</sup> ЕНиР. Единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. Сборник Е 1. Внутрипроектные транспортные работы: <https://docs.cntd.ru/document/1200000897>  
 ЕНиР. Сборник Е 3. Каменные работы: <https://docs.cntd.ru/document/1200001038>  
 ЕНиР. Сборник 4. Монтаж сборных и устройство монолитных конструкций: [https://www.ects.ru/images/1685/Image/enir\\_7\\_vypusk\\_1\\_betonnye\\_i.pdf](https://www.ects.ru/images/1685/Image/enir_7_vypusk_1_betonnye_i.pdf)  
 ЕНиР. Сборник 25. Такажные работы: <https://docs.cntd.ru/document/1200001092>

Таблица 2

Калькуляция затрат труда и машинного времени на устройство кирпичной кладки свода по железобетонным балкам

| № п/п | Обоснование (ЕНиР) | Наименование технологических процессов            | Ед. изм.          | Объем работ | Норма времени    |                 | Затраты труда     |                  |
|-------|--------------------|---|-------------------|-------------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|
|       |                    |   |                   |             | рабочие, чел.-ч. | машины, маш.-ч. | рабочие, чел.-см. | машины, маш.-см. |
| 1     | ЕЗ-20А             | Подача и установка подмостей автомобильным краном | 10 м <sup>3</sup> | 4,33        | 1,44             | 0,48            | 0,78              | 0,26             |
| 2     | Е4-1-29            | Устройство бетонной постели                       | м <sup>2</sup>    | 4,656       | 0,22             | 0               | 0,13              | 0,00             |
| 3     | Е4-1-6             | Установка арок                                    | 1 шт.             | 8           | 1,7              | 0,16            | 1,7               | 0,16             |
| 4     | Е15-35             | Установка шаблона опалубки в рабочее положение    | м <sup>2</sup>    | 1135,68     | 0,37             | 0               | 52,53             | 0                |
| 5     | Е1-6               | Подача раствора к месту работы                    | м <sup>3</sup>    | 174,44      | 0,84             | 0,42            | 18,32             | 9,16             |
| 6     | Е1-6               | Подача кирпича к месту работы                     | 1000 шт.          | 37,472      | 0,36             | 0,18            | 1,69              | 0,84             |
| 7     | ЕЗ-10              | Кладка свода из кирпича на цементном растворе     | м <sup>3</sup>    | 726,84      | 3,8              | 0               | 345,25            | 0                |
| 8     | Е1-6               | Перестановка подмостей краном                     | 100 т.            | 0,33        | 23               | 11,5            | 0,95              | 0,47             |
| 9     | Е25-20             | Перемещение шаблона-опалубки ручной лебедкой      | шт.               | 20          | 0,76             | 0               | 1,90              | 0                |
|       |                    |   |                   |             |                  |                 | <b>423,23</b>     | <b>10,90</b>     |

\*Примечание: посчитанные затраты не учитывают изготовление и разборку шаблона опалубки для свода.

В соответствии с проведенными расчетами составлена таблица технико-экономических показателей (таблица 3).

Таблица 3

## Технико-экономические показатели

| Наименование показателя  | Для кирпичного свода | Для свода, обустроенного по ж/б аркам |
|--|----------------------|---------------------------------------|
| Затраты труда, чел.-см.  | 506,93               | 423,23                                |
| Затраты машинного времени автокрана, маш.-см.                        | 11,39                | 10,9                                  |
| Количество операций  | 15                   | 9                                     |
| Общая продолжительность работ с учетом формирования бригад, чел.-см. | 156,6                | 111,9                                 |
| Продолжительность в месяцах  | 7,2                  | 5,08                                  |

На основе полученных данных и результатов строительства была подтверждена правильность принятого решения. Балочные арки явились ребрами жесткости. Они обладают рядом преимуществ:

– экономичность — благодаря использованию меньшего количества материалов затраты на строительство снижаются;

– арки отличаются меньшей массой и объемом по сравнению с традиционными решениями, что ведёт к уменьшению транспортных издержек.

Также было выдвинуто предположение о возможности применения комбинированного арматурного каркаса. Балочные арки отличаются высокой устойчивостью к различным видам нагрузок. С целью минимизации рисков расчеты были перепроверены в программе SCAD, проведение подобных проверочных расчетов позволяет повысить качество работ при строительстве ответственных элементов конструкций и создать трехмерную модель будущего изделия. Тестовое испытание конструкции еще до начала монтажного цикла на этапе расчета помогло выявить с помощью изополей напряжения в опорной зоне, что позволило исправить допущенные недочеты на этапе проектирования.

Монтаж готовых железобетонных конструкций обладает высокой технологичностью; практически не зависит от погодных условий в отличие от монолитной системы; не требует длительной выдержки в опалубке, т. к. применяются изделия, изготовленные в заводских условиях, обладающие многосерийностью, когда опалубка может использоваться на нескольких серийных элементах, снижая затраты на производство. Хорошо отработанный и стандартизированный процесс упростил строительство, позволил снизить продолжительность работ и уложиться в заданные сроки, снизив стоимость работ.

Современное строительство сталкивается с необходимостью постоянного поиска путей оптимизации процессов, направленных на сокращение сроков возведения различных объектов, в том числе и культовых сооружений.

Традиционные подходы, основанные на использовании кирпичных сводов со сложными системами закладок и тяжелей, требуют больших временных затрат.

Применение арочных балок позволило проявить принцип разумной экономии материалов и трудозатрат.

Эффективная организация процесса переноса размеров и контроль на всех стадиях строительства позволили минимизировать ошибки и расхождения между проектной документацией и реальной конструкцией. Современные технологии и геодезическое оборудование повысили качество, надежность и эффективность строительного процесса с учетом использования доступных ресурсов.

Использование арочных балок взамен традиционного подхода с применением закладных деталей и затяжек представляет собой перспективное направление в современной технологии строительства культовых сооружений. Такой метод позволит существенно сократить сроки строительства: в нашем случае разница в продолжительности строительства составила около двух месяцев, что обеспечило и экономию финансовых средств, сохранив при этом высокий уровень качества и безопасность. С учётом всех перечисленных преимуществ можно прогнозировать дальнейшее увеличение востребованности предложенного метода в строительстве культовых сооружений.

Научная новизна применения арок со смешанной системой армирования, в том числе и вместо ферм, заключается в следующем:

- простая конструкция узлов и технология изготовления по сравнению с сегментными фермами или устройством затяжек;
- нет необходимости увеличения сечения элементов ферм и их армирования по сравнению с раскосными фермами из-за жёстких узлов;
- при изготовлении цельных форм возможно использовать комбинированную арматуру только с предварительно напряжённым нижним поясом: было подтверждено, что использование ненапряженной арматуры в комплекте с предварительно напряженной в данных железобетонных конструкциях не нарушает ее несущей способности;
- возможность изготовления балочных арок в простой опалубке без применения вкладышей.

Также балочные арки могут найти применение при реставрации исторических сооружений, где крайне важно сохранить оригинальный архитектурный стиль, одновременно улучшив технические характеристики строения.

#### Список литературы/References

1. Дамаскин (Орловский). *Мученики, исповедники и подвижники благочестия Русской Православной Церкви XX столетия. Жизнеописания и материалы к ним*. Тверь: Булат; 2002.  
Damaskin (Orlovsky). *Martyrs, Confessors and Ascetics of Piety of the Russian Orthodox Church of the 20<sup>th</sup> century. Biographies and Materials for them*. Book 6. Tver: Bulat, 2002. (In Russ.).
2. Цыпин В. *История Русской Церкви. 1917–1997*. М.: Издательство Спасо-Преображенского Валаамского монастыря; 1997. 831 с.  
Tsy-pin V. *History of the Russian Church. 1917-1997*. Moscow: Publishing House of the Spaso-Preobrazhensky Valaam Monastery, 1997: 831 p. (In Russ.).
3. *Храм святителя Тихона патриарха Московского и всея России*. URL: <https://globus.aquaviva.ru/khram-svyatitelya-tikhona-patriarkha-moskovskogo-i-vseya-rossii-na-ulitse-kommuny> (дата обращения 11.02.2025).  
*Church of St. Tikhon, Patriarch of Moscow and All Russia* (In Russ.) URL: <https://globus.aquaviva.ru/khram-svyatitelya-tikhona-patriarkha-moskovskogo-i-vseya-rossii-na-ulitse-kommuny> (accessed: 11.02.2025).
4. Юдина А.Ф., Верстов В.В., Бадьин Г.М. *Технологические процессы в строительстве*. М.: Издательский центр «Академия»; 2013. 304 с.  
Yudina A.F., Verstov V.V., Badin G.M. *Technological Processes in Construction*. М.: Publishing Center "Academy", 2013: 304 p. (In Russ.).
5. Орлович Р.Б., Чакалиди В.Х. Способы усиления цилиндрических каменных сводов. *Строительство и реконструкция*. 2017;1(69):50–55. URL: <https://construction.elpub.ru/jour/article/view/8> (дата обращения 11.02.2025).  
Orlovich R.B., Chakalidi V.X. Ways of Strengthening Cylindrical Stone Vaults. *Construction and Reconstruction*. 2017. №1(69):50-55. (in Russ.) URL: <https://construction.elpub.ru/jour/article/view/8> (accessed: 11.02.2025)
6. Шаннат И. *Напряженно-деформированное состояние железобетонных монолитных многоволновых оболочек с контурными элементами в виде сборных безраскосных ферм*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва; 1992. 19 с. URL: <https://tekhnosfera.com/napryazhenno-deformirovannoe-sostoyanie-zhelezobetonnyh-monolitnyh-mnogovolnovykh-obolochek-s-konturnymi-elementami-v-vidе> (дата обращения 11.02.2025).  
Shannat I. *Stress-strain of Reinforced Concrete Monolithic Multi-wave Shells with Contoured Elements in the Form of Prefabricated Bevel-free Trusses*. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Mos-

cow, 1992:19p. URL: <https://tekhnosfera.com/napryazhenno-deformirovannoe-sostoyanie-zhelezobetonnyh-monolitnyh-mnogovolnovyih-obolochek-s-konturnymi-elementami-v-vide> (accessed: 11.02.2025).

7. Коянкин А.А., Митасов В.М. Напряжённо-деформированное состояние сборно-монолитного элемента с учётом загрузки сборной части. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021;23(3):129–142. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2021-23-3-129-142>

Koyankin A.A., Mitsov V.M. Stress-strain of a Prefabricated Monolithic Element Considering Loading of the Assembled Part. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2021;23(3):129–142. (In Russ.) <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2021-23-3-129-142>

8. Осипенко Ю.Г., Кузнецов В.С., Шапошникова Ю.А. Влияние применения высокопрочной арматуры без сцепления с бетоном на прочность монолитных безбалочных перекрытий. *Вестник МГСУ*. 2017;12(8(107)):885–891. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.8.885-891>

Osipenko Yu.G., Kuznetsov V.S., Shaposhnikova Yu.A. Effect of Using High-strength Reinforcement without Adhesion to Concrete on the Strength of Monolithic Girderless Floors. *Bulletin of MGSU*, 2017, vol. 12(8(107)):885–891 <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.8.885-891> (In Russ.).

#### **Об авторах:**

**Розанцева Надежда Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4), [ScopusID](#), [ORCID](#), [nrozanceva@lan.spbgasu.ru](mailto:nrozanceva@lan.spbgasu.ru)

**Дроздов Александр Данилович**, кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4), [ScopusID](#), [ORCID](#), [drosdov@list.ru](mailto:drosdov@list.ru)

#### **Заявленный вклад авторов:**

**Н.В. Розанцева:** разработка идеи, цели и задачи исследования, проведение расчетов, анализ и формирование выводов подготовка текста, доработка текста.

**А.Д. Дроздов:** научное руководство, формирование основной концепции.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи**

#### **About the Authors:**

**Nadezhda V. Rozantseva**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction Organization at St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4 2nd Krasnoarmeyskaya St., 190005, St. Petersburg), [ScopusID](#), [ORCID](#), [nrozanceva@lan.spbgasu.ru](mailto:nrozanceva@lan.spbgasu.ru)

**Alexander D. Drozdov**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction Organization at St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4 2nd Krasnoarmeyskaya St., 190005, St. Petersburg), [ScopusID](#), [ORCID](#), [drosdov@list.ru](mailto:drosdov@list.ru)

#### **Claimed Contributorship:**

**NV Rozantseva:** development of the idea, aims and objectives of the study, calculations, analysis and drawing conclusions, manuscript preparation, revision of the manuscript.

**AD Drozdov:** scientific guidance, formation of the basic concept.

**Conflict of interest statement:** the authors do not have any conflict of interest.

**All authors have read and approved the final version of manuscript.**

**Поступила в редакцию / Received** 14.02.2025

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 28.02.2025

**Принята к публикации / Accepted** 10.03.2025