

Марковский Михаил Филиппович, канд. техн. наук, доцент,
генеральный директор, РУП «Институт БелНИИС»,
г. Минск

Бурсов Николай Генрихович, научный сотрудник,
РУП «Институт БелНИИС», г. Минск

Обухов Алексей Евгеньевич, младший научный сотрудник,
РУП «Институт БелНИИС», г. Минск

Димитриади Николай Павлович, инженер-конструктор,
РУП «Институт БелНИИС», г. Минск

ТЕХНОЛОГИЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ХРАМОВЫХ СООРУЖЕНИЙ ИЗ МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА В СОВРЕМЕННЫХ ОПАЛУБОЧНЫХ СИСТЕМАХ

TECHNOLOGY OF TEMPLE MONOLITHIC STRUCTURES CONSTRUCTION PROCESS USING MODERN FORMWORK SYSTEMS

Аннотация

В работе освещены вопросы технологии возведения монолитных конструкций культовых сооружений, построенных в последнее десятилетие в Республике Беларусь и России. Изложены принципиальные технологические подходы по опалубиванию сложных по форме монолитных конструкций, особенностям крепления опалубочных систем для обеспечения их формоустойчивости в пространстве при бетонировании.

Abstract

The issues of construction process of cultic monolithic structures built in Belarus and Russia during recent decade are discussed. The principal approaches in technology of formwork installation for complicated monolithic structures as well as difficulties of formwork erection providing stability of form while casting are shown.

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии монолитного бетона давно доказали на практике свою конкурентоспособность и экономическую эффективность. Об этом свидетельствует тот факт, что практически

все объекты последнего десятилетия, имеющие государственную важность, были возведены с преимущественным использованием монолитного бетона. Фактически монолитный бетон в настоящее время стал основным строительным материалом, позволяющим возводить яркие, выразительные и запоминающиеся сооружения благодаря использованию новых технологий строительства, современных опалубочных систем, обеспечению комплексной механизации технологических процессов приготовления, доставки, подачи и укладки бетонной смеси, применению ускоренных методов твердения бетона при всесезонном производстве работ.

Расширению области применения монолитного бетона способствовали выполняемые РУП «Институт БелНИИС» по заданию Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь научно-исследовательские работы, направленные на разработку и внедрение интенсивных конкурентоспособных технологий строительства из монолитного бетона с применением современных модифицированных бетонов, энергосберегающих технологий бетонирования, обеспечивающих высокое качество и заданные темпы строительства. В результате строители получили современные технологии, а специалистами отечественной строительной наукой накоплен значительный опыт в области использования опалубочных технологий.

ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ХРАМОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

При разработке технологии строительства монолитных конструкций, как правило, практикуют два принципиально различных подхода. Суть первого заключается в изначальном определении архитектурной идеи, задачи сооружения и разработке соответствующих конструктивных решений, а основной целью технологий является реализация этой идеи. Это так называемая технология «архитектурного» бетона с его высокими сопутствующими издержками, разработкой технологии строительства по готовой и утвержденной проектной документации. Стоимость реализации проекта и сроки его исполнения в данном случае уходят на второй план. По такому пути идут при необходимости реализации ярко выраженного с архитектурной точки зрения проекта с лицезым «архитектурным» бетоном или при возведении монолитных конструкций сооружений с устоявшимися, классическими архитектурными формами, имеющими символическое значение. В первую очередь это культовые сооружения, конструктивные особенности

которых (например, различные пространственные тонокостенные конструкции, как правило, двоякой кривизны (своды, купола и пр.)) определяются архитектурой самого сооружения. Подобные конструкции в отличие от плоскостных являются самонесущими и обеспечивают существенное снижение расхода бетона и арматуры – от 25 до 30 %, но при этом приходится учитывать существенный рост трудоемкости их возведения. Железобетонные монолитные своды и купола, конструктивные элементы, характерные для культовых сооружений, получают в настоящее время все большее распространение. В действующих нормативных документах приведены надежные методы расчета и проектирования, но при этом процесс их возведения требует разработки сложных опалубок и опалубочных технологий, стоимость которых соизмерима со стоимостью самой конструкции.

Второй подход является в большей степени прагматичным и заключается в параллельном и взаимосвязанном проектировании самих конструкций и технологий их возведения. Здесь определяющая роль принадлежит именно опалубкам и опалубочным технологиям, а их выбор осуществляют с учетом стоимости, сроков строительства и особенно технологичности самих конструкций. При этом, как показывает практический опыт, оптимальные с конструктивной точки зрения проектные решения не всегда являются рациональными с технологических позиций, а игнорирование или нежелание учитывать технологические особенности возведения приводят к росту трудоемкости работ и снижению темпов и удорожанию строительства.

Технологичность монолитных конструкций определяют следующие факторы [2]:

- геометрические формы и параметры монолитных конструкций и их примыканий, обуславливающие возможность их опалубки инвентарными опалубочными системами с учетом технических, конструктивных и технологических особенностей опалубок;

- возможность устройства технологических швов, а также технологических и конструктивных проемов в стенах и перекрытиях;

- допустимая скорость бетонирования;

- способы армирования монолитных конструкций и значений распалубочной прочности бетона;

- технологические требования к производству опалубочных, арматурных, бетонных работ и других строительного-монтажных работ.

КАФЕДРАЛЬНЫЙ СОБОР ХРИСТА СПАСИТЕЛЯ (Г. КАЛИНИНГРАД, РОССИЯ)

При разработке технологии строительства культовых сооружений следует учитывать следующие факторы:

- значительные размеры самого сооружения по высоте;
- отсутствие надежных точек опоры для опалубки монолитных конструкций покрытий и перекрытий;
- сложные геометрические очертания самих монолитных конструкций.

Для Кафедрального Собора Христа Спасителя были характерны все вышеперечисленные признаки (рис. 1):

- высота сооружения (до основания креста), м – 56;
- широкий перечень монолитных конструкций (колонны, арки, своды, ребристые перекрытия, наклонные стены, лестницы и пр.);
- необходимость использования опорной системы опалубки монолитных конструкций значительной высоты – до 40 м.

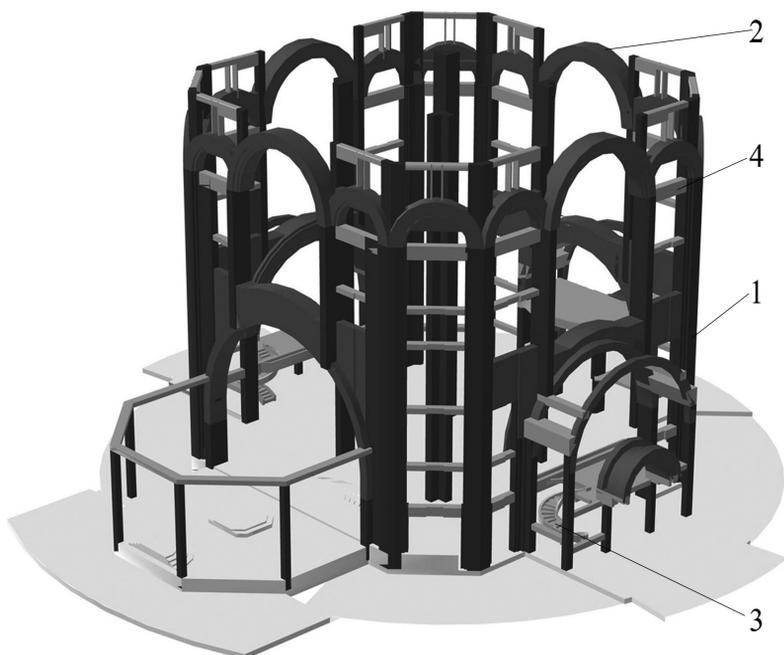


Рисунок 1. Схема монолитных конструкций Кафедрального Собора Христа Спасителя:
1 – колонны; 2 – арки; 3 – лестницы; 4 – балки

Технология возведения Кафедрального Собора Христа Спасителя базировалась на использовании системы рамных сборно-разборных опорных башен, которые, с одной стороны, использовались в качестве несущих опор, а с другой – являлись вспомогательными рабочими площадками и клетями для размещения лестниц, предназначенных для подъема рабочих к месту производства работ. Рамные сборно-разборные опорные башни являются оптимальной опорной системой для опалубки монолитных конструкций сложных форм, особенно при необходимости производства работ на значительной высоте. Преимуществами рамных опорных башен являются значительная прочность на сдвиг, большой диапазон изменения высоты башни, а также возможность быстрого монтажа за счет использования предварительно изготовленных опорных рам, которые являются основными элементами башен, объединяемыми в неизменяемую пространственную систему горизонтальными и наклонными раскосами. В проектное положение опорные башни устанавливают, как правило, крупными собранными единицами с использованием монтажных кранов, но при этом в зонах, недоступных для работы крана, допускается ручная сборка башен.

Для возведения монолитных арок использовалась инвентарная и индивидуальная опалубка, формоустойчивость которых на стадии бетонирования обеспечивалась за счет анкерных затяжек и стальных распорок, воспринимающих распорное давление бетонной смеси (рис. 2), а также в результате четко спланированной по-

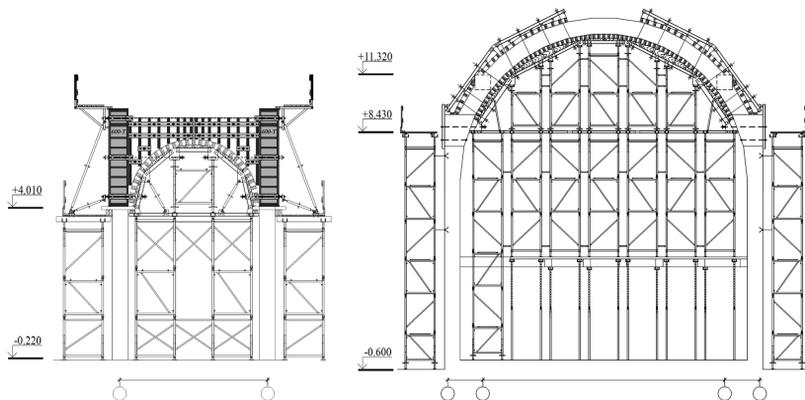


Рисунок 2. Схемы устройства опалубки монолитных арок

следовательности бетонирования – синхронно с двух сторон, начиная от пят к замку арки, с ограниченной скоростью бетонирования (не более 3 м/ч по высоте арки).

ХРАМ-ПАМЯТНИК В ЧЕСТЬ ВСЕХ СВЯТЫХ В ПАМЯТЬ БЕЗВИННО УБИЕННЫХ ВО ОТЕЧЕСТВЕ НАШЕМ (Г. МИНСК, БЕЛАРУСЬ)

Конструктивные особенности данного сооружения обусловили применение технологии поярусного наращивания во внутренней части Храма опорной системы опалубки монолитных конструкций, находящихся на значительной высоте (рис. 3). При этом внутреннюю опорную систему использовали для размещения временных промежуточных площадок, обеспечивающих безопасность работ, а для опирания наружной опалубки стен применяли наружные несущие подмости, которые фиксировались посредством анкерного механизма, замоноличенного в стену при ее бетонировании (рис. 4). Подобное комплексное решение обеспечило необходимые точки опоры опалубки монолитных стен.

Бетонирование стен велось поярусно с шагом, равным высоте щитов – 3 м, а с учетом нестандартной конфигурации стен инвентарная опалубка была дополнена индивидуальными угловыми элементами, конструкция которых допускала использование инвентарных крепежных элементов. Свод Храма также бетонировался ярусами, с пошаговой установкой щитов наружной опалубки.

Для исключения значительных нагрузок на перекрытие на отметке +5.250 была устроена опорная разгружающая площадка на отметке +30.700, состоящая из стальных балок и деревянного настила (рис. 3 и 5), которая также использовалась для повышения безопасности производства строительно-монтажных работ.

Начиная с отм. +37.500 монолитные стены были запроектированы с углом наклона во внутрь сооружения (рис. 6 и 7). При возведении наклонных стен с целью обеспечения формоустойчивости опалубки необходимо ограничивать максимальную скорость бетонирования, определяемую в зависимости от характера распределения давления бетонной смеси на опалубку. При этом в действующих отечественных и зарубежных нормативных документах пространственное расположение опалубки при определении бокового давления бетонной смеси не учитывается. Например, методика расчета бокового давления бетонной смеси на опалубку, приведенная в DIN 18218 «Смесь бетонная свежеприготовленная. Давление на вертикальную опалубку», справедлива только для опалубок, максимальное значение угла наклона которых не более $\pm 5^\circ$.

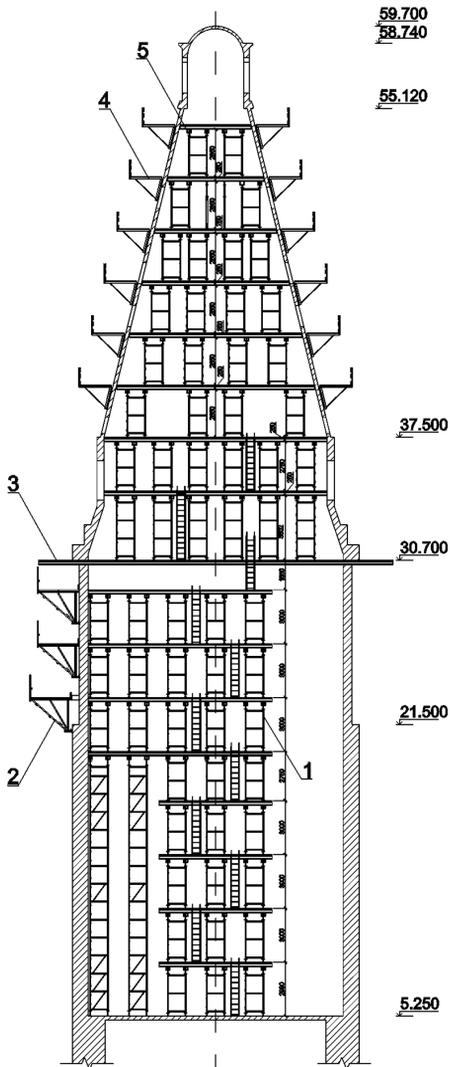


Рисунок 3. Технологическая последовательность установки опалубки монолитных конструкций шатра Храма в Честь Всех Святых:
 1 – опорные башни;
 2 и 4 – наружные опорные подмости;
 3 – опорная разгружающая площадка;
 5 – промежуточные временные перекрытия

Расчетная модель наклонной опалубки базировалась на реологическом подходе, использованном при исследовании распределения бокового давления бетонной смеси на вертикальную опалубку стен [3]. При этом боковое давление бетонной смеси на опалубку зависит не только от реологических параметров самой смеси, геометрических параметров опалубки, но и от угла ее наклона.

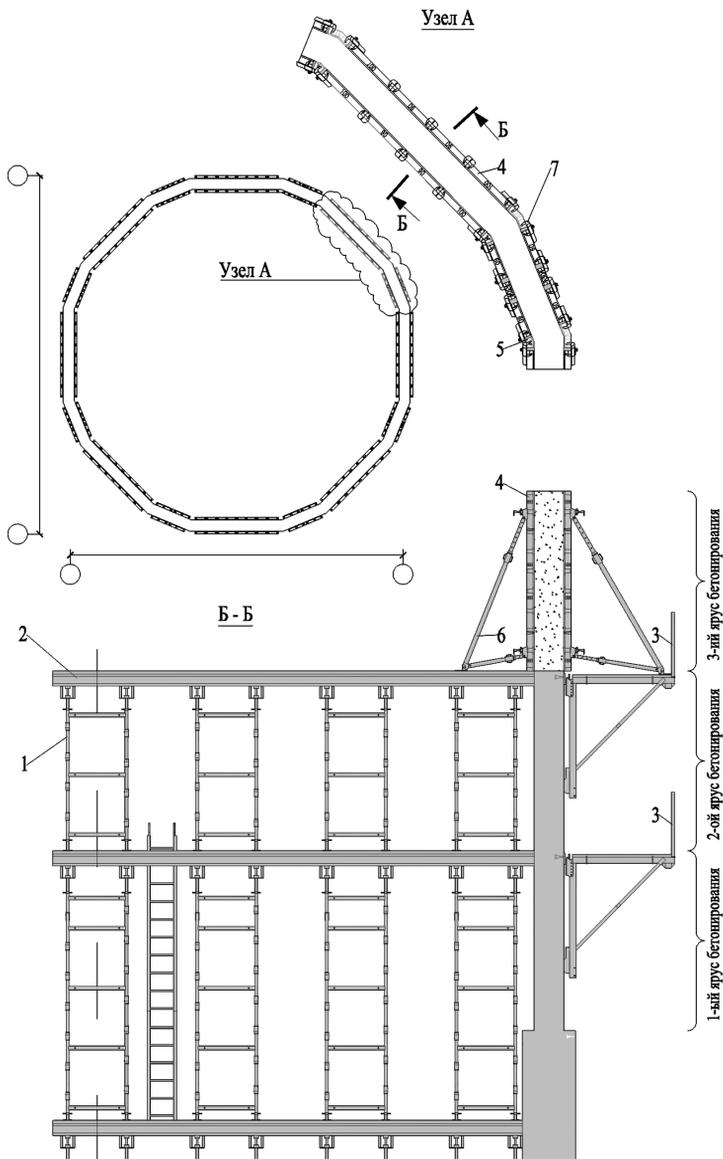


Рисунок 4. Схема опалубки наружных стен Храма в Честь Всех Святых:
 1 – опорные башни; 2 – промежуточные перекрытия на основе деревянных двутавровых балок; 3 – наружные опорные подмости; 4 – щитовая опалубка;
 5 – индивидуальный доборный щит; 6 – регулируемый подкос

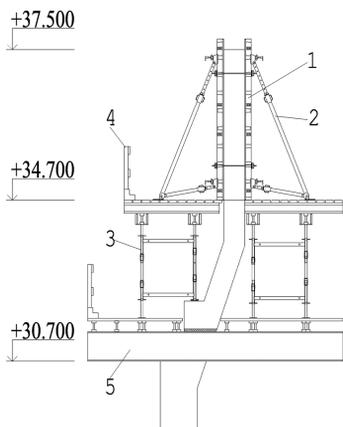


Рисунок 5. Схема устройства разгружающей площадки на отм. +30.700:

- 1 – щитовая опалубка;
- 2 – регулируемый подкос;
- 3 – опорная башня;
- 4 – защитное ограждение;
- 5 – опорная разгружающая площадка

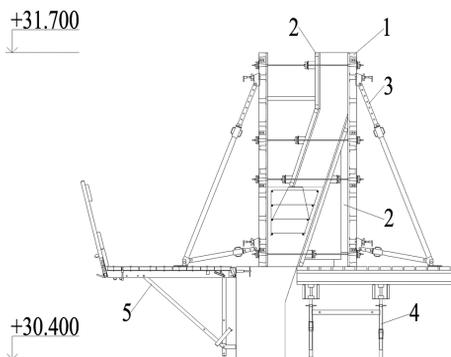


Рисунок 6. Схема опалубки наклонных стен шатра Храма:

- 1 – щитовая опалубка;
- 2 – индивидуальная опалубка;
- 3 – регулируемый подкос;
- 4 – опорная башня;
- 5 – наружные опорные подмости

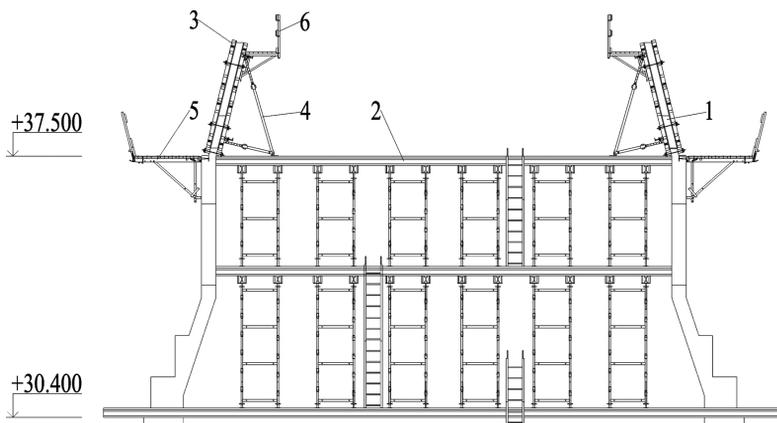


Рисунок 7. Схема опалубки наклонных стен шатра Храма:

- 1 – наклонные стены шатра;
- 2 – промежуточные перекрытия на основе деревянных двутавровых балок;
- 3 – щитовая опалубка;
- 4 – регулируемые подкосы;
- 5 – наружные опорные подмости

Исходя из предпосылок и допущений, изложенных в [4], дифференциальное уравнение равновесия элементарного слоя бетонной смеси толщиной dx (рис. 8) имеет следующий вид:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \gamma_{см} \cdot \sin \alpha - \tau \cdot \frac{P}{S}, \quad (1)$$

где σ_x – вертикальное давление;
 $\gamma_{см}$ – средняя плотность бетонной смеси;
 τ – напряжение сдвига;
 P – периметр опалубки;
 S – площадь горизонтального сечения опалубки;
 α – угол наклона опалубки.

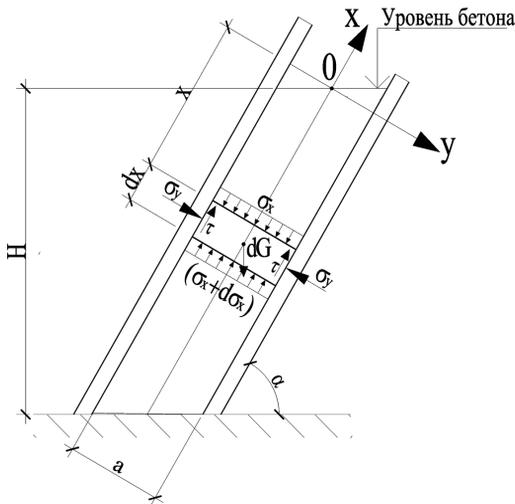


Рисунок 8. Расчетная схема определения давления бетонной смеси на наклонную опалубку

Общее решение дифференциального уравнения при граничных условиях имеет вид:

$$\sigma_y = \xi_0 \cdot \left(\gamma_{см} - \frac{\tau_{o.n.c}}{\sin \alpha} \cdot \frac{P}{S} \right) \cdot H, \quad (2)$$

где $\xi_0 = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$ – коэффициент бокового давления бетонной смеси;
 $\tau_{o.n.c}$ – предельное напряжение сдвига бетонной смеси в пристенном слое в начальный период укладки;
 H – высота уложенного слоя бетона.

Боковое давление бетонной смеси на наклонную опалубку стены определяли по следующей формуле:

$$\sigma_y = \xi_0 \cdot \left(\gamma_{см} - \frac{2 \cdot \tau_{o.n.c}}{a \cdot \sin \alpha} \right) \cdot H. \quad (3)$$

При рассмотрении влияния скорости укладки бетонной смеси на распределение бокового давления смеси в наклонной опалубке, исходя из предпосылок, изложенных в [3], была принята скорость укладки V_x вдоль оси опалубки x (рис. 8). Дифференциальное уравнение равновесия элементарного слоя смеси в опалубке приняло следующий вид:

$$d\sigma_y = \xi(t) \cdot \left[\gamma_{см} \cdot \sin \alpha - \left(\tau_{o.n.c} + \frac{\alpha_t \cdot t}{t_E} \right) \cdot \frac{P}{S} \right] \cdot V_x \cdot dt, \quad (4)$$

где $\xi(t) = \frac{d\sigma_y}{d\sigma_x}$.

При определении давления учитывали изменение во времени коэффициента бокового давления бетонной смеси по [5] и реологических параметров только пристенного слоя. Параметр t , определяющий влияние времени, был принят исходя из условия достижения нуля за период времени t_E . В результате было установлено, что максимальное значение бокового давления бетонной смеси на опалубку устанавливается при $t = t_E$:

$$\sigma_y^{max} = \xi_0 \cdot V_x \cdot \left(\gamma_{см} \cdot \sin \alpha - \frac{P}{S} \cdot \tau_{o.n.c} \right) \cdot \left[\frac{t_E}{2} - \frac{\alpha_t \cdot t_E}{6 \cdot \left(\gamma_{см} \cdot \frac{S}{P} \cdot \sin \alpha - \tau_{o.n.c} \right)} \right]. \quad (5)$$

Пересчет на вертикальную скорость укладки (V), привычную для вертикальной опалубки, следует производить по следующей зависимости:

$$V_x = \frac{V}{\sin \alpha}. \quad (6)$$

ЦЕРКОВЬ СВЯТОГО ДУХА (Г. МИНСК, БЕЛАРУСЬ)

Церковь Святого Духа, воссозданная в 2011 году, с конструктивной точки зрения соответствовала своему барочному облику XVII века, то есть имела многочисленные своды, купола, арки

и прочие конструкции, которые в современном прочтении были запроектированы из монолитного бетона.

Размеры свода в осях 1-5/Г-И (рис. 9а):

- длина в плане, м – 25,0;
- радиус поперечного сечения, м – 6,1;
- толщина перекрытия, м – 0,2.

Размеры монолитного железобетонного свода в осях 5-6/Д-Е (рис. 9б):

- размеры в плане, м – 7,0 x 11,1;
- радиус поперечного сечения, м – 4,7;
- толщина перекрытия, м – 0,2.

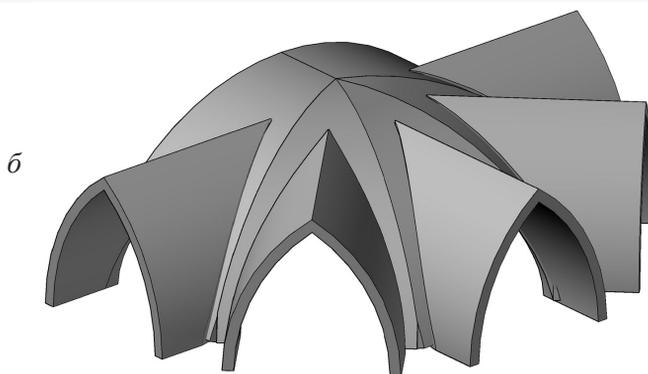
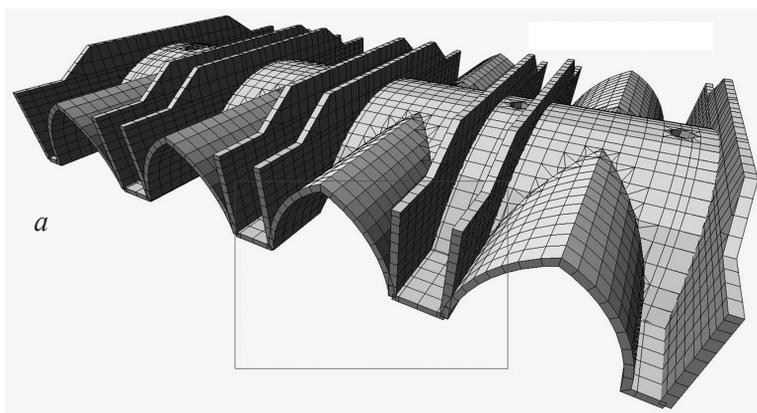


Рисунок 9. Схемы монолитных железобетонных сводов Церкви Святого Духа:
а – схема монолитного железобетонного свода в осях 1-5/Г-И;
б – то же, в осях 5-6/Д-Е

Для непосредственного монтажа опалубки монолитных сводов на первом этапе строительства был устроен вспомогательный рабочий настил, состоящий из стандартных опорных башен, двутавровых деревянных балок и непосредственно самого настила, выполненного из досок толщиной 100 мм. Высота настила – около 10 м, а его общая площадь – 360 м².

В качестве основных несущих элементов опалубки монолитных сводов были использованы (рис. 10 и 11):

- индивидуальные арочные конструкции, радиус изгиба которых соответствовал радиусу изгиба монолитных конструкций;
- универсальные опорные башни;
- внутренняя палуба из водостойкой фанеры (толщина 15 мм);
- щиты наружной опалубки;
- крепежные элементы и пр.

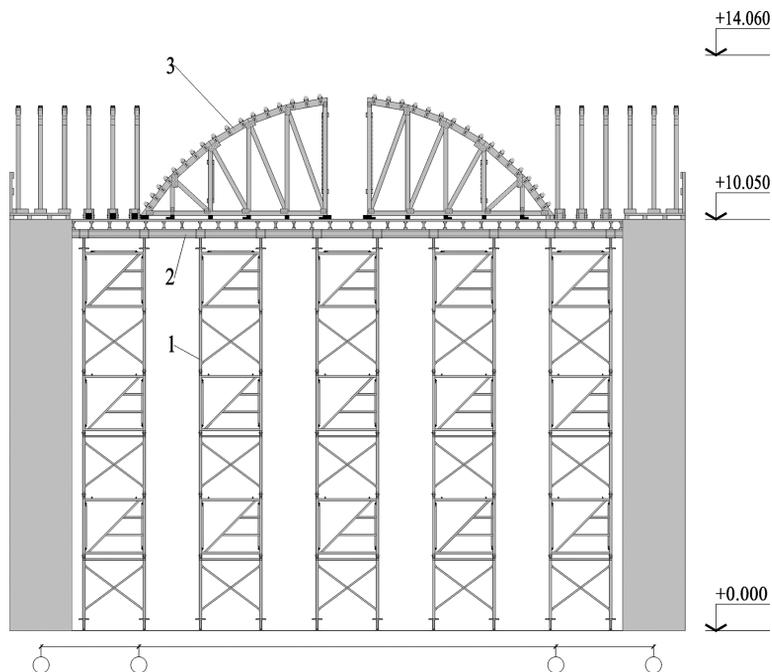


Рисунок 10. Опорная система монолитного железобетонного свода Церкви Святого Духа:

- 1 – опорная башня; 2 – временное перекрытие на основе деревянных двутавровых балок; 3 – индивидуальные фермы

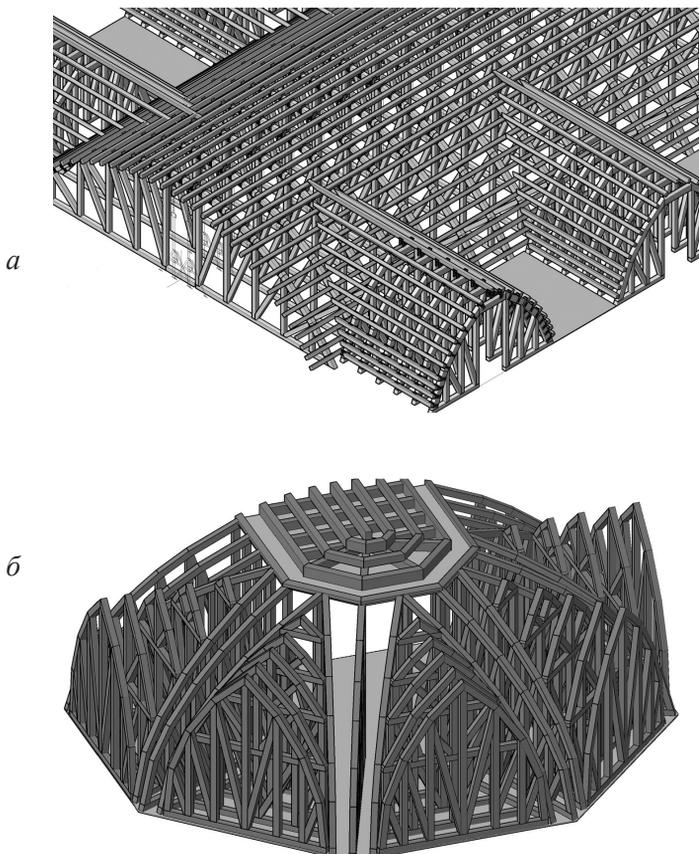


Рисунок 11. Схемы опорной системы монолитных железобетонных сводов Церкви Святого Духа:

а – схема опалубки монолитного железобетонного свода в осях 1-5/Г-И;
 б – то же, в осях 5-6/Д-Е

При возведении монолитного ж/б свода в осях 1-5/Г-И было принято решение возводить его поэтапно, разделив на две равные захватки, что позволило сократить нормокomплект опалубки в два раза. Непосредственно сам свод бетонируют ярусами, с поэтапной установкой щитов наружной опалубки. Подобная технология позволила избежать оползания бетонной смеси. Щиты наружной опалубки каждого последующего яруса устанавливали в проектное положение после схватывания бетонной смеси предыдущего яруса

(ориентировочно через два часа после укладки бетонной смеси). Для вибрирования бетонной смеси в щитах наружной опалубки были предусмотрены технологические проемы для пропуска вибратора.

ХРИСТОРОЖДЕСТВЕНСКИЙ СОБОР (Г. СОЛИГОРСК, БЕЛАРУСЬ)

Центром композиции собора является пятикупольный Храм, квадратное в плане строение, увенчанное барабаном с куполом. Общая площадь Храма составляет 4000 м². При реализации данного проекта использовались те же принципиальные технологические решения, ставшие уже традиционными:

– переопирание опалубки вышележащих конструкций на нижележащие перекрытия с учетом технологических нагрузок и несущей способности самих перекрытий (рис. 12);

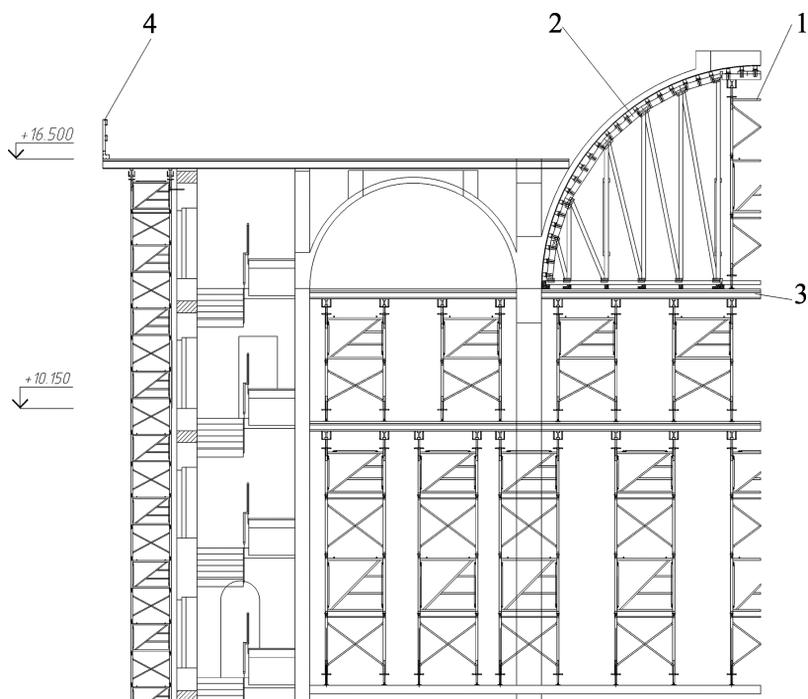


Рисунок 12. Опорная система опалубки монолитных конструкций Христорождественского Собора:

- 1 – опорная башня; 2 – индивидуальные фермы; 3 – временное перекрытие на основе деревянных двутавровых балок; 4 – защитное ограждение

– использование индивидуальных деревянных ферм с наружной опалубкой, устанавливаемой поэтапно, по мере бетонирования монолитных сводов (рис. 13);

– возведение монолитного барабана купола в индивидуальной дерево-фанерной опалубке (рис. 14).

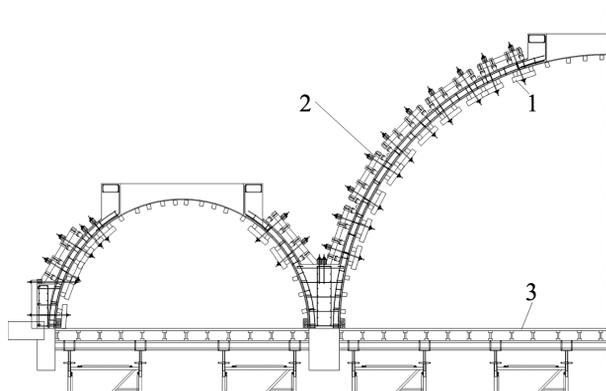


Рисунок 13. Опалубка монолитных сводов Христорождественского Собора¹⁾:

1 – внутренняя опалубка монолитного свода; 2 – наружная опалубка монолитного свода; 3 – временное перекрытие на основе деревянных двутавровых балок

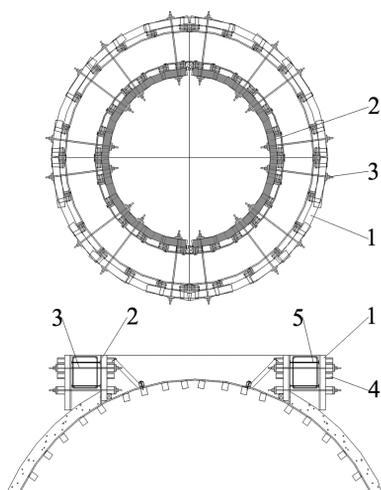


Рисунок 14. Опалубка монолитного барабана купола в индивидуальной дерево-фанерной опалубке¹⁾:

1 – наружная опалубка монолитного барабана; 2 – внутренняя опалубка монолитного свода; 3 – винтовой тяз с гайками; 4 – балка; 5 – арматурный фиксатор точной установки щитов опалубки

¹⁾ Опорная система опалубки монолитных сводов условно не показана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны новые эффективные опалубочные технологии возведения монолитных конструкций сложных и уникальных объектов, обеспечивающие оптимизацию процесса производства строительно-монтажных работ, высокие темпы строительства, качество работ и в конечном итоге снижение стоимости объекта.

2. Разработана методика определения бокового давления бетонной смеси на наклонную опалубку стен.

Список использованных источников

1. Hinrichs, B. Entwicklungen und Tendenzen Schalungssysteme / B. Hinrichs // Beton. – 2001. – № 8. – P. 436–441.
2. Абрамчук, М. Национальная библиотека Беларуси. Технология интенсивного строительства / М. Абрамчук, М. Марковский // Архитектура и строительство. – 2003. – № 2. – С. 36–37.
3. Markouski, M.F. Technology of Cast-in-Situ Inclined Outer Walls Erection. In Proceedings / M.F. Markouski, R.A. Turavets // 2nd International Conference on Advanced Construction. Lithuania: Kaunas University of Technology. – 2010. – P. 177–182.
4. Марковский, М.Ф. Распределение давления бетонной смеси на вертикальную опалубку в процессе безвибрационной укладки / М.Ф. Марковский // Сб. тр. XVI Междунар. науч.-метод. семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь». – Брест, 2009. – С. 85–90.
5. Specht, M. Druck des Frischbetons gegen eine geneigte Boden – oder Wandschalung / M. Specht // Beton- und Stahlbetonbau. – 1975. – № 11.

Статья поступила в редколлегию 02.12.2013