УДК 69. 694.5, 69.057.55; 69.057.592

© Н. В. Розанцева, канд. техн. наук, преподаватель
(СПбГФПУ «Колледж туризма и гостиничного
сервиса», Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: qq_89@list.ru

© А. Ф. Юдина, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: yudinaantonina2017@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-128-133

© N. V. Rozantseva, PhD in Sci. Tech., teacher
(SPbSAPI «College of tourism and hotel service»,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: qq_89@list.ru

© A. F. Yudina, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: yudinaantonina2017@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ МОНТАЖА КУПОЛЬНОГО ЗДАНИЯ С ВНУТРЕННИМ ДЕРЕВЯННЫМ КАРКАСОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ОПАЛУБКИ

TECHNOLOGY FOR INSTALLATION OF A DOMED BUILDING WITH AN INTERNAL WOODEN FRAME, USING PNEUMATIC FORMWORK

Подчеркнута важность освоения арктической зоны и раскрыты существующие проблемы строительства в данной зоне. Рассмотрены и проанализированы существующие методы строительства быстросборных конструкций, в том числе и с применением пневматических опалубок. Предложена бескрановая технология строительства купольного здания с применением пневматической опалубки, с последующим заполнением межпалубного пространства вспененным материалом на основе Quad Core.

Ключевые слова: арктическая зона, пневматическая опалубка, термопластичная ткань, бескрановый метод монтажа, теплосопротивление.

The article emphasizes the importance of developing the Arctic and reveals the existing problems of construction in this zone. The existing methods of construction of quick-assembly structures, including the use of pneumatic formwork, are analyzed. A crane-free technology for the construction of a domed building using pneumatic formwork is proposed, with subsequent filling of the inter-deck space with foam material based on Quad Core.

Keywords: the Arctic zone, pneumatic formwork, thermoplastic fabric, crane-free installation method, thermal resistance.

Арктика — зона сложных природно-климатических условий, вечной мерзлоты и геополитических интересов. Последние обусловлены запасами природных ресурсов, притягивают внимание Скандинавии, Канады, Соединенных Штатов Америки, Китая. Арктика требует особого отношения России для поддержания целостности и благосостояния нашей страны [1].

Основные принципы строительства в этом регионе: унификация и модульность, сокращающие технологические операции, оптимизация геометрии, увеличивающая устойчивость и долговечность конструкций, и создание замкнутого контура, снижающего энергозатратность [2].

По удельным величинам теплотерь и по пространственной жесткости лучшим вариантом для энергосбережения являются сферические конструкции — минимальное соотношение площади оболочки к внутреннему объему объекта, равномерное распределение нагрузок на все точки поверхности улучшает работу на сжатие и на прогиб. Быстросборные тонкостенные пространственные конструкции имеют большое количество модификаций, в том числе в несъемных опалубках: структуры, оболочки, пневматические [3]. Удачный пример — «Арктический Трилистник» (военная база Российской Федерации на острове Земля Александры в архипелаге Земля Франца-Иосифа, рядом с поселком На-

гурское). Здания имеют купольное покрытие, очищающееся при воздействии ветра от снега, и фундамент на высоком ростверке, предотвращающий подтаивание грунта.

Широкое распространение получило применение железобетонных конструкций с металлическим каркасом, но данная технология сложно применима в условиях Арктики из-за больших транспортных расходов, трудоемкости технологического процесса и высоких эксплуатационных затрат. Альтернатива — бетонно-деревянные композиты и пространственные конструкции из LVL-бруса и CLT (*Cross-Laminated Timber* — многослойные клееные деревянные панели), отвечающие повышенным требованиям к энергоэффективности здания, удешевлению и увеличению скорости строительства, снижающие вероятность деградации мерзлоты. Крупнейшие вузы Германии в Веймаре и Штутгарте заняты исследованием напряженного состояния пространственных деревобетонных конструкций [5, 6].

Прародителем применения в строительстве сетчатых конструкций был В. Г. Шухов, согласно расчетам которого только нижние секции каркаса должны иметь более мощные поперечные сечения. Достоинства применения сетчатых конструкций — прочность, легкость и малая материалоемкость, не требующая мощных фундаментов, позволяющая вести бескрановое строительство [4].

Признанный способ получения купольных конструкций — применение пневмоопалубок. Метод основан на возведении тонкостенных куполов подъемом с расширением надувных опалубок из прорезиненной ткани или тентов из поливинилхлорида, сферических и полусферических форм, с внутренним (как правило металлическим) каркасом, собранным по принципу сотовой структуры. Технология требует минимального применения строительной техники, проста в доставке и монтаже. Существует два варианта пневмоопалубок: воздухоопорные и пневмокаркасные и две технологии укладки бетона: первая — с предварительным нанесением на разостланную поверхность опалубки в ненадутую состоянии бетонной смеси и приведением в проектное положение путем медленной подачи воздуха по системе распределительных воздуховодов;

вторая — нанесение способом торкретирования бетонной смеси на надутую опалубку. Способ торкретирования был разработан в 1980 году в Ленинградском военно-строительном училище на основе мелкозернистого (песчаного) бетона и позволил сократить толщину стенки и сроки монтажа. Наиболее широко применяют цилиндрические опалубки (рис. 1, а)^{1,2}.

С помощью метода торкретирования был возведен железобетонный купол над Новосибирским театром оперы и балета диаметром 60 м и высотой 35 м. К недостаткам метода относится необходимость постоянной подкачки воздуха и низкой несущей способности в период набора прочности бетоном³.

Развитие пневмоопалубочных систем позволило применять их для возведения не только вертикальных и линейно протяженных сооружений, но и объектов любой криволинейной или радиусной формы, как, например, «Толстый дом» в Вене, построенный архитектором Эрвином Вурмом (рис. 1, б)⁴.

С целью сокращения трудозатрат при монтаже разработана технология с использованием несъемной пневматической опалубки повышенной прочности, не менее 1100 г/м², из термопластичного материала производства ООО «Тайм Триал»⁴. Для правильного формирования формы покрытия опалубка заранее рассчитывается, раскраивается по выкройкам, сшивается, при этом швы проклеиваются тем же материалом.

Основные этапы монтажа

1. Монтаж коробчатой фундаментной системы. Установка (подъем) монтажной колонны (центрального сердечника из деревянных или железобетонных конструкций), на которую будут опираться полуарки. Такой монтаж не требует дополнительных связей.

2. Укрупнительная сборка в наземном вертикальном положении полуарок купольной кон-

¹ Монолитные купольные дома из несъемной опалубки. URL: <https://sfera-monolit.ru/g12568203-monolitnye-kupolnye-doma>.

² Пневмокаркасные ангары для спец. техники. URL: <https://timetrial.ru/produktsiya/naduvnye-angary/pnevmokarkasnye-angary-dlya-spets-tekhniki/>

³ Купольные дома — технология строительства. 23.12.2017. URL: <http://www.rmmt.ru/story/house/646449.htm>.

⁴ Пневмокаркасные ангары для спец. техники. URL: <https://timetrial.ru/produktsiya/naduvnye-angary/pnevmokarkasnye-angary-dlya-spets-tekhniki/>

Рис. 1. Конструкции на основе пневмоопалубки:
а — цилиндрическая пневмокаркасная конструкция; б — «Толстый дом» Эрвина Вурма

струкции из элементов (рис. 2). Применены подвижные платформы, позволяющие перевозить после укрупнительной сборки полуарки к месту монтажа. Полуарки раскладываются в предпроектное положение и шарнирно закрепляются на высоких опорных фундаментах (фундаментных башмаках, отвечающих требованиям сохранности древесины) с поворотной основой. Монтаж начинают с крайних сегментов полуарки после регулировки стыков, с помощью гидравлических домкратов и колес натяжения.

3. Проведение монтажа с помощью лебедок. Поочередно, в направлении против часовой стрелки, поднимают полуарки до проектной плоскости (отметки), что позволит без дополнительных связей придать каркасу жесткость. К лебедке прикрепляют монтажную траверсу, позволяющую создать при подъеме равновеликое напряжение (рис. 3).

4. Прикрепление к полуаркам стабилизирующих, имеющих предварительное напряжение (с помощью натянутых тросов) конструкций между основными полуарками и деревянными связями, регулировка отдельных тросов с помощью стяжных муфт. Этот этап включает в работу всю конструкцию. Оттяжки позволят сократить

сечение полуарки и тем самым расход требуемой древесины. Чтобы не натягивать каждый трос отдельно, применяются дистанционные шайбы, позволяющие регулировать длину тросов.

5. После закрепления хребтовых связей полуарок монтажная колонна при необходимости может удаляться, благодаря чему получится безопорное внутреннее пространство, что значительно увеличит полезную внутреннюю площадь. При высоких расчетных нагрузках внутренний деревянный каркас может быть заменен на металлические конструкции, поддерживающие внешние стены.

6. Натяжка тканевой верхней части опалубки методом надвигки.

7. Закрепление тента на фундаментной основе, монтаж воздухоподающей установки и нагнетание воздуха для придания нужной формы. Проход во внутреннюю часть объекта осуществляется за счет вмонтированных плотно закрываемых шлюзов. Сокращение воздухоподачи достигается обработкой пневмоопалубки аэрационным способом специальным гидрофобным составом, создающим эластично-ударопрочное, износ- и химически стойкое быстросохнущее защитное покрытие, надежно фиксирующее форму (например, «ДенсТоп ПУ 650», общий расход $2,2 \text{ кг/м}^2$, увеличивающее удлинение при разрыве до 400 %, прочность при растяжении 15 МПа, температура эксплуатации от -50°C до $+150^\circ\text{C}$). Покрытие возможно наносить даже при отрицательных температурах. Несъемная опалубка образует форму сооружения, работает

Рис. 2. Натяжной косой замок с шипами для соединения элементов

Рис. 3. Конструкция каркаса купольного здания:
1 — опорная колонна или ж/б сердечник; 2 — подъемные лебедки; 3 — полуарка; 4 — элемент обрешетки;
5 — фундаментный башмак

как одно целое с конструкцией, повышая прочностные характеристики, защищая поверхность от атмосферных воздействий и при этом сокращая трудозатраты на монтаж опалубки (рис. 4).

8. Конечный этап — заливка межпалубного пространства вспененной смесью — грунтоземом на основе *Quad Core*, надежно соединяющим все элементы конструкции и снижающим стоимость доставки и горючесть смеси.

Для сокращения энергозатрат в качестве стенового (СП 131.13330.2012) применен материал *QuadCore*, обладающий значительно более высокими, чем у обычных материалов, теплоизоляционными свойствами ($\lambda = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$), имею-

щий класс пожарной опасности К0 (15 мин), обладает высокими адгезивными свойствами, что позволяет использовать его в качестве демпфера и тем самым значительно повысить воспринимаемые каркасом нагрузки. Повысить энергосбережение возможно, применив способные к быстрому реагированию как на порывы ветра, так и понижение температуры элементы ставней зонтичного типа для внешнего дополнительного утепления окон (рис. 5).

Принимая во внимание совместную работу LVL-бруса и *QuadCore*, выступающего в роли демпфера, с учетом того, что угол, образуемый полуаркой, позволяет регулировать скопление

Рис. 4. Монтаж пневмоопалубочной конструкции:
1 — опорная колонна или ж/б сердечник; 2 — полуарка; 3 — внутренняя оболочка пневмоопалубки с выведенными элементами трубопровода для нагнетания воздуха; 4 — внешняя натяжная оболочка пневмоопалубки;
5 — временные распорные стойки для удерживания в проектном положении опалубок межэтажных перекрытий;
6 — вспененный утеплитель *Quad Core*; 7 — высокий ростерк; 8 — фундаментный башмак

Рис. 5. Механизм закрытия ставней:
1 — обойма верхняя; 2 — механизм открытия (обойма нижняя с пружиной и замком фиксации); 3 — шарнирная петля; 4 — тяга шатун; 5 — ставни

снежных масс, уменьшая давление, но увеличивает ветровые напряжения, и на основании ранее проведенных экспериментов был выполнен расчет прогибов полуарок в зависимости от сечения верхнего пояса полуарки (рис. 6).

Отличие представленной технологии от ранее существующих заключается в следующем:

- позволяет практически полностью отказаться от металлических конструкций, что снижает вероятность в дальнейшем образование мостиков холода;
- межпалубное пространство купола из вспененного материала на основе *QuadCore* с применением в качестве наполнителя просеянного и прокаленного грунта повышает теплосопротивление, снижает требуемую толщину стены и горючесть;
- для строительства применен бескрановый метод монтажа пневмокаркасной конструкции, что значительно сокращает трудоемкость и срок производства работ;
- демпфирующая способность материала *QuadCore* к древесине, его существенно меньшая плотность по сравнению с бетоном позволяют снизить сечение полуарок и тем самым расход

материала, что значительно удешевляет транспортировку к месту монтажа.

Достоинства данной технологии:

1. Компактность конструктивных элементов в разобранном положении.

2. Решетчатые конструкции уменьшают вес, увеличивают несущую способность за счет применения стабилизирующих тросов и *QuadCore*.

3. Не требуется дорогостоящее крановое оборудование (монтаж с помощью лебедок и подмостей).

4. Сжатые сроки монтажа. Элементы полуарок, шарнирно закрепленные в местах опор, легко устанавливаются в проектное положение, исключая трудоемкий процесс выверки. На основе спрогнозированного хронометража возведение наземной части объекта диаметром до 36 м и высотой купола до 12 м бригадой из 5–7 человек, с учетом предварительной укрупнительной сборки, заняло не более 30 смен.

Применение грунтозема на основе вспененного материала типа *Quad Core* позволяет снизить нагрузку на основание, повысить теплосопротивление, снизить трудозатраты, при одновременном соблюдении максимальных темпов

Рис. 6. Распределение прогибов верхнего пояса полуарки в зависимости от длины пролета и размера сечения (результатирующая прикладываемой постоянной, ветровой и снеговой нагрузки равна 500 кг/м²)

строительства, что дает возможность широко использовать представленную выше технологию.

Библиографический список

1. Научно-технические проблемы освоения Арктики: научная сессия общего собрания членов РАН. Москва, 16 декабря 2014 г. / под ред. Н. П. Лаверова, В. И. Васильева, А. А. Макоско. М.: Наука, 2015. 490 с.
2. Варфоломеев Ю. А. Особенности проектирования и строительства малоэтажных домов в Арктике // Арктика и Север. 2014. № 17. С. 28–43.
3. Мушинский А. Н., Зимин С. С. Строительство быстровозводимых зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 4 (31). С. 182–193.
4. Патент Российской Империи № 1896 от 12.03.1899. Кл. 37f,15/28. Гиперboloидные конструкции (ажурная башня) / В. Г. Шухов.
5. Müller J. Trag- und Verformungsverhalten spezieller Verbundelemente für Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken unter Kurzzeit-, Ermüdungs- und Langzeitbeanspruchung. Dissertation (in Begutachtung), Bauhaus-Universität Weimar, 2014. 80 S.
6. Kuhlmann U., Kudla K. Forschungsprojekt AiF/iVTH 17070 N Vereinfachter Ermüdungsnachweis von Holzbauteilen in Holz- und Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, Nr. 2010-60X, Schlussbericht, 2015.

References

1. *Nauchno-tehnicheskie problemy osvoeniya Arktiki: nauchnaya sessiya obshchego sobraniya chlenov RAN* [Scientific and technical problems of the Arctic development: scientific session of the General meeting of RAS members.]. December 16, 2014. Ed. by Laverov N. P., Vasil'ev V. I., Makosko A. A. Moscow, Nauka Publ., 2015, 490 p.
2. Varfolomeev Yu. A. *Osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva maloetazhnykh domov v Arktike* [Features of design and construction of low-rise buildings in the Arctic]. *Arktika i Sever – The Arctic and the North*, 2014, no. 17, pp. 28–43.
3. Mushinskiy A. N., Zimin S. S. *Stroitel'stvo bystrovostroyimykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of prefabricated buildings and structures]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy – Construction of unique buildings and structures*, 2015, no. 4 (31), pp. 182–193.
4. Shukhov V. G. *Giperboloidnye konstruksii (azhurnaya bashnya)* [Hyperboloid structures (openwork tower)]. Patent of the Russian Empire, no. 1896, 1899. Kl. 37f, 15/28. \
5. Müller J. *Trag- und Verformungsverhalten spezieller Verbundelemente für Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken unter Kurzzeit-, Ermüdungs- und Langzeitbeanspruchung*. Dissertation (in Begutachtung), Bauhaus-Universität Weimar Publ., 2014, 80 p.
6. Kuhlmann U., Kudla K. *Forschungsprojekt AiF/iVTH 17070 N Vereinfachter Ermüdungsnachweis von Holzbauteilen in Holz- und Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken*. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf Publ., Nr. 2010-60X, Schlussbericht, 2015.