Технология и организация строительства

УДК 69.691.1.624.011.01

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-102-107

© А. Ф. Юдина, д-р техн. наук, профессор

© A. F. Yudina, Dr. Sci. Tech., Professor

© С. А. Евтюков, д-р техн. наук, профессор

© S. A. Evtyukov, Dr. Sci. Tech., Professor

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: yudinaantonina2017@mail.ru, s.a.evt@mail.ru

E-mail: yudinaantonina2017@mail.ru, s.a.evt@mail.ru

© Н. В. Розанцева, канд. техн. наук

© N. V. Rozantseva, PhD in Sci. Tech.

(Санкт-Петербургское государственное автономное профессиональное учреждение «Колледж туризма и гостиничного сервиса», Санкт-Петербург, Россия)

(Saint Petersburg State Autonomous professional institution «College of tourism and hotel service», St. Petersburg, Russia)

E-mail: qq_89@list.ru

E-mail: qq_89@list.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МОНТАЖА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРЕКРЕСТНО-БАЛОЧНОЙ СИСТЕМЫ

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR THE INSTALLATION OF SPATIAL STRUCTURE BASED ON EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF THE CROSS-BEAM SYSTEM

Для перспективного развития жизнедеятельности в Арктической зоне и на территориях Крайнего Севера России необходимы исследования по проектированию и разработке технологий возведения зданий и сооружений различного назначения. Рассмотрены и проанализированы существующие перекрестно-балочные системы из клееной древесины и принципы их расчета. Проведены аналитические расчеты, позволившие выявить оптимальную конструкцию по расположению стержневой системы, в том числе значительно снижающую общий конструктивный вес. Также на основании проведенных расчетов определен наиболее прогрессивный способ решения геометрических параметров пространственной стержневой структуры. Предложена технология монтажа клеелесовых конструкций и возможность ее применения при строительстве зданий и сооружений в суровых условиях Арктики и Крайнего Севера.

Ключевые слова: технология монтажа клеелесовых конструкций, деревокомпозитный материал, клееный LVL брус, структурная плита, стержневая система, статический расчет, максимальная нагрузка.

For the prospective development of life in the Arctic zone and the territories of the Far North of Russia, research is needed on the design and development of technologies for the construction of buildings and structures for various purposes. This article considers and analyzes the presently used cross-beam systems made of laminated timber and the principles of calculating these systems. Analytical calculations were carried out, which made it possible to identify the optimal design for the location of the rod system, including the one which significantly reduces the total structural weight. Furthermore, on the basis of the calculations, there was determined the most progressive way of solving the geometric parameters of the spatial rod structure. The technology of installation of laminated wood structures is proposed, and the possibility of its application in the construction of buildings and structures in the severe conditions of the Arctic and the Far North is discussed.

Keywords: technology of installation of laminated wood construction, timber composite material, laminated LVL flitch-of timber, structural plate, rod system, static calculation, maximum load.

Арктика и северные территории России — это зона сложных природно-климатических условий, вечной мерзлоты и геополитических интересов. Последние обусловлены запасами природных ресурсов. Проблемой является их экологически безопасная добыча и изыскания, размещение большого количества ученых и рабочих и т. п. Поэтому для перспективного развития деятельности в Арктике важными являются разработки технологий возведения зданий и сооружений различного назначения с использованием строительных материалов, наиболее пригодных для таких условий. Основные принципы строительства в этом регионе: унификация и модульность, сокращающие продолжительность выполнения технологических процессов, оптимизация геометрии, увеличивающая устойчивость и долговечность конструкций, и создание замкнутого контура, снижающего затраты энергии [1].

В сентябре 2020 года в Санкт-Петербурге прошел Форум устойчивого развития северных территорий России¹, на котором было подчеркнуто направление на всестороннее развитие и освоение этих районов, от которых во многом зависит благосостояние России, и здесь необходим комплексный подход: развитие не только жилищного комплекса, но и инфраструктуры.

Продолжительность возведения объектов играет существенную роль при выборе технологии для строительства в северных районах страны, и в том числе в Арктике.

Известна технология монтажа подъемом перекрытий из клеедеревянных (КДК) структурных конструкций — покрытий из ячеистых перекрестных ортогональных или диагональных стержневых систем в двух или трех направлениях, позволяющих безопорное перекрытие больших пролетов, в которых для повышения устойчивости применяются затяжки в растянутых поясах. Применение метода подъема перекрытий и сборки конструкции в наземном положении значительно сокращает продолжительность работ и сметную стоимость строительства.

Однако ранее предложенные технологии выполнялись или с применением как минимум четырех кранов, что является очень проблематичным в районах Крайнего Севера, или с помощью

гидроподъемников большой мощности на ограниченную высоту, что уменьшало доступные варианты конструктивных решений сооружений.

Конструктивная система клеедеревянных структурных конструкций имеет ряд достоинств по сравнению с перекрытиями из ферм² [2–3]:

- вариативность формы покрытия с малым отношением высоты к пролету $h/l = 1/16 \dots 1/25$, что снижает строительный объем и эксплуатационные расходы;
- малую материалоемкость по отношению к воспринимаемым нагрузкам;
- универсальность, технологичность, разборность, транспортабельность, позволяют применять конструктивные решения в труднодоступных северных районах;
- вариативность методов монтажа.

Расчет структурных плит из металла применялся еще в Советском Союзе. Основная задача данной работы: на основании выявленных мест концентрации напряжений в пространственной конструкции предложить оптимальное соотношение конструктивного и технологического решения структурных систем. В связи с востребованностью большепролетных перекрытий в качестве объекта исследования была выбрана оптимальная по размерам пространственная конструкция 48×48 м из восьми секций-полей, с верхними и нижними поясами из клеедеревянных структурных конструкций с жестко соединенными узлами и раскосами, обеспечивающими устойчивость.

Для получения сравнительных результатов от максимальных изгибающих моментов, возникающих в элементах структуры, в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» был проведен сбор возможных распределенных нагрузок на покрытие и запроектированы три варианта балок поясов структуры: 1 — цельная балка из дуба, 2 — береза/дуб, модуль упругости — 18 300/14 300 МПа, модуль сдвига — 1510/1380 МПа; 3 — сосна/береза/дуб, модуль упругости — 12 100/18 300/14 300 МПа, модуль сдвига — 1210/1510/1380 МПа. Принимаем сечения³: пояса — 80×260 мм, стойки — 50×100 мм, раскосов — 63×225 мм.

² Рекомендации по проектированию структурных конструкций / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1984. 303 с.

³ СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная версия СНиП II-25-80 / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко — институт ОАО «НИЦ «Строительство». М., 2017.

¹ URL: <https://www.assembly.spb.ru/article/633200002/129146/V-Peterburge-otkrylsya-Forum-ustoychivogo-razvitiya-severnyh-territoriy-Rossii>

Рис. 1. Схема приложения нагрузки

Схема приложения нагрузки представлена на рис. 1. Проектируем опирание каждой из сторон плиты на две опоры на расстоянии $\frac{1}{4}$ пролета от углов как наиболее неблагоприятное. Принимаем допуск, что перекрестные фермы в узлах имеют между собой только вертикальную связь, регулируя усилия в элементах для уменьшения типов стержней, и проводим расчет на максимальную равномерно распределенную нагрузку (временную и постоянную) на структуру — $q = 1,86 \text{ кН/м}^2$ [2, 3].

Расчетная минимальная высота плиты $h_{\min}$ — из условия устойчивости верхних и прочности нижних поясов ($N_{\max} \leq \varphi R_y A_{\max}$; $N_{\min} \leq R_y A_{\min}$) и ограничения по прогибам ($w_{\max} \leq [f]$)⁴. Меньшая высота плиты приводит к недонапряженности поясов, а большая увеличивает вероятность наступления первого предельного состояния ранее второго, осложняя расчет пластических деформаций. Расчет сводится к составлению n числа линейных уравнений, их решению по прогибам узлов поясных сеток на жесткость и учету податливости болтового соединения, увеличивающей

⁴ СП 382.1325800.2017. Конструкции деревянные клееные на клеенных стержнях.

прогиб. Число уравнений равно числу поясных узлов в покрытии. Расчет проведен методом конечных элементов в программе Autodesk Robot [4]. Диагональную и ортогональную пространственную конструкцию первоначально загружаем одинаковой нагрузкой в 10 кН, что позволит оценить эффективность работы в одинаковых условиях. Результаты представлены в таблице.

Применение клеелесовых структурных конструкций и диагональной стержневой системы уменьшает усилия и снижает вес элементов, при этом увеличивая перемещения.

После проведенных испытаний на нагрузку в 10 кН начинаем постепенный пригруз каждой конструкции с шагом 5 кН до потери устойчивости, определяя максимально допустимые нагрузки для конструкции. На рис. 2 приведена диаграмма полученных с помощью комплекса Robot результатов на $\frac{1}{4}$ пролета, в качестве эталона принимаем первоначальное испытание — 10 кН, на рис. 3 — критическая нагрузка при различных вариантах пространственных конструкций.

Результаты расчетов показали, что в прямоугольной плите с ортогональным расположением поясов возникает большая разница нагрузок в поясах. Изменить данное положение возможно, изменив кривизну структурной плиты, приближая ее форму к линзообразной форме, путем уменьшения высоты у опор, тем самым сократить изгибающий момент в геометрическом центре фигуры и сократить эксплуатационные затраты [5, 6].

Как правило, при перекрытии большепролетного здания происходит предварительное укрупнение (сборка) структурной плиты в построечных условиях, что значительно сокращает трудозатраты.

Результаты расчета конструкций

Показатели	Конструкция 1 (ортогональная)				
	$N_x(-)$, кН	$N_x(+)$, кН	Перемещение, см	Вес, кг	Макс. напряжение, МПа
Балка 1	-559,8	400,6	-10,2	56 441	21,75
Балка 2	-558,6	399,9	-9,4	54 112	21,7
Балка 3	-556,7	398,5	-9,5	51 029	21,6
Конструкция 2 (диагональная)					
Балка 1	-320,2	273,7	-15,1	37 800	26,21
Балка 2	-325,3	278,3	-14,3	34 176	25,94
Балка 3	-326,1	279,3	-14,3	31 726	24,3

Рис. 2. Карты изменения стержней под воздействием нагрузки N_x для: клеенодеревянной балки 2 (береза/дуб) при ортогональном (а) и диагональном (б) расположении стержней; клеенодеревянной балки 3 (сосна/береза/дуб) при ортогональном (в) и диагональном (г) расположении стержней

Монтаж плит со сходными параметрами 48×48 м на проектную отметку может производиться несколькими способами⁵ с одновременным использованием четырех и более (четного количества) кранов, лебедками и, в зависимости от размеров укрупненного покрытия, с помощью электромеханических подъемников. Применение кранов большой грузоподъемности требует не только больших финансовых затрат, но и максимальной профессиональной слаженности в течение всего периода монтажа.

По разработанной технологии первоначально по углам возводимого объекта устраиваются четыре воздуховода или железобетонные конструкции лестничных клеток со встроенными воздуховодами, которые выполняют роль несущих конструкций.

Структурная плита укрупняется (собирается) в наземном положении под несущими опорами. Подъем кровельного перекрытия осуществляется с помощью гидравлических самоподъемных устройств, закрепленных на домкратной раме, передвигающейся по вертикальным направляющим, соединенным болтовым соединением с закладными деталями и сварным соединением с основной арматурой несущих бетонных конструкций. Общее число направляющих составит не менее 16, при этом внешние стороны направ-

ляющих имеют резьбу, а домкратная рама имеет внутреннюю резьбу, что значительно увеличивает сцепление и грузоподъемность.

После набора необходимой прочности бетонной конструкции собирается подвесной подъемный механизм.

Такой способ монтажа позволяет существенно сократить продолжительность работ, и он более экономичен. При монтаже не требуется применение кранового оборудования.

Угловые участки структурной плиты при различных вариациях конструктивного решения или монтируются впоследствии, или изменяемая конструкция монтируется целиком.

Одновременно с подъемом перекрытия монтируются ограждающие конструкции. После демонтажа направляющих выступы закладных деталей или полностью скрываются в слое фасада, или срезаются.

Устройство железобетонных конструкций со встроенными наружными воздуховодами в условиях севера значительно сокращает энергозатраты на отопление в зимний период, предотвращая потери теплого воздуха, который в данном случае происходит по кольцевой схеме и попадает в помещение не напрямую, а проходя через межстенное пространство, в котором нагревается.

На рис. 4 представлены варианты монтажа структурного покрытия с помощью:

⁵ URL: <https://zen.yandex.ru/media/blogstroitelja>

Рис. 3. Критическая нагрузка при различных вариантах пространственных конструкций

- гидравлических механизмов и системы тяжей;
- самоподъемных механизмов.

Элементы структурной плиты проектируются максимально простой конструкции. Унификация элементов и узловых соединений значительно упрощает сборку и позволяет менять компоновочное решение.

Выводы

Таким образом, на основании результатов аналитических расчетов перекрестно-балочных систем из клееной древесины определена оптимальная конструкция расположения стержневой системы, что позволяет значительно снизить общий вес структурной системы. Также на основании проведенных расчетов определен

Рис. 4. Схема монтажа укрупненного покрытия структурной плиты размером 48 × 48 м:
 а — с помощью гидравлических подъемников и системы тяжей; б — с помощью самоподъемных механизмов;
 1 — пояса; 2 — стойки; 3 — раскосы; 4 — последовательные положения конструкции во время подъема;
 5 — гидравлические опоры; 6 — система тяжей с тросом; 7 — элемент лебедочного механизма; 8 — временные усиливающие конструкции; 9 — гидравлические самоподъемные устройства, закрепляемые на домкратной раме, передвигающейся по вертикальным направляющим конструкциям; 10 — воздухозаборное устройство

наиболее прогрессивный способ решения геометрических параметров пространственной стержневой структуры. Расчет показал, что конструкции структурного покрытия с диагональным расположением поясов на 39,9 % эффективнее конструкции с ортогональным положением по восприятию усилий и на 36 % устойчивее. Структурная система пространственной конструкции способна воспринимать значительные эксплуатационные нагрузки.

Применение представленной технологии монтажа структурных систем с использованием гидравлических домкратов с перемещением по домкратным направляющим значительно сокращает трудозатраты и продолжительность монтажа, что позволяет выполнять монтаж в сжатые сроки без применения кранового оборудования. Простота монтажа и унификация элементов позволяют широко использовать данную технологию монтажа структурных систем из клеендеревянных конструкций в Арктической зоне и районах Крайнего Севера.

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. Филимонов Э. В., Ермоленко Л. К., Гапцов М. М., Гуськов И. М., Линьков В. И., Серова Е. Т., Степанов Б. А. Конструкции из дерева и пластмасс. М.: АСВ, 2004. 440 с.
3. Зиннуров Т. А., Нурмухаметов К. А. Исследование совместной работы деревянных составных балок // Современное строительство и архитектура. 2017. № 4 (08). С. 20–23.
4. Тупикина М. А., Ходакова В. А., Маришкин Н. А., Журавлев Н. Ю. Сравнение систем автоматизированного проектирования КОМПАС-3Д и Solidworks // Студенческая наука для развития информационного общества: сб. материалов VII Всерос. науч.-техн. конф. Ставрополь, 26–28 декабря 2017 г. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный ун-т, 2018. С. 326–328.
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-tekhnicheskie problemy osvoeniya Arktiki [Scientific and technical problems of the development of the Arctic]. Trudy nauchnoy sessii obshchego sobraniya chlenov RAN, Moskva, 16 dekabrya 2014 g. [Proceedings of the scientific session of the general meeting of members of the RAS, December 16, 2014]. (Eds.) Laverova N. P., Vasiliev V. I., Makosko A. A. Moscow, Nauka Publ., 2015, 490 p.
2. Filimonov E. V., et al. Konstruktsii iz dereva i plastmass [Wood and plastic constructions]. Moscow, ASV Publ., 2004, 440 p.
3. Zinnurov T. A., Nurmukhametov K. A. Issledovanie sovmestnoy raboty derevyannykh sostavnykh balok [Study of the joint performance of timber composite beams]. Sovremennoe stroitel'stvo i arkhitektura – Modern construction and architecture, 2017, no. 4 (08), pp. 20–23.
4. Tupikina M. A., Khodakova V. A., Marshkinskiy N. A., Zhuravlev N. Yu. Sravnenie sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya KOMPAS-3B i Solidworks [Comparison of computer-aided design systems KOMPAS-3B and Solidworks]. Trudy VII Vseros. nauch.-tekhn. konf. «Studencheskaya nauka dlya razvitiya informatsionnogo obshchestva», Stavropol', 26–28 dekabrya 2017 g. [Proceedings of the All-Russia sci.-tech. conf. "Student science for the development of the information society, Stavropol', December 26–28, 2017]. Stavropol', Severo-Kavkazskiy federal'niy un-t Publ., 2018, pp. 326–328.
5. Müller J. Trag- und Verformungsverhalten spezieller Verbundelemente für Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken unter Kurzzeit-, Ermüdungs- und Langzeitbeanspruchung [Bearing and deformation behaviour of special composite elements for timber-concrete composite road bridges under short-term, fatigue and long-term stress.]. Dissertation (in Begutachtung), Bauhaus-Universität Weimar, 2014, 80 p.
6. Kuhlmann U., Kudla K. Vereinfachter Ermüdungsnachweis von Holzbauteilen in Holz- und Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken [Simplified fatigue detection of timber components in timber and timber-concrete composite road bridges]. Forschungsprojekt AiF/iVTH 17070 N. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, Nr. 2010-60X, Schlussbericht, 2015.