

Деревянное покрытие-настил промышленного здания: расчет из условия изгибной жесткости

И.И. Шишов^{ID}, А.В. Лукина^{ID}✉, М.С. Лисятников^{ID}, Д.А. Чибрикин^{ID}

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Российская Федерация

✉ pismo.33@yandex.ru

Поступила в редакцию: 12 марта 2025 г.

Доработана: 17 мая 2025 г.

Принята к публикации: 30 мая 2025 г.

Аннотация. Большепролетные конструкции покрытия позволяют создавать просторные помещения без использования промежуточных опор, что важно для гибкой планировочной системы промышленных и общественных зданий. Как правило, такие конструкции выполняют из металлических или железобетонных ферм или арок. Объектом исследования является новая двускатная конструкция деревянного дощатого покрытия-настила для промышленного здания пролетами 24 и 30 м. Ширина настила без стропильных конструкций составляет 2,4 м. Соединение отдельных досок и элементов между собой в настиле предусматривается гвоздевыми и болтовыми, что выгодно отличает его от клеёных деревянных конструкций. Существует возможность сборки конструкции непосредственно на строительной площадке. Не требуется доставка крупномасштабного изделия до места монтажа. Представлен подробный анализ конструктивных решений, приведены методы расчета, в результате которых определено, что предложенная конструкция удовлетворяет условию изгибной жесткости. Описана простая в изготовлении и монтаже система, основанная на применении деревянных досок и панелей, которые обеспечивают необходимую общую устойчивость конструкции, что делает ее привлекательным вариантом для использования в различных климатических районах. Результаты исследований подтверждают высокую перспективность дальнейшего внедрения подобной технологии в реальную практику проектирования.

Ключевые слова: деревянные конструкции, покрытия, прочность, жесткость

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: Шишов И.И. — разработка конструктивного решения деревянной кровельной панели, постановка задачи исследования; Лукина А.В. — сбор нагрузок, выполнение расчета изгибной жесткости панели, написание текста; Лисятников М.С. — анализ современного состояния большепролетных конструкций на основе древесины, литературный обзор; Чибрикин Д.А. — оформление графического материала, формулировка выводов. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в области научной деятельности (тема FZUN-2024-0004, государственное задание ВлГУ).

Для цитирования: Шишов И.И., Лукина А.В., Лисятников М.С., Чибрикин Д.А. Деревянное покрытие-настил промышленного здания: расчет из условия изгибной жесткости // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2025. Т. 21. № 3. С. 242–253. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-3-242-253>

Шишов Иван Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Российская Федерация, 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87; ORCID: 0009-0001-9621-7196; e-mail: ivshish1938@gmail.com

Лукина Анастасия Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Российская Федерация, 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87; eLIBRARY SPIN-код: 8745-0004, ORCID: 0000-0001-6065-678X; e-mail: pismo.33@yandex.ru

Лисятников Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Российская Федерация, 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87; eLIBRARY SPIN-код: 4089-7216, ORCID: 0000-0002-5262-6609; e-mail: mlisyatnikov@mail.ru

Чибрикин Данила Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Российская Федерация, 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87; eLIBRARY SPIN-код: 1809-6997, ORCID: 0000-0001-9278-4559; e-mail: dachibrikin@outlook.com

© Шишов И.И., Лукина А.В., Лисятников М.С., Чибрикин Д.А., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Timber Roof Panel for Industrial Buildings: Analysis According to Bending Stiffness Condition

Ivan I. Shishov^{ID}, Anastasia V. Lukina^{ID}✉, Mikhail S. Lisyatnikov^{ID}, Danila A. Chibrikov^{ID}

Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletovs, Vladimir, Russian Federation

✉ pismo.33@yandex.ru

Received: March 12, 2025.

Revised: May 17, 2025.

Accepted: May 30, 2025

Abstract. Large-span roof structures allow creating spacious rooms without using intermediate supports, which is important for a flexible planning system of industrial and public buildings. Typically, such structures are made of metal or reinforced concrete trusses or arches. The object of the study is a new ridged structure of a wooden plank roof panel for industrial buildings with spans of 24 and 30 m. The width of the panel without rafter structures is 2.4 m. The connection of individual boards and elements with each other in the panel is provided by nails and bolts, which compares favorably with glued wooden structures. It is possible to assemble the structure directly on the construction site. There is no need to deliver a large-scale product to the installation site. The article provides a detailed analysis of design solutions, presents calculation methods, as a result of which it is determined that the proposed structure meets the condition of bending rigidity. A simple to manufacture and to install system is described, based on the use of wooden boards and panels, which provide the necessary overall stability of the structure, making it an attractive option for use in various climatic regions. The results of the studies confirm the high potential for further implementation of such technology in real design practice.

Keywords: wooden structures, roofs, strength, rigidity

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution: Shishov I.I. — development of structural solution of the wooden roofing panel, formulation of research objective; Lukina A.V. — collecting loads, calculating the bending stiffness of the panel, writing the text; Lisyatnikov M.S. — analysis of the current state of large-span structures based on wood, literature review; Chibrikov D.A. — design of graphic material, formulation of conclusions. All authors read and approved the final version of the article.

Funding. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment in the field of scientific activity (theme FZUN-2024-0004, state assignment of the VISU).

For citation: Shishov I.I., Lukina A.V., Lisyatnikov M.S., Chibrikov D.A. Timber roof panel for industrial buildings: analysis according to bending stiffness condition. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2025;21(3):242–253. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-3-242-253>

1. Введение

Большепролетные конструкции становятся все более популярными благодаря своей экономической эффективности, архитектурной выразительности и технологическому развитию. Большепролетные конструкции находят широкое применение в различных сферах, включая строительство промышленных, зрелищных, культовых зданий, мостов, спортивных арен, аэропортов, торговых центров и других крупных объектов [1; 2]. В будущем они будут играть ключевую роль в создании современных и функциональных объектов, способствуя развитию инфраструктуры и улучшению качества жизни населения.

Ivan I. Shishov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures, Institute of Architecture, Civil Engineering and Energy, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, 87 Gorky St, Vladimir, 600000, Russian Federation; ORCID: 0009-0001-9621-7196; e-mail: ivshish1938@gmail.com

Anastasia V. Lukina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures, Institute of Architecture, Civil Engineering and Energy, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, 87 Gorky St, Vladimir, 600000, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8745-0004; ORCID: 0000-0001-6065-678X; e-mail: pismo.33@yandex.ru

Mikhail S. Lisyatnikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures, Institute of Architecture, Civil Engineering and Energy, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, 87 Gorky St, Vladimir, 600000, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 4089-7216, ORCID: 0000-0002-5262-6609; e-mail: mlsiyatnikov@mail.ru

Danila A. Chibrikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures, Institute of Architecture, Civil Engineering and Energy, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, 87 Gorky St, Vladimir, 600000, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 1809-6997, ORCID: 0000-0001-9278-4559; e-mail: dachibrikov@outlook.com

Когда речь идет о большепролетных перекрытиях, как правило, используют фермы, арки или пространственные конструкции [3; 4]. Широко распространены решения, выполненные из металлических и железобетонных конструкций [5–7].

Одним из перспективных направлений является использование деревянных стропильных конструкций для перекрытия больших пролетов. Деревянные конструкции обладают рядом преимуществ: экологичность, легкость, высокие теплоизоляционные свойства, эстетичность [8].

Элементы стропильной деревянной системы, как правило, выполняются на болтах, нагелях и реже на МЗП. Болтовые соединения обеспечивают прочность и устойчивость конструкции, а также позволяют легко монтировать и демонтировать элементы при необходимости [9]. Так, в [10; 11] предложены стропильные конструкции из бамбука, соединения которых выполнены на болтах.

Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В.А. Кучеренко (ЦНИИСК им. Кучеренко), один из ведущих институтов строительной отрасли России, накопил значительный опыт проектирования большепролетных деревянных конструкций. Под руководством С.Б. Турковского и А.А. Погорельцева разработаны основные виды проектов большепролетных деревянных конструкций: арочные покрытия зданий, деревянные фермы и рамные конструкции, шпренгельные системы и клеёные балки, решетчатые деревянные фермы и комбинированные конструкции.

Огромный вклад в формирование и развитие школы деревянных конструкций в Сибирском регионе внес профессор П.А. Дмитриев (Сибстрин). П.А. Дмитриевым были экспериментально исследованы соединения элементов деревянных конструкций на металлических и пластиковых нагелях, разработаны положения по проектированию несущих и ограждающих деревянных конструкций.

Разработка новых полимеров, конструктивных решений и технологий обработки древесины способствует развитию деревокомпозитных конструкций. В практику проектирования все более интенсивно входят составные и деревоклеёные конструкции [12; 13].

Деревянные конструкции гигроскопичны. При набухании создаются внутренние напряжения, что может привести к деформациям, расслоению и снижению прочности конструкции. Деревокомпозитные конструкции лишены таких недостатков.

В [14–16] выполнены расчеты деревянных конструкций с учетом ползучести. Исследования подтверждают необходимость учета ползучести древесины и уточнения расчетов деревянных конструкций.

В [17; 18] предлагается инновационное предварительно нагруженное соединение дюбель — гайка для высокопроизводительных пространственных конструкций из клееного шпона (LVL). Такое соединение LVL элементов приводит к снижению собственного веса конструкции на 33 % при равной проектной несущей способности. Соединение дюбель — гайка, используемое для реализации прототипов, обеспечивает простоту операций по сборке/разборке. В [19] подробно обсуждаются клеёные деревянные элементы, которые используются в качестве несущих конструкций. Подчеркиваются преимущества металлических соединений, но также упоминаются проблемы, связанные с экологичностью синтетических клеев и соединителей.

Статья М.С. Сергеева [20] посвящена исследованию влажностного поведения и процессов высыхания кросс-ламинированной древесины (CLT) в кровельных конструкциях. В работе представлен полевой эксперимент, проведенный в течение 11 месяцев на строительной площадке в Торонто (Канада), где анализировалась динамика распределения влаги в CLT. Основное внимание уделено влиянию влаги на торцы панелей CLT, так как древесина является гигроскопичным материалом, а ее торцы особенно уязвимы к водопоглощению.

Также в исследования [21; 22] рассмотрены вопросы армирования деревянных конструкций. Армирование — эффективный способ повышения несущей способности строительных конструкций, но требующий дополнительных ресурсов на разработку технологии изготовления композитных конструкций.

Примером успешного применения деревянных покрытий для промышленных зданий являются спортивные комплексы, выставочные залы, общественные здания [23; 24]. Например, крытый стадион в городе Хельсинки, Финляндия, построен с использованием клеёных деревянных балок длиной до 30 м [25]. Эти объекты демонстрируют высокую прочность и эстетическую привлекательность деревянной конструкции.

Таки образом, актуальность исследования деревянного покрытия-настила промышленного здания обусловлена несколькими важными факторами. Во-первых, это экономическая эффективность. Использование древесины вместо металла или бетона может существенно снизить затраты на строительство. Легкий вес материала уменьшает расходы на транспортировку и монтаж, а также снижает нагрузку на фундамент. Во-вторых, низкая теплопроводность древесины позволяет создавать более энергоэффективные здания, снижая затраты на отопление и кондиционирование воздуха. В-третьих, это адаптация к местным условиям. В России и других странах с развитой лесной промышленностью использование местных ресурсов древесины может способствовать развитию экономики региона и созданию рабочих мест [26].

2. Методы

Рассмотрено деревянное покрытие-настил (панель) для промышленного здания с пролетами длиной 24 и 30 м без использования традиционных стропильных систем.

Покрытие-настил представляет собой ряд кровельных панелей размером $2,4 \times 24$ м, шарнирно опирающихся на подстропильные балки. Кровельная панель это два сплошных настила толщиной по 120 мм, разделенных между собой поперечными стенками сечением 60×340 мм, расположенными с шагом 2,4 м (рис. 1).

Сплошной настил толщиной 120 мм обеспечивает достаточную жесткость и прочность, чтобы выдерживать нагрузки от снега, ветра и собственного веса. Поперечные стенки сечением 60×340 мм, расположенные через каждые 2,4 м, дополнительно усиливают конструкцию, предотвращая прогибы и деформации. Шарнирное соединение на подстропильные балки позволяет компенсировать возможные температурные расширения и усадки материалов, что повышает общую стабильность конструкции [27].

Соединение отдельных досок и элементов между собой предусматривается по типу дощато-гвоздевых балок. На этапе разработки модель исследуемого деревянного покрытия предполагается конструктивный забой гвоздей, а также крепление отдельных элементов болтовыми соединениями. Расчет узловых и стыковых соединений будет выполнен в дальнейшем при анализе внутренних усилий в каждом элементе отдельно.

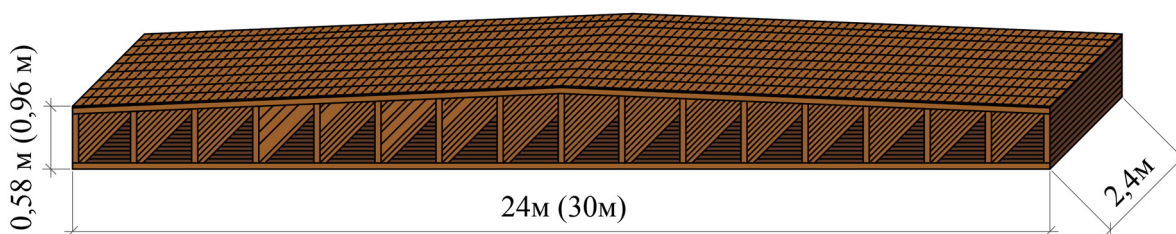


Рис. 1. Общий вид деревянного покрытия-настила промышленного здания

Источник: выполнено Д.А. Чибрикиным

Figure 1. General view of the wooden panel for industrial buildings

Source: made by D.A. Chibrikov

2.1. Покрытие здания с пролетом 24 м

Выполнен расчет предложенной деревянной конструкции. Расчетная схема представляет собой однопролетную шарнирно-опертую балку с шарнирным соединением стенок с верхним и нижним поясами, нагруженную равномерно-распределенной нагрузкой по пролету. Определен момент инерции и изгибную жесткость покрытия.

Момент инерции поперечного сечения панели:

$$I_z = \frac{bh^3}{12} = \frac{2,4}{12} (0,58^3 - 0,34^3) = 0,0312 \text{ м}^3.$$

Изгибная жесткость: $EI_z = 12600 \cdot 0,0312 = 393 \text{ М} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}^2$.

Выполнен расчет по деформациям.

Нагрузки нормативные:

1. Продольные настилы: $P_1 = 0,24 \cdot 2,4 \cdot 510 = 294 \text{ кг/м}$;
2. Поперечные стенки: $P_2 = 0,06 \cdot 0,34 \cdot 2,4 \cdot 11 \cdot 510 = 259 \text{ кг/м}$;
3. Пароизоляция: $P_3 = 0,08 \cdot 2,4 = 0,192 \text{ кг/м}$;
4. Полимерная мембрана: $t = 1,5 \text{ мм}$; $P_4 = 1,8 \cdot 2,4 = 4,32 \text{ кг/м}$;
5. Снеговая нагрузка: $P_5 = 200 \cdot 2,4 = 480 \text{ кг/м}$;

Итого нормативная нагрузка: $q = 1038 \text{ кг/м} = 0,0104 \text{ МН/м}$.

Прогиб в середине пролета: $\text{Max } f = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{E} = \frac{5}{384} \cdot \frac{0,0104 \cdot 24^4}{393} = 0,114 \text{ м}$.

Предельно допустимый прогиб: $\frac{24}{200} = 0,120 \text{ м}$.

Таким образом, жесткость кровельной панели достаточна. Недостаток этого решения в том, что покрытие получается плоским. Чтобы создать уклон кровли от конька к карнизу, необходимо увеличить высоту поперечных стенок от карниза к коньку на 30 мм с каждым шагом поперечных стенок.

Нагрузка немного увеличится:

$$q = 0,0104 + 0,03 \cdot 0,06 \cdot 2,4 \cdot (2 + 4 + 6 + 8 + 10) \cdot 0,0051 = 0,011 \text{ МН/м}.$$

3. Результаты и обсуждение

Кровельная панель длиной 24 м разделяется поперечными стенками на 5 фрагментов, каждый из которых имеет две части по 2,4 м по разные стороны от конька. Каждый фрагмент имеет свою высоту и жесткость на изгиб EI_z . Высота фрагмента измеряется в его середине и считается постоянной. Принятые высоты фрагментов: $h = 0,58; 0,61; 0,64; 0,67; 0,70 \text{ м}$. Моменты инерции кровельных панелей I_z :

$$I_z = \frac{bh^3}{12} = \frac{b}{12} (h^3 - h_1^3),$$

где h — высота фрагмента; h_1 — расстояние между верхним и нижним настилами кровельной панели. Моменты инерции и изгибные жесткости EI_z по фрагментам представлены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

**Определение изгибной жесткости кровельной панели /
Determination of the bending stiffness of the roof panel**

Номер фрагмента / Fragment number	Момент инерции кровельных панелей I_z , м ⁴ / Moment of inertia of I_z , m ⁴ roofing panels	Изгибные жесткости EI_z , МН/м ² / Bending stiffness EI_z , MN/m ²
Фрагмент 1 / Fragment 1	0,0312	393
Фрагмент 2 / Fragment 2	0,0353	445
Фрагмент 3 / Fragment 3	0,0396	499
Фрагмент 4 / Fragment 4	0,0443	558
Фрагмент 5 / Fragment 5	0,0491	619

Источник: выполнено А.В. Лукиной / Source: made by A.V. Lukina

Далее определяются прогибы кровельной панели в середине пролета:

$$\text{Max } f = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{EI_z}. \quad (1)$$

Нагрузка $q = 0,011 \text{ МН/м}$ по всему пролету. Модуль упругости древесины: $E = 12600 \text{ МН/м}^2$.

$$\text{Max } f = 0,000142 \frac{l^4}{EI_z}.$$

Для каждого фрагмента кровельной панели выполняется следующее:

1. Часть кровельной панели, включающая фрагмент, рассматривается как балка длиной l_1 на шарнирных опорах. По формуле (1) определяется прогиб в середине пролета от нагрузки q .

2. Часть кровельной панели, за исключением фрагмента, рассматривается как балка длиной l_2 , и для нее определяется прогиб в середине. Разность прогибов дает прогиб кровельной панели в середине пролета от нагрузки, действующей в пределах фрагмента (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Определение прогибов кровельной панели / Determining the deflections of the roof panel

Номер фрагмента / Fragment number	Пролет l , м / Span l , m	Прогиб f , м / Deflection, m
Фрагмент 1 / Fragment 1	24	0,0505
Фрагмент 2 / Fragment 2	21,6	0,0251
Фрагмент 3 / Fragment 3	19,2	0,016
Фрагмент 4 / Fragment 4	16,8	0,0112
Фрагмент 5 / Fragment 5	14,2	0,0

Источник: выполнено А.В. Лукиной / Source: made by A.V. Lukina

Прогиб кровельной панели в середине пролета равен сумме определенных прогибов.

$$\text{Max } f = 0,0505 + 0,0251 + 0,016 + 0,0112 + 0,0129 = 0,116 \text{ м.}$$

Предельно допустимый прогиб 0,120 м.

Жесткость кровельной панели достаточна

3.1. Покрытие здания с пролетом 30 м

Соберем нагрузки.

Продольные настилы толщиной $0,09 \cdot 2 = 0,18 \text{ м}$. Тогда $P_1 = 0,18 \cdot 2,4 \cdot 510 = 220 \text{ кг/м}$.

Поперечные стенки: $P_2 = 0,08 \cdot 2,4 \cdot (0,78 + 0,81 + 0,84 + 0,87 + 0,90) \cdot 510 \cdot 2 = 823 \text{ кг/м}$.

Нагрузка от пароизоляции и полимерной мембраны: $P_3 = 4,32$ кг/м.

Снеговая нагрузка: $200 \cdot 2,4 = 480$ кг/м.

Итого (нормативные нагрузки): $q = 1527,32$ кг/м = $0,0153$ МН/м.

Прогиб кровельной панели в середине пролета составит:

$$\text{Max } f = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EI_z} = 0,000198 \frac{l^4}{EI_z}.$$

Моменты инерции и жесткости кровельной панели по фрагментам от карниза к коньку (табл. 3).

Далее вычисляются прогибы в середине кровельной панели от раздельного нагружения ее по фрагментам, как это описано выше. Принимается: l_1 — длина участка панели, включающего фрагмент, l_2 — длина участка с исключенным фрагментом. Прогибы определяются по формуле

$$\text{Max } f = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{EI_z} = 0,000198 \cdot \frac{l^4}{EI_z}.$$

Разность прогибов определяет прогиб кровельной панели f в середине пролета от нагружения фрагмента: $f = \text{Max } f_1 - \text{Max } f$.

Таблица 3 / Table 3

Результаты расчета покрытие здания пролетом 30 м /
Calculation results for covering a building with a span of 30 m

Номер фрагмента / Fragment number	Момент инерции кровельных панелей I_x , м ⁴ / Moment of inertia of roof panels I_x , m ⁴	Изгибная жесткость EI_x , МН/м ² / Bending stiffness EI_x , MN/m ²	Прогиб f , м / Deflection, m
Фрагмент 1 / Fragment 1	0,0820	1033	0,0914
Фрагмент 2 / Fragment 2	0,0878	1106	0,0406
Фрагмент 3 / Fragment 3	0,0937	1257	0,0141
Фрагмент 4 / Fragment 4	0,0998	1257	0,000123
Фрагмент 5 / Fragment 5	0,106	1336	0,000192

Источник: выполнено А.В. Лукиной / Source: made by A.V. Lukina

Прогиб кровельной панели в середине пролета равен сумме прогибов от нагружения фрагментов $\text{Max } f = 0,146$ м при предельно допустимом значении 0,150 м. Жесткость кровельной панели достаточна.

Результаты выполненного расчета показывают, что наибольший прогиб кровельной панели возникает от нагружения первого (прикарнизного) фрагмента, а с приближением нагруженного фрагмента к коньку его влияние на прогиб в середине пролета быстро уменьшается. Это можно использовать. Жесткость панели в направлении от карниза к коньку будем уменьшать, уменьшая толщину настилов.

Каждый скат будет иметь три зоны протяженностью по 5 м с суммарной толщиной верхнего и нижнего настилов от карниза к коньку 20, 18, 12 см. Каждая зона разделена поперечными стенками на два фрагмента по 2,5 м. Высота стенок в пределах ската 0,750; 0,775; 0,800; 0,825; 0,850; 0,875, высота средней стенки 0,900 м.

3.2. Определение нагрузок

1. Настилы: $(0,20 \cdot 5 + 0,18 \cdot 5 + 0,12 \cdot 5) \cdot 2 \cdot 2,4 \cdot 510 = 6120$ кг. Тогда нагрузка на 1 м кровельной панели составит: $q = 204$ кг/м.

2. Стенки по скатам, поперечные сечения: $(0,750 + 0,775 + 0,80 + 0,825 + 0,875) \cdot 0,08 \cdot 2 = 0,78$.

3. Средняя стенка $9 \cdot 0,15 = 0,135$ м².

Всего $0,78 + 0,135 = 0,915$ м²

Вес всех стенок на ширину кровельной панели — 2,4 м.

$$G = 0,915 \cdot 2,4 \cdot 510 = 1120 \text{ кг.}$$

Тогда нагрузка 1 м кровельной панели $q = \frac{1120}{30} = 37,333$ кг/м.

Вместе с настилами $q = 204 + 37,333 = 24,333$ кг/м = 0,00241 МН/м.

Пароизоляция и полимерная мембрана $g = 4$ кг/м = 0,00004 МН/м.

Снег $G = 480 \cdot 2,4 = 1152$ кг / м = 0,0115 МН/м.

Итого $q = 0,00241 + 0,00004 + 0,0115 = 0,0140$ МН/м.

Наибольший прогиб кровельной панели в середине пролета:

$$\text{Max } f = \frac{5ql^4}{384EI} = 0,000182 \frac{l^4}{EI}.$$

Момент инерции кровельной панели

$$I_z = \frac{bh^3}{12} = \frac{2,4}{12} (h^3 - h_1^3) = 0,2 (h^3 - h_1^3),$$

где h — высота фрагмента панели, включающая настилы; h_1 — без настилов.

Получаются следующие значения для фрагментов от карниза к коньку:

$$h = 0,20 + 0,75 = 0,95, \quad h_1 = 0,750;$$

$$h = 0,20 + 0,775 = 0,975, \quad h_1 = 0,775;$$

$$h = 0,18 + 0,80 = 0,98, \quad h_1 = 0,800;$$

$$h = 0,18 + 0,825 = 1,005, \quad h_1 = 0,825;$$

$$h = 0,12 + 0,850 = 0,970, \quad h_1 = 0,970;$$

$$h = 0,12 + 0,875 = 0,995, \quad h_1 = 0,875.$$

Моменты инерции и жесткости кровельной панели для фрагментов от карниза к коньку:

$$I_z = 0,2 (0,95^3 - 0,75^3) = 0,0871, \quad EI_z = 1010;$$

$$I_z = 0,2 (0,975^3 - 0,775^3) = 0,0923, \quad EI_z = 1160;$$

$$I_z = 0,2 (0,98^3 - 0,8^3) = 0,0858, \quad EI_z = 1080;$$

$$I_z = 0,2(1,005^3 - 0,825^3) = 0,09007, \quad EI_z = 1140;$$

$$I_z = 0,2(0,97^3 - 0,85^3) = 0,0597, \quad EI_z = 752;$$

$$I_z = 0,2(0,995^3 - 0,875^3) = 0,0630, \quad EI_z = 794.$$

Максимальный прогиб кровельной панели в середине пролета определяется как сумма прогибов от раздельного нагружения ее фрагментов. Для каждого фрагмента определяется 2 прогиба: f_1 — от нагружения панели длиной l_1 , включающей фрагмент, и f_2 — от нагружения панели длиной l_2 — без фрагмента. Разность прогибов определяет прогиб в середине пролета от нагружения фрагмента. Сумма таких разностей определяет прогиб кровельной панели переменной жесткости в середине пролета.

Фрагмент 1: / Fragment 1:

l_1 , м / м	l_2 , м / м	l_1 , м / м	l_2 , м / м	l_1 , м / м	l_2 , м / м	l_1 , м / м	l_2 , м / м	l_1 , м / м	l_2 , м / м	l_1 , м / м	l_2 , м / м
30	25	25	20	20	15	15	10	10	5	5	0
$f_1 = 0,146$	$f_2 = 0,0704$	$f_1 = 0,0613$	$f_2 = 0,0251$	$f_1 = 0,0270$	$f_2 = 0,00853$	$f_1 = 0,00808$	$f_2 = 0,00160$	$f_1 = 0,00242$	$f_2 = 0,00015$	$f_1 = 0,000151$	$f_2 = 0$

Сумма величин $(f_1 - f_2)$ определяет прогиб кровельной панели в середине пролета $f = 0,139$ м. Предельно допустимый прогиб 0,150 м. Жесткость кровельной панели достаточна.

Инженерный расчет дает лишь ориентировочную оценку несущей способности конструкции, однако требуется дополнительное моделирование всех факторов, влияющих на работу сооружения, включая сложное распределение внутренних усилий, учет узлового сопряжения и возможные концентрации напряжений. Численный расчет проведен в расчетном программном комплексе ПК Lira. Сложное напряженно-деформированное состояние деревянного покрытия-настила пролетом 24,0 м отражено в виде мозаик усилий, напряжений и перемещений на рис. 2–5.

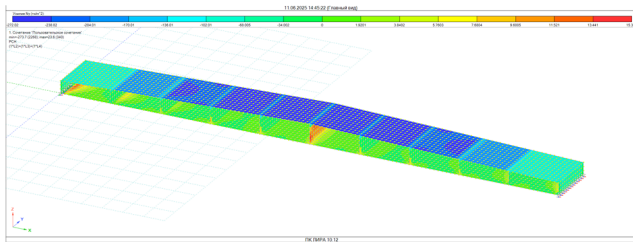


Рис. 2 Мозаика нормальных напряжений, N_y
Источник: выполнено Д.А. Чибрикиным
Figure 2. Mosaic of normal stresses, N_y
Source: made by D.A. Chibrikov

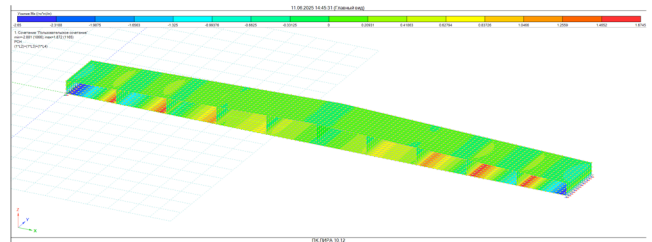


Рис. 3. Мозаика изгибающих моментов, M_x
Источник: выполнено Д.А. Чибрикиным
Figure 3. Mosaic of bending moments, M_x
Source: made by D.A. Chibrikov

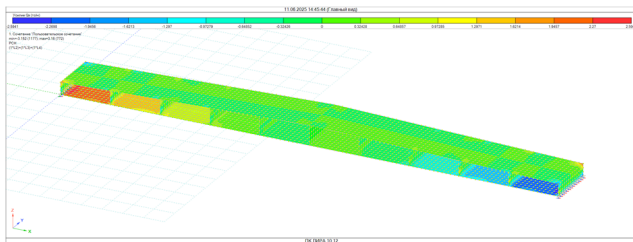


Рис. 4. Мозаика поперечных усилий, Q_x
Источник: выполнено Д.А. Чибрикиным
Figure 4. Mosaic of transverse forces, Q_x
Source: made by D.A. Chibrikov

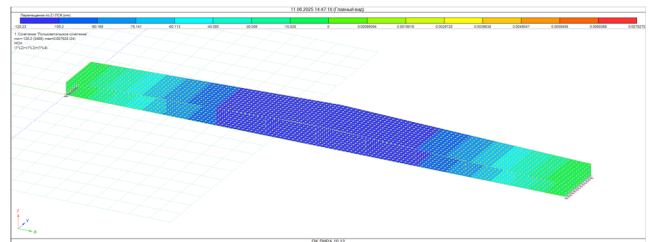


Рис. 5. Мозаика вертикальных перемещений, z
Источник: выполнено Д.А. Чибрикиным
Figure 5. Mosaic of vertical movements, z
Source: made by D.A. Chibrikov

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о хорошей сходимости численного расчета и инженерного метода расчета. Разница при расчете по 2-й группе предельных состояний перемещения составила 13 %.

4. Заключение

Представленные результаты исследования показали следующее:

- деревянное покрытие-настил представляет собой эффективное решение для промышленных зданий с пролетами 24 и 30 м;
- разработанное деревянное покрытие обеспечивает теплоизоляцию, что особенно важно для промышленных зданий, где требуется поддержание стабильной температуры внутри помещения;
- поперечные стенки создают дополнительные воздушные камеры, которые действуют как теплоизоляторы, уменьшая теплопотери через крышу. Это поможет сократить затраты на отопление зимой и охлаждение летом.

Следует отметить следующее:

1. Деревянное перекрытие просто в изготовлении. Шарнирное крепление панелей на подстропильные балки упрощает процесс сборки крыши, сокращая время и трудозатраты на установку. Использование стандартных размеров панелей ($2,4 \times 24$ м) позволяет оптимизировать производство и минимизировать отходы материалов.

2. Правильно обработанная древесина устойчива к влаге, гниению и насекомым-вредителям, что продлевает срок службы конструкции. При необходимости, в случае повреждения, отдельные элементы кровли можно легко заменить, не затрагивая всю систему покрытия.

Применение современных технологий и инженерных решений позволяет создать надежную и долговечную конструкцию, которая соответствует всем требованиям безопасности и функциональности. Предлагаемая конструкция применима не только для промышленных, но в подходящих случаях и для гражданских зданий.

Список литературы / References

1. Cucuzza R., Aloisio A., Rad M.M., Domaneschi M. Constructability-based design approach for steel structures: From truss beams to real-world inspired industrial buildings. *Automation in Construction*. 2024;166:105630. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105630> EDN: OMRKJT
2. Gusevs J., Serdjuks D., Artebjakina G.I., Afanasjeva E.A., Goremikins V. Behaviour of load-carrying members of velodromes' long-span steel roof. *Magazine of Civil Engineering*. 2016;5(65):3–16. <https://doi.org/10.5862/MCE.65.1> EDN: XBDQXS
3. Shishov I.I., Lisyatnikov M.S., Roschina S.I., Lukina A.V. Covering a single-storey industrial building with wide box-shaped beams of stepwise-varying height. *Bulletin of South Ural state university. Series: Construction engineering and architecture*. 2021;21(1):22–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/build210103> EDN: PGWZAD
- Шишов И.И., Лисятников М.С., Рощина С.И., Лукина А.В. Покрытие одноэтажного промышленного здания широкими балками коробчатого поперечного сечения ступенчато переменной высоты // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Т. 21. № 1. С. 22–29. <https://doi.org/10.14529/build210103> EDN: PGWZAD
4. Dirrenberger J., Lapouge P., Azulayb R., Eversb P., Vroemenb T. Adaptive Spatial Lattice Manufacturing (ASLM): A novel approach to efficient lattice structure production. *Materials & Design*. 2025;249:113553. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113553> EDN: HTUERZ
5. Pereira X., M., Borja Conde B., Riveiro B. BIM methodology for cost analysis, sustainability, and management of steel structures with reconfigurable joints for industrial structures. *Journal of Building Engineering*. 2023;77:107443. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107443> EDN: DHYGGR
6. Turkovskiy S.B., Pogoreltsev A.A., Stoyanov V.O. Experience in the operation of large-span laminated timber structures with TSNIISK system nodes. *Structural mechanics and analysis of constructions*. 2022;6(305):61–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.6.61.68> EDN: EEXUNC

Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Стоянов В.О. Опыт эксплуатации большепролетных клееных деревянных конструкций с узлами системы ЦНИИСК // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2022. № 6 (305). С. 61–68. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.6.61.68> EDN: EEXUNC

7. Lisyatnikov M.S., Roshchina S.I., Prusov E.S., Deev V.B. Enhancing the efficiency of using deformable aluminum alloys in composite constructions. *Non-ferrous Metals*. 2024;57(2):24–30. 10.17580/nfm.2024.02.04 EDN: VNBVFF

8. Aloisio A., Sejkot P., Pellicciari M., Ormarsson S., Vessby J., Fragiaco M. Instability of compressed members in timber trusses assembled with punched metal plates. *Engineering Structures*. 2025;329:119775. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119775> EDN: UDSNKT

9. Nasir V., Ayanleye S., Kazemirad S., Sassani F., Adamopoulos S. Acoustic emission monitoring of wood materials and timber structures: A critical review. *Construction and Building Materials*. 2022;350:128877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128877> EDN: YGPYTM

10. Luo C., Yang J., Xin J., Fan Y., Zhou Y., Tang Q. Large-scale model test on the construction process of a stiff skeleton arch bridge with the span of 600 m. *Case Studies in Construction Materials*. 2024;21: e03783. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03783>

11. Shi D., Marano G.C., Demartino C. Modeling of glulam roof truss, parameter identification and updating based on parallel genetic algorithm. *Engineering Structures*. 2024;316:118520. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.118520> EDN: VFSJOP

12. Zheng Y., Zhou C. Lateral performance of circular wooden columns reinforced with high-performance bamboo-based composite. *Engineering Structures*. 2025;322:119062. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.119062> EDN: OSNGCN

13. Popov E.V., Sopilov V.V., Labudin B.V., Zemcovskii A.E., Tochilova E.S. Calculation of composite bending wooden elements by deformations considering the nonlinear work of shear bonds. *Structural mechanics and analysis of constructions*. 2022;4(303):36–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.4.36.42> EDN: WSRUYO

Попов Е.В., Сопилов В.В., Лабудин Б.В., Земцовский А.Е., Точилова Е.С. Расчет составных изгибаемых деревянных элементов по деформациям с учетом нелинейной работы связей сдвига // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2022. № 4 (303). С. 36–42. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.4.36.42> EDN: WSRUYO

14. Inzhutov I.S., Mezentshev V.V., Rozhkov A.F., Khovansky M.E. The calculation of wooden constructions taking into account the creep of wood on the example of a statically indeterminate lenticular blocked truss. *Herald of Daghestan state technical university. Technical sciences*. 2017;44(3):156–164. (In Russ.) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-3-156-164> EDN: ZWDGFN

Инжутов И.С., Мезенцев В.В., Рожков А.Ф., Хованский М.Е. Напряженно-деформированное состояние шпренгельной подкрановой балки // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2017. Т. 44. № 3. С. 156–164. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-3-156-164> EDN: ZWDGFN

15. Lisitsky I.I., Zhadanov V.I., Rudnev I.V. Wooden trusses with nodal joints on glued flat rods. *Industrial and civil engineering*. 2020;(4):9–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.04.09-15> EDN: FVYINC

Лисицкий И.И., Жаданов В.И., Руднев И.В. Деревянные фермы с узловыми соединениями на клеенных плоских стержнях // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 4. С. 9–15. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.04.09-15> EDN: FVYINC

16. Mihajlov V.V., Roshchina S.I., Shokhin P.B. Experimental determination of creep up wood. *Scientific and technical Volga region bulletin*. 2011;(5):219–221. (In Russ.) EDN: OKGEIR

Михайлов В.В., Рощина С.И., Шохин П.Б. Экспериментальное определение меры ползучести древесины // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2011. № 5. С. 219–221. EDN: OKGEIR

17. Fabbri A., Minghini F. Timber spatial trusses using laminated veneer lumber. *Journal of Building Engineering*. 2025;100:111696. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111696> EDN: RILZMC

18. Mehra S., O’Ceallaigh C., Sotayo A., Guan Z., Harte A.M. Structural characterisation of laterally loaded glued and compressed wood dowel laminated timber portal frames produced using compressed wood connectors. *Construction and Building Materials*. 2024;457:139107. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139107> EDN: VFZHHX

19. Johns D., Richman R. Dry-out behaviour of cross-laminated timber (CLT) edge conditions in roof assemblies: A field study. *Structures*. 2025;72:108210. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108210>

20. Sergeev M.S., Lukina A.V., Gribanov A.S., Strekalnikov A.A. Development studies derivatising beams with symmetrical reinforcement. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016;7:46–49. (In Russ.) EDN: WBVYTR

Сергеев М.С., Лукина А.В., Грибанов А.С., Стрекалов А.А. Развитие исследования деревокомпозитных балок с симметричным армированием // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 7. С. 46–49. EDN: WBVYTR

21. Kumar V., Ricco M. Lo, Bergman R.D., Nepal P., Poudyal N.C. Data and bills of materials for buildings designed for mass timber, structural steel, and reinforced concrete based on the 2021 international building code provisions. *Data in Brief*. 2024;55:110641. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2024.110641> EDN: OMRPKX

22. Repin V.A., Lukina A.V., Strekalkin A.A. Parameterization of Maxwell — Cremona diagram for determining forces in elements of a scissors truss // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024;20(2):97–108. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-2-97-108> EDN: KZTKLX
23. Kolesnikova T.N., Kuznetsov P.E. Analysis of the architecture of modern multifunctional cultural and entertainment complexes and their development trends. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023;18(3):346–357. (In Russ.) <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.3.346-357> EDN: MURSIM
- Колесникова Т.Н., Кузнецов П.Э. Анализ архитектуры современных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов и тенденции их развития // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 3. С. 346–357. <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.3.346-357> EDN: MURSIM
24. Onegin V.I., Chubinsky A.N. Russian wood processing industry: problems and prospects of development. *Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2002;(168):10–15. (In Russ.) EDN: HYWHTF
- Онегин В.И., Чубинский А.Н. Деревообрабатывающая промышленность России: проблемы и перспективы развития // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2002. № 168. С. 10–15. EDN: HYWHTF
25. Lukin M.V., Chibrikin D.A., Roshchina S.I. Numerical studies of modified composite beams taking into account the physical nonlinearity of wood. *News of higher educational institutions. Construction*. 2023;5(773):5–19. (In Russ.) <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-773-5-5-19> EDN: OWKAIK
- Лукин М.В., Чибрикин Д.А., Рощина С.И. Численные исследования модифицированных композитных балок с учетом физической нелинейности древесины // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 5 (773). С. 5–19. <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-773-5-5-19> EDN: OWKAIK
26. Lukin M.V., Roshchina S.I., Lukina A.V., Rimshin V.I. Computer modeling of energy-efficient joints of wood composite panels. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024;20(1):68–80. <http://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-1-68-80> EDN: LSRINA