

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ПОКРЫТИЯ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ЗДАНИЙ

Б.С. СОКОЛОВ¹, канд. техн. наук

А. ИВАНОВ¹, д-р техн. наук

И.А. ЧЕРНЫЙ^{1,2}

В.А. ТИТАЕВ^{1,2}, канд. техн. наук

Д.В. ПАСХИН¹

¹Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В НИИЖБ им. А.А. Гвоздева выполнены исследования сборного большепролетного железобетонного структурного покрытия, собираемого из отдельных плоских рам.

Цель. Разработка основ нормативной базы проектирования железобетонных структурных покрытий.

Материалы и методы. Проведены расчетно-теоретические исследования конструктивных решений сборного большепролетного железобетонного структурного покрытия из плоских рам разных типоразмеров при различных схемах нагружения методом конечных элементов.

Результаты. На основании анализа результатов расчетно-теоретических исследований выполнена разработка рекомендаций по конструированию элементов и узлов, по армированию элементов. Разработаны предложения по нормированию параметров конструктивных элементов железобетонных структурных покрытий. Разработаны проектные предложения двух вариантов структурных покрытий.

Выводы. Разработанные рекомендации и проектные предложения направлены на повышение эффективности и расширение области применения конструктивных решений железобетонных большепролетных пространственных покрытий зданий.

Ключевые слова: сборные железобетонные конструкции, пространственные конструкции, структурные покрытия, двухпоясная решетка, стержневой элемент, конструирование, расчетная модель, метод конечных элементов

Для цитирования: Соколов Б.С., Иванов А., Черный И.А., Титаев В.А., Пасхин Д.В. Железобетонные структурные покрытия большепролетных зданий // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. № 2(49). С. 59–75. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-59-75](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-59-75) EDN: JEJPCJ

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке ФАУ «ФЦС».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.04.2026

Поступила после рецензирования 14.05.2026

Принята к публикации 21.05.2026

REINFORCED CONCRETE SPACE FRAME ROOFS OF LARGE SPAN BUILDINGS

B.S. SOKOLOV¹, Cand. Sci. (Engineering)

A. IVANOV¹, Dr. Sci. (Engineering)

I.A. CHERNY^{1,2}

V.A. TITAEV^{1,2}, Cand. Sci. (Engineering)

D.V. PASKHIN¹

¹ Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institut'skaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

Abstract

Introduction. Studies of a precast large-span reinforced concrete space frame roof assembled from separate flat frames have been carried out at the A.A. Gvozdev Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete.

The aim was to develop the fundamentals of the regulatory framework for the design of reinforced concrete space frame roofs.

Materials and methods. Computational and theoretical studies of the structural solutions of a precast large-span reinforced concrete space frame roof made of flat frames of different sizes for various loading schemes by finite element method have been carried out.

Results. Based on the analysis of the results of computational and theoretical studies, recommendations have been developed for the design of elements and assemblies, and reinforcement of elements. Proposals have been developed to normalize the parameters of the structural elements of reinforced concrete space frame roofs. Design proposals for two variants of space frame roofs have been developed.

Conclusions. The developed recommendations and design proposals are aimed at increasing efficiency and expanding the scope of structural solutions for reinforced concrete spatial roof systems of large-span buildings.

Keywords: precast reinforced concrete structures, spatial structures, space frame roofs, double-layer grid, bar member, design, calculation model, finite element method

For citation: Sokolov B.S., Ivanov A., Cherny I.A., Titaev V.A., Paskhin D.V. Reinforced concrete space frame roofs of large span buildings. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 2(49), pp. 59–75. [In Russian] [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-59-75](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-59-75) EDN: JEJPCJ

Authors contribution statement

All the authors have made an equal contribution to the preparation of the publication.

Funding

The study was carried out with the financial support of the Federal Center of Regulation, Standardization and Technical Assessment (FAU "FCC").

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 17.04.2026

Revised 14.05.2026

Accepted 21.05.2026

Введение

Одним из видов строительных конструкций, применяемых в покрытиях и перекрытиях зданий, являются системы регулярной структуры. К системам регулярной структуры относятся плиты регулярной структуры, работающие на изгиб, и пространственные регулярные системы, элементы которых работают преимущественно на сжатие и растяжение [1–3].

Конструкциями первого типа являются разнообразные конструктивные решения железобетонных часторебристых кессонных перекрытий, а также стальные листовые «вафельные» плиты. К конструкциям второго типа относятся пространственные стержневые, пластинчатые или пластинчато-стержневые системы. Стержневые элементы образуют регулярную двухпоясную решетку с ячейками в форме тетраэдров или октаэдров, что обеспечивает равную длину элементов и геометрическую неизменяемость системы. Узлы соединения являются наиболее ответственным и сложным элементом конструкции, объединяя стержневые элементы различного пространственного направления и различного знака продольных сил.

Структуры в пластинчатом или пластинчато-стержневом исполнении представляют собой регулярные складчатые конструкции, в которых все или отдельные плоскости формирующих тетраэдров или октаэдров выполнены пластинами, части которых, прилегающие к ребрам, работают как стержни [3, 4].

Наибольшее распространение как за рубежом [5–8], так и в нашей стране [9–11] приобрели стальные структурные конструкции. Такие конструкции, как правило, выполнены из тонкостенных трубчатых профилей. Наряду со стальными структурными конструкциями находят применение структуры из других материалов. Так, за рубежом достаточно популярны деревометаллические структурные конструкции, в которых несущие элементы выполнены из древесины со стальными узловыми соединениями.

Железобетонные и армоцементные структурные конструкции в сборном исполнении также находят свое применение как в зарубежной, так и в отечественной практике строительства [12–15].

К преимуществам структурных конструкций при разработке архитектурно-планировочных решений следует отнести возможность устройства плоской кровли, установки светоаэрационных конструкций, а также возможность устройства в межферменном пространстве (между верхним и нижним поясами двухпоясных конструкций) помещений и проходов, необходимых проемов, пропуска коммуникаций.

Конструктивными достоинствами сборных структурных конструкций является возможность унификации однотипных сборных элементов и индустриальность их изготовления.

1. Принципиальные конструктивные решения

В НИИЖБ им. А.А. Гвоздева выполнен комплекс научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ по разработке методов проектирования железобетонных структурных покрытий. В основу положено конструктивное решение железобетонного покрытия по а.с. № 945319, предложенное в лаборатории пространственных конструкций НИИЖБ (авторы д.т.н. проф. Г.К. Хайдуков, д.т.н. проф. В.В. Шугаев и др.) [16]. Конструктивное решение представлено на рис. 1 и 2.

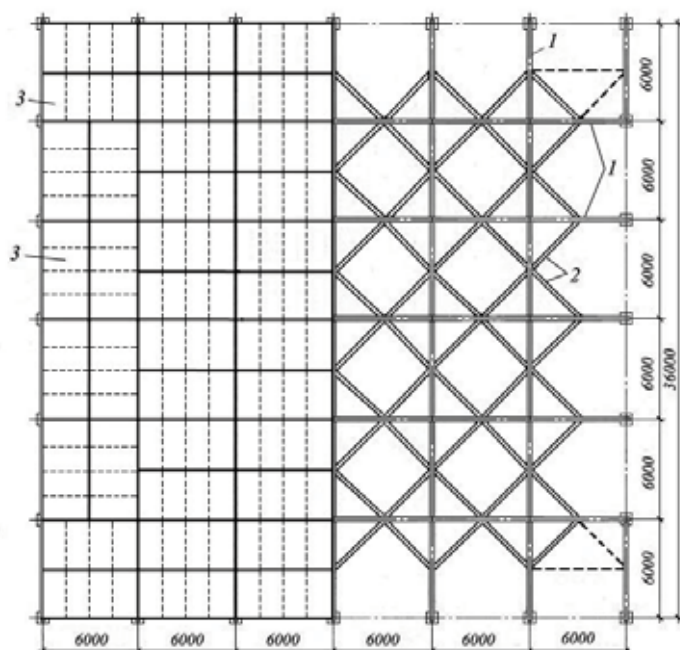


Рис. 1. План структурного покрытия размерами 36×36 м. 1 – треугольная рама; 2 – квадратная рама; 3 – плиты настила. На правой половине плана плиты настила условно не показаны
Fig. 1. The plan of the space frame roof with size of 36×36 m. 1 – triangular frame; 2 – square frame; 3 – flooring plate. The floor slabs are conventionally not shown on the right half of the plan

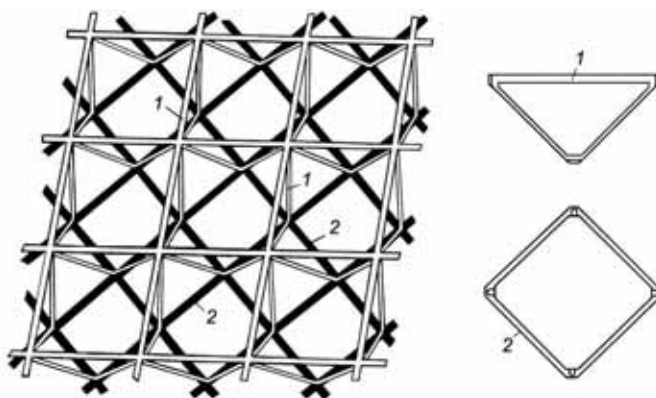


Рис. 2. Конструктивная схема структурного покрытия. 1 – треугольная рама; 2 – квадратная рама
Fig. 2. Structural scheme of the space frame roof. 1 – triangular frame; 2 – square frame

Объектом выполненного исследования является структурное покрытие, сохраняющее общее конструктивное решение по а.с. №№ 945319 [16, 17] с внесением в него некоторых конструктивных дополнений в части конструктивной реализации элементов и узловых соединений, обобщающих опыт выполненных исследований на маломасштабных моделях [18].

Структурное покрытие собирается из отдельных треугольных рам 1, обращенных вниз вершиной, расположенных вертикально, во взаимно перпендикулярных направлениях и соединенных между собой с образованием квадратных ячеек. Горизонтальные элементы

рам 1 вместе с уложенными и закрепленными на них плитами настила 3 образуют верхний пояс покрытия, а их наклонные линейные элементы – полуоктаэдрическую систему раскосов покрытия. К вершинам треугольных рам прикреплены своими углами квадратные рамы 2, расположенные горизонтально с образованием ячеек нижнего пояса. При этом квадратные ячейки верхнего и нижнего поясов несущих конструкций железобетонного покрытия повернуты относительно друг друга на угол 45° , что способствует увеличению пространственной жесткости покрытия, так как каждая квадратная рама нижнего пояса с четырьмя примыкающими к ее углам наклонными раскосами образует пирамиду, обладающую собственной высокой жесткостью на изгиб и кручение.

Пространственная решетка такой конфигурации по зарубежной классификации двухпоясных структур относится к типу SOD (Square-on-diagonal offset) или ISM (inclined square mesh grid), в которых оси элементов верхнего пояса параллельны сторонам внешнего контура покрытия, оси элементов нижнего пояса повернуты к ним на 45° , а узлы пересечения осей нижнего пояса располагаются в плане под серединами сторон верхнего пояса.

Под действием вертикальной нагрузки нижний пояс структурного покрытия работает на растяжение, в связи с чем линейные элементы квадратных рам рекомендуется выполнять преднапряженными с проволочной, прядевой или высокопрочной стержневой арматурой. Для крепления напрягаемой арматуры каждая рама 2 в углах снабжена внутренними анкерами, одновременно служащими для соединения между собой смежных квадратных рам.

Верхний пояс состоит из горизонтальных линейных элементов треугольных рам и прикрепленных к ним плит покрытия, которые включаются в пространственную работу конструкции, уменьшая свободную длину горизонтальных линейных элементов рам и разгружая их. Верхний пояс работает на сжатие с изгибом. В раскосах возникают знакопеременные продольные усилия. Треугольные рамные элементы целесообразно выполнять из высокопрочного бетона, что позволяет снизить расход бетона и вес конструкций.

Узловые соединения сборных элементов структурного покрытия выполняются сваркой закладных деталей. Наиболее напряженными являются сварные соединения сопряженных квадратных рам нижнего пояса.

Железобетонное покрытие отличается высокой степенью надежности. Отказ (выход из строя по какой-либо причине) отдельного элемента не приводит к обрушению конструкции, а лишь к перераспределению в ней усилий.

Структурные покрытия на пролет 24–36 м целесообразно выполнять строительной высотой не менее 3 м, в пределах которой может быть организован технический этаж с размещением оборудования и коммуникаций. Конфигурация вертикальных рам позволяет достаточно свободное размещение горизонтальных коммуникаций, в том числе трубопроводов и воздухопроводов большого сечения.

Монтаж структурного покрытия может выполняться как подъемом целиком с помощью кранов или домкратами по колоннам, так и с помощью укрупнения монтажных блоков размером на пролет или поэлементной сборкой на подмостях.

Преимуществом данной конструкции по сравнению с металлическими или деревянными структурными покрытиями является высокая огнестойкость и высокая коррозионная стойкость как железобетонной конструкции при условии выполнения защиты сварных узловых соединений монтажных элементов.

Структурная конструкция рассматриваемого вида может перекрывать как отдельно стоящие, так и многопролетные здания, с опиранием на колонны или сплошные несущие стены. В многопролетном здании с расположением колонн по контуру здания рационально покрытие опирать непосредственно на колонны, для чего линейный размер ячейки верхнего пояса следует принимать равным шагу колонн (рис. 3).

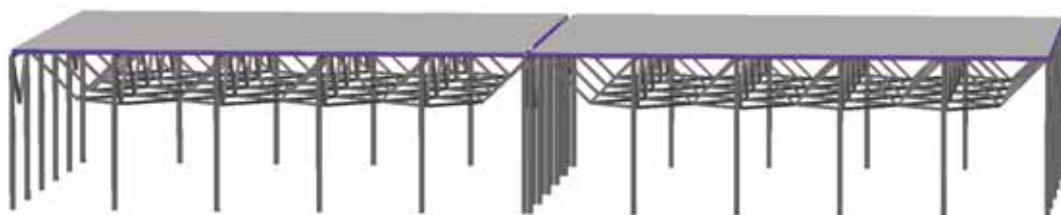


Рис. 3. Пример компоновки несущего каркаса здания размерами 30 x 60 м
Fig. 3. An example of the layout of the carrying framework of a building with size of 30 x 60 m

Для выполнения исследований структурных покрытий были приняты к рассмотрению следующие конструктивные ячейки здания:

- структурное покрытие размерами в плане 24×24 м высотой 3 м с опиранием на колонны по углам ячейки (рис. 4а);
- структурное покрытие размерами в плане 30×30 м высотой 3 м с опиранием на колонны по периметру ячейки с шагом 6 м (рис. 4б);
- структурное покрытие размерами в плане 36×36 м высотой 3 м с опиранием на колонны по периметру ячейки с шагом 6 м (рис. 4в).

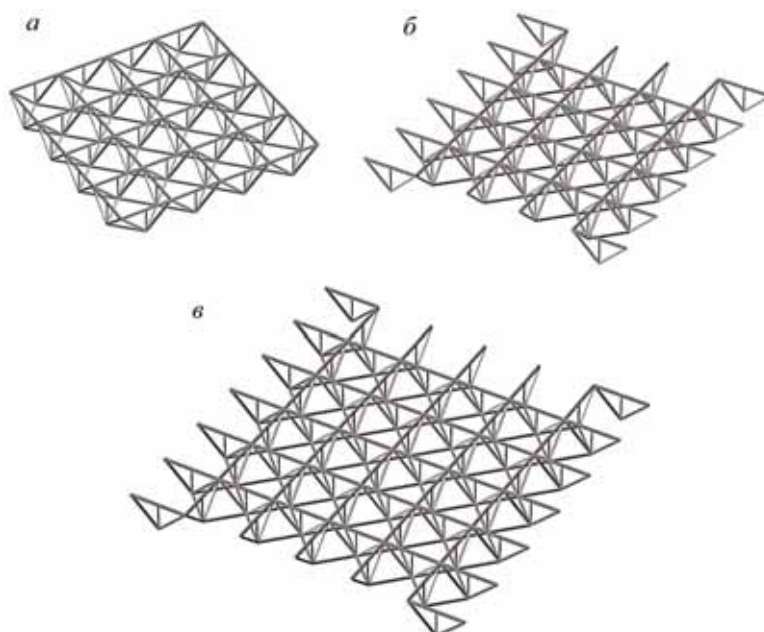


Рис. 4. Стержневые системы структурных покрытий: а – $24 \times 24 \times 3$ м с опиранием по углам;
б – $30 \times 30 \times 3$ м с опиранием по периметру; в – $36 \times 36 \times 3$ м с опиранием по периметру
Fig. 4. Bar systems of space frame roofs: а – $24 \times 24 \times 3$ m, resting on the corners;
б – $30 \times 30 \times 3$ m, resting on the perimeter; в – $36 \times 36 \times 3$ m, resting on the perimeter

Стержневые системы включают треугольные вертикальные сборные элементы крайних рядов ТК и треугольные элементы ТС средней части ячейки. Треугольные элементы в осях имеют одинаковые размеры (длина 6 м, высота 3 м), но различаются устройством опорных частей и высотой сечения наклонных стержней. Элементы нижнего пояса КК в осях имеют форму квадрата с диагональю 6 м и стороной 4,243 м (рис. 5).

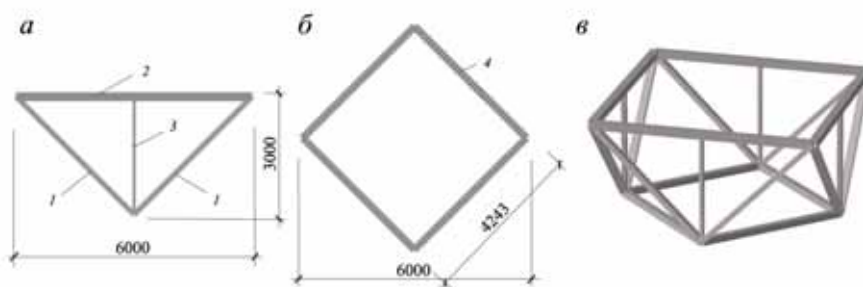


Рис. 5. Сборные элементы структуры: а – треугольный элемент ТК (ТС); б – элемент нижнего пояса КК; в – ячейка структуры из элементов ТК (ТС) и КК. 1 – раскос; 2 – ригель верхнего пояса; 3 – стойка; 4 – ригель нижнего пояса
Fig. 5. Precast units of space frame: а – triangular unit TK (TC); б – bottom chord unit CC; в – structural cell composed of TK (TC) and KK units. 1 – diagonal brace; 2 – top chord crossbar; 3 – post; 4 – bottom chord crossbar

2. Расчетные исследования

В рамках научно-исследовательской работы выполнены расчетные исследования по выбору расчетных моделей, а также по выбору рациональных геометрических параметров конструктивных элементов покрытия, прочностных и деформационных характеристик материалов. В ходе исследований путем выполнения многовариантных расчетов выявлялись области рациональных значений конструктивных параметров структур данного типа. Исследовано влияние на несущую способность и жесткость большепролетных железобетонных структурных покрытий следующих основных технических параметров:

- размеры плана перекрываемых помещений;
- соотношение сторон плана перекрываемого помещения;
- соотношение высоты покрытия с габаритными размерами конструктивной ячейки покрытия;
- формы и размеры поперечных сечений элементов сборных рамных конструкций.

На основе полученных результатов разработаны рекомендации по назначению технических параметров таких конструкций, а также методика расчета методом конечных элементов железобетонного структурного покрытия в эксплуатационной стадии работы по двум группам предельных состояний, включающая:

- назначение основных геометрических параметров конструктивных элементов на основе анализа функционального назначения и общих геометрических параметров здания;
- построение геометрии расчетных моделей методом конечных элементов;
- назначение прочностных и деформационных характеристик элементов структурной конструкции, в том числе плит покрытия и перекрытия;
- расчет жесткостных характеристик ребер плит покрытия и их эксцентриситетов к срединной поверхности полки для корректного учета совместной работы ребристых плит покрытия в составе верхнего пояса структурной конструкции;

- назначение граничных условий;
- назначение учитываемых нагрузок и воздействий и их расчетных комбинаций;
- расчет напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом физической нелинейности материалов.

В расчетах полагалось шарнирно-неподвижное опирание структур на колонны. Расчетами установлено, что выбор рациональных размеров поперечных сечений стержневых элементов структуры определяется минимальными размерами по условиям прочности и устойчивости, а также конструктивными требованиями размещения продольной арматуры. Установлено также, что моделирование узловых соединений стержневых элементов структуры абсолютно жесткими при соблюдении центровки осей стержней в узлах не вызывает появления существенных изгибающих моментов в стержневых элементах. При допущении эксцентричного узлового сопряжения раскосов с поясами в расчетной модели следует учесть, что возникающие дополнительные моменты в отдельных случаях способны вызвать вблизи узла появление трещин, снижающих жесткость соединения раскоса с поясом.

В связи с возможным появлением указанных нежелательных эффектов возникает необходимость применения повышенных требований к точности сборки конструкции покрытия. Наряду с высоким качеством соблюдения проектной геометрии, повышенные требования следует предъявлять к качеству сварных соединений в узлах. В частности, проверке должны быть подвергнуты сварные швы 100 % узлов нижнего пояса.

Существенное влияние на расчетное напряженное состояние элементов верхнего пояса оказывает корректность учета эксцентричности положения полок и ребер плит покрытия относительно плоскости осей горизонтальных элементов треугольных рам, образующих верхний пояс.

С использованием разработанной методики на отдельных расчетных моделях численно исследовано напряженно-деформированное состояние четырех типоразмеров структурных большепролетных покрытий размерами в плане 24×24 , 30×30 , 30×36 и 36×36 м в различных вариантах опирания. В расчетно-теоретических исследованиях рассмотрены различные варианты нагружения равномерными и неравномерными поверхностными нагрузками, а также сосредоточенными узловыми нагрузками. Выполненными расчетами во всех рассмотренных вариантах структурных покрытий подтверждена высокая жесткость конструкции.

Картина напряженного состояния в стержневых элементах структуры при действии равномерно распределенной нагрузки на примере структурного покрытия размером 30×30 м представлена на рис. 6.

Напряженное состояние характеризуется наличием значительных продольных сил в стержневых элементах. Изгибающие моменты имеют место в элементах нижнего пояса, достигая в пролетах 5 кНм, а также в раскосах, достигая в треугольных рамах крайних рядов ± 2 кНм. В элементах верхнего пояса, работающих совместно с плитами покрытия, изгибающие моменты в вертикальной и горизонтальной плоскостях не превышают 5 кНм.

Нормальные напряжения в полках плит покрытия не превышают 3,5 МПа на сжатие, погонные изгибающие моменты не превышают 0,35 кНм/м.

Максимальный прогиб центральной части плана покрытия, рассчитанный с учетом коэффициента ползучести бетона $\varphi_{b,cr} = 1,4$, составил 36,9 мм или 1/813 пролета.

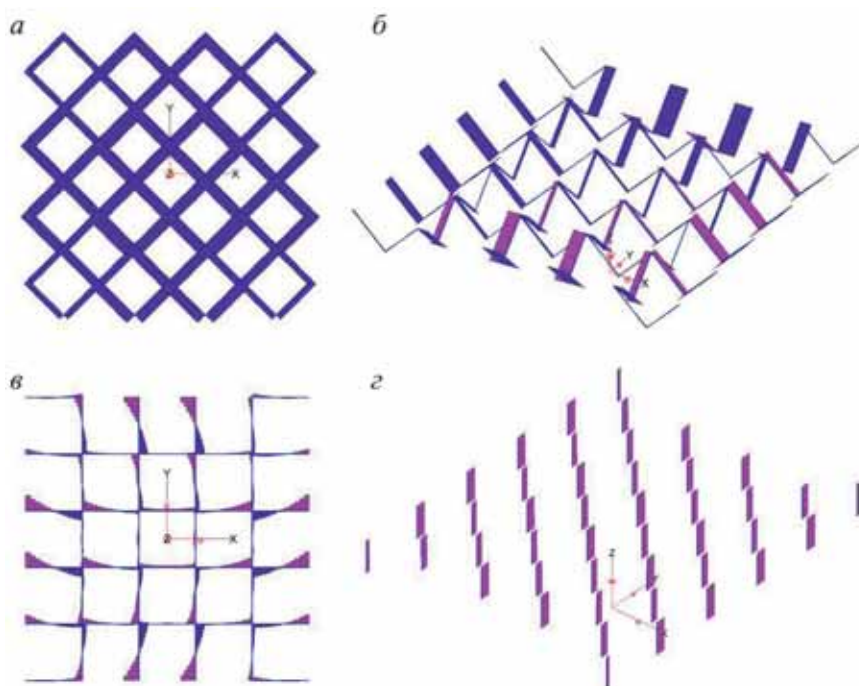


Рис. 6. Напряженное состояние в элементах структурного покрытия

- а – продольные силы в стержнях нижнего пояса, $N_{\max} = 561$ кН;
 б – продольные силы в раскосах, $N_{\max} = 478$ кН, $N_{\min} = -356$ кН;
 в – продольные силы в стержнях верхнего пояса, $N_{\max} = 182$ кН, $N_{\min} = -285$ кН;
 г – продольные силы в стойках, $N_{\min} = -67$ кН

Fig. 6. Stress state in the space frame roof elements.

- а – longitudinal forces in the bars of the bottom chord, $N_{\max} = 561$ кН;
 б – longitudinal forces in the braces, $N_{\max} = 478$ кН, $N_{\min} = -356$ кН;
 в – longitudinal forces in the top chord bars, $N_{\max} = 182$ кН, $N_{\min} = -285$ кН;
 г – longitudinal forces in the posts, $N_{\min} = -67$ кН

Выполнены расчеты общей устойчивости формы на разработанных расчетных моделях структурных покрытий. Подтверждена высокая общая устойчивость несущих систем покрытий рассмотренных типоразмеров: минимальный коэффициент устойчивости структуры размером 24×24 м составил 3,9; структуры размером 30×30 м – 4,1; структуры 36×36 м – 5,2.

Выполнена оценка влияния начальных несовершенств в виде нарушения прямолинейности оси наиболее нагруженных раскосов. Расчетами не выявлено существенного искажения картины напряженно-деформированного состояния покрытия относительно результатов расчета без учета начальных несовершенств.

Выполнены расчеты на устойчивость против прогрессирующего обрушения на разработанных расчетных моделях структурных покрытий. Рассмотрены наиболее опасные вероятные сценарии отказов несущих элементов покрытий – опорных раскосов и элементов нижнего пояса.

Выход из работы опорного подкоса вызвал локальное перераспределение усилий в смежных элементах решетки – соседнем раскосе и элементе нижнего пояса, соединяющем эти раскосы. Перераспределение усилий вызвало не критичный рост величины изгибающих моментов (до 7,4 кНм).

При выходе из работы элемента нижнего пояса из числа наиболее нагруженных при эксплуатации исправной конструкции перераспределение усилий носит более сложный характер. Во всех элементах нижнего пояса, расположенных на оси выбывшего из работы, усилия растяжения значительно снижаются. При этом несколько повышаются усилия на элементах нижнего пояса на смежных параллельных осях.

В целом ввиду высокой статической неопределимости структурной системы напряженное состояние элементов структуры при выходе отдельных элементов не изменяет своего характера, а дополнительные продольные усилия и изгибающие моменты в действующих элементах не настолько велики, чтобы привести к необходимости внесения конструктивных изменений в размеры сечений и армирование. Выполненные расчеты как в статической постановке для всех рассмотренных типоразмеров структур, так и в динамической постановке [19] подтверждают высокую устойчивость структурных конструкций к прогрессирующему обрушению.

Кроме расчетов квадратных в плане покрытий выполнен расчет структурного покрытия размерами 30×36 м для оценки работы элементов конструкции в различных направлениях при прямоугольной конфигурации плана покрытия. При данном соотношении размеров плана покрытия различие в напряженном состоянии элементов ортогональных направлений незначительно.

На основании анализа результатов расчетно-теоретических исследований выполнена разработка рекомендаций по конструированию элементов и узлов, по армированию элементов.

3. Проектные предложения

На основе результатов проведенных расчетных исследований выполнена разработка предложений по рациональным конструктивным решениям структурных покрытий.

Предложения разработаны для двух основных конструктивных решений – структурного покрытия с опиранием на колонны по контуру ячейки и структурного покрытия с опиранием на колонны по углам ячейки. В обоих случаях на плитах покрытия учитывались расчетная нагрузка веса кровли $0,38$ кПа и равномерная снеговая нагрузка $2,1$ кПа.

В качестве типичного представителя первого конструктивного решения выбрано для рассмотрения структурное покрытие размером 36×36 м (рис. 7).

Помимо указанных нагрузок на верхнем поясе, на элементах нижнего пояса учитывались расчетные нагрузки веса обслуживающих площадок и оборудования $1,64$ кН/м и расчетная временная нагрузка $1,35$ кН/м.

Второе конструктивное решение, отличающееся организацией эксплуатируемого межферменного этажа, рассмотрено на ячейке размером 24×24 м, максимальном размере, при котором расчетом в элементах установлены приемлемые значения внутренних усилий при заданной высоте конструкции 3 м (рис. 8).

Во всех случаях на верхнем поясе предусматривается использование железобетонных ребристых плит П-1 размером 3×6 м на основе типовой серии 1.465.1-21.94 с дополнением промежуточной закладной детали в середине продольных ребер для обеспечения совместности работы плит с верхним поясом структуры. Поскольку нагрузка с плит передается их продольными ребрами, схемы раскладки выбраны таким образом, чтобы нагружение элементов структуры в обоих направлениях различалось минимально.

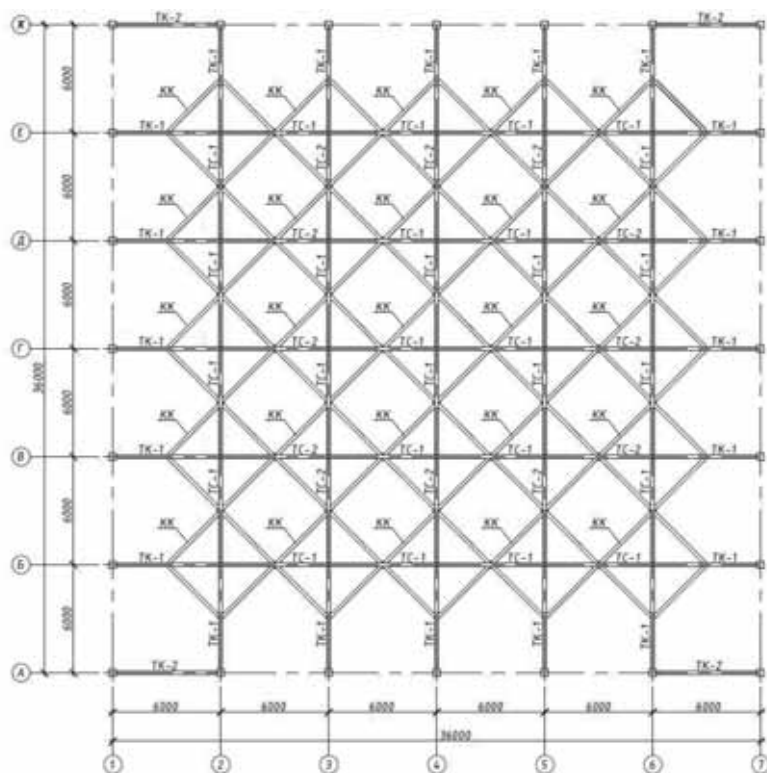


Рис. 7. Маркировочная схема каркаса структурного покрытия размером 36 × 36 м
Fig. 7. Marking scheme of the space frame with size of 36 × 36 m

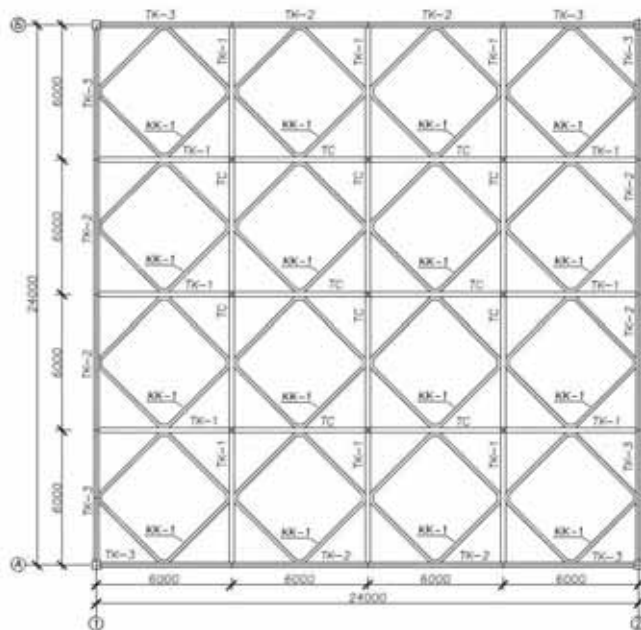


Рис. 8. Маркировочная схема каркаса структурного покрытия размером 24 × 24 м
Fig. 8. Marking scheme of the space frame with size of 24 × 24 m

В межферменном пространстве структуры на ячейку 24×24 м предусматривается устройство эксплуатируемых помещений. С этой целью по нижнему поясу структуры выполняется монолитная железобетонная плита толщиной 60 мм по стальному профилированному настилу Н75-750-0,8. При этом на плите нижнего пояса учитывалась расчетная нагрузка веса пола 0,65 кПа и расчетная временная нагрузка 2,4 кПа. Для опирания монолитной плиты по контуру ячейки 24×24 м между крайними узлами элементов нижнего пояса установлены стальные балки из швеллера 24 П.

Технические показатели разработанных вариантов структурных покрытий приведены в таблицах 1–8.

Конструктивная проработка показала, что применение железобетонного структурного покрытия взамен металлических структурных покрытий позволяет значительно снизить расход стали на покрытие при сопоставимой стоимости.

В процессе выполнения проектно-конструкторских проработок появились предложения по совершенствованию конструктивных решений структурных покрытий рассматриваемого типа путем соединения элементов нижнего пояса натяжением арматуры в построечных условиях с соответствующими техническими решениями выполнения элементов нижнего пояса и узлов их сопряжения [20].

Таблица 1

Геометрические параметры сечений и армирование элементов структурного покрытия размером 36×36 м с опиранием по контуру

Table 1

Geometric parameters of cross sections and reinforcement of space frame units of 36×36 m with contour support

Марка элемента	Сечение элемента, мм; продольное армирование элемента			
	Верхний пояс	Раскос	Стойка	Нижний пояс
ТС-1	220 × 140; 4Ø10A500C	220 × 140; 4Ø12A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
ТС-2	220 × 140; 4Ø10A500C	220 × 140; 4Ø16A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
ТК-1	220 × 160; 4Ø22A500C	220 × 160; 4Ø22A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
ТК-2	220 × 140; 4Ø10A500C	220 × 140; 4Ø10A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
КК	-	-	-	-

Таблица 2

Расход материалов на сборные элементы структур с опиранием по контуру

Table 2

Consumption of materials for precast units of space frames with contour support

Марка элемента	Масса элемента, т	Класс бетона	Расход бетона, м³	Расход стали, кг
ТС-1	1,25	B80, мелкозерн.	0,50	87,8
ТС-2	1,25	B80, мелкозерн.	0,50	114,0
ТК-1	1,31	B80, мелкозерн.	0,54	225,0
ТК-2	1,33	B80, мелкозерн.	0,53	86,3
КК	1,50	B40	0,60	303,6
П-1	2,68	B30	1,07	97,7

Таблица 3

**Приведенные показатели расхода материалов на сборные элементы структур
с опиранием по контуру**

Table 3

**The reduced indicators of material consumption for precast units
of structures with contour support**

Размеры покрытия, м	Количество сборных элементов марки, шт						Расход бетона*, см/м ²	Расход стали*, кг/м ²
	ТС-1	ТС-2	ТК-1	ТК-2	КК	П-1		
30 × 30	24	-	16	4	16	50	3,57/10,10	12,2/17,6
30 × 36	27	4	18	4	20	60	3,62/10,15	12,4/17,8
36 × 36	28	12	20	4	25	72	3,68/10,21	12,7/18,1

Примечание: * – в числителе – без плит покрытия, в знаменателе – с учетом плит покрытия

Таблица 4

**Геометрические параметры сечений и армирование элементов структурного покрытия
размером 24 × 24 м с опиранием по углам**

Table 4

**Geometric parameters of cross sections and reinforcement of space frame units
of 24 × 24 m with support at the corners**

Марка элемента	Сечение элемента, мм; продольное армирование элемента			
	Верхний пояс	Раскос	Стойка	Нижний пояс
ТС	220 × 140; 4Ø12A500C	220 × 140; 4Ø20A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
ТК-1	220 × 160; 4Ø14A500C	220 × 160; 6Ø20A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
ТК-2	220 × 160; 4Ø16A500C	220 × 160; 4Ø22A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
ТК-3	220 × 160; 4Ø12A500C	220 × 160; 8Ø22A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
КК-1	-	-	-	140 × 250; 4Ø22A800C+ 4Ø12A500C

Таблица 5

Расход материалов на сборные элементы структуры с опиранием по углам

Table 5

Consumption of materials for precast units of space frames with support at the corners

Марка элемента	Масса элемента, т	Класс бетона	Расход бетона, м ³	Расход стали, кг
ТС	1,25	B80, мелкозерн.	0,50	88,0
ТК-1	1,43	B80, мелкозерн.	0,57	205,2
ТК-2	1,43	B80, мелкозерн.	0,57	185,8
ТК-3	1,60	B80, мелкозерн.	0,64	278,8
КК-1	1,53	B40	0,61	352,0
П-1	2,68	B30	1,07	97,7

Таблица 6

**Приведенные показатели расхода материалов на сборные элементы структуры с
опиранием по углам**

Table 6

**The reduced indicators of material consumption for precast elements of structures with
support at the corners**

Размеры покрытия, м	Количество сборных элементов марки, шт						Расход бетона*, см/м ²	Расход стали*, кг/м ²
	ТС	ТК-1-1	ТК-2-1	ТК-3	КК-1	П-1		
24 × 24	12	12	8	8	16	32	5,63/12,16	22,4/27,8

Примечание: * – в числителе – без плит покрытия, в знаменателе – с учетом плит покрытия

Таблица 7

**Приведенные показатели расхода материалов на структурное покрытие
с опиранием по контуру**

Table 7

**The reduced indicators of the consumption of materials for a space frame roof
with contour support**

Размеры покрытия, м	Расход бетона, см/м ²	Расход стали, кг/м ²
30 × 30	10,11	18,7
30 × 36	10,16	18,9
36 × 36	10,22	19,2

Примечания:
 1. Расход бетона указан с учетом бетона замоноличивания швов между плитами П-1
 2. Расход стали включает вес стальных соединительных деталей

Таблица 8

Приведенные показатели расхода материалов на структурное покрытие с опиранием по углам

Table 8

**The reduced indicators of the consumption of materials for a space frame roof with support
at the corners**

Размеры покрытия, м	Расход бетона*, см/м ²	Расход стали*, кг/м ²
24 × 24	12,17/22,09	32,7/48,5

Примечания:
 1. * – в числителе – без перекрытия по нижнему поясу, в знаменателе – с учетом межферменного перекрытия
 2. Расход бетона указан с учетом бетона замоноличивания швов между плитами П-1
 3. Расход стали включает вес стальных соединительных деталей и контурного элемента

Выводы

Выполнены исследования конструктивного решения сборного железобетонного большепролетного покрытия, представляющего собой пространственную двухпоясную структуру из плоских треугольных и квадратных рам.

На трех расчетных моделях при различных схемах нагружения численно исследовано напряженно-деформированное состояние структурных покрытий размерами в плане 24 × 24, 30 × 30 и 36 × 36 м в различных вариантах опирания на колонны (для ячеек 30 × 30 м и 36 × 36 м по контуру конструктивной ячейки, для ячейки 24 × 24 м – по углам). Кроме того, выполнен расчет структурного покрытия размерами 30 × 36 м для оценки напряженного состояния элементов при разных длинах пролетов прямоугольного в плане покрытия.

Полученные результаты многовариантных расчетов позволили сформулировать рекомендации по расчету и конструированию структурных конструкций данного типа. Разработаны предложения по нормированию параметров несущих железобетонных конструкций структурных покрытий для внесения в нормативную документацию.

На основе результатов проведенных расчетных исследований выполнена разработка проектных предложений для двух основных конструктивных решений – структурного покрытия 36 × 36 м с опиранием на колонны по контуру ячейки и структурного покрытия 24 × 24 м с опиранием на колонны по углам ячейки.

Список литературы

1. Лубо Л.Н., МIRONKOV Б.А. Плиты регулярной пространственной структуры. Л., Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1976. 104 с.
2. Морозов А.П., Василенко О.В., МIRONKOV Б.А. Пространственные конструкции общественных зданий. Изд. 2-е. Л., Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1977. 168 с.
3. Каталог рекомендованных типов пространственных конструкций для общественных зданий с большими пролетами. Л., Стройиздат 1977. 160 с.
4. Клячин А.З. Исследование структурных конструкций из пирамид с фланцевыми узловыми сопряжениями // *Строительство и архитектура*. 1991. № 7. С.14 – 18.
5. Analyses, Design and Realization of Space Frames. A State-of-the-Art Report. IASS Working group WG08: Spatial Steel Structures. *Bulletin of the IASS*, no. 84/85, vol. XXV-1/2 April-August 1984, 114 p.
6. Makowski Z.S. Analysis, Design and Construction of Double-Layer Grids. CRC Press. 1990. 412 p.
7. Renton J.D. Elastic beams and frames. Camford Books. Parchment (Oxford) Ltd, 1999. 420 p.
8. Chilton J.C. Space grid structures. Architectural Press. Oxford, 2000. 179 p.
9. Трофимов В.И., Каминский А.М. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений: разработка конструкций, исследования, расчет, изготовление, монтаж. М.: Наука, 1997. 592 с.
10. Хисамов Р.И. Расчет и конструирование структурных покрытий. К.: Будівельник, 1981. 48 с.
11. Рекомендации по проектированию структурных конструкций. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1983. 298 с.
12. А.с. 649803 СССР, МКЛ Е 04 В 7/14. Железобетонное покрытие / Г.И. Бердичевский, Н.Я. Сапожников, Л.В. Руф, Г.А. Гамбаров, А.К. Караковский, В.А. Филиппов. – Опубл. 28.02.79, бюл. № 8.
13. Филиппов В.А., Садыков А.П. Прочность, трещиностойкость и деформативность узлов и стыков пространственного стержневого железобетонного покрытия блочного типа из предварительно напряженных рамных элементов: монография. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2011. 235 с.
14. Филиппов В.А. Пространственное стержневое покрытие блочного типа из предварительно напряженных рамных элементов / Г.И. Бердичевский, Л.В. Руф, В.А. Филиппов // *Расчет и конструирование железобетонных конструкций: Труды НИИЖБ*, 1977. Вып. 39. С. 106–115.
15. Chilton John. Nuovi edifici espositivi. / Chilton J., Prandoni F., Atlante delle Strutture reticolari. *Grande Atlante di Architettura. Unione Tipografico-Editrice Torinese UTET*. Torino, 2002, pp. 183–187.
16. А.с. №945319 СССР МКЛ. Е 04 В 7/14 Железобетонное покрытие. / В. В. Шугаев, Г.К. Хайдуков, Э.А. Агаев, В.Н. Ушаков. 1982, Бюл. № 27.
17. Шугаев В.В., Агаев Э.А. Железобетонное структурное покрытие здания для строительства в сейсмическом районе. / *Строительство в особых условиях. Сейсмостойкое строительство*. Н.-т. реферативный сб. Серия 14, вып. 8, отчет. ВНИИС Госстроя СССР, М., 1981.
18. Shugaev V. Experimental investigation and limit analysis of the reinforced concrete spatial roof. Invited Lecture at the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Osaka, September, 1986 / *Bulletin of the IASS*, no. 91, vol. XXVII-2, August 1986, pp. 11–17.
19. Черный И.А., Соколов Б.С., Титаев В.А. Исследование структурного железобетонного покрытия на устойчивость к прогрессирующему разрушению. *Будущее строительной отрасли: вызовы и перспективы развития: сборник трудов Третьего Международного научно-практического симпозиума (г. Москва, 15–19 сентября 2025 г.)* / ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ». Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2025. Текст: электронный. С. 137–142.
20. Патент на изобретение RU 2851903 С1. Е04В 7/14; Е04В 1/22. Преднапряженная железобетонная пространственная стержневая конструкция. Черный И.А., Соколов Б.С., Титаев В.А. Опубл. 01.12.2025, бюл. № 34.

References

1. Lubo L.N., Mironkov B.A. Plates of regular spatial structure. L., Stroyizdat, Leningrad Publishing House, 1976, 104 p. (In Russian).
2. Morozov A.P., Vasilenko O.V., Mironkov B.A. Spatial structures of public buildings. Ed. 2. L., Stroyizdat, Leningrad Publishing House, 1977, 168 p. (In Russian).
3. Catalog of recommended types of spatial structures for public buildings with large spans. L., Stroyizdat 1977, 160 p. (In Russian).

4. Klyachin A.Z. Investigation of structural structures from pyramids with flanged nodal joints. *Construction and architecture*, 1991, no. 7, pp. 14–18 (In Russian).
5. Analyses, Design and Realization of Space Frames. A State-of-the-Art Report. IASS Working group WG08: Spatial Steel Structures. Bulletin of the IASS, no. 84/85, vol. XXV-1/2 April–August 1984, 114 p.
6. Makowski Z.S. Analysis, Design and Construction of Double-Layer Grids. CRC Press. 1990. 412 p.
7. Renton J.D. Elastic beams and frames. Camford Books. Parchment (Oxford) Ltd, 1999, 420 p.
9. Trofimov V.I., Kaminsky A.M. Light metal structures of buildings and structures: design development, research, analysis, manufacture, installation. Moscow: Nauka, 1997, 592 p. (In Russian).
10. Khisamov R.I. Analysis and construction of space frame roofs. K.: Budivelnik, 1981, 48 p. (In Russian).
11. Recommendations for the design of space frame structures. V.A. Koucherenko Central Research Institute. Moscow: Stroyizdat, 1983, 298 p. (In Russian).
12. Patent 649803 USSR, MKI E 04 In 7/14. Reinforced concrete roof / G.I. Berdichevsky, N.Ya. Sapozhnikov, L.V. Ruf, G.A. Gambarov, A.K. Karakovsky, V.A. Filippov. – Publ. 02/28/179, issue No. 8.
13. Filippov V.A., Sadykov A.P. Strength, crack resistance and deformability of nodes and joints of block-type spatial beam reinforced concrete roof made of prestressed frame elements: monograph. Tolyatti: TSU Publishing House, 2011. 235 p. (In Russian).
14. Filippov V.A. Spatial beam roof of a block-type of prestressed frame elements / G.I. Berdichevsky, L.V. Ruf, V.A. Filippov. *Calculation and construction of reinforced concrete structures: Proceedings of the National Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete*, 1977. Issue 39. pp. 106–115 (In Russian).
15. Chilton John. Nuovi edifici espositivi. / Chilton J., Prandoni F., Atlante delle Strutture reticolari. *Grande Atlante di Architettura. Unione Tipografico-Editrice Torinese UTET*. Torino, 2002, pp. 183–187.
16. Patent No. 945319 USSR MKL. E 04 In 7/14 Reinforced concrete coating. / V. V. Shugaev, G.K. Khaidukov, E.A. Agaev, V.N. Ushakov. 1982, Bul. no. 27.
17. Shugaev V.V., Agaev E.A. Reinforced concrete space frame roof of buildings for construction in a seismic area. *Construction in special conditions. Earthquake-resistant construction. N.-T. Abstract collection*, Series 14, issue 8, ed. VNIIS Gosstroy of the USSR, Moscow, 1981. (In Russian).
18. Shugaev V. Experimental investigation and limit analysis of the reinforced concrete spatial roof. Invited Lecture at the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Osaka, September, 1986 / Bulletin of the IASS, no. 91, vol. XXVII-2, August 1986, pp. 11–17.
19. Cherny I.A., Sokolov B.S., Titaev V.A. Investigation of reinforced concrete space frame roof for resistance to progressive collapse / *The future of the construction industry: challenges and development prospects: proceedings of the Third International Scientific and Practical Symposium (Moscow, September 15–19, 2025) / Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “NRU MGSU”*. Moscow: MISI – MGSU Publishing House, 2025. Text: electronic. pp. 137–142 (In Russian).
20. Patent for invention RU 2851903 C1. E04B 7/14; E04B 1/22. Prestressed reinforced concrete spatial beam structure. Cherny I.A., Sokolov B.S., Titaev V.A. Publ. 12/01/2025, bull. No. 34.

Информация об авторах / Information about the authors

Борис Сергеевич Соколов*, канд. техн. наук, заведующий лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
Boris S. Sokolov, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory for thin-walled and spatial structures of NIIZhB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: moo-shell@mail.ru

Акрам Иванов, доктор техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории тонкостенных и пространственных наук НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
Akram Ivanov, Dr. Sci. (Engineering), Chief researcher of the Laboratory for thin-walled and spatial structures of NIIZhB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: moo-shell@mail.ru

Иван Александрович Черный, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; преподаватель кафедры строительной и теоретической механики Института промышленного и гражданского строительства НИУ МГСУ, Москва.

Ivan A. Cherny, Graduate student, Junior Researcher of the Laboratory for thin-walled and spatial structures of NIIZhB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Lecturer, Department of Structural and Theoretical Mechanics of the Institute of Industrial and Civil Engineering of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow.
e-mail: kron_975@mail.ru

Виталий Александрович Титаев, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ, Москва.

Vitaly A. Titaev, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of the Thin-Walled and Spatial Structures, NIIZhB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction; Associate Professor, Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, NRU MGSU, Moscow.
e-mail: titaev@bk.ru

Дмитрий Владимирович Пасхин, заместитель заведующего лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
Dmitry V. Pashin, Deputy Head of the Laboratory for thin-walled and spatial structures of NIIZhB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: moo-shell@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку/Corresponding author