

## Регулирование напряженно-деформированного состояния структурной плиты покрытия

*А.А. Василькин, В.В. Денякова*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** В статье поставлена задача поиска проектного решения структурной плиты покрытия. Структурные плиты широко применяются для перекрытия одноэтажных сооружений и имеют большое многообразие конструктивных и архитектурных форм. Выбор конструкции минимальной массы осуществляется на основе метода регулирования НДС. В качестве регуляторов приняты расположение колонн и класс стали. В зависимости от количества и расположения колонн, на которые опирается структурная плита меняются усилия в элементах структуры и соответственно меняется площадь поперечного сечения и масса конструкции. Было рассмотрено 4 варианта расположения колонн и три варианта класса стали. Для каждого расчетного варианта выполнен расчет конструкции численным методом, подобрано сечение и определена масса. На основании принятого критерия эффективности проектного решения – металлоемкость, принято наиболее эффективное проектное решение с расположением колонн по периметру покрытия с шагом в одну ячейку.

**Ключевые слова:** структурная плита, регулирование НДС, оптимизация, металлоемкость, параметр регулирования.

В мировой строительной практике создано много универсальных конструкций общественного и промышленного назначения. Одной из них являются стальные структурные системы покрытия, отличающиеся оригинальными архитектурными формами и прогрессивными конструкторскими решениями [1].

Структурные плиты (структуры) – это пространственные стержневые конструкции, сходные по своему строению с кристаллическими решетками металла [2,3] и обладающие рядом положительных свойств: многосвязность, универсальность, возможность изготовления на поточных высокопроизводительных технологических линиях, простота транспортирования [4].

Структуры могут применяться в качестве конструкции покрытия большепролетных зданий и сооружений [5]. Усилия в плите, а следовательно

сечение и масса элементов конструкции во многом зависят от принятых конструктивных параметров. Поиск наиболее эффективного варианта проектного решения структурной плиты является одной из задач, решаемых на начальных этапах проектирования [6] и напрямую влияет на последующую трудоемкость изготовления, монтажа и в конечном итоге стоимость сооружения.

### 1. Постановка задачи

В данной работе была поставлена задача регулирования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции путем изменения ряда параметров в целях получения конструкции минимальной массы. Минимизация массы проектируемой конструкции является наиболее распространенным критерием проектирования [7,8,9]. В качестве способа решения задачи используется численный эксперимент [10].

Регулирование НДС несущей конструкции покрытия может рассматриваться как одна из задач управления поведением несущих строительных конструкций – отдельного направления в строительной механике [11].

В качестве регуляторов или изменяемых параметров приняты класс стали с возможными значениями: С245, С285, С345 и четыре варианта расположения колон. Таким образом, в работе проводится исследование 12 вариантов значений регуляторов.

В качестве исследуемой принимаем структурную плиту (рис.1) с размерами в плане 30х30 м, имеющую ортогональную сетку поясов с ячейкой 3,0×3,0 м и высоту по осям поясов 2,12 м. Таким образом, высота конструкции составляет 1/15 пролета, что является оптимальной высотой для разрезных структурных плит [12]. Узлы верхнего и нижнего поясов соединены раскосами. Кристаллы структурной плиты имеют форму

---

пирамиды с квадратным основанием. Колонны приняты высотой 7 м. Опираение структурной плиты на колонны осуществляется по нижнему поясу.

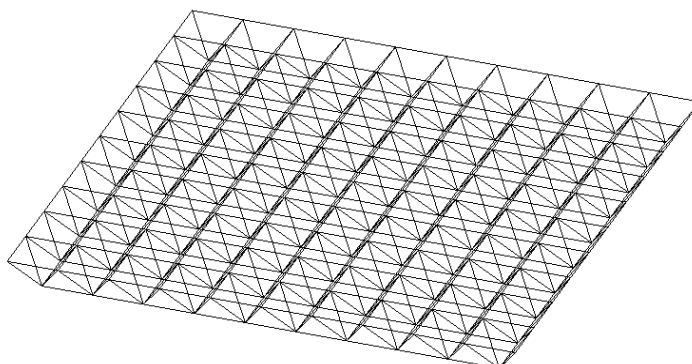


Рис. 1. – Геометрическая схема структурной плиты

Размеры плиты в плане, действующая нагрузка, тип кристалла, высота плиты приняты в виде неизменяемых параметров.

В виде ограничений приняты условие прочности для растянутых стержней, условие устойчивости для сжатых стержней, ограничение по предельной гибкости, предельный прогиб конструкции [13].

Сопряжение всех элементов принято шарнирное, сечения всех элементов – трубы электросварные прямошовные по ГОСТ 10704-91. Объемно-планировочное решение представляет собой одноэтажное, однопролетное здание с квадратной в плане конструкцией покрытия, работающей в двух направлениях, что относится к наиболее совершенным типам структурных плит. Сооружение без светоаэрационных фонарей и без перепадов высот. Для обеспечения отвода атмосферных осадков, как правило, структурная плита выполняется с двусторонним уклоном, однако в настоящем расчете этой особенностью конструкции пренебрегаем.

Для проведения исследования были выбраны следующие варианты расположения колонн (рис.2):

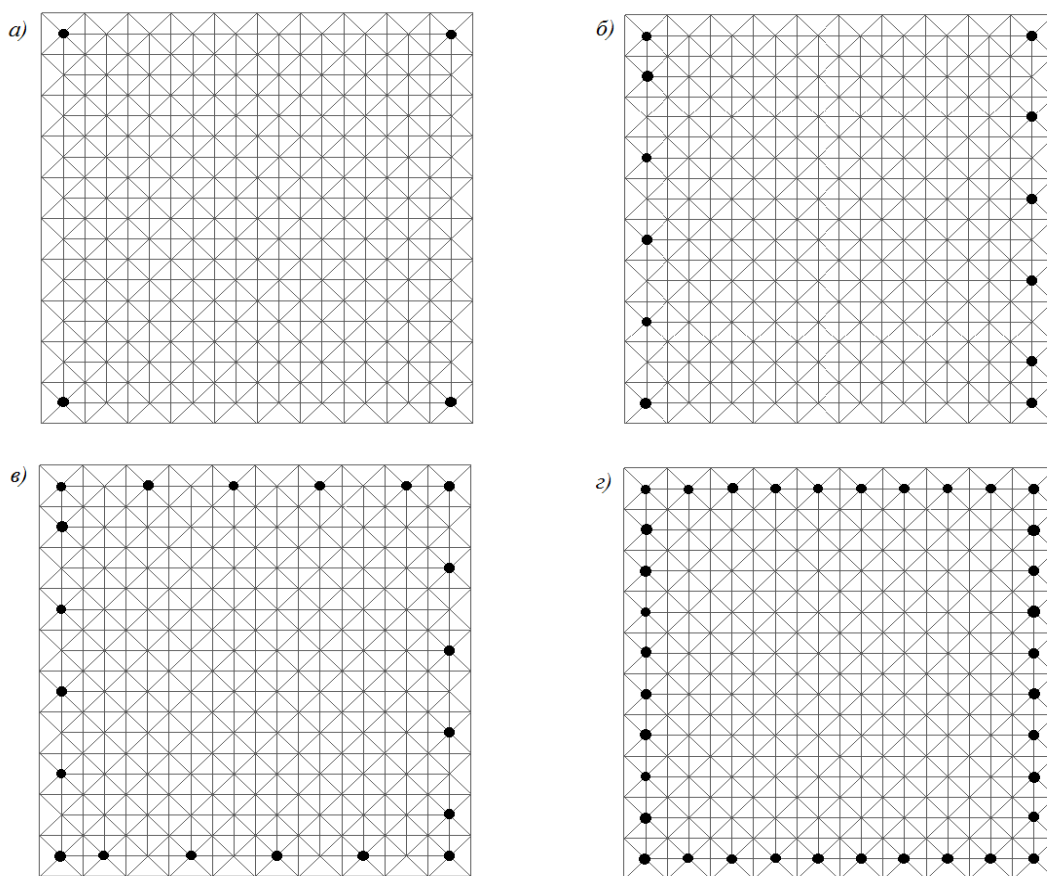


Рис. 2. – Варианты расположения колонн: *а* – вариант 1 (по четырем углам нижнего пояса), *б* – вариант 2 (по двум сторонам нижнего пояса), *в* – вариант 3 (по четырем сторонам нижнего пояса с шагом 6 м), *г* – вариант 4 (по четырем сторонам нижнего пояса с шагом 3 м)

Расстояние между колоннами и их количество для каждого варианта приведено в таблице № 1.

Таблица № 1

Расстояние между колоннами и их количество

Номер варианта	Расстояние между колонн, м	Количество колонн
1	27	4
2	6	12
3	6	20
4	3	36

Как указано в работе [4], наиболее рациональной схемой опирания считается опирание по контуру в каждом узле или с шагом в три-четыре ячейки, что в конечном итоге подтвердилось расчетом.

В качестве действующих нагрузок принимались следующие:

Постоянная – нагрузка от покрытия (от профнастила:  $0,0914 \text{ кН/м}^2$  от прогонов:  $0,0903 \text{ кН/м}$ ), а также собственный вес структуры, который задавался автоматически ПК SCAD Office 21.1 и изменялся на каждой итерации подбора сечений групп конструктивных элементов.

Снеговая нагрузка –  $2,1 \text{ кН/м}^2$ . Поскольку уклон верхнего пояса структуры  $\alpha < 30^\circ$ , то принято равномерное распределение снегового покрова по всему покрытию (СП 20.1330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*).

Ветровая нагрузка не учитывалась, поскольку как показали исследования [14] усилия от ветровой нагрузки составляют около 1% и их влияние на НДС конструкции структуры не является существенным.

В данной работе принята конструкция покрытия по прогонам, когда профилированный настил опирается на прогоны, которые крепятся к верхнему поясу структурной плиты. Таким образом, в расчетной схеме прикладывалась сосредоточенная нагрузка от покрытия и снега в узлы верхнего пояса структурной плиты.

Статический расчет производился в программном комплексе SCAD Office 21.1 в соответствии с действующими нормами.

Для проведения расчета была создана пространственная модель, состоящая из структурной плиты и колонн. Все элементы структурной плиты задавались стержнями пространственной фермы с тремя степенями свободы: X, Y, Z, колонны – пространственными стержнями с шестью степенями свободы X, Y, Z, Ux, Uy, Uz. Все сопряжения между элементами приняты шарнирными.

---

Для анализа прогибов структурной плиты создавалась комбинация нагрузжений, учитывающая нормативные постоянные и длительные нагрузки. Поскольку в расчетной схеме прикладывались расчетные нагрузки, то постоянные нагрузки учитывались с коэффициентом  $1/1,05=0,952$ . Для выделения длительной части кратковременной (снеговой) нагрузки следует умножать ее нормативное значение на долю длительности (понижающий коэффициент), следовательно, для снеговой нагрузки учитывался коэффициент  $(1/1,4) \cdot 0,5=0,357$ . Таким образом, комбинация нагрузжений для анализа прогибов следующая:  $(L1) \cdot 0,952 + (L2) \cdot 0,952 + (L3) \cdot 0,357$ , где (L1), (L2), (L3) – нагрузжения № 1, 2 и 3 соответственно.

Статический расчет производится для определения напряженно-деформированного состояния всей конструкции. Подбор сечений растянутых элементов выполняется по расчету на прочность, сжатых элементов – по расчету на устойчивость. Также при расчете учитываются предельные гибкости элементов и вертикальные перемещения всей конструкции.

Для проверки несущей способности стальных сечений задавались четыре группы конструктивных элементов и четыре группы унификации: верхний пояс, нижний пояс, раскосы и колонны. Для верхнего и нижнего пояса задавался тип конструктивной группы – элемент пояса фермы, для раскосов – элемент решетки фермы, для колонн – стойка. Коэффициент надежности по ответственности  $\gamma_n$  принят равным 1,0. Для колонн коэффициент расчетной длины в двух плоскостях приняты 0,7; предельные гибкости 180-60 $\alpha$  (СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*).

В рамках данного исследования для всех вариантов расположения колонн принимались три варианта стали для структурной плиты: С245, С285, С345 и один вариант для колонн С245.

---

Расчет стальных конструкций производился в упругой стадии работы материала.

## 2. Результаты расчета

Деформированные схемы модели для всех вариантов расположения колонн представлены на рисунке 3.

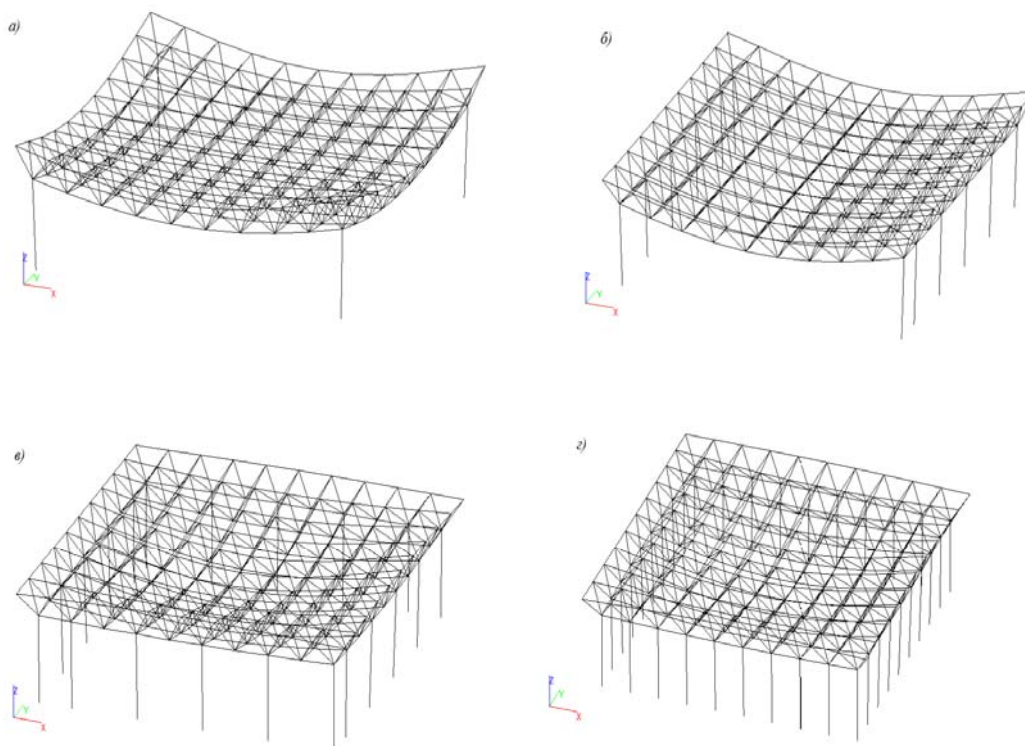


Рис. 3. – Деформированная схема модели: *а, б, в, г* – для 1, 2, 3, 4 вариантов расположения колонн соответственно

В таблице № 2 приведены вертикальные перемещения узлов структурной плиты при принятом классе стали структурной плиты С245, С285 и С345.

Предельно допустимые прогибы определены по формуле (1):

$$f = \frac{L}{262,5} = \frac{27000}{262,5} = 102,86 \text{ мм.} \quad (1)$$



Таблица № 2

## Перемещения по Z

Сталь	Вариант расположения колонн	Максимальные значения, мм	Минимальные значения, мм
С245	1	11.375	-53.211
	2	4.291	-40.808
	3	2.925	-39.393
	4	4.104	-38.685
С285	1	12.902	-57.979
	2	4.819	-43.652
	3	3.526	-42.729
	4	4.698	-41.986
С345	1	15.041	-64.807
	2	5.924	-49.919
	3	4.365	-47.542
	4	5.652	-47.357

Как и следовало ожидать, с увеличением количества опор, усилия и сечения в элементах решетки структурной плиты будут снижаться. Поэтому для адекватного сравнения вариантов проектных решений по металлоемкости необходимо учесть суммарную массу плиты и колонн.

По результатам подбора сечений на последней итерации были приняты следующие размеры сечений конструктивных групп элементов (табл. № 3):

Таблица № 3

## Результаты подбора сечений

Сталь структуры	Вариант расп. колонн	Конструктивная группа элементов			
		Верхний пояс	Нижний пояс	Раскосы	Колонны
С245	1	D244,5x3,2	D273x3,5	D168x2,5	D273x4
	2	D193,7x2,2	D133x3,5	D108x1,8	D193,7x2,2
	3	D152x1,8	D95x2,5	D89x1,8	D177,8x1,8
	4	D152x1,8	D95x2,5	D83x1,6	D127x1,8
С285	1	D219x3,2	D152x5,5	D168x2,2	D273x4
	2	D193,7x2	D140x3	D108x1,8	D193,7x2,2
	3	D140x1,8	D76x2,8	D89x1,8	D177,8x1,8



	4	D140x1,8	D76x2,8	D83x1,6	D127x1,8
С345	1	D219x2,8	D177,8x3,8	D159x2	D273x4
	2	D168x2	D168x2	D102x1,8	D193,7x2,2
	3	D133x1,8	D70x2,5	D89x1,8	D177,8x1,8
	4	D127x1,8	D63,5x2,8	D83x1,6	D127x1,8

Толщина элементов предложенных в результате расчета получается достаточно небольшой – 1-3 мм, что целесообразно для сжатых элементов, поскольку при потере устойчивости при равной площади поперечного сечения, выгоднее увеличивать диаметр и уменьшать толщину стенки трубы, поскольку это позволит увеличить радиус инерции  $i$  и уменьшить таким образом гибкость элемента  $\lambda$ . В случае необходимости присоединения к колоннам дополнительных элементов следовало бы увеличить толщину стенки для обеспечения ее прочности на срез. Кроме того, при возможной эксплуатации объекта в слабо- и среднеагрессивной среде необходимо увеличить толщину стенки раскосов и поясов на величину ожидаемого коррозионного износа. Подобные соображения можно учесть на этапе подбора сечения элементов в качестве ограничений.

На основании результатов подбора сечений была определена масса для всех вариантов проектных решений, результаты которых приведены в таблице № 4.

Таблица № 4

#### Масса конструкции

Сталь структуры	Вар. расп. колонн	Кол-во колонн	Масса структурной плиты, т	Масса колонн, т	Масса итого, т	% структурной плиты	% итого
С245	1	4	37,38	0,74	38,13	100,0	100,0
	2	12	18,56	0,87	19,44	49,7	51,0
	3	20	12,12	1,09	13,22	32,4	34,7
	4	36	11,33	1,40	12,73	30,3	33,4
С285	1	4	32,77	0,74	33,51	100,0	100,0
	2	12	17,38	0,87	18,25	53,0	54,5

	3	20	11,42	1,09	12,52	34,9	37,4
	4	36	10,63	1,40	12,03	32,4	35,9
С345	1	4	27,95	0,74	28,70	100,0	100,0
	2	12	15,18	0,87	16,04	54,3	55,9
	3	20	10,74	1,09	11,83	38,4	41,2
	4	36	9,79	1,40	11,19	35,0	38,98

С ростом количества опор масса плиты покрытия снижается, а масса колонн возрастает. Наглядно закон изменения массы для различных сталей показан на рис.4.

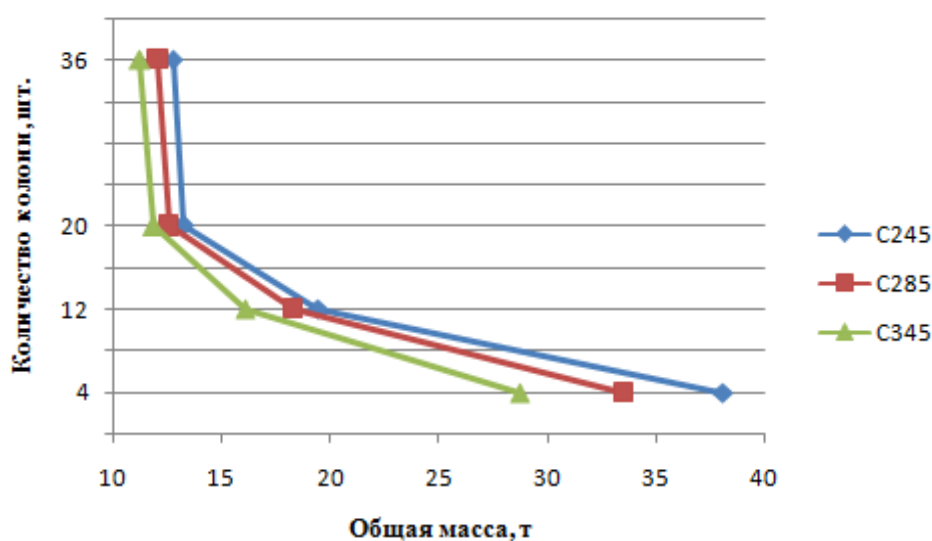


Рис.4. – Изменение массы конструкции в зависимости от количества колонн в соответствии с вариантами их расположения (1 вариант – 4 колонны, 2 – 12, 3 – 20, 4 – 36) и классов стали структурной плиты С245, С285, С345

### Выводы

Исходя из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что по критерию металлоемкость для рассматриваемых проектных решений наиболее эффективен четвертый вариант расположения колонн (по периметру нижнего пояса структуры с шагом 3м) для всех вариантов класса стали. В этом случае масса структурной плиты составляет от 30 до 35% от максимального значения, а общая масса конструкций, несмотря на увеличение доли массы колонн – от 33 до 39%. При классе стали

структурной плиты С345 для четвертого варианта расположения колонн общая масса конструкций достигает минимума. Максимальная общая масса получается при 1 варианте расположения колонн (по четырем углам нижнего пояса) и классе стали С245.

При анализе результатов установлено, что при увеличении количества колонн разница эффективности по металлоемкости снижается, то есть, например, для стали С245 при переходе от четырех колонн к двенадцати эффективность увеличивается на 50,4%, от двенадцати к двадцати – на 17,2%, от двадцати к тридцати шести – всего на 2,1%.

Также было выявлено, что снижение общей массы конструкций при четвертом варианте расположения колонн по сравнению с третьим незначительно и составляет около 4%. При этом при переходе от третьего к четвертому варианту расположения колонн их количество увеличивается на 16 штук, что существенно увеличивает трудоемкость монтажа.

Таким образом, наиболее эффективным является третий вариант расположения колонн (по периметру нижнего пояса с шагом 6 м) при классе стали структурной плиты С345. Наиболее эффективной схемой опирания является опирание по контуру с шагом в две ячейки.

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем исследовании различных вариантов расположения колонн и классов стали структурной плиты по двум критериям эффективности: металлоемкость и трудоемкость монтажа.

### **Литература**

1. ЦНИИСК им. Кучеренко. Рекомендации по проектированию структурных конструкций. М.: Стройиздат, 1984. 303 с.
2. Толмачев И.Н. Структурные конструкции покрытий одноэтажных промышленных зданий. М.: МИИТ, 1981. 32 с.

3. Хисамов Р.И. Расчет и конструирование структурных покрытий. Киев: Будівельник, 1981. 48 с.
  4. Лубо Л.Н., Миронков Б.А. Плиты регулярной пространственной структуры. Ленинград: Стройиздат, 1976. 104 с.
  5. Колодежнов С.Н., Селиванова А.Н. Анализ висячих конструктивных систем подкрепления навеса в виде структурной плиты // Строительная механика и конструкции. 2017. №14. С. 61-71.
  6. Василькин А.А., Щербина С.В. Автоматизированное решение задачи определения оптимальной высоты стальной фермы по критерию минимума массы при вариации высоты фермы // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: сборник материалов Международной конференции (12-13 ноября 2014 г., Москва). М.: МГСУ, 2015. С. 131-134.
  7. Василькин А.А. Выбор оптимальной стальной конструкции по целевой функции стоимость материала // Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность: материалы Международной научной конференции, VI Академических чтений, посвященных памяти академика РААСН Осипова Г.Л.. М: НИИСФ РААСН, 2015. С. 7-16.
  8. Туменова И.М. Параметрическая оптимизация трапециевидной деревянной фермы с восходящими раскосами на металлических зубчатых пластинах // Инженерный вестник Дона, 2017, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4165](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4165).
  9. Flager, F., A. Adya, J. Haymaker and M. Fischer, 2014. A bi-level hierarchical method for shape and member sizing optimization of steel truss structures. Computers and Structures, 131, pp. 1-11.
  10. Volkov, A.A. and A.A. Vasilkin, 2016. Optimal design of the steel structure by the sequence of partial optimization. Procedia Engineering, 153, pp. 850-855.
-

11. Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Думбай В.А., Данилейко И.Ю. Регулирование напряженно-деформированного состояния структурного покрытия способом изменения геометрической схемы сооружения // Инженерный вестник Дона, 2017, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/3982.

12. Михайлов В.В., Сергеев М.С. Пространственные стержневые конструкции покрытий (структуры). Владимир: ВлГУ, 2011. 56 с.

13. Парлашкевич В.С., Василькин А.А., Булатов О.Е. Проектирование и расчет металлических конструкций рабочих площадок. 2 изд. М.: МГСУ, 2014. 168 с.

14. Зуева И.И., Иванова С.Л. Особенности проектирования структурных конструкций типа «ЦНИИСК» // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2013. № 1. С.91-97.

### References

1. The V.A. Kucherenko Central Scientific Research Institute of Building Structures Rekomendatsii po proektirovaniyu strukturnykh konstruksiy [Recommendations for the design of space grid structures]. Moscow: Stroyizdat, 1984. 303 p.

2. Tolmachev I.N. Strukturnye konstruksii pokrytiy odnoetazhnykh promyshlennykh zdaniy [Space grid structures for roofs of single-storey industrial buildings]. Moscow.: MIIT, 1981. 32 p.

3. Khisamov R.I. Raschet i konstruirovaniye strukturnykh pokrytiy [Calculation and design of space grid structures for roofs]. Kiev: Budivel'nik, 1981. 48 p.

4. Lubo L.N., Mironkov B.A. Plity regul'yarnoy prostranstvennoy struktury [Slabs of regular spatial structure]. Leningrad: Stroyizdat, 1976. 104 p.

5. Kolodezhnov S.N., Selivanova A.N. Stroitel'naya mekhanika i konstruksii. 2017. №14. pp. 61-71.

6. Vasilkin A.A., Shcherbina S.V. Integratsiya, partnerstvo i innovatsii v stroitel'noy nauke i obrazovanii: sbornik materialov Mezhdunarodnoy konferentsii (12-13 noyabrya 2014 g.. Moskva) (Integration, partnership and innovation in building science and education: a collection of materials of the International Symp. (November 12-13, 2014, Moscow)). Moscow, 2015, pp. 131-134.

7. Vasilkin A.A. Aktual'nye voprosy stroitel'noy fiziki. Energoberezhenie. Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy i ekologicheskaya bezopasnost': materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, VI Akademicheskikh chteniy, posvyashchennykh pamyati akademika RAASN Osipova G.L. (Actual items of physics of civil engineering. Energy saving. Reliability of building structures and environmental safety: materials of the International Scientific Symp., VI Academic readings dedicated to the memory of academician RAASN G.L. Osipov). Moscow, 2015. pp. 7-16.

8. Tumenova I.M. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4165](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4165).

9. Flager, F., A. Adya, J. Haymaker and M. Fischer, 2014. Computers and Structures, 131, pp. 1-11.

10. Volkov, A.A. and A.A. Vasilkin, 2016. Procedia Engineering, 153, pp. 850-855.

11. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Dumbay V.A., Danileyko I.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/3982](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/3982).

12. Mikhaylov V.V., Sergeev M.S. Prostranstvennye sterzhnevye konstruksii pokrytiy (strukturny) [Space grid structures for roofs]. Vladimir: VIGU, 2011. 56 p.

13. Parlashkevich V.S., Vasilkin A.A., Bulatov O.E. Proektirovanie i raschet metallicheskih konstruksiy rabochikh ploshchadok [Design and



calculation of metal structures of operating platforms]. 2 izd. Moscow: MGSU, 2014. 168 p.

14. Zueva I.I., Ivanova S.L. Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura. 2013. № 1. pp.91-97.