



ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ  
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ  
METAL CONSTRUCTIONS

2020, ТОМ 26, НОМЕР 1, 37–48  
УДК 624.073:624.04

(20)-0406-1

## ОПТИМАЛЬНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПРЯМОУГОЛЬНЫХ НЕТИПОВЫХ ПЛАНАХ

**А. В. Мушанов**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.  
E-mail: [mushhanov93@gmail.com](mailto:mushhanov93@gmail.com)

Получена 25 февраля 2020; принята 27 марта 2020.

**Аннотация.** В статье рассмотрены подходы к оптимизации структурных конструкций на нетиповых планах. Целевой функцией принята удельная металлоемкость покрытия ( $G$ ), а оптимизируемыми показателями выступают относительная высота покрытия ( $h/l$ ) и относительная стрела выгиба ( $f/l$ ). Таким образом, процесс оптимизации может проходить как по одному показателю ( $h/l$ ), так и по двум сразу ( $h/l$ ) и ( $f/l$ ). На основе полученных результатов был сформирован массив данных для регрессионного анализа, обработанных с помощью встроенной функции «ЛИНЕЙН» в Microsoft EXCEL, что позволило выразить 8 результирующих формул (4 из которых – оптимизация по одному показателю и 4 – по двум показателям), позволяющих на основании варьируемых параметров проектирования ( $q$  – расчетная нагрузка и  $a/b$  – соотношение сторон в плане) вычислить оптимальные параметры конструкции.

**Ключевые слова:** структурное покрытие, оптимизация, множественная линейная регрессия, металлоемкость, matlab, Microsoft EXCEL.

## ОПТИМАЛЬНІ КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ СТРУКТУРНИХ ПОКРИТТІВ НА ПРЯМОКУТНИХ НЕТИПОВИХ ПЛАНАХ

**О. В. Мушанов**

ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,  
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.  
E-mail: [mushhanov93@gmail.com](mailto:mushhanov93@gmail.com)

Отримана 25 лютого 2020; прийнята 27 березня 2020.

**Анотация.** У статті розглянуті підходи щодо оптимізації структурних конструкцій на нетипових планах. За цільову функцію прийнята питома металоємкість покриття ( $G$ ), а оптимізованими показниками виступають відносна висота покриття ( $h/l$ ) і відносна стріла вигину ( $f/l$ ). Таким чином, процес оптимізації може проходити як за одним показником ( $h/l$ ), так і за двома відразу ( $h/l$ ) і ( $f/l$ ). На основі одержаних результатів було сформовано масив даних для регресивного аналізу, опрацьованих за допомогою вбудованої функції «ЛИНЕЙН» у Microsoft EXCEL, що дозволило виразити 8 підсумкових формул (4 із яких – оптимізація за одним показником і 4 – за двома показниками), що дозволяють на основі варійованих параметрів проектування ( $q$  – розрахункове навантаження і  $a/b$  – співвідношення сторін у плані) обчислити оптимальні параметри конструкції.

**Ключові слова:** структурне покриття, оптимізація, множинна лінійна регресія, металоємність, matlab, Microsoft EXCEL.

## OPTIMAL DESIGN SOLUTIONS FOR STRUCTURAL COATINGS ON RECTANGULAR NON-STANDARD LAYOUTS

Alexandr Mushchanov

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,*

*2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.*

*E-mail: mushchanov93@gmail.com*

*Received 25 February 2020; accepted 27 March 2020.*

**Abstract.** The article considers approaches to optimizing structural coatings on non-standard layouts. The target function is the specific metal content of the coating ( $G$ ), and the optimized indicators are the relative height of the coating ( $h/l$ ) and the relative bending boom ( $f/l$ ). Thus, the optimization process can take place both in one indicator ( $h/l$ ) and in two at once ( $h/l$ ) and ( $f/l$ ). Based on the obtained results, an array of data for regression analysis was generated, performed using the built-in LINEST function in Microsoft EXCEL, which allowed us to express 8 resulting formulas (4 of which are optimization for one indicator and 4 for two indicators), which allow variable design parameters ( $q$  – design load and  $a/b$  – aspect ratio) calculate the optimal design parameters.

**Keywords:** structural coating, optimization, multiple linear regression, metal consumption, matlab, Microsoft EXCEL.

### Введение

Оптимизация конструкций представляет собой целенаправленный поиск наилучшего варианта из множества различных допустимых проектных решений, обусловленных различными значениями переменных параметров. Инструктивные материалы предлагают критерием экономической оценки качества сравниваемых вариантов считать приведенные затраты. Они складываются из единовременных затрат и текущих расходов за нормативный срок окупаемости капитальных вложений. Реальное содержание составных частей приведенных затрат зависит от того, чем разнятся сравниваемые затраты. Эффективность оптимального проектирования структурных конструкций в основном определяется способами постановки и реализации оптимизационных задач.

При постановке задачи в оптимизационную модель вводят различные компоненты, влияющие на указанные показатели. Прежде всего – это состав искомых (варьируемых, оптимизируемых) параметров. Чем больше параметров считаются заданными (фиксированными), тем проще решение задачи, но слабее эффект оптимизации.

Основными классическими, варьируемыми параметрами для структурных покрытий принимают:

- размеры ячейки ( $a, b$ );
- число панелей ( $m, n$ ) (граней, рёбер, колец);
- высота стержневого набора ( $h$ );
- стрела подъёма покрытия ( $f$ ).

Заданными считаются:

- тип конструкции;
- генеральные размеры в плане;
- условия опирания;
- уровень нагрузки;
- характеристики материала и сортамент профилей.

Вопросами исследования оптимизации большепролетных конструкций в разное время занимались Я. М. Лихтарников, В. Н. Шимановский, М. Л. Гринберг, В. Н. Гордеев, И. В. Роменский, Е. В. Горохов, Я. В. Назим, В. Ф. Мущанов, А. В. Гинзбург, А. А. Василькин, И. Н. Серпик, А. В. Алексейцев, П. Ю. Балабин, Н. С. Курченко, М. Kociecki, Н. Adeli, T. Zhang, K. Kawaguchi, M. Wu. В вышеперечисленных работах раскрыты вопросы оптимизации большепролетных конструкций на типовых планах согласно действующим нормам проектирования с различными варьируемыми параметрами. Однако вопросы оптимизации конструкций на нетиповом плане с учетом уточненных расчетных моделей структурных покрытий не затрагивались. На основе

критического анализа этих работ формулируется цель данной работы.

### Цель исследования

Разработка оптимальных конструктивных форм структурных покрытий на нетиповых прямоугольных планах с учетом значимых параметров проектирования и уточненной несущей способности центрально-сжатых стержней, обеспечивающих возможность использования сортамента типовых конструктивных элементов.

### Постановка задачи исследования

На основании сформулированной выше цели работы целевая функция, положенная в основу алгоритма оптимизации, может быть записана в следующем виде.

### Основная часть

Формулировка целевой функции. В рамках проводимого исследования предлагается функция цели, предусматривающая минимальную массу конструкции при выполнении ограничений, связанных с требованиями обеспечения прочности, устойчивости, жесткости конструкции в пределах изменения варьируемых параметров.

Обоснованием такого подхода может служить тот факт, что в настоящее время стоимость материалов конструкции составляет 40...70 % общей стоимости завершеного объекта. Затраты, связанные с другими статьями стоимости строительства, очень сильно разнятся в зависимости от производителя, его технических и технологических возможностей и на сегодняшний день имеют неустоявшиеся границы. В связи с этим предлагается минимизировать теоретическую массу конструкции, вычисляемую по конечным геометрическим параметрам структурных элементов, составляющих конструкцию:

$$G \rightarrow \min[\rho(\sum_{i=1}^n A_i l_i + \sum_{j=1}^m V_j)], \quad (1)$$

где  $G$  – оптимизируемая масса конструкции;

$\rho$  – плотность стали;

$i = 1...n$  – количество стержневых элементов структурного покрытия;

$A_i$  – площадь поперечного сечения  $i$ -го элемента;

$l_i$  – теоретическая длина  $i$ -го элемента (по центрам узлов);

$j = 1...m$  – количество соединительных узлов-коннекторов;

$V_j$  – объем-нетто (за вычетом отверстий)  $j$ -го коннектора.

Алгоритм оптимизации реализован в виде программного комплекса, написанного на высокоуровневом интерпретируемом языке программирования MATLAB [10]. Блок-схема методики оптимизации представлена на рисунке 1. В качестве переменной «х» алгоритма выступают одновременно «Н» и «Z». Изначально формируется файл с исходными данными в формате txt, где указывается нагрузка, координаты узлов, геометрические характеристики сечений и связи. Для обеспечения интеграции разработанного программного продукта с современными комплексами автоматического проектирования предусмотрена возможность загрузки вышеперечисленных данных из текстовых файлов генерируемых программами «ЛИРА САПР» и «SCAD». Далее насчитывается сетка точек, расположенных на исследуемой поверхности массы (m), где параметры «Н» и «Z» изменяются с заданным шагом. Анализируя полученный массив данных масс конструкции, выбираются три базисные точки для реализации алгоритма Нелдера-Мида. Точка с максимальным значением целевой функции массы (точка 3) отображается через центр отрезка, образованного двумя оставшимися точками базиса (точки 1 и 2). Если целевая функция в полученной точке (точка 4) меньше массы в точке 3, то происходит растяжение вычисления (рассчитывается точка 5), отрезок «3–4» удлиняется по направлению точки 4. Если целевая функция массы в точке 4 больше массы в точке 3, но меньше массы в центре отрезка «1–2», выполняется редукция (перопределение точек базиса). Если целевая функция массы в точке 4 больше массы всех предыдущих точек итерации, то выполняется сжатие (точка 5 получается путем отображения точки 4 «внутри» базисного треугольника). После вычисления параметров и массы 5 точки производится анализ полученных вычислений и выбираются три точки с наименьшей целевой функцией массы для следующей итерации. Расчет ведется, пока изменение целевой функции массы на трех итерациях подряд не составит менее 5 %. Точка с минимальной функцией массы на последней итерации принимается как наиболее оптимальный вариант конструкции. Далее фиксируются жесткости элементов, геометрия

конструкции и выводятся пользователю. После чего расчет останавливается.

В рамках предварительно выполненных исследований были выделены параметры

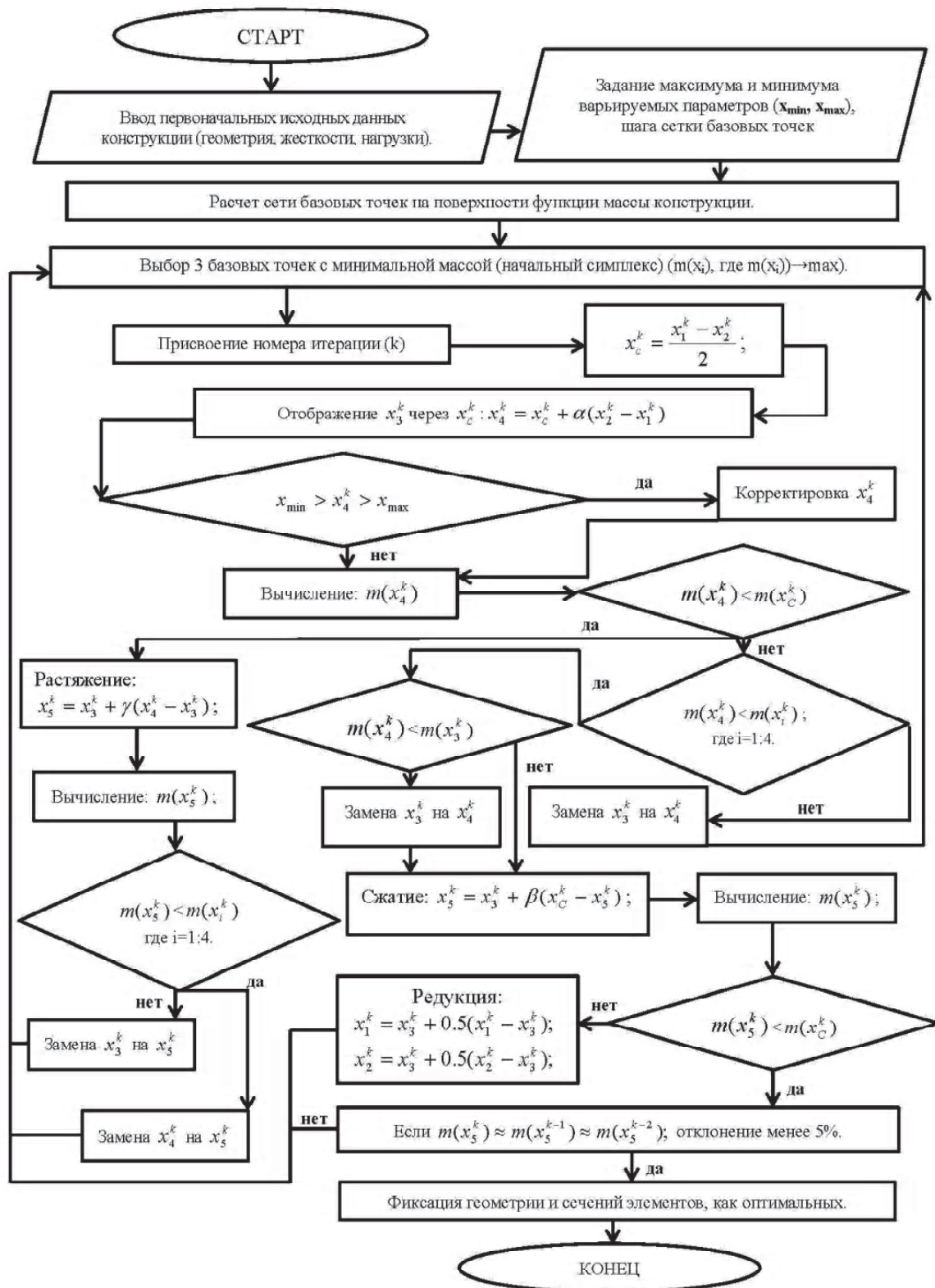


Рисунок 1. Алгоритм оптимизации решетчатой конструкции.

проектирования ( $q^*$ ,  $S1-S3(a/b)$ ,  $f/b$ ,  $h/b$ ), оказывающие значительное влияние на несущую способность центрально-сжатых стержней структурных конструкций. Эти параметры можно разделить на две группы [6]:

1. Управляющие параметры: к этой группе относятся параметры, имеющие наибольшее влияние на НДС центрально-сжатых стержней структурных конструкций:
  - $f/b$  – соотношение стрелы обратного выгиба покрытия к его меньшей стороне в плане;
  - $h/b$  – соотношение высоты покрытия к его меньшей стороне в плане.

Согласно предыдущим исследованиям, наибольшее влияние на НДС центрально-сжатых стержней структурных конструкций оказывает параметр  $f/b$ , что обусловлено перераспределением напряжений в элементах за счет появления общей кривизны покрытия.

2. Варьируемые параметры: к этой группе относятся параметры, которыми предполагается варьирование НДС покрытия:
  - $q$  – снеговая нагрузка на покрытие (40 кг/м<sup>2</sup>, 100 кг/м<sup>2</sup>, 160 кг/м<sup>2</sup>, 240 кг/м<sup>2</sup>);
  - $b/a$  – соотношение меньшей стороны покрытия в плане к большей (45×45 м, 45×68,4 м, 45×90 м, 45×108 м, 45×126 м).

Для оценки значимости параметров проектирования был проведен анализ данных, представленных на рисунках 2–9. Основным показателем значимости является удельный вес конструкции покрытия. По указанному алгоритму была проведена оптимизация по массе конструкции при условии подбора сечений центрально-сжатых элементов по двум методикам: классическая методика, предложенная нормами (ДБН) и методика, разработанная с помощью линейной регрессии. Используя возможности разработанного алгоритма, оптимизация исходных проектных решений выполнена в двух вариантах:

- 1) при сохранении плоской формы исходного проектного решения и поиска оптимального решения путем варьирования 1-го параметра – относительной высоты покрытия ( $h/b$ );
- 2) при искривлении первоначальной плоской формы проектного решения и преобразовании ее в пологую стержневую оболочку с поиском оптимального решения путем варьирования двух параметров: относительной высоты покрытия ( $h/b$ ) и относительной стрелы подъема ( $f/b$ ).

### Результаты оптимизации исходных решений по 1-му варианту

- а) влияние величины суммарной расчетной нагрузки  $q$ .

В программном комплексе Microsoft EXCEL были созданы зависимости «Удельная масса покрытия – соотношение сторон в плане», представленные на рисунках 2–3.

В таблице 1 представлено изменение значения показаний удельной массы конструкции в зависимости от расчетной нагрузки и соотношения сторон покрытия в плане.

- б) влияние соотношения сторон покрытия  $a/b$ .

В программном комплексе Microsoft EXCEL были созданы зависимости «Удельная масса покрытия – соотношение сторон в плане», представленные на рисунках 4–5.

В таблице 2 представлены изменение значения показаний удельной массы конструкции в



**Рисунок 2.** Зависимость «Удельная масса конструкции – соотношение сторон в плане» при нагрузке 40 кг/м<sup>2</sup>.



**Рисунок 3.** Зависимость «Удельная масса конструкции – соотношение сторон в плане» 240 кг/м<sup>2</sup>.

Таблица 1. Сравнение показателей удельной массы покрытия

№ п/п	$q$ , (кг/м <sup>2</sup> )	$b/a$	$G_{ДБН}$	$G_M$	$G_{6,0}$	$\delta 5-6$	$\delta 5-4$	$h/b_{ДБН}$	$h/b_{рег}$
1	40,00	1	10,17	10,17	11,20	-9,2	0,0	0,03	0,03
2	40,00	1/1,6	9,45	9,44	10,02	-5,8	-0,1	0,03	0,03
3	40,00	1/2	9,49	9,47	10,08	-6,1	-0,2	0,03	0,03
4	40,00	1/2,4	9,77	9,76	10,32	-5,4	-0,1	0,04	0,03
5	40,00	1/2,8	9,58	9,58	10,16	-5,7	0,0	0,03	0,04
6	100,00	1	12,12	12,11	12,42	-2,5	-0,1	0,05	0,04
7	100,00	1/1,6	11,45	11,41	11,56	-1,3	-0,3	0,05	0,05
8	100,00	1/2	11,76	11,70	11,82	-1,0	-0,5	0,06	0,06
9	100,00	1/2,4	12,11	12,04	12,19	-1,2	-0,6	0,06	0,06
10	100,00	1/2,8	12,17	12,08	12,27	-1,5	-0,7	0,06	0,06
11	160,00	1	14,01	13,90	14,12	-1,6	-0,8	0,06	0,06
12	160,00	1/1,6	13,37	13,16	13,42	-1,9	-1,6	0,06	0,06
13	160,00	1/2	13,86	13,63	13,88	-1,8	-1,7	0,06	0,06
14	160,00	1/2,4	14,17	13,90	14,21	-2,2	-1,9	0,06	0,06
15	160,00	1/2,8	14,54	14,23	14,58	-2,4	-2,1	0,06	0,06
16	240,00	1	16,46	16,23	16,43	-1,2	-1,4	0,06	0,06
17	240,00	1/1,6	16,00	15,81	16,21	-2,5	-1,2	0,07	0,07
18	240,00	1/2	16,65	16,39	16,86	-2,8	-1,6	0,08	0,07
19	240,00	1/2,4	17,23	16,89	17,50	-3,5	-2,0	0,08	0,08
20	240,00	1/2,8	17,46	17,17	17,72	-3,1	-1,7	0,08	0,07

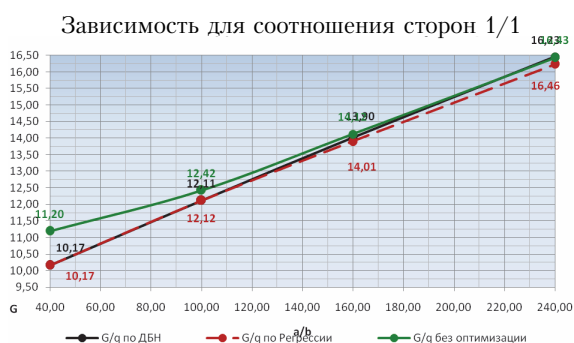


Рисунок 4. Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» для соотношения 1/1.

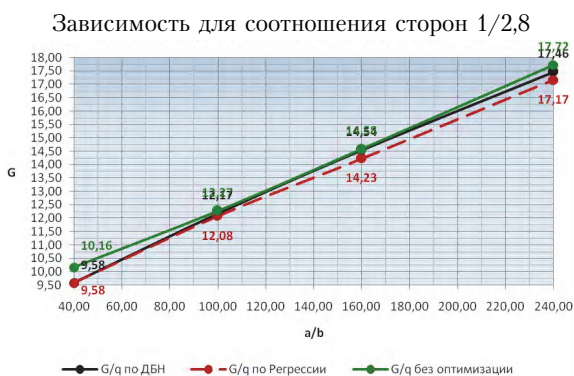


Рисунок 5. Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» для соотношения сторон 1/2,8.

зависимости от расчетной нагрузки и соотношения сторон покрытия в плане.

#### Результаты оптимизации исходных решений по 2-му варианту

а) влияние величины суммарной расчетной нагрузки  $q$ .

В программном комплексе Microsoft EXCEL были созданы зависимости «Удельная масса покрытия – соотношение сторон в плане», представленные на рисунках 6–7.

В таблице 3 представлено изменение показаний удельной массы конструкции в зависимости от расчетной нагрузки и соотношения сторон покрытия в плане.

б) влияние соотношения сторон покрытия  $a/b$ .

В программном комплексе Microsoft EXCEL были созданы зависимости «Удельная масса покрытия – соотношение сторон в плане», представленные на рисунках 8–9.

В таблице 4 представлено значения разницы показаний удельной массы конструкции в зависимости от расчетной нагрузки и соотношения сторон покрытия в плане.

Анализируя полученные зависимости, следует отметить следующие закономерности:



Таблица 2. Сравнение показателей соотношения сторон покрытия

№ п/п	$b/a$	$q$ , (кг/м <sup>2</sup> )	$G_{ДБН}$	$G_m$	$G_{б.о}$	$\delta 5-6$	$\delta 5-4$
1	1	40	10,17	10,17	11,20	-9,2	0,0
2	1	100	12,12	12,11	12,42	-2,5	-0,1
3	1	160	14,01	13,90	14,12	-1,6	-0,8
4	1	240	16,46	16,23	16,43	-1,2	-1,4
5	1/1,6	40	9,45	9,44	10,02	-5,8	-0,1
6	1/1,6	100	11,45	11,41	11,56	-1,3	-0,3
7	1/1,6	160	13,37	13,16	13,42	-1,9	-1,6
8	1/1,6	240	16,00	15,81	16,21	-2,5	-1,2
9	1/2	40	9,49	9,47	10,08	-6,1	-0,2
10	1/2	100	11,76	11,70	11,82	-1,0	-0,5
11	1/2	160	13,86	13,63	13,88	-1,8	-1,7
12	1/2	240	16,65	16,39	16,86	-2,8	-1,6
13	1/2,4	40	9,77	9,76	10,32	-5,4	-0,1
14	1/2,4	100	12,11	12,04	12,19	-1,2	-0,6
15	1/2,4	160	14,17	13,90	14,21	-2,2	-1,9
16	1/2,4	240	17,23	16,89	17,50	-3,5	-2,0
17	1/2,8	40	9,58	9,58	10,16	-5,7	0,0
18	1/2,8	100	12,17	12,08	12,27	-1,5	-0,7
19	1/2,8	160	14,54	14,23	14,58	-2,4	-2,1
20	1/2,8	240	17,46	17,17	17,72	-3,1	-1,7

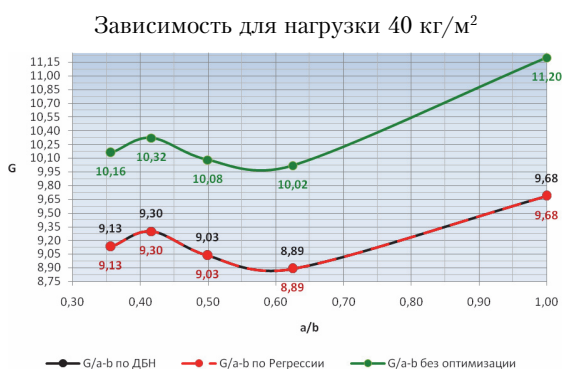


Рисунок 6. Зависимость «Удельная масса конструкции – соотношение сторон в плане» 40 кг/м<sup>2</sup>.

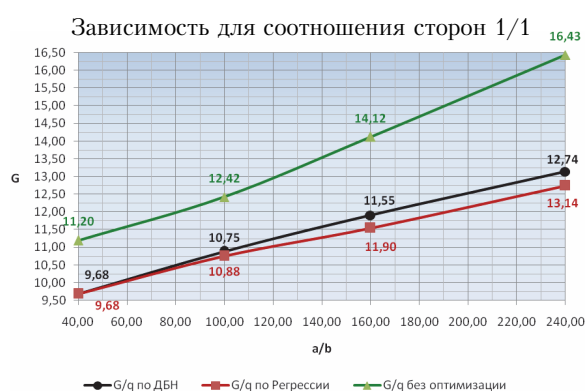


Рисунок 8. Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» для соотношения 1/1.

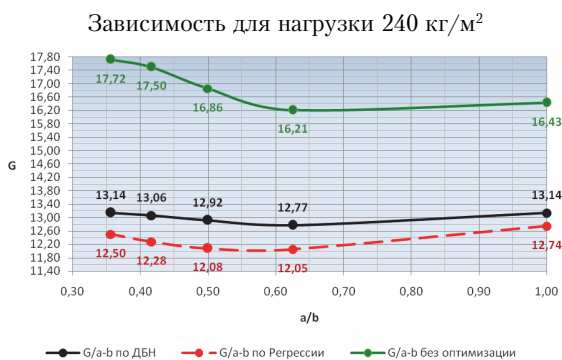


Рисунок 7. Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» для соотношения сторон 1/2,8.

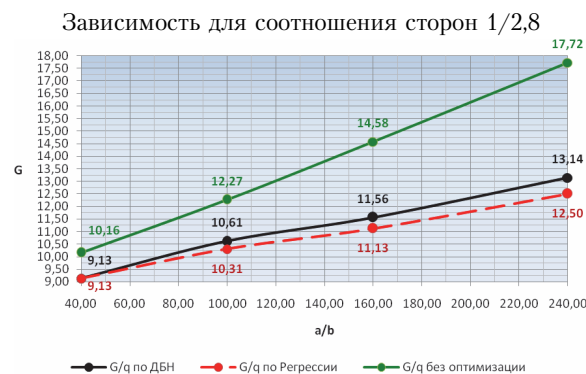


Рисунок 9. Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» для соотношения сторон 1/2,8.

Таблица 3. Сравнение показателей удельной массы покрытия

№ п/п	$q$ , (кг/м <sup>2</sup> )	$b/a$	$G_{\text{дбн}}$	$G_{\text{м}}$	$G_{\text{б.о}}$	$\delta 5-6$	$\delta 5-4$	$f/b_{\text{дбн}}$	$f/b_{\text{пер}}$
1	40,00	1	9,68	9,68	11,20	-13,6	0,0	0,17	0,17
2	40,00	1/1,6	8,89	8,89	10,02	-11,3	0,0	0,22	0,22
3	40,00	1/2	9,03	9,03	10,08	-10,4	0,0	0,22	0,22
4	40,00	1/2,4	9,30	9,30	10,32	-9,9	0,0	0,22	0,22
5	40,00	1/2,8	9,13	9,13	10,16	-10,1	0,0	0,22	0,22
6	100,00	1	10,88	10,75	12,42	-13,4	-1,2	0,22	0,19
7	100,00	1/1,6	10,19	10,05	11,56	-13,1	-1,4	0,22	0,22
8	100,00	1/2	10,31	10,04	11,82	-15,1	-2,6	0,22	0,22
9	100,00	1/2,4	10,57	10,16	12,19	-16,7	-3,9	0,22	0,22
10	100,00	1/2,8	10,61	10,31	12,27	-16,0	-2,8	0,22	0,22
11	160,00	1	11,90	11,55	14,12	-18,2	-2,9	0,22	0,19
12	160,00	1/1,6	11,33	10,97	13,42	-18,3	-3,2	0,22	0,22
13	160,00	1/2	11,29	10,86	13,88	-21,8	-3,8	0,22	0,22
14	160,00	1/2,4	11,32	10,82	14,21	-23,9	-4,4	0,22	0,22
15	160,00	1/2,8	11,56	11,13	14,58	-23,7	-3,7	0,22	0,22
16	240,00	1	13,14	12,74	16,43	-22,5	-3,0	0,21	0,22
17	240,00	1/1,6	12,77	12,05	16,21	-25,7	-5,6	0,22	0,22
18	240,00	1/2	12,92	12,08	16,86	-28,4	-6,5	0,22	0,22
19	240,00	1/2,4	13,06	12,28	17,50	-29,8	-6,0	0,22	0,22
20	240,00	1/2,8	13,14	12,50	17,72	-29,5	-4,9	0,22	0,22

Таблица 4. Сравнение показателей соотношения сторон покрытия

№ п/п	$q$ , (кг/м <sup>2</sup> )	$b/a$	$G_{\text{дбн}}$	$G_{\text{м}}$	$G_{\text{б.о}}$	$\delta 5-6$	$\delta 5-4$
1	1	40,00	9,68	9,68	11,20	-13,6	0,0
2	1	100,00	10,88	10,75	12,42	-13,4	-1,2
3	1	160,00	11,90	11,55	14,12	-18,2	-2,9
4	1	240,00	13,14	12,74	16,43	-22,5	-3,0
5	1/1,6	40,00	8,89	8,89	10,02	-11,3	0,0
6	1/1,6	100,00	10,19	10,05	11,56	-13,1	-1,4
7	1/1,6	160,00	11,33	10,97	13,42	-18,3	-3,2
8	1/1,6	240,00	12,77	12,05	16,21	-25,7	-5,6
9	1/2	40,00	9,03	9,03	10,08	-10,4	0,0
10	1/2	100,00	10,31	10,04	11,82	-15,1	-2,6
11	1/2	160,00	11,29	10,86	13,88	-21,8	-3,8
12	1/2	240,00	12,92	12,08	16,86	-28,4	-6,5
13	1/2,4	40,00	9,30	9,30	10,32	-9,9	0,0
14	1/2,4	100,00	10,57	10,16	12,19	-16,7	-3,9
15	1/2,4	160,00	11,32	10,82	14,21	-23,9	-4,4
16	1/2,4	240,00	13,06	12,28	17,50	-29,8	-6,0
17	1/2,8	40,00	9,13	9,13	10,16	-10,1	0,0
18	1/2,8	100,00	10,61	10,31	12,27	-16,0	-2,8
19	1/2,8	160,00	11,56	11,13	14,58	-23,7	-3,7
20	1/2,8	240,00	13,14	12,50	17,72	-29,5	-4,9

По первому варианту:

При создании отечественных норм проектирования и рекомендаций по проектированию структурных конструкций в части назначения

относительной высоты покрытия (1/20–1/30) во главу угла ставилось достаточно высокое значение расчетной нагрузки, что указывает на маленький процент (1,2 %) разницы с результатами



оптимизированной конструкции, сечение которых подбиралось согласно нашей методике. Как только расчетная нагрузка становится достаточно небольшой ( $40 \text{ кг/м}^2$ ), разница вырастает до 9,2%.

На примере малой нагрузки следует отметить влияние соотношения сторон в плане на показатели оптимизации (при соотношении  $1/1 - 9,2\%$ , при соотношении  $1/2,8 - 5,7\%$ ). Такая разница обусловлена постепенным выключением из работы стороны плана, которая подвергается удлинению.

#### По второму варианту:

При включении в оптимизацию второго параметра (стрелы подъема покрытия), на понижении металлоёмкости покрытия сразу же влияет и расчетная нагрузка, и удлинение одной из сторон в плане. Таким образом, минимальная разница между оптимизируемым покрытием по заданной методике и неоптимизируемым покрытием 9,9 %. Максимальная разница – 29,8 %.

Из зависимостей, представленных на рисунках 2–9, был сформулирован массив данных для оценки влияния принятых параметров проектирования на результирующий показатель по удельному весу покрытия  $G$  и соотношению стрелы выгиба к короткой стороне пролета покрытия  $f/b$ .

Статистическая обработка массива данных выполняется с помощью функции «ЛИНЕЙН» (множественная линейная регрессия) в программе Microsoft EXCEL 2010. В таблицах 1–4 и на рисунках 2–9 представлен массив начальных данных, принятых для регрессионного анализа. Поиск искомой функции для значения удельного веса покрытия ( $G_{\text{расч}}$ ), относительной высоты покрытия ( $h/b$ ) и стрелы выгиба ( $f/b$ ) находим по формуле для множественной линейной регрессии:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2, \quad (2)$$

где  $y$  – результирующий показатель;

$x_1$  – значение нагрузки на покрытие ( $q$ );

$x_2$  – соотношение сторон покрытия в плане ( $a/b$ );

$b_1, b_2$  – искомые коэффициенты.

В таблице 5 представлены все 8 результирующих формул, позволяющих на основании варьируемых параметров проектирования ( $x_1, x_2$ ) вычислить оптимальные параметры конструкции.

#### Основные выводы

1. Сравнительный анализ возможных подходов к оптимизации (1-й и 2-й вариант оптимизации конструкции) показал значительное сокращение металлоемкости покрытие

Таблица 5. Результирующие формулы регрессионных зависимостей

№ п/п	Формула	Описание	Коэффициент корреляции
1	2	3	4
1	$G_{\text{расч}} = 8,56004 + 0,03523 \times q_{\text{расч}} - 0,38389 \times a/b$	Определение удельной массы покрытия, оптимизированной по одному параметру (относительная высота покрытия) с подбором центрально-сжатых стержней по действующим нормативным документам	0,99007
2	$G_{\text{расч}} = 8,52905 + 0,03384 \times q_{\text{расч}} - 0,2448 \times a/b$	Определение удельной массы покрытия, оптимизированной по одному параметру (относительная высота покрытия) с подбором центрально-сжатых стержней по уточненной методике, разработанной автором	0,99004
3	$h/b_{\text{расч}} = 0,03809 + 0,00019 \times q_{\text{расч}} - 0,0138 \times a/b$	Определение оптимальной относительной высоты покрытия, оптимизированной по одному параметру (относительная высота покрытия) с подбором центрально-сжатых стержней по действующим нормативным документам	0,91866

Окончание таблицы 5

1	2	3	4
4	$h / b_{расч} = 0,0393 + 0,00018 \times$ $\times q_{расч} - 0,0161 \times a / b$	Определение оптимальной относительной высоты покрытия, оптимизированной по одному параметру (относительная высота покрытия) с подбором центрально-сжатых стержней по уточненной методике, разработанной автором	0,91912
5	$G_{расч} = 8,24686 + 0,01873 \times$ $\times q_{расч} + 0,47052 \times a / b$	Определение удельной массы покрытия, оптимизированной по двум параметрам (относительная высота покрытия и относительная стрела выгиба) с подбором центрально-сжатых стержней по действующим нормативным документам	0,98861
6	$G_{расч} = 8,20306 + 0,01541 \times$ $\times q_{расч} + 0,73692 \times a / b$	Определение удельной массы покрытия, оптимизированной по двум параметрам (относительная высота покрытия и относительная стрела выгиба) с подбором центрально-сжатых стержней по уточненной методике, разработанной автором	0,98379
7	$h / b_{расч} = 0,22617 + 0,0000034 \times$ $\times q_{расч} - 0,0234 \times a / b$	Определение оптимальной относительной высоты покрытия, оптимизированной по двум параметрам (относительная высота покрытия и относительная стрела выгиба) с подбором центрально-сжатых стержней по действующим нормативным документам	0,54018
8	$h / b_{расч} = 0,233344 + 0,0000046 \times$ $\times q_{расч} - 0,0429 \times a / b$	Определение оптимальной относительной высоты покрытия, оптимизированной по двум параметрам (относительная высота покрытия и стрела выгиба) с подбором центрально-сжатых стержней по уточненной методике, разработанной автором	0,76918

(до 30 %), что обусловлено как изменением общей высоты покрытия, так и переходом геометрии покрытия от плоской к криволинейной форме. При этом наибольший эффект оптимизации достигается за счет перехода от плоской к искривленной форме покрытия (в пределах 10...30 %). Сохранение плоской формы покрытия и оптимизация лишь за счет изменения его относительной высоты позволяет снизить металлоемкость в пределах 1...9 %.

2. Разработанная ранее методика к уточнению несущей способности центрально-сжатых стержней структурного покрытия, учитывающая влияние конструктивного решения уз-

ловых соединений на их несущую способность из условия устойчивости, позволяет дополнительно снизить металлоемкость покрытия в пределах 5 %.

3. Построенная регрессионная модель и окончательные формулы к определению металлоемкости покрытия позволяют на стадии вариантного проектирования с учетом технических возможностей заказчика определить удельную массу и назначить оптимальные геометрические параметры проектируемого покрытия на нетиповом прямоугольном плане, формируемого из типового сортамента элементов. При этом экономия возрастает ещё в пределах 4 %.

## Литература

1. ДБН В.2.6-198:2014. Стальные конструкции. Нормы проектирования [Текст]. – На замену ДБН В.2.6-163:2010 в части раздела 1 и ДСТУ Б В.2.6-194:2013 ; введ. 2015-01-01. К. : Мінбуд України, 2014. – 198 с.
2. Рекомендации по проектированию структурных конструкций [Текст] / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М. : Стройиздат, 1984. – 303 с.
3. Трущев, А. Г. Пространственные металлические конструкции : учебное пособие. [Текст] / А. Г. Трущев. – М. : Стройиздат, 1983. – 216 с.
4. Хисамов, Р. И. Расчет и конструирование структурных покрытий [Текст] / Р. И. Хисамов. – Киев : Будивэльник, 1981. – 48 с.
5. Роменский, И. В. Основные подходы к назначению пространственных и жесткостных характеристик покрытия системы МАРХИ при регулировании параметров его напряженно-деформированного состояния [Текст] / И. В. Роменский, Т. И. Загоруйко, А. В. Мушанов. // Металлические конструкции. 2015. Том 21, № 1. С. 5–14.
6. Мушанов, В. Ф. Рациональные геометрические и жесткостные параметры большепролетного структурного покрытия [Текст] / В. Ф. Мушанов, И. В. Роменский, А. В. Мушанов // СУЗИС. 2016, № 2 (41). С.18–29.
7. Горохов, Е. В. Учёт конструктивных особенностей узловых соединений в расчетах устойчивости центрально сжатых стержней структурных покрытий [Текст] / Е. В. Горохов, А. В. Мушанов // Металлические конструкции, 2016. Том 24, № 3. С. 125–137.
8. Горохов, Е. В. Анализ влияния конструктивных особенностей узловых соединений на несущую способность центрально сжатых стержней структурных покрытий [Электронный ресурс] / Е. В. Горохов, А. В. Мушанов // Металлические конструкции. 2017. Том 23, № 3. С. 139–151. – Режим доступа : [http://donnasa.org/publish\\_house/journals/mk/2017-3/04\\_gorokhov\\_mushchanov.pdf](http://donnasa.org/publish_house/journals/mk/2017-3/04_gorokhov_mushchanov.pdf).
9. Горохов, Е. В. Оценка устойчивости центрально-сжатых стержней структурных покрытий с учётом конструктивных особенностей узловых соединений и нелинейной работы материала [Электронный ресурс] / Е. В. Горохов, А. В. Танасогло, А. В. Мушанов // Металлические конструкции. 2018, Том 24, № 3. С. 105–121. – Режим доступа : [http://donnasa.org/publish\\_house/journals/mk/2018-3/02\\_gorokhov\\_tanasoglo\\_mushanov.pdf](http://donnasa.org/publish_house/journals/mk/2018-3/02_gorokhov_tanasoglo_mushanov.pdf).
10. Мушанов, В. Ф. Оптимальное проектирование структурных покрытий на нетиповых планах [Электронный ресурс] / В. Ф. Мушанов, А. Н. Оржеховский, А. В. Мушанов // Научное сотрудничество и инновации : эл. сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф. в 2 ч. ; ч. 2. (29 апреля 2019 г., Белгород). – 114 с. – С. 75–79. – Режим доступа : <https://conf.bstu.ru/shared/attachments/200934>.

## References

1. DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Design Standards [Text]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2014. – 198 p. (in Russian)
2. V. A. Kucherenko CSRIBS Structural Design Guidelines [Text]. M. : Stroiizdat, 1984. 303 p. (in Russian)
3. Trushchev, A. G. Spatial metal structures: schoolbook [Text]. M. : Stroiizdat, 1983. 216 p. (in Russian)
4. Khisamov, R. I. Calculation and design of structural coatings [Text]. Kyiv : Budivelynyk, 1981. 48 p. (in Russian)
5. Romensky, I. V.; Zagoruyko, T. I.; Mushchanov, A. V. The main approaches to the assignment of spatial and stiffness characteristics of the coating of the MARKHI system when adjusting the parameters of its stress-strain state [Text]. In: *Metal constructions*. 2015. Vol 21, № 1. P.5–14. (in Russian)
6. Mushchanov, V. F.; Romensky, I. V.; Mushchanov, A. V. Rational geometric and stiffness parameters of a long-span structural coating [Text]. In: *CUBS*. 2016, №2 (41). P.18–29. (in Russian)
7. Gorokhov, Ye. V.; Mushchanov, A. V. Consideration of design features of nodal joints in stability calculations of centrally compressed structural coating rods [Text]. In: *Metal constructions*. 2016. Vol. 24, № 3. P. 125–137. (in Russian)
8. Gorokhov, Ye. V.; Mushchanov, A. V. Analysis of the influence of structural features of nodal joints on the bearing capacity of centrally compressed structural coating rods [Electronic resource]. In: *Metal constructions*. 2017. Vol. 23, № 3. P. 139–151. Access mode : [http://donnasa.org/publish\\_house/journals/mk/2017-3/04\\_gorokhov\\_mushchanov.pdf](http://donnasa.org/publish_house/journals/mk/2017-3/04_gorokhov_mushchanov.pdf). (in Russian)
9. Gorokhov, Ye. V.; Tanasoglo, A. V.; Mushchanov, A. V. Stability assessment of centrally compressed structural coating rods taking into account design features of nodal joints and non-linear material operation [Electronic resource]. In: *Metal constructions*. 2018, Vol. 24, № 3, P. 105–121. Access mode : [http://donnasa.org/publish\\_house/journals/mk/2018-3/02\\_gorokhov\\_tanasoglo\\_mushanov.pdf](http://donnasa.org/publish_house/journals/mk/2018-3/02_gorokhov_tanasoglo_mushanov.pdf). (in Russian)
10. Mushchanov, V. F.; Orzhekhovskiy, A. N.; Mushchanov, A. V. Optimal design of structural coatings on non-standard layouts [Electronic resource]. In: *High technology and innovation: electronic proceedings of the international scientific and technical conference* in 2 parts; part 2, 114 p. P. 75–79. Access mode: <https://conf.bstu.ru/shared/attachments/200934>. (in Russian)
11. Buijsen, Michel. Dynamic Space Frame Structures [Electronic resource]. 2011. 96 p. Access mode : [http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/sadbtreports/1011nj/Dynamic\\_Space\\_Frame\\_Structures\\_Michel\\_Buijsen.pdf](http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/sadbtreports/1011nj/Dynamic_Space_Frame_Structures_Michel_Buijsen.pdf). (in English)

11. Buijsen, Michel. Dynamic Space Frame Structures [Электронный ресурс] / Michel Buijsen. 2011. 96 p. – Режим доступа : [http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/sadddbtreports/1011nj/Dynamic\\_Space\\_Frame\\_Structures\\_Michel\\_Buijsen.pdf](http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/sadddbtreports/1011nj/Dynamic_Space_Frame_Structures_Michel_Buijsen.pdf).
12. Rosen, A. A general nonlinear structural model of a multirod (multibeam) system – I. Theoretical derivations [Текст] / A. Rosen, M. Sabag, M. Givoli // *Computers & Structures*. 1996. Volume 61, Issue 4. P. 617–632.
13. Antoniou, N. Designing long-span steel girders by applying displacement control concepts [Текст] / N. Antoniou, Th. N. Nikolaidis, C. C. Baniotopoulou // *Engineering Structures*. 2014. Volume 59. P. 21–27.
14. Edwin, Gaylord. Structural engineering [Текст] / Gaylord Edwin, Gaylord Charles, Stallmeyer James. New York : The McGraw Hill Companies, 1997. – 1024 p.
15. Chilton, John. Space Grid Structures [Текст] / John Chilton. – Great Britain : Architectural Press, 2000. – 180 p.
12. Rosen, A.; Sabag, M.; Givoli, M. A general nonlinear structural model of a multirod (multibeam) system – I. Theoretical derivations [Text]. In: *Computers & Structures*. 1996. Volume 61, Issue 4. P. 617–632. (in English)
13. Antoniou, N.; Nikolaidis, Th. N.; Baniotopoulou, C. C. Designing long-span steel girders by applying displacement control concepts [Text]. In: *Engineering Structures*. 2014. Volume 59. P. 21–27. (in English)
14. Edwin, Gaylord; Charles, Gaylord; James, Stallmeyer. Structural engineering [Text]. New York : The McGraw Hill Companies, 1997. 1024 p. (in English)
15. Chilton, John. Space Grid Structures [Text]. Great Britain : Architectural Press, 2000. 180 p. (in English)

**Мущанов Александр Владимирович** – ассистент кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: расчет и проектирование пространственных металлических конструкций.

**Мущанов Олександр Володимирович** – асистент кафедри металевих конструкцій і споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розрахунок і проектування просторових металевих конструкцій.

**Mushchanov Alexander** – assistant, Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: analysis and design of spatial metal structures.