



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2015, ТОМ 21, НОМЕР 4, 191–206

УДК 624.041.1+624.971

(15)-0337-1

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СТРУКТУРНОГО ПОКРИТТЯ НА ПРЯМОКУТНОМУ ПЛАНІ

Є. В. Горохов¹, В. П. Мушчанов², І. В. Роменський³, О. В. Мушчанов⁴

Донбаська національна академія будівництва і архітектури,

2, вул. Державіна, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.

E-mail: ¹ mailbox@donnasa.ru, ² volodymyr.mushchanov@mail.ru, ³ riv_2005@mail.ru,

⁴ mushhanov93@gmail.com

Отримана 03 листопада 2015; прийнята 27 листопада 2015.

Анотація. У статті розглянуто додаткові можливості перекриття прямокутних в плані великопрогонових покриттів з нестандартним співвідношенням сторін за допомогою структурного покриття типу МАРХІ. Наведено результати виконаного аналізу особливостей конструктивного рішення, прикладів використання основних методів розрахунку, вимог вітчизняних і зарубіжних нормативних документів щодо їх проектування і конструювання. На основі результатів аналізу питання виділені завдання, що виникають при проектуванні структурних конструкцій на нетипових планах. Запропоновано до дослідження нетипові співвідношення сторін структурного покриття в плані (співвідношення сторін a/b) і відповідні підходи, що забезпечують регулювання напружено-деформованого стану структурного покриття за допомогою зміни основних геометричних параметрів досліджуваної конструкції. Розглянуто і враховано фактор впливу різних значень снігового навантаження на напружено-деформований стан покриття, встановлено загальні закономірності зміни напружено-деформованого стану покриття на прямокутному нетиповому плані (із співвідношенням довжин сторін $1 / 1.6...1 / 2.4$) залежно від зміни запропонованих геометричних і інших значущих параметрів проектування.

Ключові слова: великопрогонові структурні покриття, система МАРХІ, напружено-деформований стан, типізація, уніфікація.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТРУКТУРНОГО ПОКРЫТИЯ НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ

Е. В. Горохов¹, В. Ф. Мушчанов², И. В. Роменский³, А. В. Мушчанов⁴

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,

2, ул. Державина, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.

E-mail: ¹ mailbox@donnasa.ru, ² volodymyr.mushchanov@mail.ru, ³ riv_2005@mail.ru,

⁴ mushhanov93@gmail.com

Получена 03 ноября 2015; принята 27 ноября 2015.

Аннотация. В статье рассмотрены дополнительные возможности перекрытия прямоугольных в плане большепролетных покрытий с нестандартным соотношением сторон с помощью структурного покрытия типа МАРХИ. Приведены результаты выполненного анализа особенностей конструктивного решения, примеров использования основных методов расчета, требований отечественных и зарубежных нормативных документов по их проектированию и конструированию. На основе результатов анализа вопроса выделены задачи, возникающие при проектировании структурных конструкций на

нетиповых планах. Предложены к исследованию нетиповые соотношения сторон структурного покрытия в плане (соотношение сторон a/b) и соответствующие подходы, обеспечивающие регулирование напряженно-деформированного состояния структурного покрытия с помощью изменения основных геометрических параметров исследуемой конструкции. Рассмотрен и учтен фактор влияния различных значений снеговой нагрузки на напряженно-деформированное состояние покрытия, установлены общие закономерности изменения напряженно-деформированного состояния покрытия на прямоугольном нетиповом плане (с соотношением длин сторон $1/1.6...1/2.4$) в зависимости от изменения предложенных геометрических и других значимых параметров проектирования.

Ключевые слова: большепролетные структурные покрытия, система МАРХИ, напряженно-деформированное состояние, типизация, унификация.

INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS ON THE STRESS-STRAIN STATE OF STRUCTURAL ROOF ON A RECTANGULAR PLAN

Yevgen Gorokhov¹, Volodymyr Mushchanov², Igor Romenskii³, Alexander Muschanov⁴

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makiyivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.*

*E-mail: ¹ mailbox@donnasa.ru, ² volodymyr.mushchanov@mail.ru, ³ riv_2005@mail.ru,
⁴ mushhanov93@gmail.com*

Received 03 November 2015; accepted 27 November 2015.

Abstract. The article deals with the additional features overlapping rectangular span roofs with non-standard aspect ratio with the help of the structural type of the MARCHI system. The results of the analysis features of constructive solutions, examples of use, basic calculation methods, the requirements of domestic and foreign regulatory documents on their design and construction have been given. Based on the results of the analysis the issue it has been highlighted the problems arising in the design of structural designs on non-standard plans. To the study of atypical aspect ratio of the structural coverage in terms of (the aspect ratio a/b) and appropriate approaches to ensure that the regulation of the stress-strain state of structural system by varying the basic geometric parameters of the study design have been suggested. It has been considered and taken into account the factor of the impact of various snow load value on the stress-strain state of the roof, set the overall patterns of change in the stress-strain roof status on a rectangular non-standard terms (with the ratio of the lengths of the sides $1/1.6...1/2.4$), depending on the changes proposed by the geometrical and other important design parameters.

Keywords: large-span structure roof system of MARCHI, the stress-strain state, typification, unification.

Анализ состояния вопроса

Поиски современных архитектурных форм большой выразительности и универсальности, образуемых на основе многократно повторяющихся элементов, привели к созданию стержневых систем нового типа, к так называемым структурам.

Эти системы, имея в своей основе «кристаллическое» строение, сходны с некоторыми весьма прочными образованиями органической природы. Практика отечественного и зарубежного строительства имеет немало примеров

применения структурных конструкций в виде оболочек, складок, куполов [2].

Структурные конструкции применяются главным образом в виде плоских покрытий, стержневых плит [3]. Сначала они применялись в строительстве из параллельно расположенных перекрестных ферм двух направлений. В своем дальнейшем развитии перекрестные системы перешли в структурные конструкции за счет сведения конструктивного решения до минимального числа типовых элементов (узла и стержня) [1].

Эти конструкции изготавливаются из стали, алюминия, дерева, в некоторых случаях из пластмасс. В отечественном гражданском строительстве нашли также применение плиты регулярного строения из армоцементных элементов [2].

Стержневые плиты, применяемые в структурных конструкциях, можно разделить на следующие группы (рис. 1):

- 1) стержневые плиты типа перекрестных ферм двух направлений с поясными сетками из квадратных ячеек;
- 2) стержневые плиты типа перекрестных ферм трех направлений.

Существующие узловые решения структурных конструкций по видам применяемых в них соединений можно подразделить на 3 группы [1]:

1-я группа: сварочные узловые соединения – изготавливаемые на строительной площадке («ЦНИИСК», «Okta Platt», «SDS»);

2-я группа: болтовые узловые соединения – исключают сварку как в заводских, так и в монтажных условиях («КИСИ», «Unistat», «Triodetik»);

3-я группа: комбинированные соединения – сварка выполняется в заводских условиях, а сборка узла – в построчных условиях на болтах («МАРХИ», «MERO», «Veimar»).

В рамках работы из различных вариантов была принята конструктивная форма системы МАРХИ. Конструкции системы МАРХИ появились в СССР в 70-х годах XX столетия как плод труда ученых и специалистов кафедры

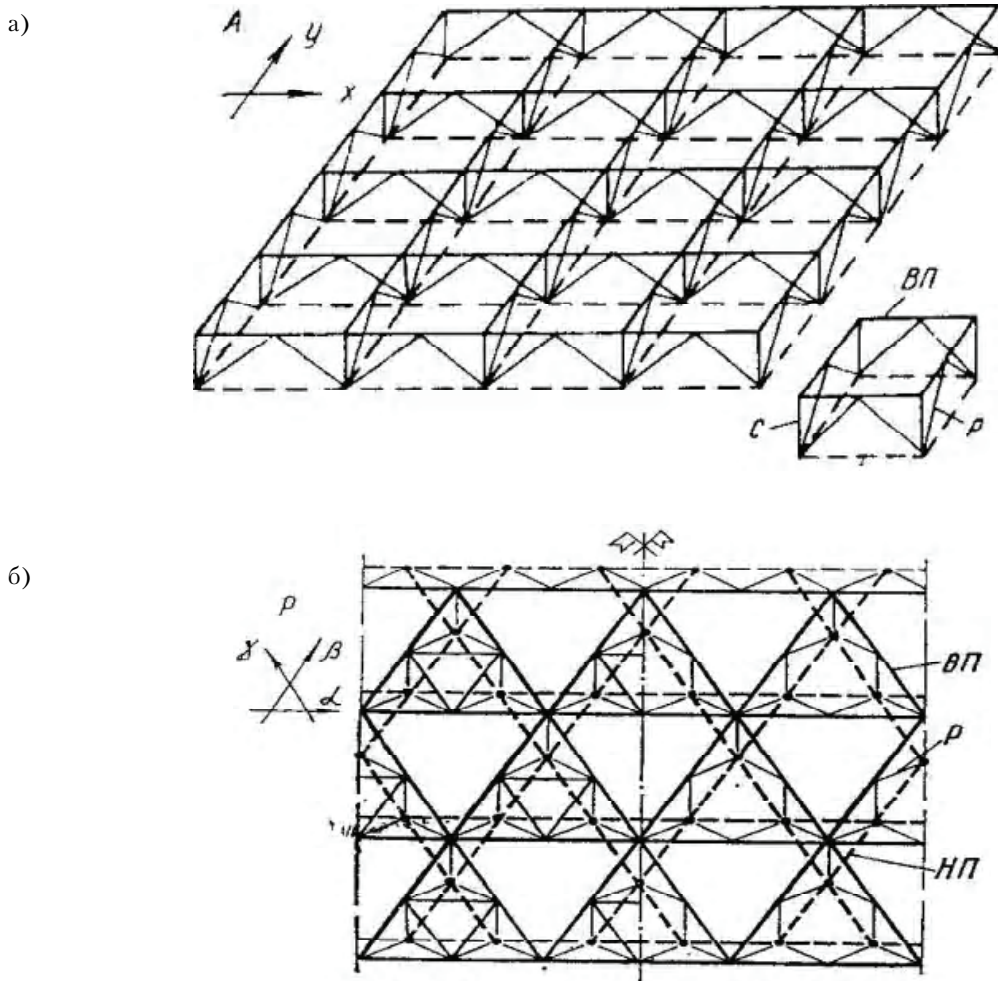


Рисунок 1. Виды стержневых плит: а) 1-я группа; б) 2-я группа.

инженерных конструкций Московского архитектурного института. Конструкторами-архитекторами был разработан способ строительства сборных сооружений практически любой формы, мобильных, экономичных и эстетически привлекательных [4].

В основе аналитического решения задачи напряженно-деформированного состояния (НДС) структурных покрытий лежит теория изгиба тонких пластинок, основным уравнением которого является уравнение Софи-Жермен:

$$D \cdot \nabla^4 \cdot w - q = 0, \quad (1)$$

где $D = \frac{Et^2}{12(1-\mu^2)}$;

t – эквивалентная толщина пластины;

∇ – оператор Лапласа;

$w(x; y)$ – функция прогиба пластины;

$q(x; y)$ – функция нагрузки, действующей на пластину.

Конкретные решения получаем от различных условий закрепления на контуре пластинки. Указанные решения лежат в основе инженерного метода расчета структурных покрытий, изложенного в работах А. Г. Трущева [25].

Помимо приближенных методов расчета Трущева, были проанализированы также методики, изложенные в работах Р. И. Хисамова [1], а именно:

1. Приближенный расчет структурных пластинок покрытия с использованием решений пластинок. Этот метод соответствует методу, изложенному у Трущева [25].
2. Приближенный расчет структурных конструкций как перекрестно-балочных систем. Метод сводится к составлению n числа линейных уравнений типа

$$\sum (\omega_{-2} - 4\omega_{-1} + 6\omega_0 - 4\omega_1 + \omega_2) = \frac{qa^6}{EI}, \quad (2)$$

$(i = x, y)$

$$\sum (\omega_{-2} - 4\omega_{-1} + 6\omega_0 - 4\omega_1 + \omega_2) = \frac{\sqrt{3}qa^5}{2EI} \quad (3)$$

$(i = \alpha, \beta, \gamma)$

и их решению относительно прогибов узлов поясных сеток. Анализируемый подход к расчету в большей степени, на наш взгляд, применим для систем с небольшим проле-

том, поскольку дискретность системы (соотношение размеров ячейки и пролета) в этом случае имеет гораздо большее значение, чем для рассматриваемых нами систем структурных покрытий на большепролетных планах.

3. Приближенный расчет структурных покрытий в упруго-пластической стадии работы. В данной работе этот метод рекомендован для случаев, когда расчет структурных конструкций с возможным развитием пластических деформаций в пределах одной, наиболее загруженной, панели фермы имеет в большей степени теоретическое значение, поскольку приложение к конструкции знакопеременных нагрузок может в дальнейшем привести к исчерпанию площадки текучести и последующего хрупкого разрушения элемента конструкции. Указанный характер работы элемента конструкции является недопустимым с точки зрения классификации ее работоспособности и, несмотря на многосвязность системы, в дальнейшем будет классифицироваться как ограничено работоспособный, требующий восстановления первоначально несущей способности.

Несмотря на положительные стороны рассматриваемого конструктивного решения, наличие сортамента типовых элементов ограничивает применение системы МАРХИ лишь типовыми планами (от 12×12 до 36×36 м).

В связи с этим одной из задач, которая требует своего решения, является обоснование экспериментально расчетной сетки для конструкции в виде изгибаемой пластины, применение которой в дальнейшем позволит использовать ранее систему относительных параметров при установлении зависимостей НДС структурного покрытия на нетиповом плане.

Объектом исследования является структурная несущая конструкция большепролетного покрытия с размерами в плане $68,4 \times 45,0$ м (рис. 2) [6].

В качестве покрытия используется структурная плита типа МАРХИ. Несущими элементами структурной плиты являются трубы, соединенные в узлах на болтах с помощью специальных узловых элементов (коннекторов).

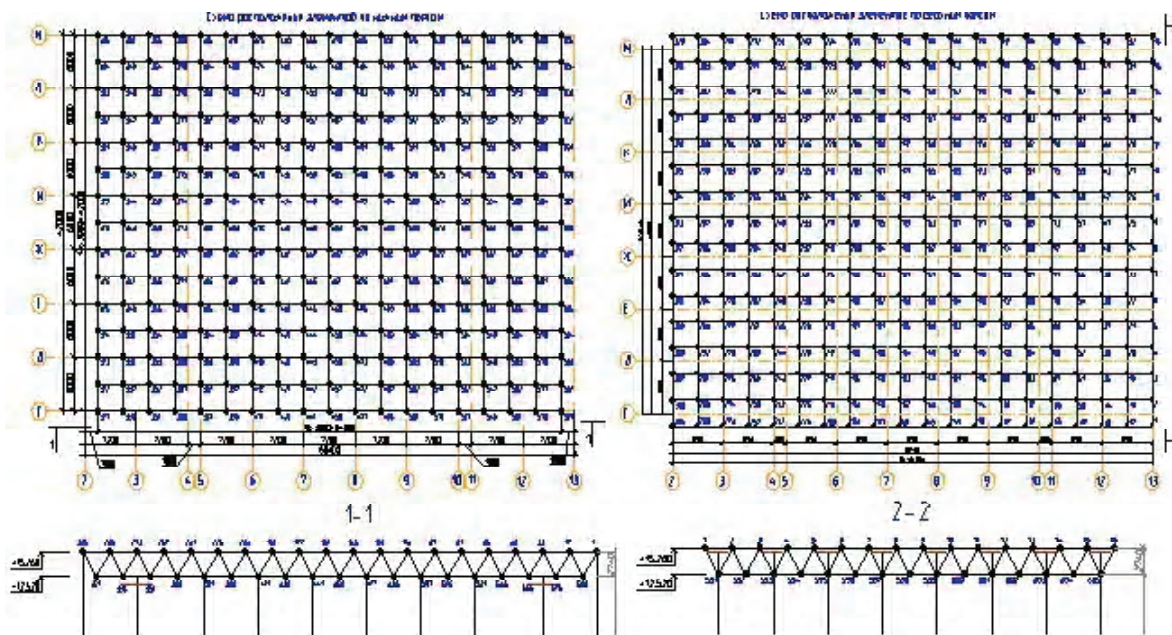


Рисунок 2. Исследуемое структурное покрытие.

В качестве элементарной ячейки структуры базового варианта принята пирамида с основанием в виде прямоугольника $3,0 \times 3,6$ м (что соответствует шагу колонн вдоль и поперек здания) и ребрами, равными $3,6$ м. Высота структурного покрытия составляет $2,73$ м, угол наклона ребра $\alpha = 49,40^\circ$ (рис. 3) [6]. Все выбранные сечения труб были приняты по [7, 8].

Система МАРХИ обладает множеством положительных качеств и является надежным и экономически выгодным вариантом покрытия [9]. Однако существует определенный ряд проблем, с которыми возможно столкновение при выборе в качестве покрытия системы МАРХИ:

- 1) использование системы МАРХИ при нестандартных пролетах приводит к геометрическому изменению элементарной ячейки и соответственно нестандартного шага колонн;

- 2) из-за нетрадиционного соотношения размеров объекта в плане (для частного случая, рассматриваемого далее, $68,4 \times 42,0 \approx 1,6 : 1,0$) в узлах возникают большие усилия. И даже использование высокопрочных болтов из наиболее прочных марок стали, применяющихся в данный момент в Украине – 40Х «селект», не позволяет решить эту проблему.

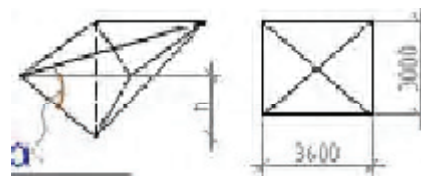


Рисунок 3. Элементарная ячейка покрытия.

Выполненный обзор литературы подчинен решению основной задачи, рассматриваемой в данной статье, а именно: установлению таких геометрических параметров проектируемой конструкции на нетиповом плане, которые обеспечили бы возможность использования типовых элементов системы МАРХИ (стержней и вставок-коннекторов).

Из множества трудов отечественных и зарубежных авторов, посвященных расчету, проектированию и эксплуатации структурных покрытий прежде всего следует выделить работы, посвященные:

- нормативному обеспечению процесса проектирования [10, 7, 8];
- изложению общих принципов компоновки, расчета и проектирования рассматриваемых конструкций [3, 11–17, 31–33];

- численному исследованию особенностей напряженно-деформированного состояния большепролетных структурных конструкций, в том числе на нетиповом плане, с учетом геометрических несовершенств и других значимых факторов [6, 18–24, 35];
- разработке аналитических принципов расчета, базирующихся на теории изгиба тонких плит [25–28, 34];
- типизации и унификации конструктивных элементов структурных покрытий [5, 9, 27].

Выполненный обзор и анализ проведенных ранее исследований позволил сформулировать основную задачу исследования, результаты которого представлены в данной статье, а именно: *отыскание таких геометрических параметров типовой ячейки покрытия, которые могли бы удовлетворять максимальной несущей способности высокопрочного болта 40Х «селект» (100 т), являющегося одним из основных типовых конструктивных элементов системы МАРХИ, регламентирующего его несущую способность.*

Для достижения цели, описанной выше, в работе используется как аналитический, так и численный расчет напряженно-деформированного состояния конструкций.

Аналитический метод расчета основывается на приближенном методе расчета изгибаемых тонких плит и выполняется в соответствии с методикой, предложенной в изученных нами отечественных работах [27] и зарубежных [26, 28]. Однако в качестве фундаментальных работ в этом направлении, конечно, следует считать работу А. Г. Трущева [25].

В связи с этим на основе результатов анализа, представленного в I главе работы, сформулированы:

цель исследования – на основе установленных зависимостей напряженно-деформированного состояния структурных конструкций от значимых параметров проектирования предложить подходы к их формообразованию, обеспечивающие возможность использования типовых конструктивных элементов (стержней, соединительных элементов) при перекрытии прямоугольных планов с нетиповым соотношением сторон;
объект исследования – напряженно-деформированное состояние структурных кон-

струкций покрытий на нетиповых прямоугольных планах.

Поставленная цель исследования достигается путем решения основной **задачи исследования**:

- установить общие закономерности изменения напряженно-деформированного состояния покрытия на прямоугольном нетиповом плане (с соотношением длин сторон 1 / 1.6...1 / 2.4) в зависимости от изменения значимых параметров проектирования.

Основная часть

Традиционно изложенные общие рекомендации принципов компоновки, расчета и проектирования рассматриваемых структурных конструкций [1–6] относятся либо к проектированию на квадратном плане, либо близком к квадратному (соотношение сторон не более 1,5 : 1,0).

Вследствие этого формируются цели и задачи данной работы, а именно:

- 1) более подробное изучение влияния соотношения сторон на параметры напряженно-деформированного состояния (НДС);
- 2) на основе теории изгиба тонких пластин получить значения безразмерных геометрических параметров для проектируемой структурной конструкции с соотношением сторон более 1,5 : 1,0.

Для получения системы безразмерных параметров рассмотрим прямоугольную тонкую пластину с соотношением сторон $a : b$, толщиной t , шарнирно закрепленной по контуру и нагруженной равномерно распределенной нагрузкой q_0 (рис. 4б). Как известно, в основе решения подобных задач лежит уравнение Софи-Жермен:

$$\nabla^4 w = \frac{d^4 w}{dx^4} + 2 \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} + \frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{q(x, y)}{D}. \quad (4)$$

Для решения уравнения зададимся функцией прогиба:

$$w = w_0 \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b}. \quad (5)$$

Предлагаемая функция прогиба удовлетворяет условиям на контуре, соответствующем шарнирно-неподвижному закреплению ($w = 0$; $w \neq 0$). Подставим 4-е производные от функции прогиба в уравнение (4) (рис. 5):

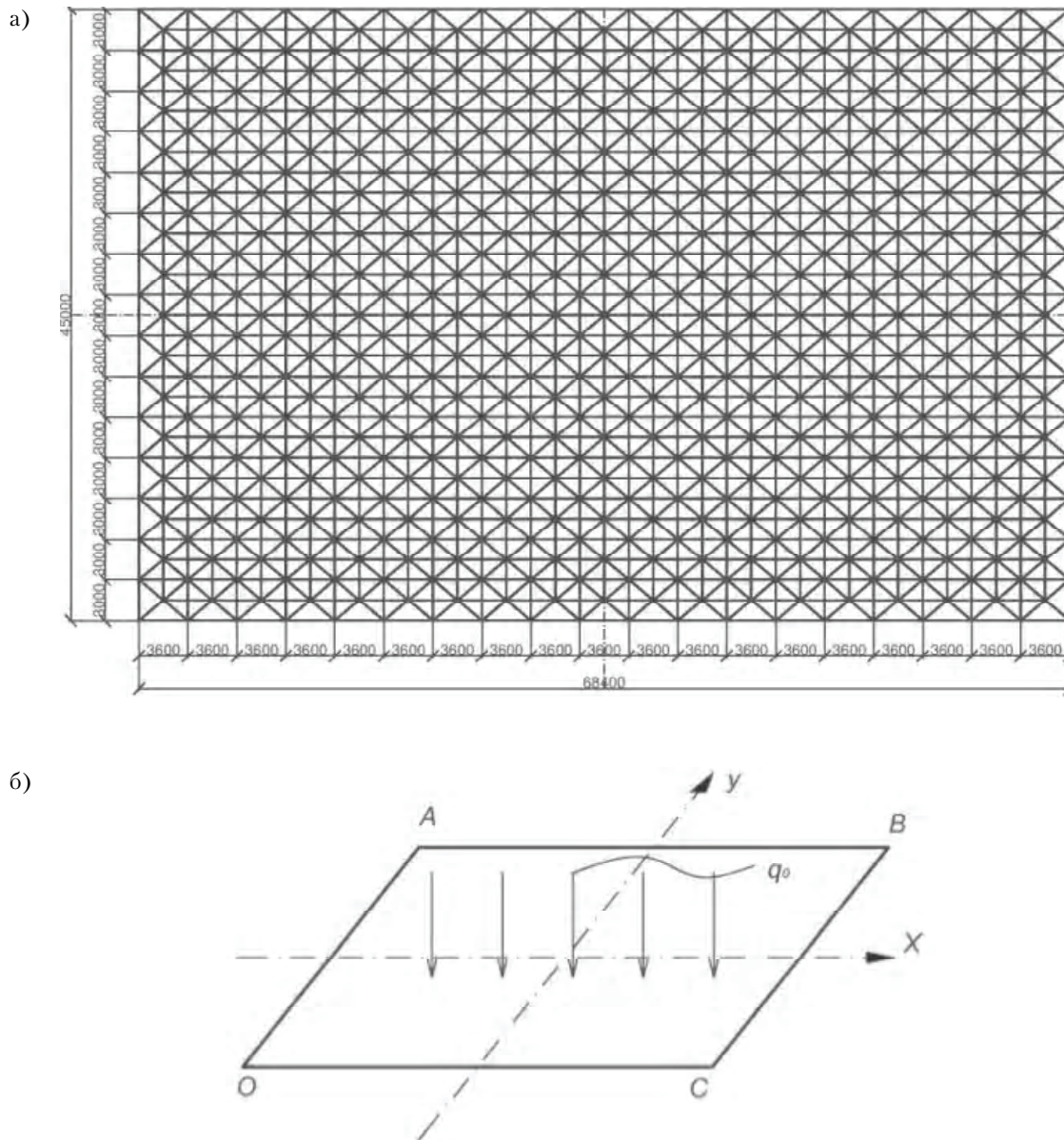


Рисунок 4. Исследуемое структурное покрытие (68,4×45,0 м): а) рассчитываемая структурная конструкция; б) эквивалентная плита.

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{\pi^4 W_0}{16a^4} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b};$$

$$\frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{\pi^4 W_0}{16b^4} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b};$$

$$\frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} = \frac{\pi^4 W_0}{16a^2 b^2} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b};$$

$$\frac{d^4 w}{dy^2 dx^2} = \frac{\pi^4 W_0}{16a^2 b^2} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b};$$

запишем уравнение в развернутом виде:

$$\nabla^4 w = \frac{\pi^4 W_0}{16a^4} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b} +$$

$$+ 2 \left(\frac{\pi^4 W_0}{16a^2 b^2} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b} \right) +$$

$$+ \frac{\pi^4 W_0}{16a^4} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b} \quad (6)$$

и из его решения получим значение постоянной w_0 (7). Для центра покрытия, где прогиб

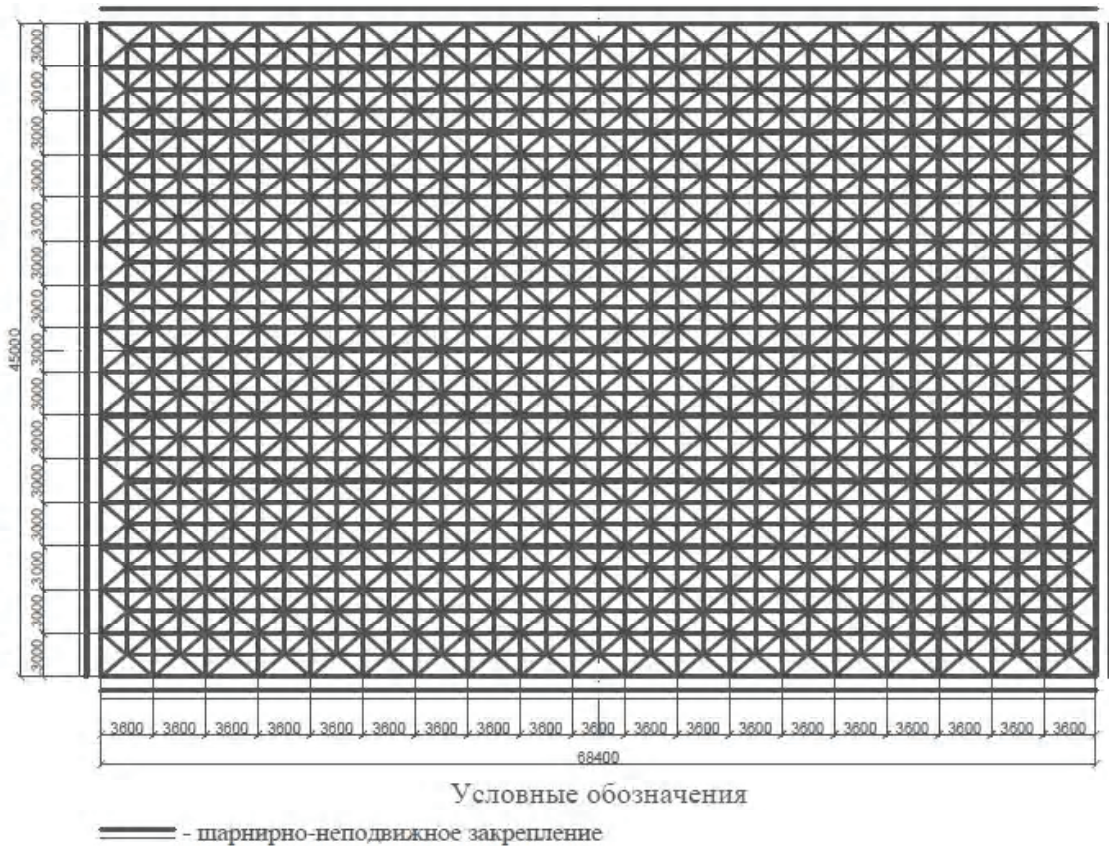


Рисунок 5. Исследуемая структурная конструкция (шарнирно-неподвижное закрепление).

имеет максимальное значение (при $x=0; y=0$), выражение упрощается к виду:

$$w_0 = \frac{16q_0}{\pi^4 D} \left(\frac{a^4 b^4}{(a^2 + b^2)^2} \right). \quad (7)$$

Анализируя полученное выражение, можно указать, что прогиб в центре покрытия линейно зависит от величин q_0 и D и нелинейно от геометрического параметра \bar{S}_1 :

$$\bar{S}_1 = \frac{a^4 b^4}{(a^2 + b^2)^2}. \quad (7a)$$

Используя 2-е производные от функции прогиба:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = -\frac{\pi^2 W_0}{4a^2} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b};$$

$$\frac{d^2 w}{dy^2} = -\frac{\pi^2 W_0}{4ab^2} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b};$$

получим выражения для расчета изгибающих моментов M_x и M_y в общем виде:

$$M_x(x, y) = -D \left(\frac{d^2}{dx^2} W(x, y) + \mu \frac{d^2}{dy^2} W(x, y) \right);$$

$$M_y(x, y) = -D \left(\frac{d^2}{dy^2} W(x, y) + \mu \frac{d^2}{dx^2} W(x, y) \right);$$

преобразованные для центра покрытия (при $x=0; y=0$):

$$M_x = D \frac{\pi^2 W_0}{4} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{\mu}{b^2} \right) = \frac{4q_0}{\pi^2} \cdot \frac{(b^2 + \mu a^2)(a^2 + b^2)}{a^6 b^6};$$

$$M_y = D \frac{\pi^2 W_0}{4} \left(\frac{1}{b^2} + \frac{\mu}{a^2} \right) = \frac{4q_0}{\pi^2} \cdot \frac{(a^2 + \mu b^2)(a^2 + b^2)}{a^6 b^6}.$$

В формулах (7б) и (7в) приведены значения геометрических параметров, связанных, соответственно, с изгибающими моментами M_x и M_y , вычисленными для центра покрытия.

$$\bar{S}_2 = \frac{(b^2 + \mu a^2)(a^2 + b^2)^2}{a^6 b^6} \quad (7б)$$

$$\bar{S}_3 = \frac{(a^2 + \mu b^2)(a^2 + b^2)^2}{a^6 b^6} \quad (7в)$$

Примечание: при действии равномерно распределенной нагрузки значения поперечных сил Q_x и Q_y , а также крутящего момента M_{xy} равны нулю.

Расчет структурного покрытия базируется на теории изгиба тонких пластин. Вместе с тем численные исследования для рассматриваемого структурного покрытия выполняются средствами МКЭ.

Аналитический метод расчета основывается на приближенном методе расчета изгибаемых тонких плит и выполняется в соответствии с методикой, предложенной в изученных нами отечественных работах [27] и зарубежных работ [26, 28]. Однако в качестве фундаментальных работ в этом направлении, конечно, следует считать работу А. Г. Трущева [25].

Численные исследования в данном исследовании были выполнены с помощью программного комплекса «SCAD» – вычислительного комплекса для прочностного анализа конструкций методом конечных элементов [18]. Единая графическая среда синтеза расчетной схемы и анализа результатов обеспечивает неограниченные возможности моделирования расчетных схем от самых простых до самых сложных конструкций [24].

На основе анализа значимых факторов, от которых зависит НДС исследуемой конструкции, были выделены 3 фактора:

- q – величина суммарной равномерно распределенной нагрузки, действующей на покрытие;
- соотношение сторон, описываемых параметрами $S_1 - S_3$;
- приведенная толщина покрытия t^* , зависящая от соотношения h/l , где h – высота ячейки структурного покрытия, а l – пролет покрытия.

Учитывая нетрадиционные параметры исследуемой конструкции, рассмотрим влияние вышеперечисленных факторов на основные параметры НДС покрытия (W, M_x, M_y).

На рисунках 6, 7 и 8 приведены зависимости параметров НДС от изменения нагрузки q и геометрических параметров $S_1 - S_3$ на неподвижном опорном контуре. Следует отметить, что основная цель исследований (обеспечение прочности и жесткости проектируемого покры-

тия при использовании стандартных элементов системы МАРХИ) достигается при всем диапазоне исследуемых нагрузок и соотношений длин сторон прямоугольного плана покрытия.

Примечание: величины эквивалентных моментов M_x и M_y для центра покрытия были найдены по формулам:

$$M_x = \frac{M_{max} \cdot h}{\pm 2,1 \cdot a_{дл}};$$

$$M_y = \frac{M_{max} \cdot h}{\pm 2,1 \cdot a_{кор}}.$$

Общие выводы

Анализ зависимостей, представленных на рис. 6–8, позволяет сделать следующие выводы:

1. Изменение соотношения сторон для покрытия на нетиповом прямоугольном плане в пределах $a/b = 1.6...2.4$ не оказывает существенного влияния на НДС покрытия и приводит к изменению относительного прогиба в пределах 1,5...5,5 % по прогибам и 3...15 % – изменению изгибающих моментов.
2. Гораздо большее значение для изменения параметров НДС имеет изменение нагрузки. При этом следует отметить: изменение основных параметров НДС происходит практически прямо пропорционально изменению нагрузки, что в целом соответствует аналитическим предпосылкам, принятым в теории изгиба тонких пластин, описываемым уравнением Софи-Жермен.
3. Вместе с тем следует отметить проявление нелинейных эффектов зависимости между параметрами НДС и геометрическими параметрами при больших значениях расчетных нагрузок.
4. Дальнейшим развитием представленных в статье результатов исследований следует считать учет возможного влияния податливости опор, обусловленного как применяемыми проектными решениями (конструкции опор, конструктивное решение сопряжения опорной и пролетной частей конструкции), так и соотношением жесткостей пролетной и опорной частей структурного покрытия.

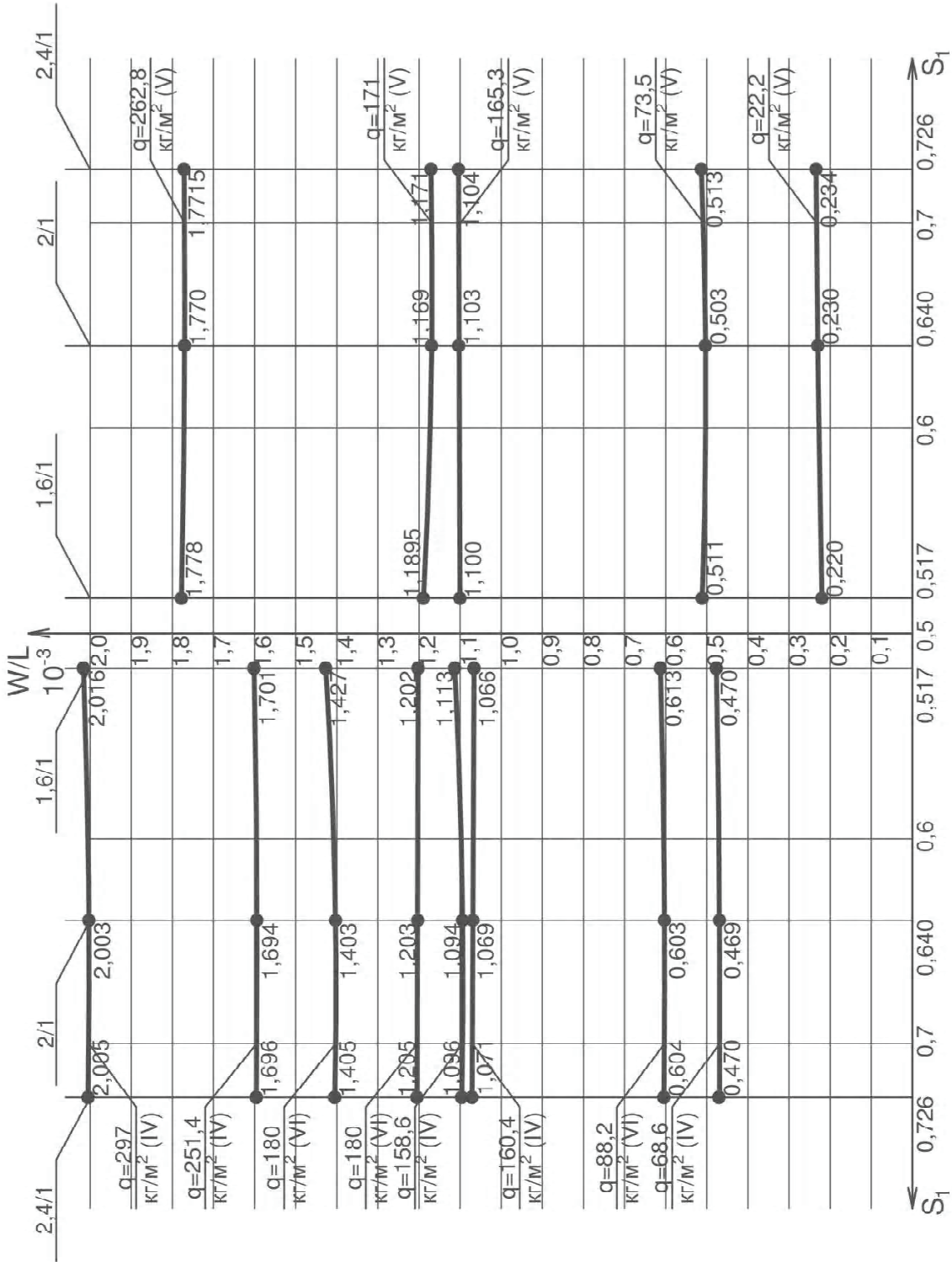


Рисунок 6. Относительный прогиб структурного покрытия W/L .

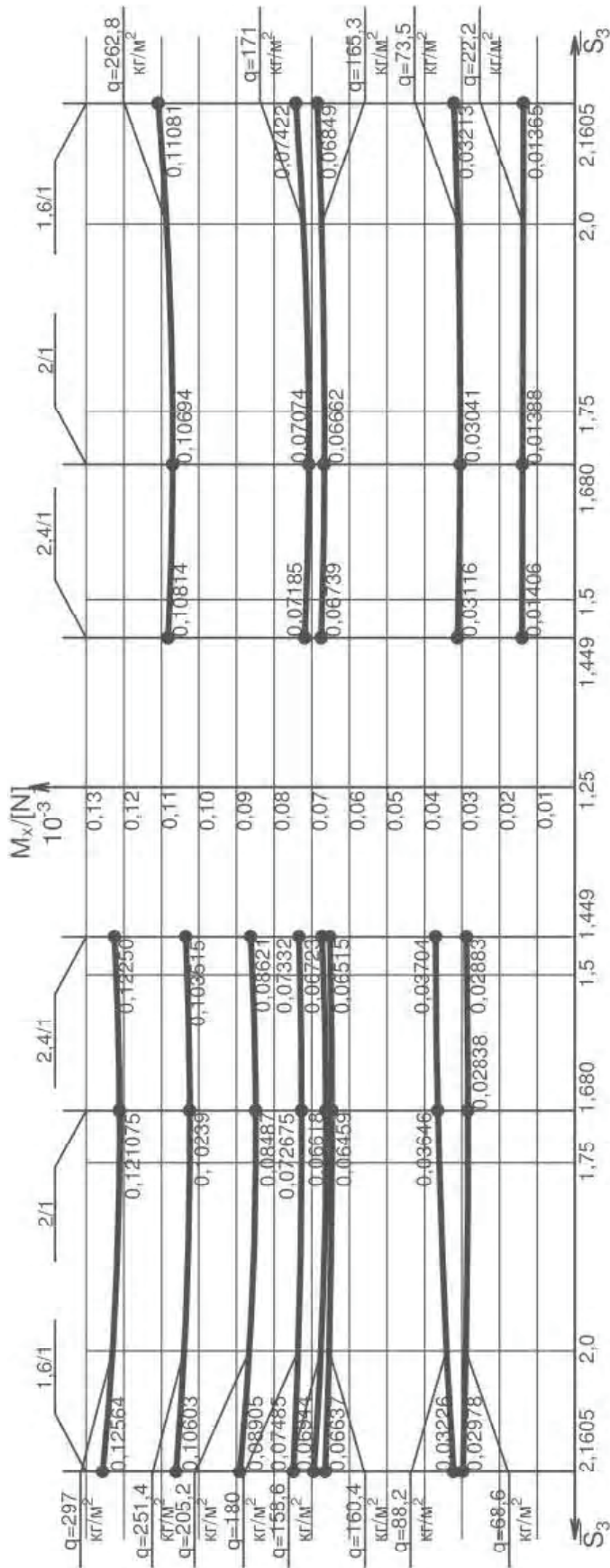


Рисунок 7. Относительный эквивалентный момент структурного покрытия $M_x / [N]$.

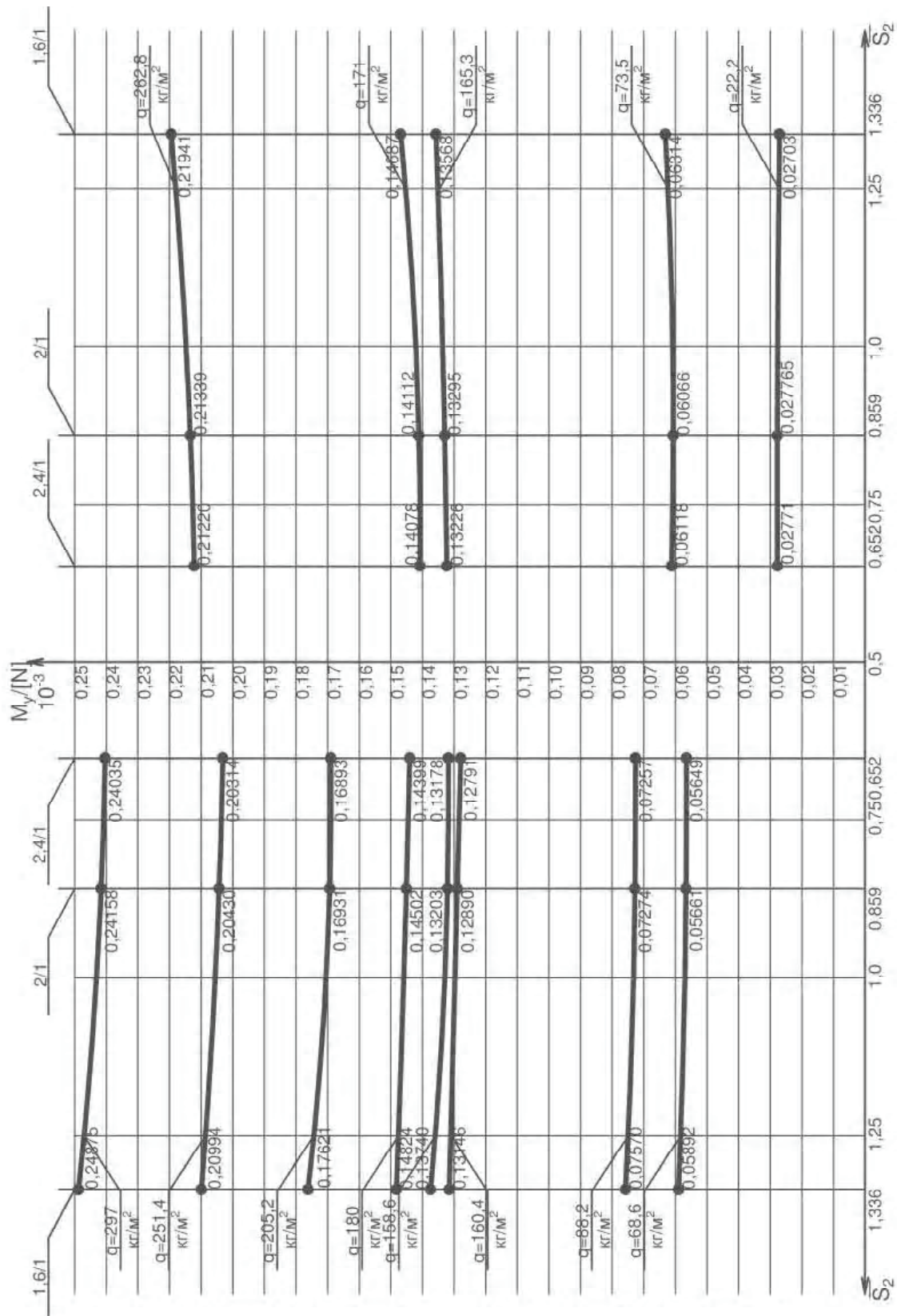


Рисунок 8. Относительный эквивалентный момент структурного покрытия $M_y / [N]$.

Литература

1. Хисамов, Р. И. Расчет и конструирование структурных покрытий [Текст] / Р. И. Хисамов. – Киев : Будивельник, 1981. – 48 с.
2. Рекомендации по проектированию структурных конструкций [Текст] / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – Москва : Стройиздат, 1984. – 303 с.
3. Металлические конструкции. Общий курс [Текст] : Учебник для вузов / Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Г. С. Ведеников [и др.] ; Под общей редакцией Е. И. Беленя. – 6-е издание, переработанное и доп. – М. : Стройиздат, 1985. – 560 с.
4. Информация о системе Мархи [Электронный ресурс] // ООО «Монтаж ПК» / ООО «Монтаж ПК». – Режим доступа : http://www.monpk.ru/system_marhi.html.
5. Система МАРХИ [Электронный ресурс] // Виктория Научно-проектный центр. – Режим доступа : <http://www.sistems-marhi.ru/marhi/.html>
6. Мушчанов, А. В. Учет особенностей конструктивных решений системы МАРХИ при разработке индивидуального проекта большепролетного структурного покрытия [Текст] / А. В. Мушчанов, И. В. Роменский // Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях : сборник докладов Пятой Международной научно-практической конференции (Москва, 26–28 июня 2013 г.) / М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». – Москва : МГСУ, 2013. – С. 111–115.
7. ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямые. Сортамент [Текст]. – Взамен ГОСТ 10704-76 ; дата введения 01.01.93. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 14 с.
8. Васильченко, В. Т. Справочник конструктора металлических конструкций [Текст] / В. Т. Васильченко, А. Н. Рутман, Е. П. Лукьяненко. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Будивельник, 1990. – 312 с.
9. Стрелецкий, Н. С. Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций [Текст] / Н. С. Стрелецкий, Д. Н. Стрелецкий. – М. : Стройиздат, 1964. – 239 с.
10. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст]. – Замість СНиП 2.01.07-85 ; надано чинності 2007–01–01. – К. : Мінбуд України, 2006. – 78 с.
11. Gaylord, Edwin. Structural engineering [Текст] / Edwin Gaylord, Charles Gaylord, James Stallmeyer. – New York : The McGraw Hill Companies, 1997. – 1024 p. – ISBN 0070237247.
12. Конструкции стадионных покрытий над трибунами стадионов [Текст] / Е. В. Горохов, В. Ф. Мушчанов, Р. И. Кинаш [и др.]. – Макеевка : ДонНАСА, 2008. – 405 с.
13. Расчет и проектирование пространственных металлических конструкций [Текст] / Е. В. Горохов, В. Ф. Мушчанов, Я. В. Назим, И. В. Роменский. – Макеевка : ДонНАСА, 2012. – 561 с.

References

1. Hisamov, R. I. Analysis and design engineering of structural roofs. Kyiv: Budivelynyk, 1981. 48 p. (in Russian)
2. V.A. Kuchenko Order of Labour Chief Research and Development Establishment of Civil Structure. Recommendations according to design engineering of structural constructions. Moscow: Stroiizdat, 1984. 303 p. (in Russian)
3. Belenia, E. I.; Baldin, V. A.; Vedenikov, G. S. [et al.]; Edited by Belenia, E. I. Metal Constructions. General Course. Textbook. The sixth edition, revised and enlarged. Moscow: Stroiizdat, 1985. 560 p. (in Russian)
4. LLC «Montazh PC» Information of the Marchi system. Mode of access: http://www.monpk.ru/system_marhi.html. (in Russian)
5. System of MARCHI. Mode of access: <http://www.sistems-marhi.ru/marhi/>. (in Russian)
6. Mushchanov, A. V.; Romenskiy, I. V. Considerations of design solutions of MARCHI system for development of individual project with span structural coating. In: *Scientific and Technical Creativity of Youth – the path to a society based on knowledge: the collection of reports of the Fifth International Scientific and Practical Conference (Moscow, 26–28 June 2013)*. Moscow: MGSU, 2013, pp. 111–115. (in Russian)
7. GOST 10704-91. Electrically welded steel line-weld tubes. Range. Moscow: Publishing house of standards, 1991. 14 p. (in Russian)
8. Vacilchenko, V. T.; Rutman, A. N.; Lukianenko, E. P. Reference book of metal construction designer. Second edition, revised and enlarged. Kyiv: Budivelynyk, 1990. 312 p. (in Russian)
9. Streletskiy, N. S.; Streletskiy, D. N. Design and fabrication of economy steel constructions. Moscow: Stroiizdat, 1964. 239 p. (in Russian)
10. DBN V.1.2-2:2006. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. Loads and effects. Kyiv: Minbud of Ukraine, 2006. 78 p. (in Ukrainian)
11. Gaylord, Edwin; Gaylord, Charles; Stallmeyer, James. Structural engineering. New York: The McGraw Hill Companies, 1997. 1024 p. ISBN 0070237247.
12. Gorokhov, Ye. V.; Mushchanov, V. F.; Kinash, R. I. et al. Constructions of fixedsite coverages over stands. Makeevka: DonNACEA, 2008. 405 p. (in Russian)
13. Gorokhov, Ye. V.; Mushchanov, V. F.; Nazim, Ya. V.; Romenskiy, I. V. Analysis and design of space metal structures. Makeevka: DonNACEA, 2012. 561 p. (in Russian)
14. Beranek, W. J. Krachtswerking deel 3: Varkwerken, standzekerheid. Delft: TU Delft, 2000. 92 p.
15. Schumacher, M.; Schaeffer, O.; Vogt, M. M. Move – Architecture in Motion. Basel: Birkhauser Verlag AG, 2010. 248 p. ISBN 3764399864.
16. Dyhovichnyi, Yu. A. Long span structures of constructions of Olympiad-80 in Moscow. Moscow: Stroiizdat, 1982. 277 p. (in Russian)

14. Beranek, W. J. Krachtswerking deel 3: Varkwerken, standzekerheid [Текст] / W. J. Beranek. – Delft : TU Delft, 2000. – 92 p.
15. Schumacher, M. Move – Architecture in Motion [Текст] / M. Schumacher, O. Schaeffer, M. M. Vogt. – Basel : Birkhauser Verlag AG, 2010. – 248 p. – ISBN 3764399864.
16. Дыховичный, Ю. А. Большепролетные конструкции сооружений Олимпиады-80 в Москве [Текст] / Ю. А. Дыховичный. – М. : Стройиздат, 1982. – 277 с.
17. Renton, John D. Chapter 15 - Regular Structures // Elastic Beams and Frames [Текст] / John D. Renton. – Second Edition. – Chichester : Horwood Publishing, 2002. – P. 15.1–15.36.
18. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – 4-е изд., перераб. – М. : Издательство СКАД СОФТ, 2011. – 736 с.
19. Избранные методы строительной механики в расчетах пространственных конструкций [Текст] / Под общей редакцией д.т.н., проф. В. Ф. Муцанова. – Makeevka : ДонНАСА, 2006. – 292 с.
20. Modern building materials, structures and techniques [Текст] : Abstracts of the 9th International Conference, held on May 16–18, 2007 / Vilnius Gediminas Technical University. – Vilnius : Technika, 2007. – 516 p.
21. Buijisen, Michel. Dynamic Space Frame Structures [Электронный ресурс] / Michel Buijisen. – Delft : [б. и.], 2011. – 95 p. – Режим доступа : http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/sadbtreports/1011nj/Dynamic_Space_Frame_Structures_Michel_Buijisen.pdf.
22. 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.
23. Bondarev, A. The Method of Generating Large-span Rod Systems with the Manufacturer Defect and Assembly Sequence [Текст] / A. Bondarev, A. Yugov // Procedia Engineering, 2015. Volume 117. P. 948–958.
24. Поиск рациональной геометрической схемы пространственной металлической конструкции покрытия большепролетного спортивного сооружения [Текст] / М. Р. Гарифуллин, С. А. Семенов, С. В. Беляева [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. 2(17). С. 107–124. ISSN 2304-6295.
25. Трущев, А. Г. Пространственные металлические конструкции [Текст] : учебное пособие / А. Г. Трущев. – М. : Стройиздат, 1983. – 216 с.
26. Kagome plate structures for actuation [Текст] / R. G. Hutchinson, N. Wicks, A. G. Evans [и др.] // International Journal of Solids and Structures. 2003. № 40. P. 6969–6980.
27. Файбишенко, В. К. Металлические конструкции [Текст] / В. К. Файбишенко. – М. : Стройиздат, 1984. – 336 с.
28. Heller, Robert A. Mechanics of Structures [Текст] / Robert A. Heller // Encyclopedia of Physical
17. Renton, John D. Chapter 15 – Regular Structures. In: *Elastic Beams and Frames. Second Edition*. Chichester: Horwood Publishing, 2002, pp. 15.1–15.36.
18. Perelmuter, A. V.; Slivker, V. I. Design models of structures and a possibility of their analysis. Fourth edition, revised. Moscow: Publisher SKAD SOFT, 2011. 736 p. (in Russian)
19. Mushchanov, V. F. (Ed.) Select methods of structural mechanic in analysis of space structures. Makeevka: DonNACEA, 2006. 292 p. (in Russian)
20. Vilnius Gediminas Technical University. Modern building materials, structures and techniques: Abstracts of the 9th International Conference, held on May 16–18, 2007. Vilnius: Technika, 2007. 516 p.
21. Buijisen, Michel. Dynamic Space Frame Structures. Delft, 2011. 95 p. Accessed at: http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/sadbtreports/1011nj/Dynamic_Space_Frame_Structures_Michel_Buijisen.pdf.
22. Rosen, A.; Sabag, M.; Givoli, M. A general nonlinear structural model of a multirod (multibeam) system – I. Theoretical derivations. In: *Computers & Structures*, 1996, Volume 61, Issue 4, pp. 617–632.
23. Bondarev, A.; Yugov, A. The Method of Generating Large-span Rod Systems with the Manufacturer Defect and Assembly Sequence. In: *Procedia Engineering*, 2015, Volume 117, pp. 948–958.
24. Garifullin, M. R.; Semenov, S. A.; Belyaeva, S. V.; Porivaev, I. A.; Safiullin, M. N.; Semenov, A. A. The search of rational shape of spatial metal roof of long-span sport arena. In: *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2014, No. 2(17), pp. 107–124. (in Russian)
25. Trushchev, A. G. Space metal structures. Textbook. Moscow: Stroiizdat, 1983. 216 p. (in Russian)
26. Hutchinson, R. G.; Wicks, N.; Evans, A. G.; Fleck, N. A.; Hutchinson, J. W. Kagome plate structures for actuation. In: *International Journal of Solids and Structures*, 2003, No. 40, pp. 6969–6980.
27. Faibishenko, V. K. Metal Constructions. Moscow: Stroiizdat, 1984. 336 p. (in Russian)
28. Robert A. Heller. Mechanics of Structures In: *Encyclopedia of Physical Science and Technology / edited by Robert A. Meyers*. Third edition. Academic Press, 2003, pp. 259–278.
29. Romenskiy, Igor; Zagoruiko, Tamara; Mushchanov, Alexander. The Main Approaches to the Appointment of Spatial and Stiffness Characteristics of the Marchi System Roofs when Regulating the Parameters of Its Stress-Strain State. In: *Metal Constructions*, 2015, Volume 21, Number 1, pp. 5–14.
30. Gritsuk, Yu. V. Methodical Guidelines for execution of laboratory researches on course of Information Design Technologies in the construction industry. Engineering problems solution per MathCAD. Makeevka: DonNASEA, 2013. 71 p. (in Russian)
31. Huberman, N.; Pearlmutter, D.; Galb, E.; Meira, I. A. Optimizing structural roof form for life-cycle energy efficiency. In: *Energy and Buildings*, 2015, Volume 104, pp. 336–349.
32. Jianguo, Caia; Jian, Fenga; Chao, Jiang. Development and analysis of a long-span retractable roof

- Science and Technology / edited by Robert A. Meyers. – Third edition. – [S. l.] : Academic Press, 2003. – P. 259–278.
29. Romenskiy, Igor. The Main Approaches to the Appointment of Spatial and Stiffness Characteristics of the Marchi System Roofs when Regulating the Parameters of Its Stress-Strain State [Текст] / Igor Romenskiy, Tamara Zagoruiko, Alexander MUSHCHANOV // Metal Constructions. 2015, Volume 21, Number 1. P. 5–14.
 30. Грицук, Ю. В. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Информационные технологии проектирования в строительстве» [Текст]. Решение инженерных задач с помощью MathCAD / Ю. В. Грицук. – Макеевка : ДонНАСА, 2013. – 71 с.
 31. Optimizing structural roof form for life-cycle energy efficiency [Текст] / N. Huberman, D. Pearlmuttera, E. Galb, I. A. Meira // Energy and Buildings. 2015. Volume 104. P. 336–349.
 32. Jianguo, Caia. Development and analysis of a long-span retractable roof structure [Текст] / Caia Jianguo, Fenga Jian, Jiang Chao // Journal of Constructional Steel Research. 2014. Volume 92. P. 175–182.
 33. Antoniou, N. Designing long-span steel girders by applying displacement control concepts [Текст] / N. Antoniou, Th. Nikolaidis, C. C. Baniotopoulos // Engineering Structures. 2014. Volume 59. P. 21–27.
 34. Rozvany, George I. N.; Hill, Robin D. The Theory of Optimal Load Transmission by Flexure [Текст] / George I. N. Rozvany, Robin D. Hill // Advances in Applied Mechanics. 1976. Volume 16. P. 183–308.
 35. LLC «Vista». What are the grid structures. Accessed at: <http://vista-marhi.ru/o-sisteme-MARHI/chto-takoe-PSPK/>. (in Russian)

Горохов Євген Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металевих конструкцій, ректор Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Президент Української асоціації з металевих конструкцій, Закордонний член Російської Академії архітектурно-будівельних наук, академік Академії Вищої освіти та Академії будівництва України. Член Міжнародного комітету з вивчення впливу вітру на будівлі та споруди. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, кліматичні впливи на будівельні конструкції.

Мушчанов Володимир Пилипович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної і прикладної механіки, проректор з наукової роботи Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член міжнародної організації «Інститут цивільних інженерів» та міжнародної асоціації «Просторові конструкції». Академік Академії будівництва України. Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

Роменський Ігор Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розрахунок і проектування просторових металевих конструкцій.

Мушчанов Олександр Володимирович – стажист-викладач Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розрахунок і проектування просторових металевих конструкцій.

Горохов Евгений Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических конструкций, ректор Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Президент Украинской ассоциации по металлическим конструкциям, Иностраный член Российской Академии архитектурно-строительных наук, академик Академии Высшей школы и Академии строительства Украины. Член Международного комитета по изучению воздействия ветра на здания и сооружения. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, климатические нагрузки на строительные конструкции.

Муцанов Владимир Филиппович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Член международной организации «Институт гражданских инженеров» и международной организации «Пространственные конструкции», академик Академии строительства Украины. Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

Роменский Игорь Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: расчет и проектирование пространственных металлических конструкций.

Муцанов Александр Владимирович – стажер-преподаватель Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: расчет и проектирование пространственных металлических конструкций.

Gorokhov Yevgen – D.Sc. (Engineering), Professor; Head of the Metal Structures Department, Rector of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. President of the Ukrainian Association of Metal Structures, a foreign member of the Russian Academy of Architectural and Building Science, an academician of the Higher School Academy and the Academy of Civil Engineering of Ukraine. A member of the International Committee on studying wind influence on buildings and structures. Scientific interests: operational reliability of building metal structures, climatic loads on building structures.

Mushchanov Volodymyr – D.Sc. (Engineering), Professor; Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vice-rector on the scientific activite of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. A member of the international organization «Institute of Civil Engineer» and international organization of «Spatial Structures», an academician of the Civil Engineering Academy in Ukraine. His research interests include the reliability theory, analyze, designing and engineering diagnostics of spatial metal structures.

Romenskii Igor – Ph.D. (Engineering), Associate Professor; Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: analyze and design of spatial metal structures.

Mushchanov Alexander – Graduate associate, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: analysis and design of spatial metal structures.