



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

2012, ТОМ 18, НОМЕР 3, 159–169

УДК 624.014

(12)-0267-1

## **ЗАГАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ВИСЯЧОГО ПОКРИТТЯ, УТВОРЕНОГО ЖОРСТКИМИ НИТКАМИ НАСКРІЗНОГО ПЕРЕРІЗУ**

**В. П. Мущанов, Ю. М. Прядко**

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,  
вул. Державіна, 2, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.  
E-mail: yura\_pryadko@mail.ru*

*Отримана 3 вересня 2012; прийнята 20 вересня 2012.*

**Анотація.** Описаний алгоритм розрахунку і проектування просторового стержневого покриття з вирізом на еліптичному плані, утвореного системою жорстких ниток наскрізного перерізу, оснований на визначенні чисельних показників надійності проектованої конструкції. Пропонований алгоритм передбачає послідовне вирішення ряду завдань: визначення раціональних геометричних параметрів споруди; отримання відповідних жорсткісних характеристик основних несучих елементів; визначення траєкторії руйнування елементів для характерної схеми покриття з подальшою оцінкою напружено-деформованого стану об'єкта; визначення чисельних показників надійності проектованої конструкції (визначення нижньої і верхньої меж надійності).

**Ключові слова:** просторово-стержнева висяча оболонка, згинально-жорсткі нитки, показники надійності, напружено-деформований стан (НДС), снігові навантаження.

## **ОБЩИЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВИСЯЧЕГО ПОКРЫТИЯ, ОБРАЗОВАННОГО ЖЕСТКИМИ НИТЯМИ СКВОЗНОГО СЕЧЕНИЯ**

**В. Ф. Мущанов, Ю. Н. Прядко**

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
ул. Державина, 2, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.  
E-mail: yura\_pryadko@mail.ru*

*Получена 3 сентября 2012; принята 20 сентября 2012.*

**Аннотация.** Описан алгоритм расчета и проектирования пространственного стержневого покрытия с вырезом на эллиптическом плане, образованного системой жестких нитей сквозного сечения, основанный на определении численных показателей надежности проектируемой конструкции. Предлагаемый алгоритм предусматривает последовательное решение ряда задач: определение рациональных геометрических параметров сооружения; получение соответствующих жесткостных характеристик основных несущих элементов; определение траектории разрушения элементов для характерной схемы покрытия с последующей оценкой напряженно-деформированного состояния объекта; определение численных показателей надежности проектируемой конструкции (определение нижней и верхней границ надежности).

**Ключевые слова:** пространственно-стержневая висячая оболочка, изгибно-жесткие нити, показатели надежности, напряженно-деформированное состояние (НДС), снеговые нагрузки.

## TOTAL ALGORITHM OF SAFETY INDEX OF OVERHANGING COATING FORMED BY RIGID THREADS OF THROUGH SECTION

Volodymyr Mushchanov, Iurii Priadko

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

2, Derzhavina Str., Makiivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.

E-mail: yura\_pryadko@mail.ru

Received 3 September 2012; accepted 20 September 2012.

**Abstract.** The design algorithm of spatial pivotal coating with a cut in the elliptic setting formed by the system of rigid threads of through section based on determination of a numerical safety index of a designed structure has been described. The proposed algorithm provides the sequence of solution of problem series: determination rational geometric parameters of a structure; obtaining of appropriate rigidity characteristics of basic bearing elements; determination of a track of elements destruction for typical coating diagram with the following evaluation of stressed and strained state of an object; determination of numerical safety indices of a structure (determination of the lower and upper safety limits).

**Keywords:** spatial and pivotal overhanging cover, curve and rigid threads, safety indices, stressed and strained state (SSS), snow loads.

### Введение

Методика расчета и проектирования пространственного стержневого покрытия с вырезом на эллиптическом плане может предусматривать такие задачи, как назначение исходных геометрических параметров покрытия, предварительный подбор сечения с последующим уточнением при конечно-элементной модели, варьируемой на различные варианты загрузки, а также решает ключевую задачу, которая ранее не ставилась в проектировании на основе метода предельных состояний, а именно – численное определение показателей надежности многократно статически неопределимой системы в виде висячей стержневой оболочки с большим вырезом на эллиптическом плане.

Предлагаемая методика предусматривает последовательное решение ряда задач:

1. Определение рациональных геометрических параметров сооружения.
2. Получение соответствующих жесткостных характеристик основных несущих элементов.
3. Определение траектории разрушения элементов для характерной схемы покрытия с последующей оценкой напряженно-деформированного состояния объекта.
4. Определение численных показателей надежности проектируемой конструкции:
  - определение нижней границы надежности;
  - определение верхней границы надежности.

На основании вышеизложенного материала разработанная методика включает в себя 3 этапа расчета.

**На первом этапе** выполняется инженерный расчет покрытия. Для назначения исходных жесткостных характеристик покрытия используем принцип декомпозиции покрытия, а именно расчленения покрытия на отдельные элементы.

Сначала выполняется расчет изгибно-жесткой нити и определение ее исходных жесткостных характеристик (рис. 1). Для расчета фермы используется методика Г. С. Веденикова – А. Л. Телояна [2] с уточнениями для ферм сквозного сечения, изложенными в методике В. Ф. Муцанова – В. А. Гибаленко [7]. Для определения уточненных значений усилий в элементах ферм и определения сечений, учитываются поправочные коэффициенты  $k_\sigma$  для стержневых элементов в зависимости от разнотности ее опор [9].

Прогиб нити:

$$\omega(x) = \alpha \left[ \frac{M_{bal(x)}}{H} - f(x) \right].$$

Относительные параметры нагрузки:

$$p_N^* = \frac{(q+p)L^2}{EAf}, \quad p_M^* = \frac{4(q+p)L^3}{EAh^2}.$$

Усилия в элементах нити (верхний и нижний пояса):

$$N_{ВП} \approx N \cdot \frac{a_{ВП}}{h} + \frac{M}{h} \cdot \alpha \cdot k ,$$

$$N_{ВП} \approx N \cdot \frac{a_{ВП}}{h} + \frac{M}{h} \cdot \alpha .$$

Уточненные значения усилий:

$$N_{ВП}^y = k_{\sigma} \cdot N_{ВП} ,$$

$$N_{ВП}^y = k_{\sigma} \cdot N_{ВП} .$$

Далее выполняется инженерный расчет конструкции покрытия, схема которого указана на рисунке 2.

Определение рациональных геометрических параметров покрытия и получение соответствующих жесткостных характеристик основных несущих элементов выполняется в инженерном расчете, основанном на использовании системы безразмерных пространственно-жесткостных параметров (БП)

$$\bar{D}_1 = EI_z^{внеш} ab_1^4 + EI_z a_1 b^4 / (Et b^4 b_1^4) \text{ и}$$

$$\bar{D}_4 = EI_y b / (Et R^2) .$$

Для получения необходимых зависимостей был выполнен численный эксперимент. Варьирование параметров  $\bar{D}_1$  и  $\bar{D}_4$  использовалось для получения закономерности изменения безразмерного параметра вертикальных перемещений внутреннего опорного контура  $\bar{W} = W / f$ , горизонтальных перемещений внешнего опорного контура  $\bar{U} = U / a$ , безразмерного параметра продольной силы  $\bar{N} = N a b^2 / EA^3$  и безразмерного параметра изгибающего момента  $\bar{M} = M a b / EI_y a$  для внешнего и внутреннего контуров покрытия (рис. 3).

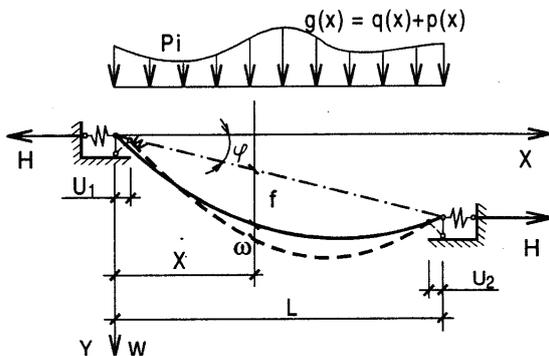


Рисунок 1. Расчетная схема изгибно-жесткой нити.

На основании полученных зависимостей разработан алгоритм определения жесткостных характеристик внешнего и внутреннего контуров покрытия:

1. Задать геометрические параметры оболочки:  $A_r$  – шаг радиальных ребер;  $A_{кол}$  – шаг кольцевых ребер;  $R$  – радиус кривизны внутреннего опорного контура в вертикальной плоскости.
2. Задается расчетная снеговая нагрузка  $S$  на  $1 \text{ м}^2$  покрытия в зависимости от снегового района.
3. Задается БП  $\bar{D}_4 \approx 0,012 \div 0,029$ .
4. Из зависимостей  $\bar{W} = f(\bar{D}_1, \bar{D}_4)$ ,  $\bar{U} = f(\bar{D}_1, \bar{D}_4)$  в зависимости от  $S$  определяется  $\bar{D}_1, \bar{W}, \bar{U}$ .
5. Из зависимостей  $\bar{D}_1 = f(\bar{M}, \bar{W})$ ,  $\bar{D}_1 = f(\bar{N}, \bar{W})$ ,  $\bar{D}_1 = f(\bar{M}, \bar{U})$ ,  $\bar{D}_1 = f(\bar{N}, \bar{U})$ , определяется  $\bar{N}, \bar{M}$  внешнего и внутреннего контуров (рис. 3).
6. Определяются жесткостные характеристики основных несущих элементов: внутреннего и внешнего опорных контуров.
7. Проверка несущей способности основных несущих элементов конструкции.

На втором этапе выполняется численный расчет системы покрытия с целью определения

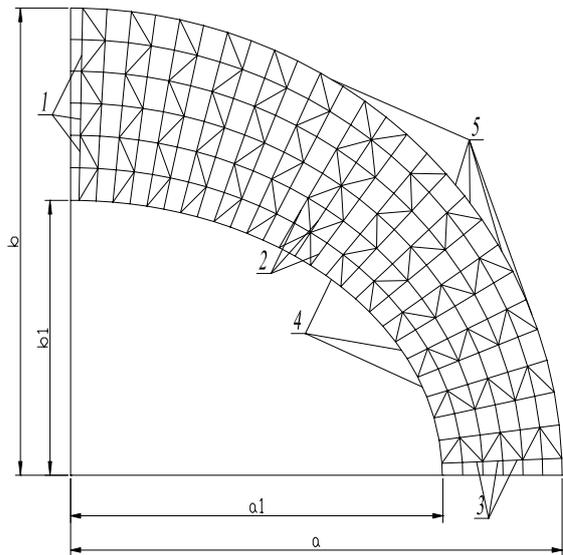


Рисунок 2. Схема четверти покрытия в виде пространственной стержневой ребристо-кольцевой системы. 1, 2, 3 – радиальные элементы вдоль короткой, средней и длинной полуосей; 4 – элементы внутреннего опорного контура; 5 – элементы внешнего опорного контура.

траектории разрушения элементов и характерных усилий для заданной схемы нагружения.

При оценке напряженно-деформированного состояния для растянутых элементов оценки прочности записываем как условие превышения напряжения расчетному сопротивлению по пределу текучести  $\sigma < \sigma_t$ . Для сжатых элементов – потеря устойчивости.

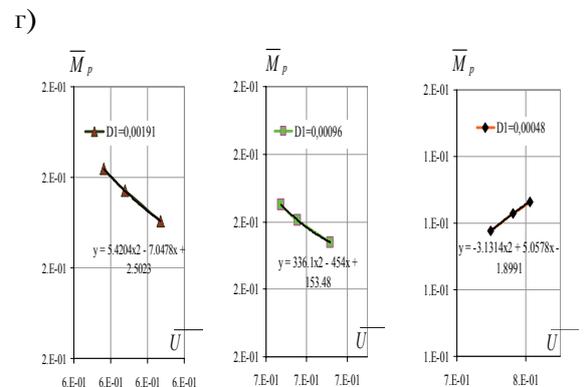
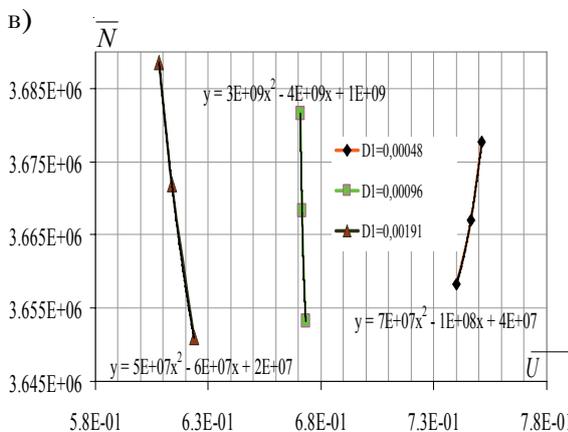
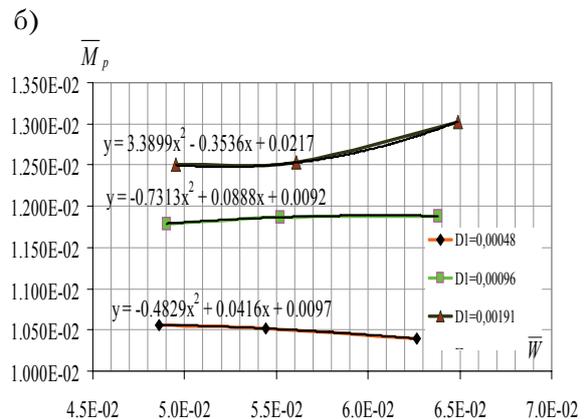
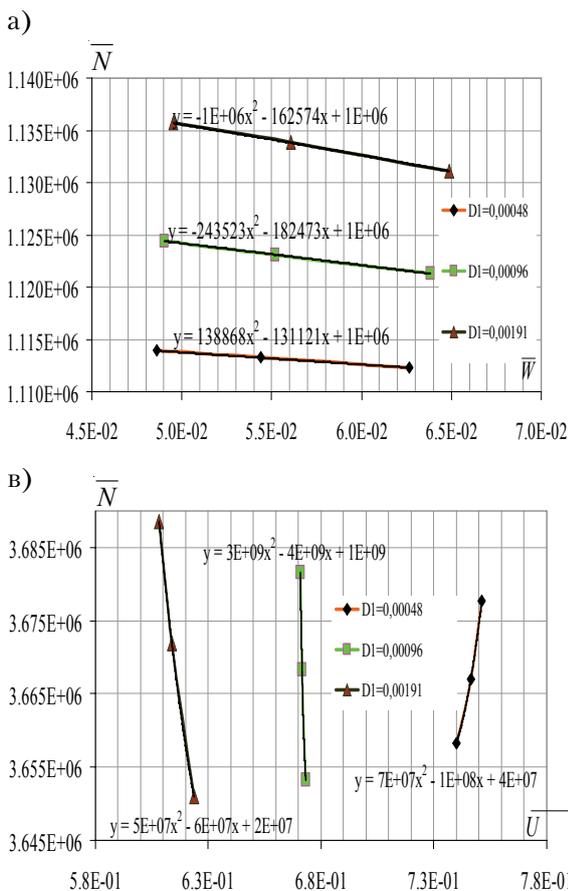
Состоянием разрушения считается момент прекращения возможности дальнейшей эксплуатации сооружения вследствие потери несущей способности; для этого нет необходимости, чтобы разрушилась вся система покрытия, достаточно разрушения какой-либо его ответственной части.

С целью определения траектории разрушения в ПК SCAD выполняется поэтапный численный расчет покрытия. В качестве нагрузки на покрытие принимается равномерно-распределенная нормативная временная снеговая на-

грузка  $S_{норм}$  для рассматриваемого района строительства [4]. В случае, если ни один элемент покрытия не разрушался, снеговая нагрузка увеличивается этапами по  $5 \text{ кг/м}^2$  и выполняется перерасчет.

По результатам выполненных расчетов фиксируется первый разрушенный элемент. Далее, не меняя схему нагружения, удаляя поочередно разрушенные элементы и заменяя их действие их же внутренними усилиями в соответствии с методикой Н. С. Стрелецкого [13], фиксируется разрушенная зона покрытия, состоящая из  $n$  элементов, и прогнозируемая зона последующего разрушения покрытия (рис. 4).

Состоянием разрушения пролетной части покрытия считать разрушение зоны I, при дальнейшем нагружении которой происходит массовый выход из строя элементов, расположенных в зоне II. В схеме покрытия с разрушенными элементами пролетной части фиксирует-



**Рисунок 3.** Зависимости БП усилий от БП перемещений: а) зависимость  $\bar{N}$  ( $\bar{W}$ ) для внутреннего контура; б) зависимость  $\bar{M}$  ( $\bar{W}$ ) для внутреннего контура; в) зависимость  $\bar{N}$  ( $\bar{U}$ ) для внешнего контура; г) зависимость  $\bar{M}$  ( $\bar{U}$ ) для внешнего контура.

ся расположение наиболее напряженных элементов внешнего и внутреннего опорных контуров, а также их максимальные усилия  $M$  и  $N$  (рис. 5).

**На третьем этапе** выполняется вероятностный расчет покрытия, в котором определяется верхняя и нижняя границы надежности.

Сначала определяется нижняя граница надежности конструкции покрытия. Для расчета используем модель покрытия, предполагающую последовательное соединение элементов, так предполагается, что выход из строя 1 элемента влечет за собой образование механизма для всего конструктива (жесткой нити сквозного сечения). При этом для расчета вероятности отказа принимается первый, потерявший несущую способность, элемент нити, разрушение которого фиксирует обрушение всего покрытия.

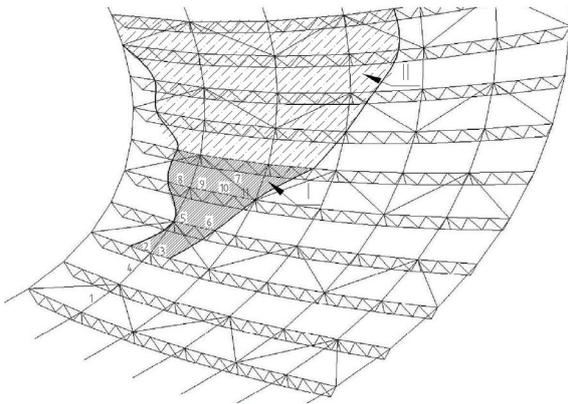


Рисунок 4. Разрушаемый участок покрытия.

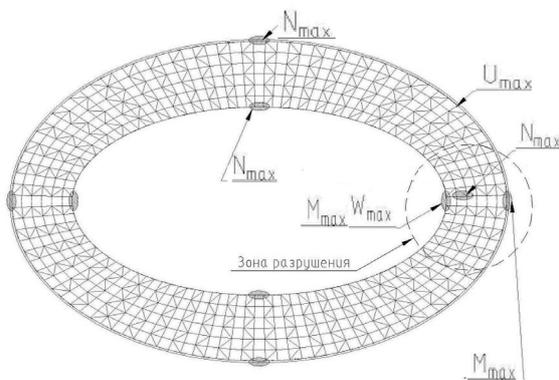


Рисунок 5. Схема покрытия с зонами максимальных усилий и деформаций.

За основу расчета был выбран численный метод Монте-Карло (ММК) [14], который решает вероятностные проблемы статистическими средствами. Важнейшим вспомогательным средством служат случайные числа.

В качестве случайных величин были выбраны: площадь сечения наиболее напряженного элемента верхнего сжатого пояса фермы  $A = Z_1$  и расчетное сопротивление стали  $R = Z_2$ .

Отказ элемента наступает, если  $N_{\text{разр}} > R \cdot A$ , где  $N_{\text{разр}}$  – усилие, в результате которого достигается предел текучести. Значение  $N$  принимается из расчета на живучесть для наиболее напряженного элемента нити.

Таким образом, уравнение предельного состояния имеет вид:

$$g(Z_1, Z_2) = Z_1 \cdot Z_2 - N_{\text{разр}} = 0.$$

Алгоритм расчета ММК:

1. Назначается  $Q = 0, j = 0$ .
  2. Вырабатываются 2 нормально распределенные величины  $Z_1 = A$  и  $Z_2 = R$  на интервале  $[0,1]$ .
  3. Вычисляется  $V_1 = \psi_1(Z_1), V_2 = \psi_2(Z_2)$ , где  $\psi_1(Z_1) = Z_1^k, \psi_2(Z_2) = Z_2^k, k = 2$ .
  4. Вычисляется  $x_1 = F_1^{-1}(V_1)$ , где  $F_1^{-1}(V_1) = \Phi^{-1}(V_1)$ .
- Аналогично вычисляется  $x_2 = F_2^{-1}(V_2)$ .
5. Вычисляется  $g(x_1, x_2) = x_1 x_2 - x_3$ , где  $x_3$  – детерминированная величина, обозначающая  $N_{\text{разр}}$ .
  6. Если  $g(x_1, x_2) < 0$ , то вычисляется весовая функция  $w = \psi_1'(Z_1) \cdot \psi_2'(Z_2)$  и полагается  $Q = 0 + w$ .
  7.  $j = j + 1$ , если  $j < n$ , переходим к шагу 2.
  8. Вычисляется вероятность отказа

$$P_f \approx Q/n.$$

В результате проведенных расчетов фиксируются результаты значений вероятности отказа элемента при различном количестве условных испытаний  $n = 100, 1\,000$  и  $10\,000$ . По полученным результатам построен график зависимости вероятности отказа  $P_f$  от количества испытаний  $n$  (рис. 6), из которого видно, что вероятность отказа распределена по закону логарифмического декремента и, с увеличением количества испытаний, увеличивается точность расчетов. Отметим, что наиболее оптимальным является расчет при  $n = 10\,000$ .

Для выявления закона распределения плотности вероятности отказа случайные величины площади сечения и расчетного сопротивления  $Z_1$  и  $Z_2$  выражаются через случайную величину усилия  $\tilde{N}=Z_1 \cdot Z_2$ .

Таким образом, по результатам полученных статистических данных, построив график зависимости  $N$  от функции накопленной частоты, принимающей максимальное значение, равное 1 (100 %), строится гистограмма относительной частоты появления значений случайной величины (рис. 7).

Описанный подход реализован при различных вариантах заданных статистических распределений случайных величин  $A, \sigma_T, N/N_0$ , обусловленных данными о прочностных и геометрических свойствах используемого металлопроката и возможным уровнем использова-

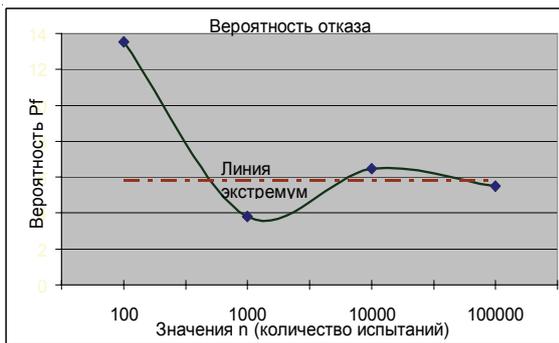


Рисунок 6. График зависимости вероятности отказа  $P_f$  от количества испытаний  $n$ .

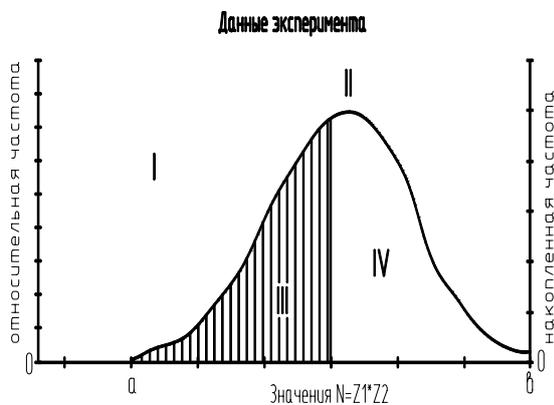


Рисунок 7. Определение плотности распределения случайной величины: I – область отказа, II – область безотказной работы, III – площадь, равная вероятности отказа, IV – площадь, равная вероятности безотказной работы.

ния несущей способности элемента при проектировании. Результаты исследований приведены в табл. 1, 2, в которых представлены выведенные значения вероятности отказа элемента  $P_f$  и законы распределения плотности случайной величины  $N = Z_1 \cdot Z_2$  при различных параметрах разброса случайных величин и требуемом резерве несущей способности.

Из значений таблицы 1 видно, что для рассматриваемого класса ответственности сооружения ССЗ, сочетания рассматриваемых факторов, выделенные темным цветом, не обеспечивают требуемого уровня надежности элемента.

Для определения верхней границы надежности используется модель покрытия, предполагающая параллельное соединение элементов, так, разрушение всего покрытия фиксируется разрушением элементов, полученных по результатам исследования живучести конструкции. Вероятностный расчет выполняется с использованием инженерной методики расчета покрытия.

Исходя из этого, вероятность неразрушения покрытия можно записать в следующем виде:

$$1 - P_{\text{sis}} = (1 - P_{\text{пр}}) \times (1 - P_{\text{внеш.к.}}) \times (1 - P_{\text{внутр.к.}}),$$

где  $P_{\text{sis}}$ ,  $P_{\text{пр}}$ ,  $P_{\text{внеш.к.}}$ ,  $P_{\text{внутр.к.}}$  – вероятность разрушения системы покрытия, пролетной части, внешнего и внутреннего контуров соответственно.

В качестве случайных величин принимаются: площадь сечения рассматриваемого элемента  $\tilde{F}$ , снеговая нагрузка  $\tilde{S}$ , усилия в элементе  $\tilde{M}$ ,  $\tilde{N}$ , предел текучести стали  $\tilde{\sigma}_T$ . За меру безопасности принимается характеристика безопасности Ржаницина [12]  $\gamma = \bar{Y} / \hat{Y}$ , которая после преобразований с учетом требований расчета по 1-й группе предельных состояний, принимает следующий вид:

$$\gamma = (\bar{\sigma}_T - \bar{\sigma}) / \sqrt{\hat{\sigma}_T + \hat{\sigma}},$$

где  $\bar{\sigma}_T$ ,  $\hat{\sigma}_T$ ,  $\bar{\sigma}$ ,  $\hat{\sigma}$  – соответственно, математические ожидания и дисперсии случайных величин, предел текучести стали и нормальных напряжений.

В этом случае распределение случайной величины предела текучести стали подчиняется нормальному закону распределения, а вероятностный характер нормальных напряжений принимает следующий вид:

$$\tilde{\sigma} = \tilde{N} / \tilde{F} + \tilde{M} / \tilde{W}.$$

**Таблица 1.** Нижняя граница надежности (вероятность отказа элемента  $P_i$ )

$N/N_0$	0,95		0,97		1	
$\tilde{A}$ $\tilde{R}$	5 %	7 %	5 %	7 %	5 %	7 %
3 %	$5,2 \times 10^{-5}$	$5,5 \times 10^{-5}$	$5,7 \times 10^{-5}$	$6,1 \times 10^{-5}$	$7,3 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-4}$
4 %	$5,7 \times 10^{-5}$	$5,9 \times 10^{-5}$	$6,3 \times 10^{-5}$	$7,6 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-4}$
5 %	$6,1 \times 10^{-5}$	$6,6 \times 10^{-5}$	$7,9 \times 10^{-5}$	$9,4 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-4}$

**Таблица 2.** Законы распределения плотности случайной величины  $N = Z_1 - Z_2$

$N / N_0 = 0,95$		
$\tilde{A}$ $\tilde{R}$	5 %	7 %
3 %	$y = 2E-06x^4 - 9E-05x^3 + 0.0043x^2 - 0.0287x + 0.007$	$y = 8E-07x^4 - 7E-05x^3 + 0.0032x^2 - 0.0143x + 0.0012$
4 %	$y = 7E-07x^4 - 6E-05x^3 + 0.00022x^2 - 0.0076x + 0.006$	$y = 5E-07x^4 - 6E-05x^3 + 0.00012x^2 - 0.0054x + 0.0032$
5 %	$y = 9E-08x^4 - 1E-05x^3 + 0.0009x^2 - 0.0022x + 0.01$	$y = 8E-08x^4 - 9E-06x^3 + 0.0005x^2 + 0.0008x + 0.0032$
$N / N_0 = 0,97$		
$\tilde{A}$ $\tilde{R}$	5 %	7 %
3 %	$y = 8E-07x^4 - 7E-05x^3 + 0.0025x^2 - 0.0237x + 0.0036$	$y = 5E-07x^4 - 5E-05x^3 + 0.0012x^2 - 0.0121x + 0.0131$
4 %	$y = 5E-07x^4 - 4E-05x^3 + 0.0009x^2 - 0.0056x + 0.022$	$y = 4E-07x^4 - 4E-05x^3 + 0.0005x^2 - 0.0023x + 0.0042$
5 %	$y = 7E-08x^4 - 9E-06x^3 + 0.0003x^2 - 0.002x + 0.0027$	$y = 6E-08x^4 - 7E-06x^3 + 0.0001x^2 + 0.0007x + 0.001$
$N / N_0 = 1$		
$\tilde{A}$ $\tilde{R}$	5 %	7 %
3 %	$y = 5E-07x^4 - 5E-05x^3 + 0.0016x^2 - 0.0132x + 0.025$	$y = 2E-07x^4 - 2E-05x^3 + 0.0007x^2 - 0.0049x + 0.0111$
4 %	$y = 2E-07x^4 - 2E-05x^3 + 0.0005x^2 - 0.0025x + 0.0052$	$y = 1E-07x^4 - 1E-05x^3 + 0.0003x^2 - 0.001x + 0.0062$
5 %	$y = 4E-08x^4 - 5E-06x^3 + 0.0001x^2 - 7E-05x + 0.0089$	$y = 3E-08x^4 - 3E-06x^3 + 5E-05x^2 + 0.0008x + 0.0071$

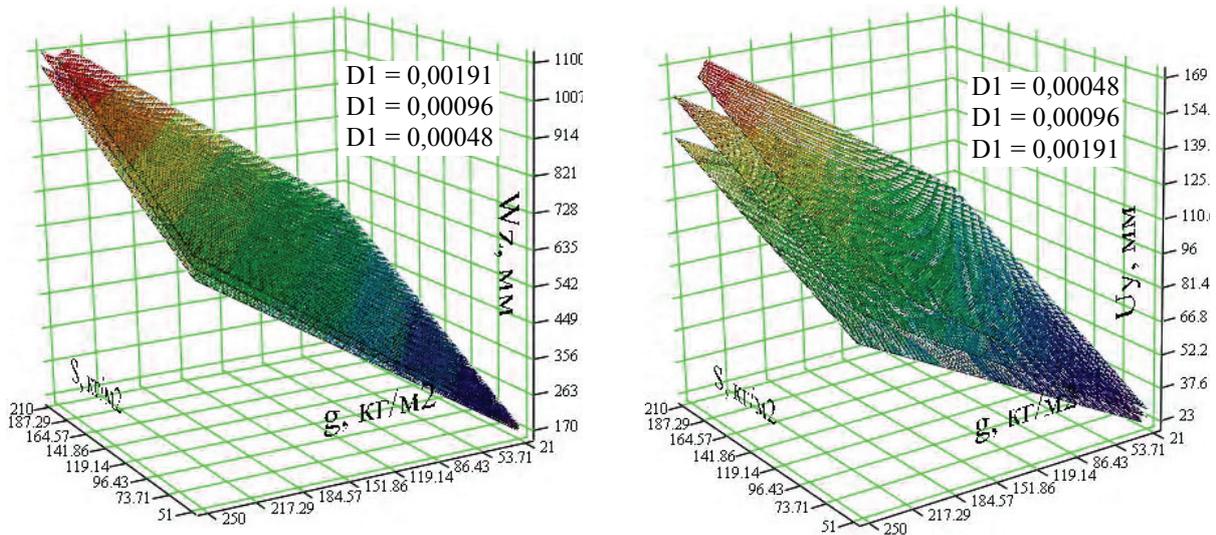
Для получения необходимой для вероятностного расчета зависимости между значениями перемещений узлов контуров  $W_z$  и  $U_y$  и равномерно распределенной нагрузки на покрытие при различном соотношении  $g/S$  ( $g$  – постоянная нагрузка,  $S$  – временная нагрузка), выполнен численный эксперимент с варьированием пространственно-жесткостного параметра  $\bar{D}_1$ . Полученные зависимости представлены на рисунке 8.

Для вычисления показателей надежности пролетной части вводится корреляционный коэффициент зависимости  $\rho_{i,j} = e^{-x}$  между напряжениями в рассматриваемых элементах  $i, j$ , где  $i \neq j, x = |i - j|$ .

Блок-схема определения верхней границы надежности показана на рисунке 9.

**Пример расчета**

По описанному выше алгоритму было запроектировано покрытие, схема которого приведена на рисунке 2 и выполнен расчет показателей надежности. На начальном этапе заданы следующие геометрические параметры: соотношение осей  $a : b = 123 : 85$  м, шаг радиальных элементов по наружному контуру – 6 м, по внутреннему контуру – 4,2 м, пролет  $L = 36,5$  м, стрела провисания  $f = 2,6$  м; количество отправочных марок  $n = 6; q = 28,3$  кг/м<sup>2</sup>,  $S = 160$  кг/м<sup>2</sup>



**Рисунок 8.** Влияние изменчивости безразмерных пространственно-жесткостных параметров и значений нагрузки на значения перемещений.

(г. Донецк) [4]. По результатам выполненного расчета были определены жесткостные характеристики несущих элементов покрытия и определены показатели надежности.

При определении нижней границы надежности для наиболее напряженного элемента нити, вероятность отказа которого определяет нижнюю границу несущей способности системы при значениях  $\tilde{A} = \bar{A} \pm 7\%$  и  $\tilde{R} = \bar{R} \pm 5\%$ , было получено значение вероятности отказа  $P_f = 2,9 \cdot 10^{-4}$  (табл. 1), которое не соответствует требованиям, предъявляемым к объектам уровня ССЗ и категории ответственности элемента: «В» (фактически разрушенный элемент не повлечет за собой разрушение всего покрытия, однако приведет к усложнению нормальной эксплуатации покрытия) в соответствии с ДБН В.1.2-14-2009 [5],  $P_f = 1 \cdot 10^{-4}$ . Соответствующим нормативным требованиям уровень надежности становится лишь при использовании более качественного металлопроката с погрешностью площади сечения изготавливаемого элемента не более 5 % и предела текучести не более 4 % или принятии следующего по сортаменту сечения элемента.

При определении верхней границы надежности была получена вероятность отказа системы  $P_{\text{sis}} = 1,78 \cdot 10^{-8} > P_{\text{треб.}} = 1 \cdot 10^{-5}$  (рис. 9), что удовлетворяет требованиям: Класс ответственности сооружения: «ССЗ». Категория ответствен-

ности системы покрытия: «А» (разрушение зафиксированных элементов повлечет за собой разрушение всего покрытия).

По полученным фактическим значениям показателей верхней и нижней границ надежности можно сделать вывод, что вероятность отказа при определении нижней границы надежности вполне сопоставима с регламентируемыми нормами [5], однако общая надежность системы, фиксирующая верхнюю границу надежности, значительно выше требуемой  $P_f$  в связи со значительными запасами прочности контуров, подобранных из условия 2-го предельного состояния. Таким образом, рассматриваемую систему покрытия в целом можно считать надежной.

#### Выводы:

1. Получены зависимости безразмерных показателей НДС от безразмерных пространственно-жесткостных параметров конструкции  $\bar{M}, \bar{N}, \bar{W}(\bar{D}_1, \bar{D}_4)$  для внешнего и внутреннего контуров, используемых при определении верхней границы надежности исследуемой конструктивной схемы.
2. На основе использования общепринятых подходов для наиболее неблагоприятного случая загрузки определена характерная траектория разрушения конструкции, положенная в основу алгоритма определения верхней границы надежности исследуемой конструкции.

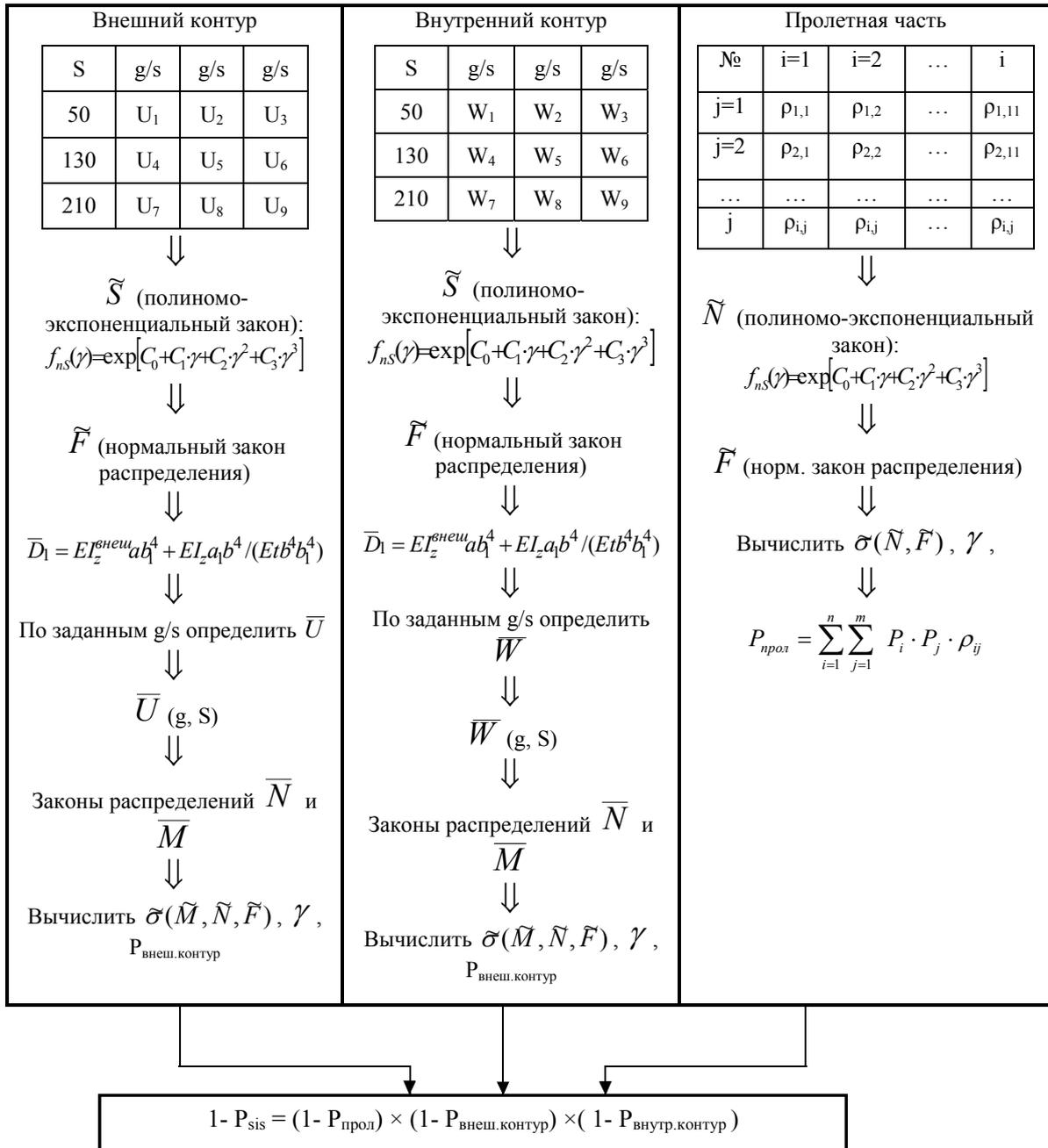


Рисунок 9. Блок-схема определения верхней границы надежности.

3. Для рассматриваемой системы разработаны алгоритмы определения верхней и нижней границ показателей надежности исследуемой конструкции, базирующейся на учете траектории разрушения и вероятностного расчета НДС системы покрытия.
4. Разработанная методика расчета показателей надежности конструкции покрытия в виде

большепролетной пологой висячей оболочки с вырезом на эллиптическом плане с достаточной точностью позволила определить жесткостные характеристики основных несущих элементов покрытия, обеспечивающих несущую способность, и требуемые значения показателей надежности проектируемого покрытия.

## Литература

1. Металлические конструкции. Спец. курс [Текст] : Учебное пособие для вузов / Е. И. Беленя, Н. Н. Стрелецкий, Г. С. Ведеников, Л. В. Клепиков, Т. Н. Морачевский. – М. : Стройиздат, 1991. – 687 с.
2. Ведеников, Г. С. Нелинейный метод расчета изгибно-жестких вант [Текст] / Г. С. Ведеников, А. Л. Телоян // Строительная механика и расчет сооружений. – 1997. – № 6. – С. 47–50.
3. Конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов [Текст] : для студентов ст. курсов, аспирантов, науч. сотрудников, архитекторов, инженеров-конструкторов науч.-исслед. и проект. орг. / Е. В. Горохов, В. Ф. Муцанов, В. Р. Касимов ; Донбасская гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Макеевка : [б. и.], 2002. – 156 с. – ISBN 966-7477-29-0.
4. 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. – 61 с. – (Державні будівельні норми).
5. ДБН В.1.2-14-2009. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст]. – Уведено вперше зі скасуванням в Україні ГОСТ 27751, СТ СЭВ 3972-83, СТ СЭВ 3973-83, СТ СЭВ 4417-83, СТ СЭВ 4868-84 ; чинні з 2009-12-01. – К. : Мінрегіонбуд, 2009. – 37 с. – (Державні будівельні норми України).
6. Еремеев, П. Г. Особенности проектирования уникальных большепролетных зданий и сооружений [Текст] / П. Г. Еремеев // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2006. – Том 2, № 1. – С. 5–15.
7. Муцанов, В. П. Особливості дійсної роботи і проектування жорстких ниток скрізного перерізу [Текст] / В. П. Муцанов, В. А. Гібаленко // Будівництво України. – 1999. – № 5. – С. 45–48.
8. Муцанов, В. Ф. Теоретическое исследование закономерностей работы висячей стержневой оболочки с вырезом на эллиптическом плане [Текст] / В. Ф. Муцанов, И. Н. Прядко // Вісник Донбаської держ. академії будівництва і архітектури : зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, ДонДАБА. – Макіївка, 2003. – Вип. 2003-3(40) : Будівлі та споруди із застосуванням нових конструкцій та матеріалів. Том 1. – С. 49–51.
9. Муцанов, В. Ф. Напряженно-деформированное состояние висячей системы, образованной системой изгибно-жестких нитей, при учете податливости опор [Текст] / В. Ф. Муцанов, И. Н. Руднева, Ю. Н. Прядко // Металеві конструкції. – 2012. – Том 18, № 1. – С. 5–16.
10. Отчет по результатам мониторинга несущих металлических конструкций покрытия. Стадион

## References

1. Belenia, E. I.; Streleckii, N. N.; Vedenikov, G. S.; Klepikov, L. V.; Morachevskii, T. N. Metal Constructions. Specialty course: text edition for Universities. Moscow: Stroiizdat, 1991. 687 p. (in Russian)
2. Vedenikov, G. S.; Teloian, A. L. Nonlinear method of analysis of bending and hard stay rope. In: *Building mechanics and analysis of structures*, 1997, Number 6, p. 47–50. (in Russian)
3. Gorohov, Ye. V.; Mushchanov, V. F.; Kasimov, V. R. Constructions of fixed-site coverages over stands. Makiivka: [S. l.], 2002. 156 p. ISBN 966-7477-29-0. (in Russian)
4. DBN B.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. 61 p. (in Ukrainian)
5. DBN B.1.2-14-2009. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. General principles of reliability control and constructional safety of buildings, structures and supports. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2009. 37 p. (in Ukraine)
6. Yermeyev, P. G. Design Peculiarities for the Unique Large-Span Buildings and Structures. In: *Modern Industrial and Civil Construction*, 2006, Volume 2, Number 1, p. 5–15. (in Russian).
7. Mushchanov, V. F.; Gibalenko, V. A. Peculiar properties of real work operation and designing of hard sewings of open overcut. In: *Ukraine building*, 1999, Number 5, p. 45–48. (in Ukraine)
8. Mushchanov, V. F.; Priadko, I. N. Theoretical research of rules of operation of hanging rod shell structure with cutout on ellipsoid plan. In: *Proceeding of the Donbas State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2003, Issue 2003-3(40): Buildings and structures using modern constructions and work materials. Volume 1. Makiivka, 2003, p. 49–51. (in Russian)
9. Mushchanov, Volodymyr; Rudneva, Irina; Priadko, Iurii. Intense-deformed condition of suspended system of bending-rigid fibers at the account of pliability of supports. In: *Metal Constructions*, 2012, Volume 18, Number 1, p. 5–16. (in Russian)
10. Report based on the results of monitoring of metal framework of coverages. Stadium «Donbass Arena». Code 110-01 ПК-МК.О/2010. Makiivka: DonNACEA, 2010. 90 p. (in Russian)
11. Pichugin, S. F. Durability of steel constructions of industrial buildings. Poltava: ASMI, 2009. 452 p. (in Russian)
12. Rzhantsyn, A. R. Calculating theory of building structures according to the durability. Moscow: Stroiizdat, 1978. 239 p. (in Russian)
13. Streletskii, N. S. Selectas. Moscow: Stroiizdat, 1975. 423 p. (in Russian)

- «Донбасс Арена» [Текст] : Шифр 110-01ПК-МК.О/2010 / Донбасская нац. академия строительства и архитектуры. – Макеевка : ДонНАСА, 2010. – 90 с.
11. Пичугин, С. Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий [Текст] / С. Ф. Пичугин. – Полтава : ООО «АСМИ», 2009. – 452 с.
  12. Ржаницын, А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность [Текст] / А. Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1978. – 239 с.
  13. Стрелецкий, Н. С. Избранные труды [Текст] / Н. С. Стрелецкий. – М. : Стройиздат, 1975. – 423 с.
  14. Шпете, Г. Надежность несущих строительных конструкций [Текст] / Г. Шпете; пер. с нем. О. О. Андреева. – М. : Стройиздат, 1994. – 288 с. – ISBN 5-274-01208-6.

**Мушанов Володимир Пилипович** – д. т. н., профессор, 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 Української Академії наук, Академії будівництва України, член-кореспондент Академії архітектури України. Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

**Прядко Юрій Миколайович** – аспірант кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: дослідження дійсної роботи і показників надійності великопрольотних жорстких ниток наскрізного перетину

**Мушанов Владимир Филиппович** – д. т. н., 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 Украинской Академии наук, Академии строительства Украины, член-корреспондент Академии архитектуры Украины. Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

**Прядко Юрий Николаевич** – аспирант кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: исследование действительной работы и показателей надежности большепролетных жестких нитей сквозного сечения.

**Volodymyr Mushchanov** – DSc (Eng.), Professor; Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vice-rector on the scientific activity of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. A member of the international organization «Institute of Civil Engineer» and international organization of «Spatial Structures», academician of the Ukrainian Academy of Science and Ukrainian Building Academy, Corresponding Member of Ukrainian Academy of Architecture. The academician of the Engineering Academy in Ukraine. His research interests include the reliability theory, analyses, designing and engineering diagnostics of spatial metal structures.

**Iurii Priadko** – postgraduate-student; Theoretical and Applied Mechanics Department of the National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: research of the real work and indicators of reliability of large-span filaments of the open section.