

УДК 624.074

В. Ф. МУЩАНОВ, М. П. КАЩЕНКО, Ю. В. СИВОКОНЬ
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ МЕМБРАННОГО ПОКРЫТИЯ НА КВАДРАТНОМ ПЛАНЕ

В статье обоснована целесообразность проведения экспериментальных исследований модели мембранного покрытия на квадратном плане. Рассмотрены достоинства и недостатки металла и пластика в экспериментальной модели. Выполнены экспериментальные исследования физико-механических свойств пластика (поливинилхлорида) с применением клея Cosmofen SA12. Вычислены значения масштабных коэффициентов для пластиковой модели. Проведен анализ численных испытаний исследуемого покрытия и модели из пластика.
напряженно-деформированное состояние, модель мембранного покрытия, поливинилхлорид, диаграмма растяжения

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Потеря устойчивости элементов конструкций часто происходит в упруго-пластической стадии деформирования. Поэтому актуальными являются вопросы разработки методики численного моделирования поведения систем в состояниях, близких к критическим и закритическим, с учетом геометрической нелинейности и реальных диаграмм деформирования материала. Для проверки результатов численного эксперимента и адекватности фактической конструкции математической модели сооружения (расчетной схемы) следует провести экспериментальные исследования на модели мембранного покрытия [8]. С помощью проведения экспериментальных исследований планируется уточнить установленные теоретически закономерности в изменениях напряженно-деформированного состояния опорного контура мембранного покрытия.

ЦЕЛЬ

Разработать план и методику проведения экспериментальных исследований, определить физико-механические свойства пластика.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Твёрдый поливинилхлорид (ПВХ) представляет собой однородные листы с гладкой поверхностью, изготовленные методом экструзии, этот материал легко поддается механической обработке, сравнительно недорогой, благодаря чему он более удобен для использования при моделировании конструкций по сравнению со стальными моделями. Для соединения деталей, изготовленных из ПВХ, применяется клей Cosmofen SA12, который характеризуется быстрым временем схватывания и не требует применения дополнительных приспособлений, как например оборудования для сварочных работ при изготовлении стальных моделей конструкций. Для изготовления описанной крупномасштабной модели будет использоваться листовая ПВХ.

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛА

Для проведения экспериментальных исследований мембранного покрытия положительной гауссовой кривизны на квадратном плане планируется изготовить крупномасштабную модель с размерами полуосей покрытия $a = b = 36$ м, начальная стрела провиса $f = 1,6$ м, толщина мембраны $t = 2$ мм. Начальную форму поверхности покрытия принимаем по формуле

$$z = f_0 \left(1 - \frac{x^n}{a^n} \right) \left(1 - \frac{y^n}{b^n} \right),$$

где a, b – половина сторон прямоугольного плана покрытия;
 f_0 – начальная стрела провиса в центре покрытия;
 x, y – текущие координаты.

Для этого был испытан образец из листового пластика размерами 0,3×4,0 см и длиной 65 см. Толщина листа, использованного для изготовления образца, 1 мм. Образец изготавливался послойным склеиванием клеем Cosmofem CA12.

В диапазоне напряжений до 5,0 МПа для пластика выполняется линейная зависимость между напряжениями и деформациями в пластике. Поэтому при $\sigma < 5$ МПа материал можно применять для моделирования. При моделировании использован принцип прямого геометрического подобия с масштабным коэффициентом $m_l = 1/50$. Модуль упругости пластика $E_{pl} = 2,26 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона $\mu_{pl} = 0,414$.

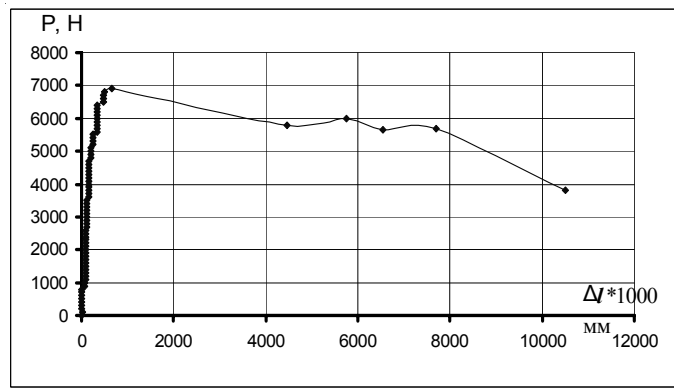


Рисунок 1 – Диаграмма растяжения пластика.

В дальнейшем предполагается уточнить поведение диаграммы растяжения пластика с учетом фактора длительности нагружения.

На рис. 2 представлено конструктивные решения модели и отдельных узлов с размерами в плане $2a \times 2b = 1,44 \times 1,44$ м.

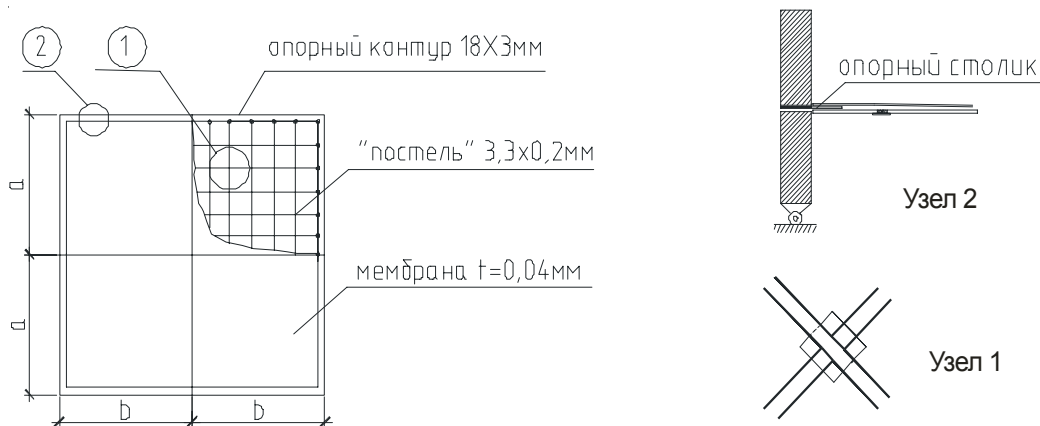


Рисунок 2 – Конструктивные решения модели и отдельных узлов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Приведены два варианта численного расчета исследуемого покрытия и модели из пластика. На рис. 3 показана расчетная схема исследуемого мембранного покрытия в масштабе 1:1 с размером в плане 72×72 м. В таблице 1 приведены показатели НДС исследуемого покрытия. Значения показателей были определены численными и аналитическими методами. Аналогично был проведен численный расчет для модели (табл. 2), где геометрический масштаб был принят 1:50 к натуре (рис. 4). Масштаб модели был выбран из условий размещения модели в испытательной лаборатории и расположения измерительных приборов. Учитывая, что при простом геометрическом подобии трудно смоделировать мембрану толщиной 0,04 мм, была предложена численная модель из пластика ПВХ с размерами в плане 1,44×1,44 м. Сравнение результатов расчета исследуемого покрытия и модели по SCAD показано в табл. 3.

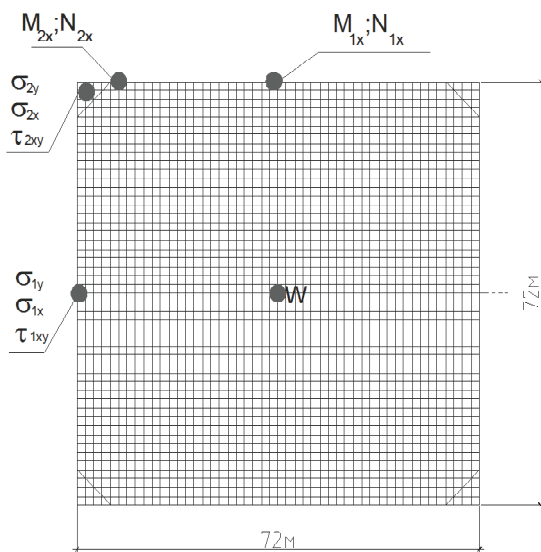


Рисунок 3 – Расчетная схема исследуемого покрытия М 1:1.

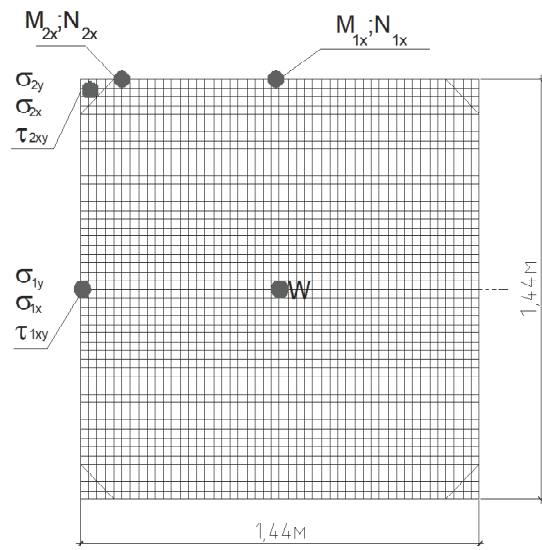


Рисунок 4 – Расчетная схема модели покрытия из пластика М 1:50.

Таблица 1 – Показатели НДС исследуемого покрытия (расчетная нагрузка $q = 2,652 \text{ кН/м}^2$)

Показатели НДС	Ед. измерения	Расчетные значения	
		SCAD	Аналит. методика
W	мм	-1 606	1 674
$\sigma_{\text{хmax}}$	МПа	501,7	$\sigma_{\text{max}} = 505$
σ_{ymax}	МПа	453,3	–
σ_{1x} (пролет)	МПа	837,0	–
σ_{1y} (пролет)	МПа	-966,7	–
τ_{1xy} (пролет)	МПа	61,5	–
σ_{2x} (угл)	МПа	-65,7	–
σ_{2y} (угл)	МПа	-115,5	–
τ_{2xy} (угл)	МПа	185,2	–
N_1	кН	11 661,6	17 723,4
M_{1x}	кН·м	172,5	726,2
N_2	кН	5 737,3	10 567,5
M_{2x}	кН·м	250,1	12 476,5
u_x	мм	143	286

Таблица 2 – Показатели НДС модели покрытия из пластика (расчетная нагрузка $q = 0,0315 \text{ кН/м}^2$)

Показатели НДС	Ед. измерения	Расчетные значения	
		SCAD	Аналит. методика
W	мм	-32,3	-34,8
$\sigma_{x\max}$	МПа	4,95	$\sigma_{\max} = 5,85$
$\sigma_{y\max}$	МПа	4,90	–
σ_{1X} (пролет)	МПа	8,0	–
σ_{1y} (пролет)	МПа	-9,6	–
τ_{1XY} (пролет)	МПа	0,7	–
σ_{2X} (угл)	МПа	-2,9	–
σ_{2y} (угл)	МПа	-2,9	–
τ_{2XY} (угл)	МПа	2,0	–
N_1	кН	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$
M_{1X}	кН·м	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$
N_2	кН	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$
M_{2X}	кН·м	$0,14 \cdot 10^{-4}$	$11,56 \cdot 10^{-4}$
u_x	мм	2,9	6,0

Таблица 3 – Сравнение результатов расчета исследуемого покрытия и модели по SCAD

Показатели НДС	Исследуемое покрытие	Модель пластиковая
W , мм	-1 606	-32,3
σ_{1X} (пролет) МПа	837,0	8,0*
σ_{1y} (пролет) МПа	-966,7	-9,6*
τ_{1XY} (пролет) МПа	61,5	0,7
σ_{2X} (угл) МПа	-65,7	-2,9
σ_{2y} (угл) МПа	-115,5	-2,9
τ_{2XY} (угл) МПа	185,2	2,0

* – напряжения, превышающие $\sigma_{\text{упр}}$ для ПВХ пластика. Требуется проведение дополнительных уточняющих расчетов с учетом пластических деформаций ПВХ.

При сравнении результатов расчета для исследуемого покрытия и модели из пластика следует указать на полное совпадение их безразмерных параметров $\bar{n} = (EI)_k / Et \cdot a^3 = 8,75 \cdot 10^{-5}$ и $\bar{k} = (EF)_k / Et \cdot a = 1,75$.

Учитывая геометрически нелинейный характер работы конструкции и сложность установления зависимостей НДС, обусловливаемых влиянием пространственно-жесткостных параметров опорного контура и пролетной части, при $m_l = l' / l = 1/50 = 0,02$; $m_E = E' / E = (2,26 \cdot 10^9 \text{ Па}) / (2,06 \cdot 10^{11} \text{ Па}) = 0,011$; $m_q = m_E \cdot m_l = 0,011 \cdot 0,02 = 2,2 \cdot 10^{-4}$.

Значения коэффициентов подобия по напряжениям и перемещениям приведены в таблице 4.

На рис. 5 показаны изополя вертикальных перемещений и нормальных напряжений на половине мембранного покрытия с указанием зоны потери устойчивости.

Коэффициент запаса устойчивости ($K_{\text{уст}}$) исследуемого покрытия определялся из условия $\frac{N}{A} + \frac{M}{W} \leq \phi R$ для стали С390. В угловой зоне $K_{\text{уст}}^{\text{угл}} = 1,29$ и в пролете опорного контура $K_{\text{уст}}^{\text{прол}} = 0,77$ (потеря устойчивости ожидается в середине пролета опорного контура).

Конструкция покрытия, опорный контур, элементы «постели» будут выполнены из пластика ПВХ. Для измерения напряжений будет применен метод тензометрии, а прогибы и перемещения будут определяться с помощью индикаторов часового типа. Нагрузка будет прикладываться в виде пакетов с песком. Величина равномерно распределенной нагрузки составит соответственно для постоянной и временной нагрузок $g = 0,0015 \text{ кН/м}^2$ и $s = 0,03 \text{ кН/м}^2$. Схема размещения измерительных приборов приведена на рис. 6.

Таблица 4 – Значение коэффициентов подобия

Коэффициенты подобия	m_w	$m_{\sigma_{1x}}^{прол}$	$m_{\sigma_{1y}}^{прол}$	$m_{\tau_{1xy}}^{прол}$	$m_{\sigma_{2x}}^{уст}$	$m_{\sigma_{2y}}^{уст}$	$m_{\tau_{2xy}}^{уст}$
Модель пластиковая М 1:50	0,020	0,010	0,010	0,011	0,044	0,025	0,011

где $m_w = w' / w$ – коэффициент подобия по перемещениям,
 w' – перемещения в модели,
 w – перемещения в исследуемом покрытии;
 $m_\sigma = \sigma' / \sigma$ – коэффициенты подобия по нормальным напряжениям,
 σ' – нормальные напряжения в модели,
 σ – нормальные напряжения в исследуемом покрытии;
 $m_\tau = \tau' / \tau$ – коэффициенты подобия по касательным напряжениям,
 τ' – касательные напряжения в модели;
 τ – касательные напряжения в исследуемом покрытии.

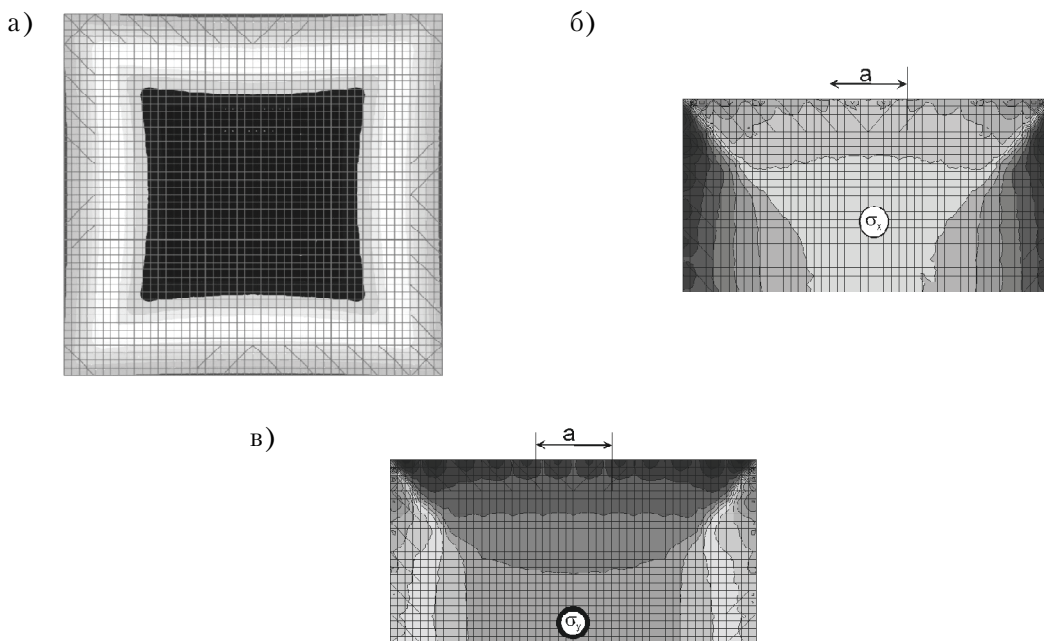


Рисунок 5 – Изополя: а) вертикальных перемещений; б) нормальных напряжений σ_x (вверху); в) нормальных напряжений σ_y (внизу).

ВЫВОДЫ

1. Предложена расчетная и конструктивная схемы модели покрытия для проведения экспериментальных исследований на действие статической нагрузки, параметры которой должны обеспечить возможность изучения потери устойчивости сжато-изогнутого опорного контура в плоскости мембранного покрытия ($K_{уст} = 0,77$).
2. Вычислены значения масштабных коэффициентов для модели из пластика, обеспечивающие переход от результатов испытаний модели к параметрам НДС реального покрытия.
3. На основании результатов численных исследований НДС модели выбрана схема расстановки и тип измерительных приборов для изучения потери устойчивости сжато-изогнутого опорного контура мембранного покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металлические конструкции [Текст] : Учебник для вузов / Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Г. С. Ведеников и др. – Москва : Стройиздат, 1986. –156 с.

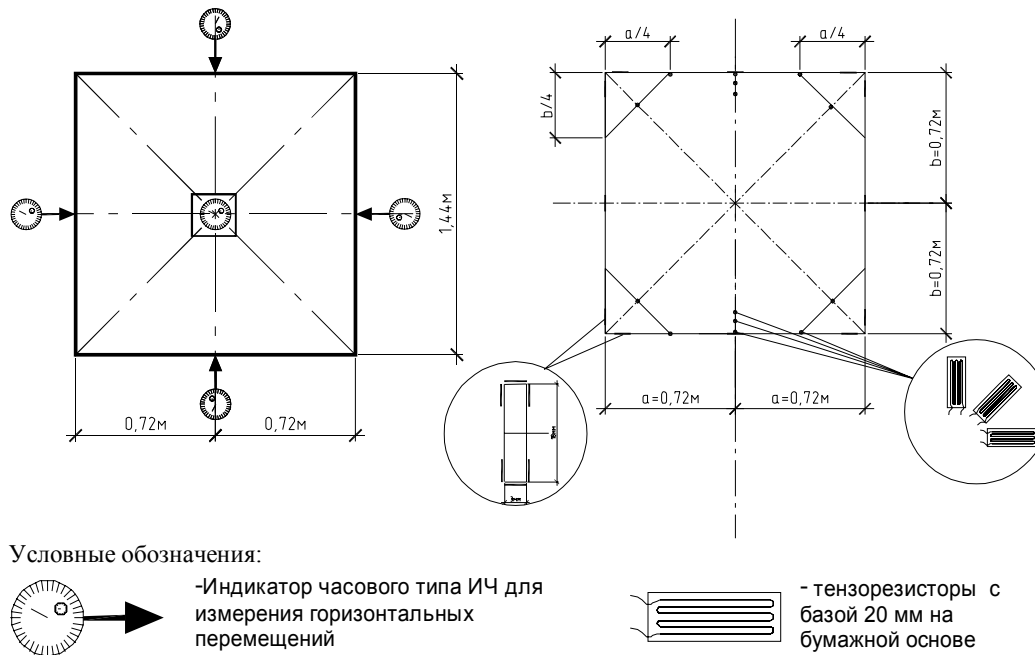


Рисунок 6 – Схема размещения измерительных приборов.

- ДБН В.2.6.-163:2010. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу [Текст]. – На заміну СНиП II-23-81* «Стальные конструкции», крім розділів 15*–19; СНиП III-18-75 «Металлические конструкции», крім розділів 3–8; СНиП 3.03.01-87 «Несущие и ограждающие конструкции» у частині, що стосується монтажу сталевих конструкцій, крім пп. 4.78–4.134 ; чинні від 2011-12-01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 127 с.
- Поляков, Л. П. Моделирование строительных конструкций [Текст] / Л. П. Поляков, В. М. Файнбурд. – Киев : Будівельник, 1975. – 144 с.
- Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. Перельмутер, В. Сливкер. – Киев : ВВП «Компас», 2001. – 448 с.
- Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы) [Текст]. Справочник / Ю. А. Дыховичный, Э. З. Жуковский, В. В. Ермолов и др.; под ред. Ю. А. Дыховичного, Э. З. Жуковского. – М. : Высш. шк., 1991. – 543 с.
- Мембранные конструкции зданий и сооружений [Текст] : Справ. пособие : В 2 ч. Ч 1 / Под ред. В. И. Трофимова и П. Г. Еремеева; ЦНИИ строительных конструкций им. В. А. Кучеренко. – М. : Стройиздат, 1990. – 248 с.
- СНиП II-23-81*. Стальные конструкции [Текст]. – Взамен СНиП II-В.3-72., СНиП II-Н-И.9-62, СН 376-67 ; введ. 1982-01-01. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1991. – 96 с.
- Сивоконь, Ю. В. Мембранные оболочки покрытий над трибунами стадионов с большими вырезами на эллиптическом плане [Текст] : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / Сивоконь Ю. В. – Макеевка, 2007. – 21 с.

Получено 04.09.2012

В. П. МУЦАНОВ, М. П. КАЩЕНКО, Ю. В. СИВОКОНЬ
 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ МОДЕЛІ
 МЕМБРАННОГО ПОКРИТТЯ НА КВАДРАТНОМУ ПЛАНІ
 Донбаська національна академія будівництва і архітектури

У статті обґрунтовано доцільність проведення експериментальних досліджень моделі мембранного покриття на квадратному плані. Розглянуто переваги і недоліки металу і пластика в експериментальній моделі. Виконано експериментальні дослідження фізико-механічних властивостей пластику (полівінілхлориду) із застосуванням клею Cosmofen SA12. Отримані значення масштабних коефіцієнтів для пластикової моделі. Проведено аналіз чисельних випробувань покриття, що досліджується, та пластикової моделі.

напружено-деформований стан, модель мембранного покриття, полівінілхлорид, діаграма розтягу

VOLODYMYR MUSHCHANOV, MARGARITA KASHCHENKO, YULIA SYVOKON
JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF EXPERIMENTAL MODEL OF
MEMBRANE COVERING ON A SQUARE PLAN

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

In the article the usefulness of experimental research model of membrane covering on a square plan has been proved. The advantages and disadvantages of metal and plastic in an experimental model have been given. Experimental studies of physical and mechanical properties of the plastic (PVC) using glue Cosmofen CA12 have been carried out. The values of the scale factor for the plastic model have been determined. The analysis of the numerical testing of the covering and plastic model have been given.

stress-strain state, the model of membrane covering, PVC, tension diagram

Мушчанов Володимир Пилипович — д. т. н., 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», аудитор системи сертифікації УкрСЕПРО. Академік Академії будівництва України. Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

Кашченко Маргарита Павлівна — асистент кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: аналіз напружено-деформованого стану мембранного покриття на прямокутному плані і забезпечення стійкості опорного контуру з урахуванням спільної роботи з мембраною.

Сивоконь Юлія Володимирівна — к. т. н., доцент кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: проектування і дослідження напружено-деформованого стану мембранних оболонок.

Мушчанов 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», аудитор системы сертификации УкрСЕПРО. Академик Академии строительства Украины. Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

Кашченко Маргарита Павловна — ассистент кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: анализ напряженно-деформированного состояния мембранного покрытия на прямоугольном плане и обеспечение устойчивости опорного контура с учетом совместной работы с мембраной.

Сивоконь Юлия Владимировна — к. т. н., доцент кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: проектирование и исследование напряженно-деформированного состояния мембранных оболочек.

Volodymyr Mushchanov — DSc (Eng.), Professor; the Head of Theoretical and Applied Mechanics Department, vice-principal on the scientific work 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», an auditor of certification UKRSEPRO system. The academician of the Engineering Academy in Ukraine. Scientific interests: the reliability theory, calculation, designing and engineering diagnostics of spatial metal structures.

Margarita Kashchenko — assistant, Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: analysis of the tensely-deformed state of membrane roofs on a rectangular plan and providing of stability of supporting contour taking into account joint work with a membrane.

Yulia Syvokon — PhD (Eng.), associate professor, Theoretical and Applied Mechanic Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: designing and research of the tensile-deformed membrane casing.