

EDN: JHTSDS

УДК 692.42/.47

М. А. ЧАЙКА

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ АРОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ С УЧЕТОМ ВЫСОТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

**Аннотация.** В работе представлено численное исследование воздействия ветрового потока на прямоугольное в плане здание с арочным покрытием с учетом предъявляемых геометрических параметров к бескаркасным металлическим арочным конструкциям. Расчеты выполняются с помощью программного комплекса SolidWorks. Исследуемое здание помещается в расчетную область (домен), представляющую собой виртуальную аэродинамическую трубу. Теоретико-методологическую основу исследования составили уравнения Невье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу (модель турбулентности Shear-Stress Transport). В работе уточняются аэродинамические коэффициенты на поверхности арочного покрытия здания и сооружения с учётом изменения его высоты и геометрических параметров покрытия, в том числе устанавливаются основные их закономерности изменения. Путём экспериментально-статического моделирования определяются регрессионные модели прогнозирования аэродинамических коэффициентов при заданных основных параметрах, таких как стрела подъема арки ( $f$ ) и отношение высоты здания к пролету ( $h/L$ ).

**Ключевые слова:** арочное покрытие, аэродинамический коэффициент, численное исследование, регрессионная модель.

### ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ И АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На этапе проектирования зданий или сооружений одним из важнейших факторов, требующих повышенного внимания, является ветровое воздействие. Для определения ветрового давления на арочные покрытия используются значения аэродинамических коэффициентов приведенных в СП [1] для сводчатых зданий и близких к ним по очертанию покрытий. На приведенных графиках [1] указаны аэродинамические коэффициенты при высоте  $h = 0$  и отношением высоты здания к пролету  $\frac{h}{l} \geq 0,5$  с учетом изменения стрелы подъёма арки. Необходимо найти аэродинамические коэффициенты в пределах этих значений. Информация об аэродинамической характеристике здания или сооружения может быть получена с помощью методов физического моделирования в аэродинамических трубах или численного моделирования с применением компьютерных CFD – технологии математического моделирования (CFD – Computational Fluid Dynamic).

Развитие отечественной нормативной базы расчетов на ветровые нагрузки связано с именами таких ученых, как Э. И. Реттер [2, 3], А. Г. Соколов [4], Г. А. Савицкий [5] и др.

Численному моделированию ветровой аэродинамики посвящены работы М. Х. Стрельца [6], И. А. Белова, С. А. Исаева [7, 8], С. И. Дубинского [9], В. Ф. Мущанова [10], Y. Tominaga [11], J. Franke [12] и мн. др.).

Целью работы является уточнение аэродинамических коэффициентов на поверхности арочного покрытия здания и сооружения с учётом изменения его высоты и геометрических параметров арочного покрытия и путём экспериментально-статического моделирования получить регрессионные модели прогнозирования аэродинамических коэффициентов.



## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Для решения поставленных целей используются следующие основные методы:

- численное моделирование, с применением программного комплекса SolidWorks-Flow Simulation, основанное на конечно-объемном методе решения систем уравнений отражающих общие законы механики сплошной среды;

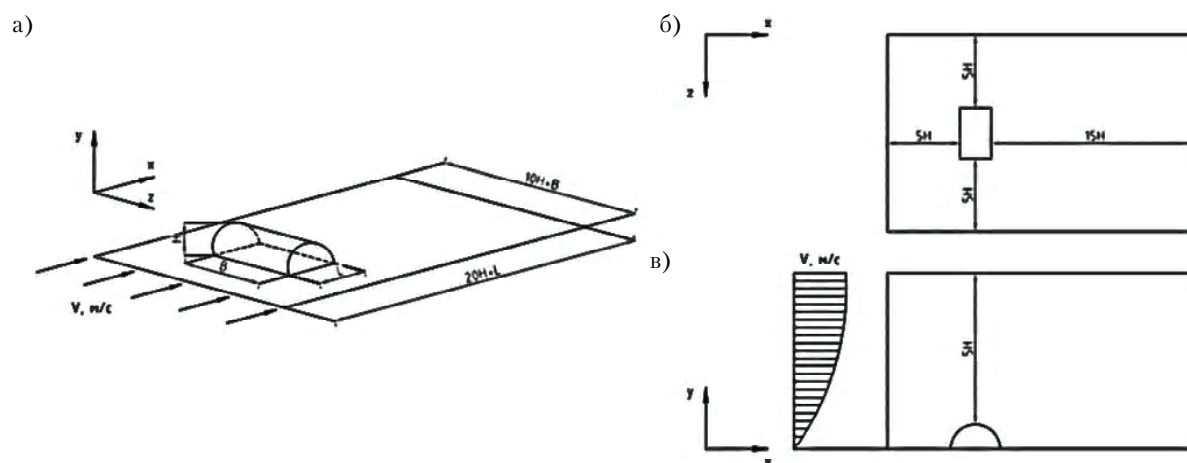
- метод корреляционно-регрессионного анализа.

Для определения ветрового воздействия на поверхности арочного покрытия с помощью применения компьютерного моделирования создаются модели в CAD – среде SolidWorks. В качестве твердотельной модели принимается прямоугольное в плане здание с арочным покрытием и геометрическими параметрами, предъявляемыми к бескаркасным металлическим арочным конструкциям [13]:

- стрела подъема арки  $f$ ;
- пролет  $L$ ;
- отношение высоты здания (от уровня поверхности земли до нижней отметки покрытия) к пролету  $h/L$ .

В качестве характеристик набегающего ветрового потока принимаются профиль скорости ветра, определяемый степенным законом и характеристики турбулентности [14] (интенсивность и масштаб), заданные параметры отвечают ветровым районам и типам местности по СП [1].

Размер расчетной области (домен) для отдельно стоящего здания высоты  $H$  создается согласно разработанным рекомендациям [15–17]. Расстояние в направлении потока до здания должно быть не менее  $5H$ , а за зданием как минимум  $15H$  (рис. 1).



**Рисунок 1** – Размеры расчетной области: а) геометрия задачи; б) расчетная область в плане; в) расчетная область в разрезе.

В результате численного моделирования получены картины распределения относительного давления ветрового потока по поверхности арочного покрытия. Для уточнения аэродинамических коэффициентов на поверхности арочного покрытия принята схема расположения контрольных точек с шагом по дуге  $15^\circ$ . Контролируемые параметры расчета: относительное давление в контрольных точках ( $P_r$ , Па) и скорость невозмущенного потока на характерной высоте ( $v_n$ , м/с). Далее в контрольных точках определяются аэродинамические коэффициенты по формуле [3]:

$$C_i = \frac{2 \cdot P_i}{\rho \cdot v_n^2}, \quad (1)$$

где  $C_i$  – аэродинамический коэффициент;  
 $P_i$  – относительное давление (относительное) в контрольной точке, Па;  
 $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  
 $v_n$  – скорость невозмущенного потока на характерной высоте, м/с.

В таблице 1 представлены максимальные аэродинамические коэффициенты.

**Таблица 1** – Аэродинамические коэффициенты

$C_e$	$C_{e1}$		$C_{e2}$		$C_{e32}$	
	0,3	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5
$\frac{h}{l}/f$						
0,1	0,82	0,93	-0,9	-1,00	-0,24	-0,40
0,25	0,61	0,74	-0,38	-0,40	-0,26	-0,33
0,45	0,4	0,63	-0,35	-0,32	-0,31	-0,32

Для определения регрессионной модели прогнозирования аэродинамического коэффициента применяется метод корреляционно-регрессионного анализа. Исследования проводятся по трехфакторному плану с восьмью экспериментальными строками. Применение математического моделирования позволяет получить адекватные модели при изменении факторов на двух уровнях: min и max приведенных в таблице 2.

**Таблица 2** – Факторы и уровни их варьирования

Уровни варьирования	Факторы		
	$f$	$\frac{h}{L}$	$L$
-	0,3	0,1	10
+	0,5	0,45	36

- стрела подъема арочного покрытия,  $f$ ;
- отношение высоты здания (от уровня поверхности земли до нижней отметки покрытия) к пролету,  $\frac{h}{L}$ ;
- длина пролета,  $L$ .

В результате по заданным данным, проводятся 8 опытов в программном комплексе SolidWorks-Flow Simulation, при изложенных выше условиях моделирования.

По полученным результатам на основе матрицы показателей корреляции составляются уравнения линейной множественной регрессии для прогнозирования аэродинамических коэффициентов с учётом изменения высоты здания и геометрических параметров арочного покрытия:

$$C_{e1} = 0,61 + 0,85 \cdot f - 1,06 \cdot \frac{h}{l}, \quad (2)$$

$$C_{e2} = -1,02 - 0,263 \cdot f - 1,72 \cdot \frac{h}{l}. \quad (3)$$

Расчёт и построение этих вариантов осуществляли с помощью программного комплекса Microsoft Office Excel. После проверки моделей на адекватность по F- критерию Фишера при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  в модели остались только значимые коэффициенты.

Пример матрицы показателей корреляции для определения регрессионной модели прогнозирования аэродинамического коэффициента с наветренной стороны представлен в таблице 3.

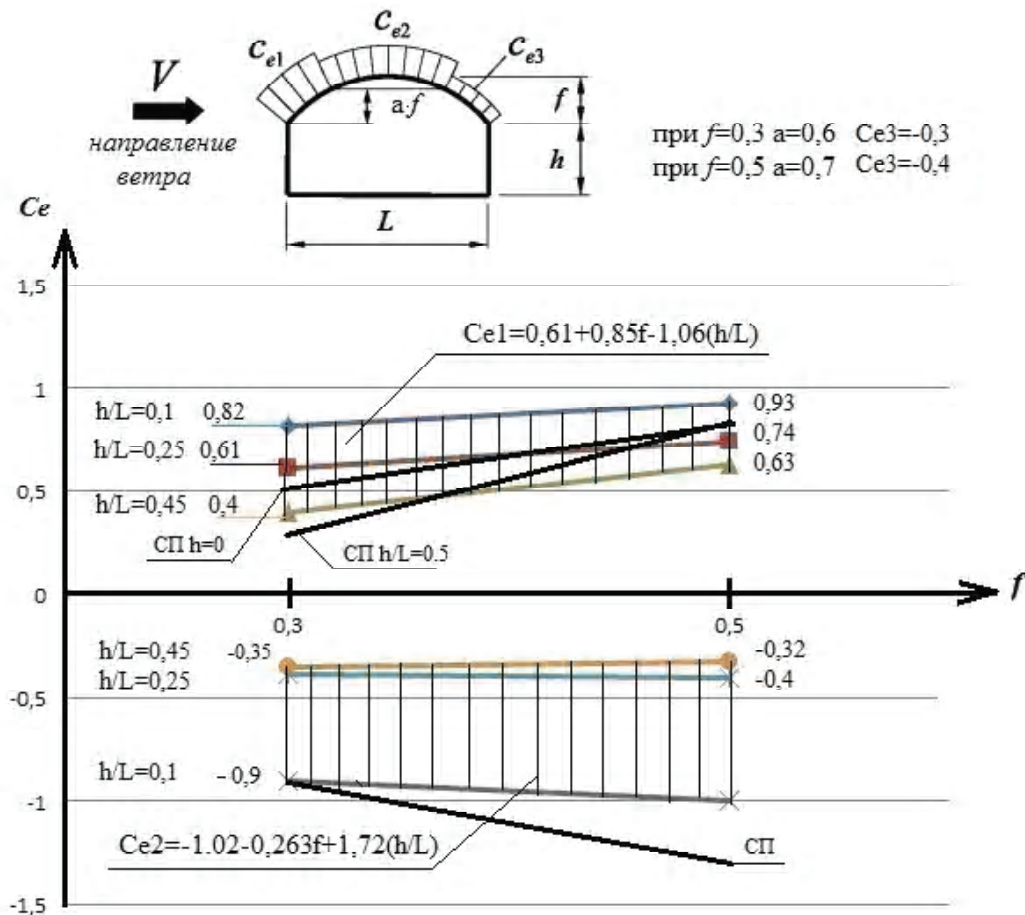
На рисунке 2 представлен график распределения коэффициентов ветрового давления  $C_e$  по поверхности арочного покрытия, полученных численным моделированием и по нормативным данным, приведенным в нормативном документе СП [1].

Исходя из полученных данных установлено, что:

- для арочных покрытий со стрелой подъёма арки  $f = 0,3 \cdot L$  аэродинамический коэффициент принимает отрицательные значения на высоте  $0,6 \cdot f$ , когда в нормативных документах на высоте  $0,7 \cdot f$  [1];
- для арочных покрытий со стрелой подъёма арки  $f = 0,5 \cdot L$  аэродинамический коэффициент принимает отрицательные значения на высоте  $0,7 \cdot f$ , что соответствует указанным данным СП [1];
- аэродинамический коэффициент с наветренной стороны  $C_{e1}$  как для арки с высотой подъёма стрелы  $f = 0,3 \cdot L$ , так и для  $f = 0,5 \cdot L$  имеет обратную зависимость с отношения высоты здания (от уровня поверхности земли до нижней отметки покрытия) к пролету  $\frac{h}{L}$ , т. е. с увеличением высоты аэродинамический коэффициент принимает меньшие значения. При увеличении  $\frac{h}{L}$  на 0,15 со стрелой подъёма арки  $f = 0,3 \cdot L$  аэродинамический коэффициент уменьшается в среднем на 0,21 для  $f = 0,5 \cdot L$  – уменьшается на 0,15;

**Таблица 3** – Матрица показателей корреляции: результаты для прогнозирования аэродинамического коэффициента с наветренной стороны  $C_{e1}$

№ опыта	Кодированные величины			Факторы			$C_{e1}$ - аэродинамический коэффициент с наветренной стороны
	$f$	$h/L$	$L$	$f$	$h/L$	$L, м$	
1	+	+	+	0,5	0,45	36	0,63
2	+	+	-	0,5	0,45	10	0,61
3	+	-	+	0,5	0,1	36	0,93
4	-	+	+	0,3	0,45	36	0,4
5	-	-	+	0,3	0,1	36	0,82
6	+	-	-	0,5	0,1	10	0,9
7	-	+	-	0,3	0,45	10	0,35
8	-	-	-	0,3	0,1	10	0,82
Регрессионная статистика			Дисперсионный анализ				
Множественный R			0,983	F		6,648	
R – квадрат			0,965	Значимость F		0,05	
Нормированный R – квадрат			0,940				
Наблюдения			8				



**Рисунок 2** – График распределения аэродинамических коэффициентов.

– аэродинамический коэффициент с наветренной стороны  $C_{e1}$  со стрелой подъёма арки  $f = 0,5 \cdot L$  при  $h/L = 0,1$  и  $h/L = 0,25$  увеличивается относительно  $f = 0,3 \cdot L$  на 0,12, при  $h/L = 0,45$  на 0,23;

- аэродинамический коэффициент на вершине покрытия  $C_{e2}$  как для арки с высотой подъема стрелы  $f = 0,3L$ , так и для  $f = 0,5L$  имеет обратную зависимость с отношением высоты здания (от уровня поверхности земли до нижней отметки покрытия) к пролету  $h/L$ , т. е. с увеличением высоты аэродинамический коэффициент принимает меньшие значения;
- аэродинамический коэффициент с подветренной стороны  $C_{e3}$  для арки с высотой подъема стрелы  $f = 0,3L$  принимает значение равное  $-0,3$ , а для  $f = 0,5L$   $C_{e3} = -0,4$ , когда в нормативном документе при  $f = 0,3L$  и  $f = 0,5L$  принимает постоянное значение  $C_{e3} = -0,4$ ;
- значения аэродинамических коэффициентов  $C_{e1}$ , полученных численным моделированием не входят в плоскости прямых, указанных в СП [1], а коэффициенты  $C_{e2}$  имеют меньшие значения.

## ВЫВОД

В результате численного моделирования в работе была определена аэродинамическая характеристика здания или сооружения, на основании которой были уточнены аэродинамические коэффициенты на поверхности арочного покрытия и установлены основные закономерности изменения от высоты здания и геометрических параметров арочного покрытия. Путём экспериментально-статического моделирования были получены регрессионные модели прогнозирования аэродинамических коэффициентов при заданных основных параметрах, таких как стрела подъема арки ( $f$ ) и отношение высоты здания к пролету ( $h/L$ ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия = Loads and actions : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. № 891/пр. : на замену СП 20.13330.2011 : дата введения 2017-06-04 / подготовлен Департаментом градостроительной деятельности и архитектуры Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. – Москва : ЦНИ ИСК им. В. А. Кучеренко АО Минстроя России, 2016. – 110 с. – Текст : непосредственный.
2. Реттер, Э. И. Аэродинамика зданий / Э. И. Реттер, С. И. Стриженов. – Москва : Стройиздат, 1968. – 240 с. – Текст : непосредственный.
3. Реттер, Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика / Э. И. Реттер. – Москва : Стройиздат, 1984. – 294 с. – Текст : непосредственный.
4. Беспрозванная, И. М. Воздействия ветра на высокие сплошностенчатые сооружения. / И. М. Беспрозванная, А. Г. Соколов, Г. М. Фомин. – Москва : Стройиздат, 1976. – 185 с. – Текст : непосредственный.
5. Савицкий, Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения / Г. А. Савицкий. – Москва : Стройиздат, 1972. – 112 с. – Текст : непосредственный.
6. Strelec, M. Detached eddy simulation of massively separated flows / M. Strelec. – Текст : непосредственный // AIAA Paper. – 2001. – No. 2001-0879. – P. 1–18.
7. Белов, И. А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости / И. А. Белов, С. А. Исаев, В. А. Коробков. – Ленинград : Судостроение, 1989. – 252 с. – Текст : непосредственный.
8. Белов, И. А. Моделирование турбулентных течений : учебное пособие. / И. А. Белов, С. А. Исаев. – Санкт-Петербург : Изд-во БГТУ, 2001. – 107 с. – Текст : непосредственный.
9. Дубинский, С. И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплекс : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата наук / Дубинский Сергей Иванович ; Московский государственный строительный университет. – Москва, 2010. – 198 с. – Текст : непосредственный.
10. Мушчанов, В. Ф. Исследование аэродинамических коэффициентов провисающих мембранных покрытий инженерных сооружений / В. Ф. Мушчанов, А. В. Зубенко, А. А. Дроздов. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2017. – Том 23, номер 2. – С. 81–96. – URL: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/mk/2017-2/04\\_mushchanov\\_zubenko\\_drozдов.pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2017-2/04_mushchanov_zubenko_drozдов.pdf) (дата публикации: 17.07.2017).
11. Comparison of various k-ε models and DSM applied to flow around a high-rise building / A. Mochida, Y. Tominaga, S. Murakami [et al.]. – Текст : непосредственный // Wind and Structures. – 2002. – 5(2–4). – P. 227–244.
12. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment / Edited by Jörg Franke, Antti Hellsten, Heinke Schlünzen, Bertrand Carissimo. – Hamburg : Meteorological Inst., 2007. – 52 p. – ISBN 3-00-018312-4. – Текст : непосредственный.
13. Липленко, М. А. Несущая способность бескаркасных арочных покрытий из стальных холодногнутых профилей с поперечно-гофрированными гранями: специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Липленко Максим Александрович ; Национальный исследовательский московский государственный строительный университет. – Москва, 2017. – 215 с. – Текст : непосредственный.

14. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра / ЦНИИ строительных конструкций им. В. А. Кучеренко. – Москва : Стройиздат, 1978. – 216 с. – Текст : непосредственный.
15. Comparison of various k-ε models and DSM applied to flow around a high-rise building / A. Mochida, Y. Tominaga, S. Murakami [et al.]. – Текст : непосредственный // Wind and Structures. – 2002. – 5(2-4). – P. 227–244.
16. Cross comparisons of CFD results of wind environment at pedestrian level around a high-rise building and within a building complex / Y. Tominaga, A. Mochida, T. Shirasawa [et al.]. – Текст : непосредственный // Journal of Asian architecture and building engineering. – 2004. – Volume 3(1). – P. 63–70.
17. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings / Yoshihide Tominaga, Akashi Mochida, Ryuichiro Yoshie [et al.]. – Текст : непосредственный // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2008. – Volume 96, Issues 10–11. – P. 1749–1761.

Получена 10.11.2022

Принята 25.11.2022

М. О. ЧАЙКА

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АЕРОДИНАМІЧНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ  
АРОЧНИХ ПОКРИТТІВ З УРАХУВАННЯМ ВИСОТИ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД  
ДОУ ВПО «Донбаська державна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У роботі представлено чисельне дослідження впливу вітрового потоку на прямокутну в плані будівлю з арочним покриттям з урахуванням пропозованих геометричних параметрів до безкаркасних металевих арочних конструкцій. Розрахунки виконуються за допомогою програмного комплексу SolidWorks. Досліджуване будівля поміщається в розрахункову область (домен), що представляє собою віртуальну аеродинамічну трубу. Теоретико-методологічну основу дослідження склали рівняння Нев'є-Стокса, осереднені за Рейнольдсом (модель турбулентності Shear-Stress Transport). У роботі уточнюються аеродинамічні коефіцієнти на поверхні арочного покриття будівлі і споруди з урахуванням зміни його висоти і геометричних параметрів покриття, в тому числі встановлюються основні їх закономірності зміни. Шляхом експериментально-статичного моделювання визначаються регресійні моделі прогнозування аеродинамічних коефіцієнтів при заданих основних параметрах, таких як стріла підйому арки ( $f$ ) і відношення висоти будівлі до прольоту ( $h/L$ ).

**Ключові слова:** арочне покриття, аеродинамічний коефіцієнт, чисельне дослідження, регресійна модель.

MARIA CHAYKA

MATHEMATICAL MODEL OF AERODYNAMIC COEFFICIENTS FOR ARCH  
COVERINGS TAKING INTO ACCOUNT THE HEIGHT OF BUILDINGS AND  
STRUCTURES

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The paper presents a numerical study of the effect of wind flow on a building rectangular in plan with an arch covering, taking into account the geometric parameters required for frameless metal arched structures. Computings are performed by use of the SolidWorks software package. The building under study is placed in the computational domain, which corresponds to a virtual wind tunnel. The Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (Shear-Stress Transport turbulence model) form the theoretical and methodological background of the study. The paper elaborates the aerodynamic coefficients on the surface of the arch covering of a building and structure, taking into account changes in its height and geometric parameters of the coating, including establishing their main patterns of change. By means of experimental and static modeling, regression models for predicting aerodynamic coefficients are determined for given basic parameters, such as the arched boom ( $f$ ) and the ratio of the height of the building to the span ( $h/L$ ).

**Key words:** arch covering, aerodynamic coefficient, numerical study, regression model.

**Чайка Мария Александровна** – ассистент кафедры технологии и организации строительства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: совершенствование конструктивных решений утеплённых металлических бескаркасных покрытий.

**Чайка Марія Олександрівна** – асистент кафедри технології та організації будівництва ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: удосконалення конструктивних рішень утеплених металевих безкаркасних покриттів.

**Chayka Maria** – assistant, Technology and Management in Construction Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: improvement of construction solutions of insulated metal frameless coatings.