

EDN: **DXQQQU**

УДК 692.42/.47:624.042.41

В. А. МАЗУР, М. А. ЧАЙКА

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗДАНИЙ СО СВОДЧАТЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ИЗ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ АРОЧНЫХ ПРОФИЛЕЙ

Аннотация. Статья посвящена исследованиям аэродинамических коэффициентов зданий со сводчатыми покрытиями в развитие положений СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия». Численное моделирование ветровой аэродинамики в программном комплексе вычислительной гидрогазодинамики SolidWorks – Flow Simulation позволяет исследовать ветровое воздействие на сводчатое покрытие при разных углах атаки набегающего потока ветра на бескаркасное арочное покрытие с заданными геометрическими параметрами. На основании полученных экспериментальных данных, используя методы статистического моделирования, получены регрессионные зависимости для определения аэродинамических коэффициентов на поверхности сводчатого покрытия при заданных геометрических параметрах для бескаркасных арочных покрытий, таких как: отношение стрелы подъема арки к пролету (f/L) и отношение высоты здания к пролету (h/L) при разных углах атаки набегающего ветрового потока.

Ключевые слова: аэродинамический коэффициент, ветровая аэродинамика, численное моделирование, экспериментально-статистическое моделирование.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ И АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В последние десятилетия во многих странах мира отмечается значительный рост объемов капитального строительства и реконструкции с использованием стальных тонкостенных холодногнутох профилей в качестве конструктивных элементов зданий и сооружений. По оценкам экспертов [1], в РФ объем применения тонколистового проката с защитными покрытиями составляет порядка 2 млн тон в год и с каждым годом увеличивается на 10...12 % [2]. Использование стальных тонкостенных холодногнутох арочных профилей позволяет не только создавать эффективные конструктивные решения покрытий зданий и сооружений, но возводить объекты различного назначения пролетом до 36 метров.

Широкая область применения технологии бескаркасного арочного строительства предопределяет не только разные конструктивно-технологические решения по возведению покрытий и зданий из стальных тонкостенных холодногнутох арочных профилей, но и разные условия эксплуатации. Для поддержания установленного микроклимата объекта и снижения уровня теплопотерь необходимо устройство теплоизоляционного слоя.

Анализ нормативных требований и научных исследований показал, что рациональным конструктивным решением утепленных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутох арочных профилей является вариант с устройством двойной арки с заполнением минеральной ватой и наличием воздушного пространства между ними, так как конденсированная влага выводится за счет свободной конвекции потока воздуха в вентилируемой прослойке [3, 4].

Учеными, занимающимися вопросами температурно-влажностного режима наружных ограждающих конструкций, в том числе и воздухообмена в вентилируемой прослойке, было установлено, что скорость воздушного потока зависит как от внутренних параметров прослойки, так и от внешних условий обтекания здания или сооружения ветровым потоком [5, 6].



Для определения ветрового давления на арочные покрытия используются графики для определения значений аэродинамических коэффициентов, приведенные в нормативных документах (рис. 1) [7].

В.1.3 Прямоугольные в плане здания со сводчатыми и близкими к ним по очертанию покрытиями

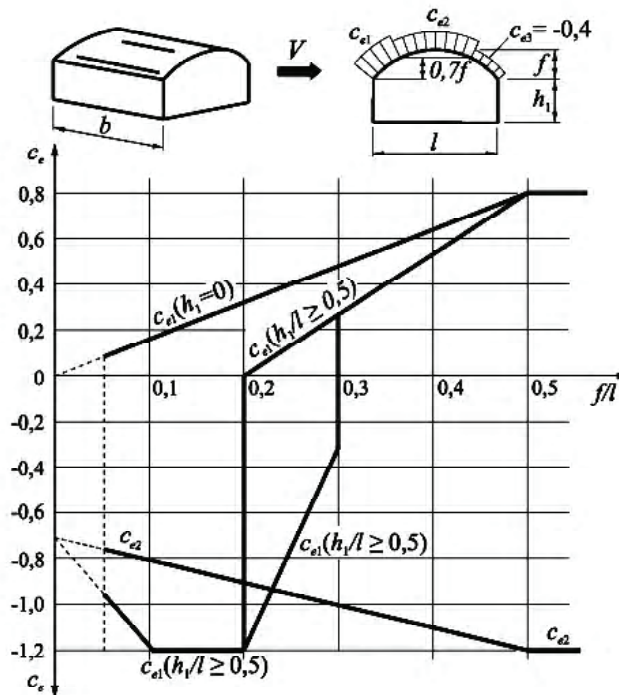


Рисунок 1 – График распределения аэродинамических коэффициентов представленный по СП 20.13330.2016, угол атаки $\beta = 0^\circ$.

В процессе исследований установлено, что существующие графики позволяют определить аэродинамические коэффициенты при высоте здания $h = 0$, характерной для бескаркасных арочных объектов, и при отношении высоты здания к пролету $\frac{h}{L} \geq 0,5$, характерном для высотных зданий при двух углах атаки $\beta = 0^\circ$ и $\beta = 90^\circ$. Данные для определения значений аэродинамических коэффициентов при отношении высоты здания к пролету в диапазоне $0 < \frac{h}{L} < 0,5$ отсутствуют. Анализ существующих и проектируемых объектов со сводчатыми покрытиями показал, что значительный объем зданий и сооружений возводится именно с подобными геометрическими параметрами.

Также необходимо отметить, что в отечественной нормативной базе отсутствуют данные для определения аэродинамических коэффициентов при угле атаки ветрового потока $\beta = 45^\circ$ несмотря на то, что последние научные исследования в этом направлении доказали необходимость уточнения нагрузок при подобном направлении ветрового давления.

Поэтому **целью работы** является уточнение аэродинамических коэффициентов для сводчатого покрытия из стальных тонкостенных холодногнутых арочных профилей и построение регрессионных зависимостей для прогнозирования аэродинамических коэффициентов на его поверхности при заданных основных параметрах, таких как отношение, стрела подъема арки к пролету ($\frac{f}{L}$) и отношение высоты здания к пролету ($\frac{h}{L}$) при разных углах атаки набегающего ветрового потока.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Моделирование ветровой аэродинамики на основе численных схем решения трехмерных уравнений движения жидкости и газа с современными моделями турбулентности в работе выполняется в программном комплексе SolidWork – Flow Simulation, основанном на конечно-объемном методе решения систем уравнений отражающих общие законы механики сплошной среды с применением двухслойной $k-\omega$ модели турбулентности Ментера (Shear-Stress Transport) [8].

Для этого в CAD-среде SolidWorks создаются расчетные модели здания со сводчатым покрытием со следующими геометрическими параметрами:

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

Затем исследуемая расчетная модель помещается в расчетную область (домен) представляющую собой виртуальную аэродинамическую трубу (рис. 2). Из опыта исследований в аэродинамических трубах принимается, что сооружение высотой H влияет на расстояние почти до $10H$. Размер расчетной области по вертикали и вдоль направления потока ветра для изолированной расчетной модели должны быть не менее $5H$, а за моделью как минимум $15H$ [9–11].

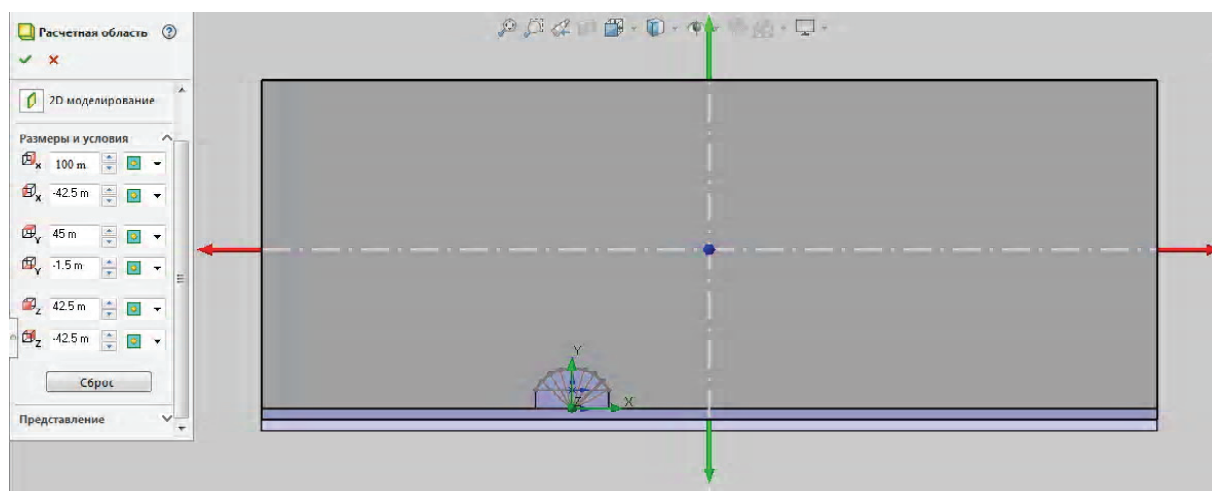


Рисунок 2 – Определение расчетной области для исследуемой модели.

В качестве характеристик набегающего ветрового потока принимают профиль скорости ветра, определяемый степенным законом и характеристики турбулентности (интенсивность и масштаб) [12], заданные параметры отвечают ветровым районам и типам местности по СП [7].

Проверка адекватности расчетов ветрового воздействия в программном комплексе SolidWorks проведена путем верификации расчетных моделей с использованием численного моделирования и физического исследования с дренажным масштабным экспериментом в аэродинамической трубе MAT-1 ДонНАСА. На рисунке 3 представлены физическая модель исследования и графики распределения коэффициента ветрового давления C_e для поверхности модели, полученные по экспериментальным данным в аэродинамической трубе и в результате численного моделирования в SolidWorks Flow Simulation.

Анализируя полученные значения аэродинамических коэффициентов численного исследования с данными эксперимента получена хорошая сопоставимость (в пределах 80 %), показывающая адекватность результатов расчета аэродинамических процессов в ПК SolidWorks Flow Simulation.

В работе рассматриваются сводчатые покрытия, ограниченные следующими геометрическими параметрами для бескаркасных арочных покрытий:

- стрела подъема арки $f = (0,3 \div 0,5)L$, м;
- пролет $10 \text{ м} \leq L \leq 36 \text{ м}$;
- отношение высоты здания (от уровня поверхности земли до нижней отметки покрытия) к пролету.

На рисунке 4 представлен пример расчетной области для одной из исследуемых моделей ($f = 0,3L$, $L = 10 \text{ м}$, $h/L = 0,25$).

В результате численного моделирования определяются контролируемые параметры расчета (относительное давление и скорость невозмущенного потока на характерной высоте) (рис. 4).

Анализ полученных параметров позволяет по аналитической формуле определить аэродинамические коэффициенты [13] при трех углах атаки ветра (табл. 1).

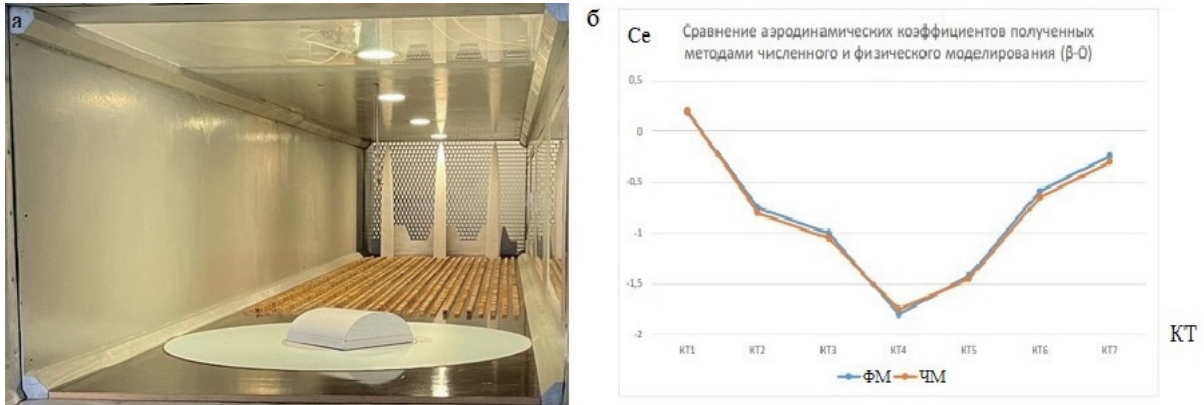


Рисунок 3 – Физическая модель покрытия (а) и график распределения аэродинамических коэффициентов для расчетной модели в контрольных точках КТ (б): где ФМ – физическое моделирование, ЧМ – численное моделирование.

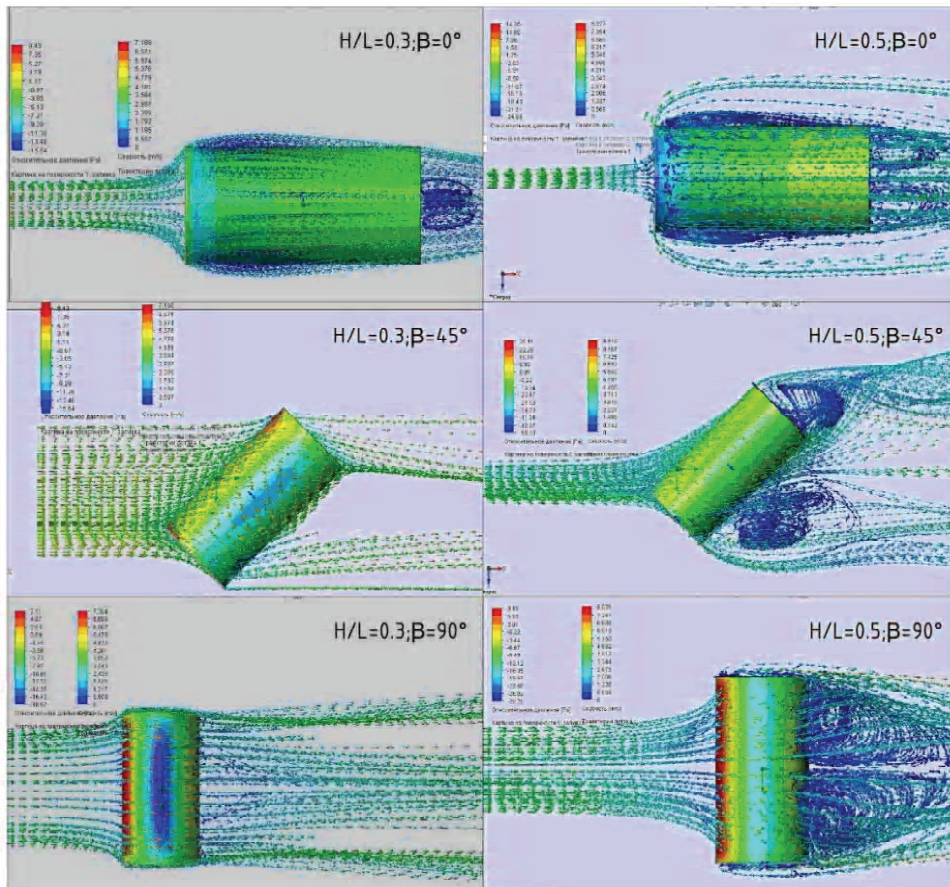


Рисунок 4 – Картины распределения относительного давления и скорости ветра на поверхности покрытия при разных углах атаки.

Для получения регрессионных моделей, позволяющих прогнозировать аэродинамические коэффициенты, применяется метод корреляционно-регрессионного анализа. Исследования проводятся по трехфакторному плану с восьмью экспериментальными строками при трех углах атаки ветра. Использование статистического моделирования позволяет получить адекватные модели при изменении факторов на двух уровнях: \min и \max при заданных параметрах (табл. 2):

- 1) отношении стрелы подъема арочного покрытия к пролету f/L ;

Таблица 1 – Аэродинамические коэффициенты сводчатых покрытий в зависимости от угла атаки и отношение высоты здания к пролету

Угол атаки β , °	$h/L/f$	C_{e1}		C_{e2}		C_{e3}	
		0,3	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5
0	0,1	0,82	0,93	-0,9	-1,00	-0,24	-0,40
	0,45	0,4	0,63	-0,35	-0,32	-0,31	-0,32
45	0,1	0,65	0,87	-0,58	-0,48	-0,5	-0,6
	0,45	0,38	0,48	-0,73	-0,61	-0,44	-0,46
90	0,1	-0,61	-0,49	-0,47	-0,32	-0,61	-0,49
	0,45	-0,43	-0,42	-0,42	-0,33	-0,43	-0,42

Таблица 2 – Факторы и уровни их варьирования

Уровни варьирования	Факторы		
	f/L	h/L	L
min	0,3	0,1	10
max	0,5	0,45	36

2) отношении высоты здания (от уровня поверхности земли до нижней отметки покрытия) к пролету, h/L ;

3) длине пролета, L , м.

По полученным результатам на основе матрицы показателей корреляции в программном комплексе Microsoft Office Excel получены уравнения линейной множественной регрессии для прогнозирования аэродинамических коэффициентов с учётом изменения высоты здания и геометрических параметров арочного покрытия при трех углах атаки ветрового потока (табл. 3).

Таблица 3 – Уравнение для прогнозирования аэродинамического коэффициента сводчатых покрытий с учетом угла атаки и отношения высоты здания к пролету

Угол атаки β , °	Уравнение для прогнозирования аэродинамического коэффициента C_{ei}
0	$C_{e1} = 0,61 - 0,85 \cdot \frac{f}{L} - 1,06 \cdot \frac{h}{L}$
	$C_{e2} = -1,02 + 0,263 \cdot \frac{f}{L} + 1,72 \cdot \frac{h}{L}$
	При $f = 0,3$ $C_{e3} = 0,3$; $f = 0$, $C_{e3} = 0,4$
45	$C_{e1} = 0,534 + 0,8 \cdot \frac{f}{L} - 0,934 \cdot \frac{h}{L}$
	$C_{e2} = -0,71 + 0,55 \cdot \frac{f}{L} - 0,4 \cdot \frac{h}{L}$
	При $f = 0,3$ $C_{e3} = -0,5$; $f = 0$, $C_{e3} = -0,6$
90	$C_{e1} = C_{e3} = -0,716 + 0,325 \cdot \frac{f}{L} + 0,357 \cdot \frac{h}{L}$
	$C_{e2} = -0,641 + 0,6 \cdot \frac{f}{L}$

Полученные данные позволяют уточнить нормативные графики для определения аэродинамических коэффициентов C_e сводчатых покрытий при отношении высоты здания к пролету в диапазоне $0 < \frac{h}{L} \leq 0,5$ и при углах атаки 45 и 0° (рис. 5–6).

В результате сравнения значений аэродинамического коэффициента C_e , полученных, в результате численного моделирования и с нормативными, приведенными в СП 20.13330, получены следующие выводы:

1. Наиболее опасным является ветровой поток, действующий на сводчатое покрытие с углом атаки $\beta = 0^\circ$.

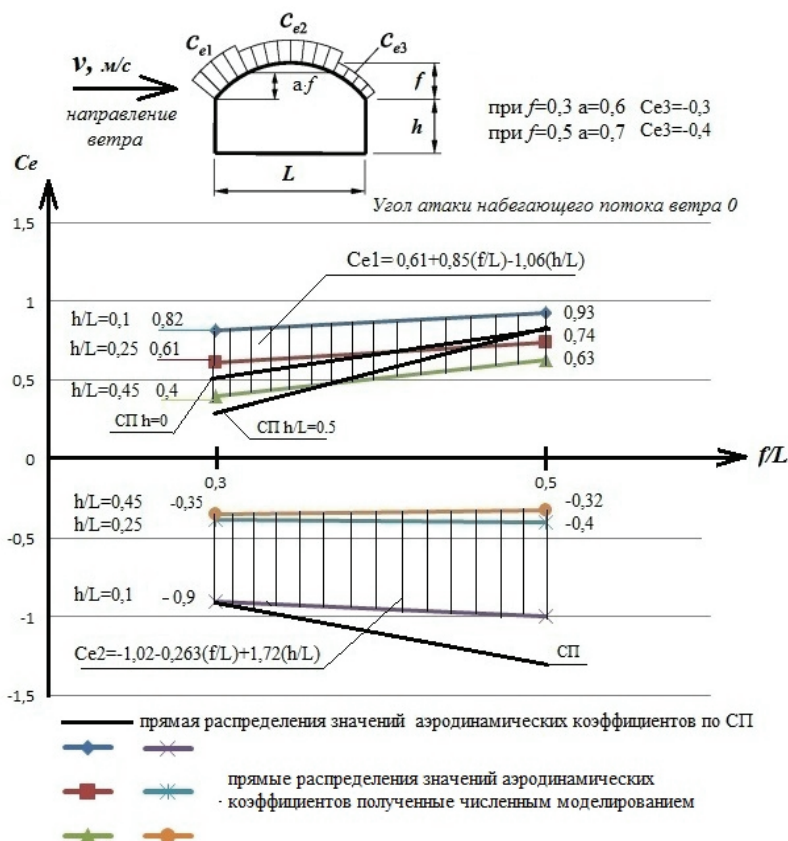


Рисунок 5 – График распределения аэродинамических коэффициентов при угле атаки $\beta = 0^\circ$.

2. Значения аэродинамических коэффициентов C_{e1} на наветренной стороне исследуемого сводчатого покрытия, определенные в результате математического (численного) моделирования, превышают нормативные значения максимум на 16 %.

3. Значения аэродинамических коэффициентов C_{e3} на подветренной стороне исследуемого копра, определенные в результате математического (численного) моделирования, по модулю превышают нормативные значения максимум на 50 %.

4. Значения аэродинамических коэффициентов C_{e2} в центральной части исследуемого сводчатого покрытия, определенные в результате математического (численного) моделирования, по модулю меньше нормативных для всех компонент.

5. Для арочных покрытий со стрелой подъема арки $f = 0,3L$ аэродинамический коэффициент принимает отрицательные значения на высоте $0,6f$, в нормативных документах – на постоянной высоте $0,7f$.

ВЫВОДЫ

1. Значения аэродинамических коэффициентов C_e для сводчатых покрытий, определенные с помощью численного моделирования, выше, чем определенные согласно СП 20.13330. В прочностных расчетах для бескаркасных арочных покрытий из тонкостенного гнутого профиля необходимо применять уточненные значения аэродинамических коэффициентов C_e .

2. На основании полученных данных при численном моделировании ветрового воздействия и применения статистического моделирования получены регрессионные зависимости для определения аэродинамических коэффициентов на поверхности арочного покрытия при заданных основных параметрах, таких как: отношение стрелы подъема арки к пролету (f/L) и отношение высоты здания к пролету (h/L) при разных углах атаки набегающего ветрового потока.

3. Уточненные аэродинамические коэффициенты C_e позволяют определить скорость воздушного потока в вентилируемой прослойке для утепленных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутого арочных профилей с устройством двойной арки с заполнением минеральной ватой.

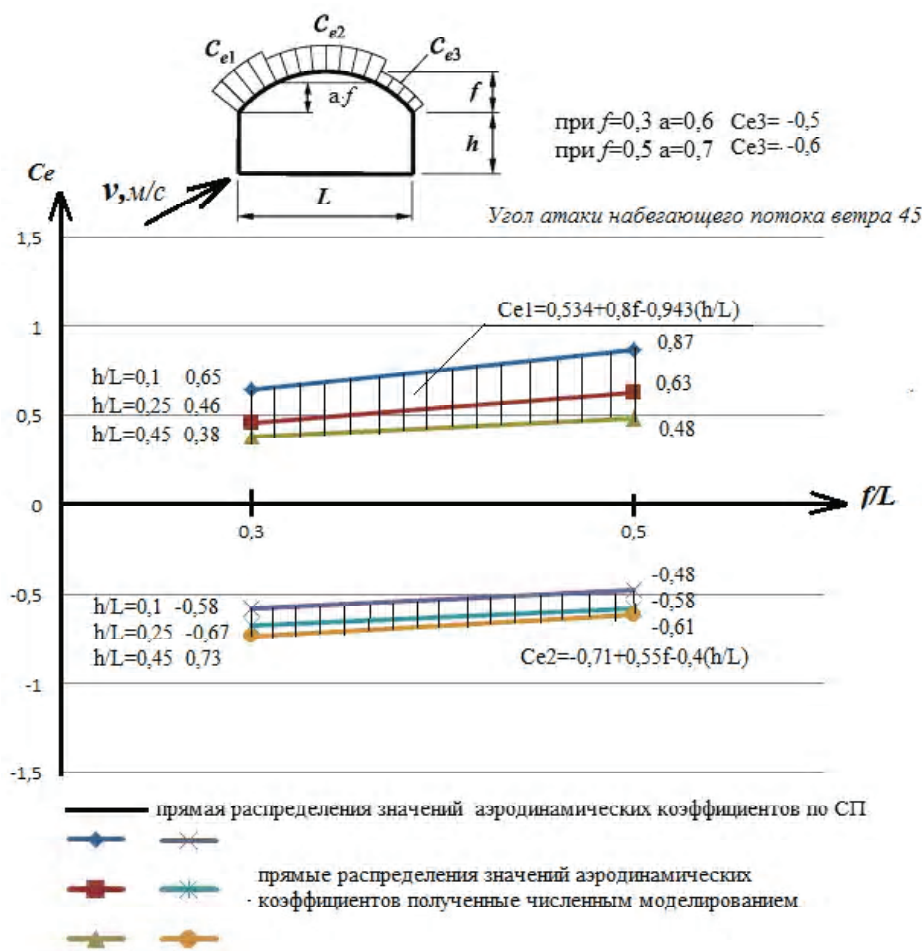


Рисунок 6 – График распределения аэродинамических коэффициентов при угле атаки $\beta = 45^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ляховский, Д. Металлостроительство: каковы перспективы в России? / Д. Ляховский. – Текст : непосредственный // Строительство. – 2014. – № 10. – С. 43–44.
2. Айрумян, Э. Л. Перспективы ЛСТК в России / Э. Л. Айрумян, Н. И. Каменщиков, М. А. Липленко. – Текст : непосредственный // Журнал «СтройПРОФИ». – 2013. – № 1 (10). – С. 31–65.
3. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин ; 5-е изд., пересмотр. – Москва : АВОК-Пресс, 2006. – 250 с. – ISBN 5-98267-023-5. – Текст непосредственный.
4. Гагарин, В. Г. Расчет теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором / В. Г. Гагарин, В. В. Козлов, Е. Ю. Цыкановский. – Текст : непосредственный // Журнал АВОК. – 2004. – № 2. – С. 20–26.
5. Машенков, А. Н. Общая система уравнений Буссинеска для одномерной свободной конвекции в плоском вертикальном слое / А. Н. Машенков, Е. А. Косолапов, Е. В. Чербуканова. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал. – 2012. – № 2. – С. 93–98.
6. Gagarin, V. G. Calculation of the velocity of air in the air gap facade systems, where natural ventilation / V. G. Gagarin, V. V. Kozlov, K. I. Lushin. – Текст : непосредственный // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Volume 10, No. 2. – P. 43438–43441.
7. 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.
8. Recommendations on the use of CFD in Wind Engineering, In J.P.A.J. van Beek (Ed.) / J. Franke, C. Hirsch, A. G. Jensen [et al.]. – Текст : непосредственный // Processing Int. Conf. on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics ; COST C14 – Impact of Wind and Storm on City life and Built Environment. – Rhode-Saint-Genève : [s. n.], 2004. – P. 1–11.

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра / ЦНИИ строительных конструкций им. В. А. Кучеренко. – Москва : Стройиздат, 1978. – 216 с. – Текст : непосредственный.
13. Реттер, Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика / Э. И. Реттер. – Москва : Стройиздат, 1984. – 294 с. – Текст : непосредственный.

Получена 09.01.2023

Принята 27.01.2023

В. О. МАЗУР, М. О. ЧАЙКА
ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ БУДІВЕЛЬ ЗІ
СКЛЕПІНЧАСТИМИ ПОКРИТТЯМИ ЗІ СТАЛЕВИХ ТОНКОСТІННИХ
ХОЛОДНОГНУТИХ АРОЧНИХ ПРОФІЛІВ
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. Стаття присвячена дослідженням аеродинамічних коефіцієнтів будівель зі склепінчастими покриттями в розв'язок положень СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Навантаження і впливи». Чисельне моделювання вітрової аеродинаміки в програмному комплексі обчислювальної гідрогазодинаміки SolidWorks – Flow Simulation дозволяє досліджувати вітровий вплив на склепінчасте покриття при різних кутах атаки набігаючого потоку вітру на безкаркасне арочне покриття із заданими геометричними параметрами. На підставі отриманих експериментальних даних, використовуючи методи статистичного моделювання, отримані регресійні залежності для визначення аеродинамічних коефіцієнтів на поверхні склепінчастого покриття при заданих геометричних параметрах для безкаркасних арочних покриттів, таких як: відношення стріли підйому арки до прольоту (f/L) і відношення висоти будівлі до прольоту (h/L) при різних кутах атаки набігаючого вітрового потоку
Ключові слова: аеродинамічний коефіцієнт, вітрова аеродинаміка, чисельне моделювання, експериментально-статистичне моделювання.

VICTORIA MAZUR, MARIA CHAYKA
INVESTIGATION OF AERODYNAMIC COEFFICIENTS OF BUILDINGS WITH
VAULTED COVERINGS MADE OF THIN-WALLED STEEL COLD-CURVED
ARCH PROFILES
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The article is devoted to the research of aerodynamic coefficients of buildings with vaulted coverings in the development of the provisions of SP 20.13330.2016 "SNiP 2.01.07-85*" Loads and impacts". Numerical simulation of wind aerodynamics in the SolidWorks – Flow Simulation computational fluid dynamics software package makes it possible to study the wind effect on the vaulted covering at different angles of attack of the incoming wind flow on the frameless arched covering with specified geometric parameters. On the basis of the experimental data obtained, using statistical modeling methods, regression dependences were obtained to determine the aerodynamic coefficients on the surface of the vaulted covering at given geometric parameters for frameless arch coverings, such as the ratio of the boom of the arch to the span (f/L) and the ratio of the height of the building to the span (h/L) at different angles of attack of the incoming wind flow.

Keywords: aerodynamic coefficient, wind aerodynamics, numerical modeling, experimental and statistical modeling.

Мазур Вікторія Александровна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології і організації будівництва ГОУ ВПО «Донбасська національна академія будівництва і архітектури». Научні інтереси: удосконалення конструктивно-технологічних рішень по устрою і капітальному ремонту огорожених будівель і споруд.

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.

Мазур Вікторія Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології та організації будівництва ДОНУВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: удосконалення конструктивно-технологічних рішень по влаштуванню і капітальному ремонту огорожувальних конструкцій будівель і споруд.

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

Mazur Victoria – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technology and Management in Construction Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: improvement of structural and technological solutions for the arrangement and overhaul of building envelopes of buildings and structures.

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