

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОВОГО ВПЛИВУ НА КОНСТРУКЦІЇ СТАДІОНУ В МОДУЛІ RWIND ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ DLUBAL RFEM

*Віталій ТОНКАЧЕЄВ<sup>1</sup>, Дмитро МАЛИШКО<sup>2</sup>, Людмила ЛАВРІНЕНКО<sup>3</sup>*

<sup>1, 2, 3</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037

<sup>1</sup> tonkacheiev.vg@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1010-8440>

<sup>2</sup> malyshkodima@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-2302-7604>

<sup>3</sup> ludmila.lavrinenko@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5601-0943>

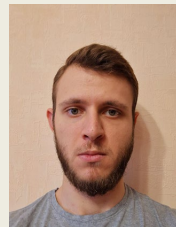
**Анотація.** В даній роботі досліджений вплив вітрового навантаження на відновлювану будівлю стадіону в м. Маріуполь, зруйнованого в результаті бойових дій. Розглянуто еліпсоподібна в плані споруда, конфігурація трибун і покриття якого являє собою повну чашу з неповним покриттям. Сталевий каркас покриття над трибунами запроєктований у вигляді навісу на консольних плоских фермах. Основу каркасу становлять вертикальні сталеві рами.

Розглянуто проблематику використання вітчизняних норм при проектуванні стадіонних споруд з покриттям над трибунами та підхід європейських нормативних документів щодо врахування дії вітрового впливу. Виконано аналіз попередніх наукових досліджень, що стосуються визначення аеродинамічних показників для стадіонних споруд, який показав необхідність проведення чисельного моделювання. Створено модель споруди відповідно до проєктних рішень. За допомогою спеціального модулю RWIND в складі програмного комплексу Dlubal RFEM імітувався вітровий потік, аналогічний до створюваного в аеродинамічній трубі. Результати теоретичного дослідження представлені у вигляді діаграм розподілу аеродинамічних коефіцієнтів, які використані для подальшого визначення значень вітрового тиску на несучі конструкції та виконання статичних розрахунків каркасу.

Проведено аналіз результатів дослідження. Використання інструментів чисельного моделювання вітрового потоку дозволило підвищити складність системи як на рівні



**Віталій Тонкачєєв**  
доцент кафедри металевих та  
дерев'яних х конструкцій,  
к.т.н., доцент



**Дмитро Малишко**  
магістр кафедри металевих та  
дерев'яних конструкцій



**Людмила Лаврінєнко**  
доцент кафедри металевих та  
дерев'яних конструкцій,  
к.т.н., доцент

конструктивного рішення, так і на рівні розрахункової моделі. Для унікальної споруди показана можливість визначення значень аеродинамічних коефіцієнтів, отриманих за чисельним моделюванням просторової структури. Аналіз результатів надав можливість кваліфіковано обрати необхідні конструктивні рішення несучих конструкцій сталевого каркасу споруди з урахуванням вимог чинних норм проектування та нормативних положень Єврокод 1.

**Ключові слова.** Стадіон; навіс; числове моделювання; вітровий потік; аеродинамічні коефіцієнти.

## ВСТУП

В результаті повномасштабного вторгнення на територію України ворогом було знищено багато об'єктів інфраструктури, громадського та житлового фонду міста Маріуполь. Одним з таких об'єктів був багатофункціональний стадіон, що вміщував близько 13 тис. глядачів.

В межах науково-дослідної роботи розглядався проєкт відновлення будівлі. Стадіон представляє собою багатофункціональну будівлю для різних заходів: від футбольних матчів та легкоатлетичних подій до культурних заходів і великих музичних концертів, включає футбольне поле, два додаткових спортивні майданчика по торцях та бігові доріжки. Над трибунами та частиною площадки передбачене покриття. При створенні проєктних рішень стадіону автори стикнулись з проблемою визначення вітрових навантажень та аеродинамічних показників будівлі стадіону. Оскільки чинні в Україні нормативні документи ДБН В.1.2-2 [1] та Єврокод ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4 [2] висувають до розрахунку ряд вимог, то дослідження аеродинамічного впливу та отримання результатів у формі аеродинамічних коефіцієнтів дозволяє використовувати отримані результати відповідно до будівельного законодавства України.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вітрове навантаження на покриття складної конфігурації становить одну із складних задач будівельного проєктування. Дослідження роботи будівель та споруд різної конфігурації при дії вітрового впливу активно виконуються науковими колективами багатьох країн світу. Тут існує велика кількість напрацьованих, добре сформульованих та відпрацьованих підходів. Виявлені при цьому додаткові резерви системи та альтернативні підходи до визначення перерозподілу зусиль дозволили отримати ефективні конструктивні рішення унікальних споруд та стадіонів [3, 4, 5].

В цілому аналіз публікацій і проєктних матеріалів показує, що на сьогоднішній день

ще не досягнуто системне, достатньо узгоджене тлумачення сукупності об'єктів, для яких вітрове навантаження є принципово однозначним та визначеним [6].

Норми проєктування [1, 2] висувають вимогу щодо визначення фактичного розподілу вітрового навантаження та регламентують його урахування як суму нормального тиску, прикладеного до зовнішніх поверхонь, та, в разі навісів та повітропроникних огорож, нормального тиску на внутрішні поверхні. Опис поведінки системи складної геометричної форми у вітровому потоці має виконуватися спеціальним динамічним розрахунком для визначення впливу пульсаційної складової навантаження, а в необхідних випадках – обдуванням моделі в аеродинамічній трубі [1].

В сучасному будівельному проєктуванні склалася ситуація, що полягає в певному тиску архітектурних форм на конструктивні рішення, що виражається не стільки у збільшенні довжин, прольотів та ускладненні сітки колон, скільки у створенні складних конфігурацій та об'ємів із специфічним обладнанням [25]. Таке проєктування вимагає чисельних досліджень і додаткового вивчення взаємодії форми споруди та вітрового потоку, а також застосування спеціалізованих програмних інструментів для розрахунку.

**Метою роботи** є аналіз конструкції просторового покриття стадіону та отримання обґрунтованого результату впливу на конструктивну форму вітрового навантаження в межах характеристичних значень відповідно до норм проєктування України.

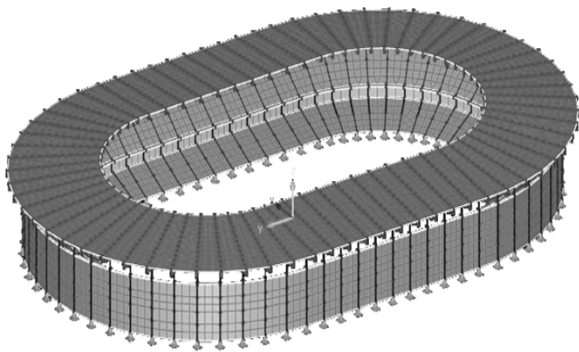
**Задачею дослідження** є побудова та розрахунок структурної моделі МКЕ просторового покриття стадіону, моделювання вітрового потоку та визначення аеродинамічних коефіцієнтів

**Методи дослідження** – використання інструментів та моделей ПК для аналізу отриманих результатів.

**Об'єктом дослідження** є несуча конструкція покриття стадіону для умов м. Маріуполь.

Запроектовано покриття еліпсоподібної в плані арени розмірами 236,0x156,4 м та загальною висотою 28 м. Композиційним ядром арени є футбольне поле, навколо якого розміщені бігові доріжки та трибунні частини споруди. Конфігурація трибун і покриття представляє собою повну чашу з неповним покриттям.

Основу каркасу будівлі стадіону становлять вертикальні сталеві рами з жорстким сполученням вузлів, до центральної стійки яких приєднано консольні ферми навісу. Покриття над трибунами стадіону запроектоване у вигляді навісу, що утворюється консольними плоскими сталевими фермами, виліт консолі над трибунами — 30 м, виліт консольних ферм на фасад будівлі — 6 м. Кут нахилу покрівлі —  $5^\circ$ . Трибуни облаштовані в 2 яруси. Перший ярус трибун містить 14 рядів сидінь, другий — 16 рядів. Рами об'єднані системою в'язей. При такому конструктивному рішенні система набуває додаткові якості просторової структури, що забезпечує надійну роботу в складних та екстремальних ситуаціях (рис. 1).



**Рис.1.** Модель будівлі стадіону, аналізована в ПК Dlubal RFEM

**Fig. 1.** The stadium model analyzed using Dlubal RFEM PC.

Загальною архітектурно-конструктивною особливістю критих стадіонів є поєднання внутрішнього функціонального простору з конструктивною схемою покриття, що чітко виражено в кращих спортивних спорудах світу. Кожна конструктивна форма є унікальною та вимагає дослідження поведінки у вітровому потоці.

Так, наприклад, при реконструкції та надбудові навісу над трибунами Олімпійського стадіону в Римі було проведено дослідження нелінійної реакції конструкцій нового покриття на штучно створене мультиторельоване поле вітрового навантаження, що було отримане продуванням моделі стадіону в аеродинамічній трубі [7]. Ціла низка робіт присвячена дослідженням конструкцій великопролітних покриттів стадіонів під дією вітрових навантажень за допомогою продування у аеродинамічній трубі [4, 8, 9, 10, 11, 12, 23, 24], уважно розглядаються та вдосконалюються сучасні методи експериментальних досліджень складних архітектурних форм. В [8] розглядаються результати чисельних досліджень та аналізується поведінка висувного покриття, в [3] наводяться дані про експериментальні аеродинамічні випробування великопролітних покрівель стадіонів Греції та Італії. Експериментальні дослідження статичного тиску на поверхні даху моделі стадіону з описом методики та оптимальних форм дахів з погляду аеродинаміки наведено в [13]. При цьому розглядаються два підходи до дослідження аеродинаміки - випробуванням в аеродинамічних трубах та методами обчислювальної аеродинаміки. На прикладі опор зв'язку в роботі [6] висвітлено проблематику сучасних вітчизняних нормативних документів щодо проведення досліджень аеродинаміки. Із зростанням потужностей обчислювальних систем все частіше надаються переваги дослідженням аеродинамічних показників конструкцій будівель та споруд за допомогою чисельного моделювання із використанням спеціалізованих програмних комплексів. Так в роботі [14] наведено аналіз поведінки мембрани просторового покриття у формі гіперболічного параболоїду в програмному комплексі Dlubal RFEM за допомогою додатку RWIND, у роботі [15] наведено результати порівняльного аналізу аеродинамічних досліджень моделей легких покриттів над трибунами стадіонів в аеродинамічній трубі та чисельних

досліджень в програмному комплексі FLUENT.

Все більша увага приділяється чисельному моделюванню розподілу вітрового тиску на просторові конструкції покриттів стадіонів [10, 16, 17, 18]. Моделювання вітрового потоку методами гідродинаміки розглядається в [19, 20] У роботі [21] узагальнюється досвід використання обчислювальної гідродинаміки при попередньому дослідженні нового даху над стадіоном Болоньї.

Вітрові навантаження на сталеві конструкції будівель в Україні визначаються згідно з вітчизняними нормами [1]. Для проведення розрахунків за граничними станами визначають експлуатаційні та граничні розрахункові значення вітрових навантажень. Розрахункові навантаження, окрім характеристичного значення вітрового тиску, коефіцієнтів надійності за граничним і експлуатаційним значенням, враховують коефіцієнт розподілу вітрового навантаження  $C$ :

$$C = C_{aer} C_h C_{alt} C_{rel} C_{dir} C_d, \quad (1)$$

де  $C_{aer}$  – аеродинамічний коефіцієнт;  
 $C_h$  – коефіцієнт висоти споруди;  
 $C_{alt}$  – коефіцієнт географічної висоти;  
 $C_{rel}$  – коефіцієнт рельєфу;  
 $C_{dir}$  – коефіцієнт напрямку;  
 $C_d$  – коефіцієнт динамічності.

Для проєктованої будівлі стадіону найбільший інтерес становить визначення саме аеродинамічних коефіцієнтів, бо коефіцієнти географічної висоти, рельєфу та напрямку є суттєво узагальненими та не залежать від геометрії об'єму, розміщеного у вітровому потоці. Фактор кореляції за висотою над поверхнею землі та динамічні ефекти поведінки покриття у даній роботі окремо не розглядаються та враховані програмно.

Щодо аеродинамічних коефіцієнтів, їх визначення викладено у [1], де пропонується користуватись схемами та вказівками ДБН. Норми проєктування [1] не пропонують готових схем, які щонайбільше відповідають розглядуваному проєкту та за якими можна

було б визначити аеродинамічні коефіцієнти на стінові і покрівельні огорожувальні конструкції та підтрибунну частину споруди. В свою чергу рекомендовано у випадках, не передбачених нормами, аеродинамічні коефіцієнти приймати за довідковими та експериментальними даними або на основі результатів фізичного моделювання конструкцій в аеродинамічних трубах. Як вказано в дослідженні [13, 22], у вітчизняних нормах напряму не міститься вказівок щодо використання чисельного моделювання для розрахунку та визначенні аеродинамічних характеристик складних будівель.

Наведені в додатку I [1] схеми повністю не відображають не тільки фактичного обтікання вітровим потоком будівлі в цілому, а й окремих частин будівлі. Наприклад, застосування схеми 2 або 3 для прямолінійних бічних ділянок зовнішньої стінової огорожі як для будівель з двосхилими або склепінчастими покриттями (відповідно без урахування коефіцієнтів для покрівлі) або схеми 12,6 для торцевих частин споруди як для споруд з круговою циліндричною поверхнею, буде давати суттєві похибки щодо вітрового навантаження, бо через наявність частково відкритого даху над стадіоном вітровий потік буде потрапляти до середини споруди та тиснути відповідно на конструкції трибун та викликати додатковий тиск на рами будівлі, що їх довантажуватиме. Моделюванням навісу над стадіоном за схемами 11 (типи III та IV) для частини покриття з підвітряного та навітряного боків відповідно не враховується вітровий потік, що піднімається нагору при потрапленні на похилу поверхню трибун та діє в зворотному напрямку відносно навантаження, що розглядається згідно зі схемою 11.

Для комплексного врахування дії вітрового потоку було обрано рішення провести чисельне моделювання за допомогою програмного комплексу Dlubal RFEM та його спеціалізованого модулю RWIND [26], успішне застосування якого

проаналізовано в [14] для мембранного покриття.

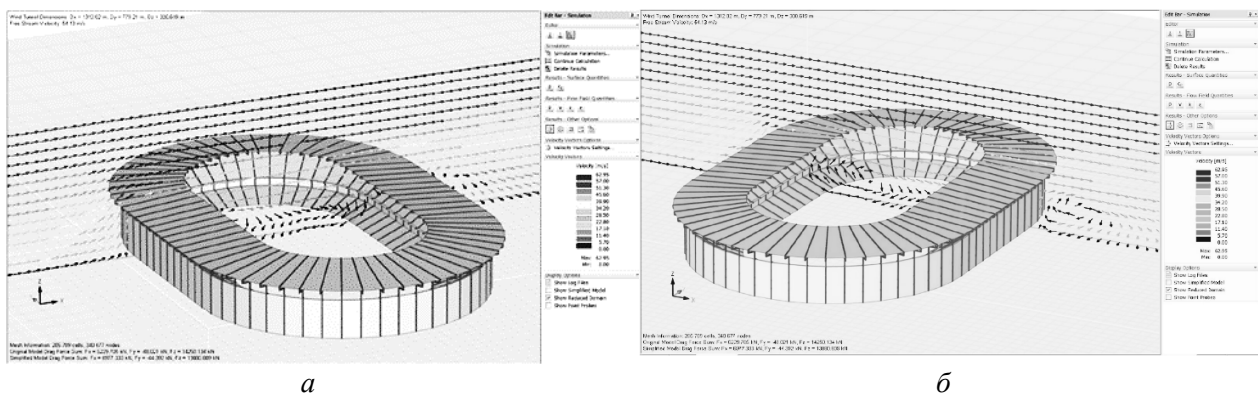
## ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Моделювання вітрового впливу в модулі RWIND базується на використанні правил EN 1991 [2]. Підхід Єврокоду дозволяє врахувати наявність перешкод під навісом через врахування коефіцієнту заповнення  $\phi$ , що відповідає відношенню площі можливих перешкод під навісом до загальної площі поперечного перерізу під ним. Спеціальний модуль RWIND при визначенні значень вітрового тиску бере за основу значення базової швидкості вітру, що згідно національного додатку [2] для міста Маріуполь дорівнює 31 м/с. Було створено модель для дослідження, що максимально відповідає запроєктованим конструкціям стадіону (рис. 1), до якої прикладався

вітровий потік в поперечному  $0^\circ$  та поздовжньому  $90^\circ$  напрямках відповідно.

Значення аеродинамічних коефіцієнтів визначалися для обох напрямків дії вітрового потоку на обидві протилежні трибуни. Швидкість та напрямки циркуляції вітрових потоків для обох напрямків їх дії наведені на рис. 2 – 3.

На рис. 2 продемонстровано, як вітрові потоки потрапляють всередину стадіону та циркулюють між трибунами, створюючи таким чином додатний тиск на трибуни та конструкції навісу. Наявність відкритого простору між стіною огорожею та навісом дозволяє вільно проходити вітровому потоку, таким чином знижуючи навантаження як на самі трибуни так і на консольні конструкції навісу, що також було зазначено в роботі [4], де розглядалось випробування в аеродинамічній трубі моделі стадіону «Металіст» в м. Харків.



**Рис. 2.** Напрямки та швидкості вітрових потоків при імітації продування в аеродинамічній трубі при напрямку дії вітрового потоку під кутом  $0^\circ$ :

- a* — вид з боку трибуни ліворуч;
- б* — вид з боку трибуни праворуч

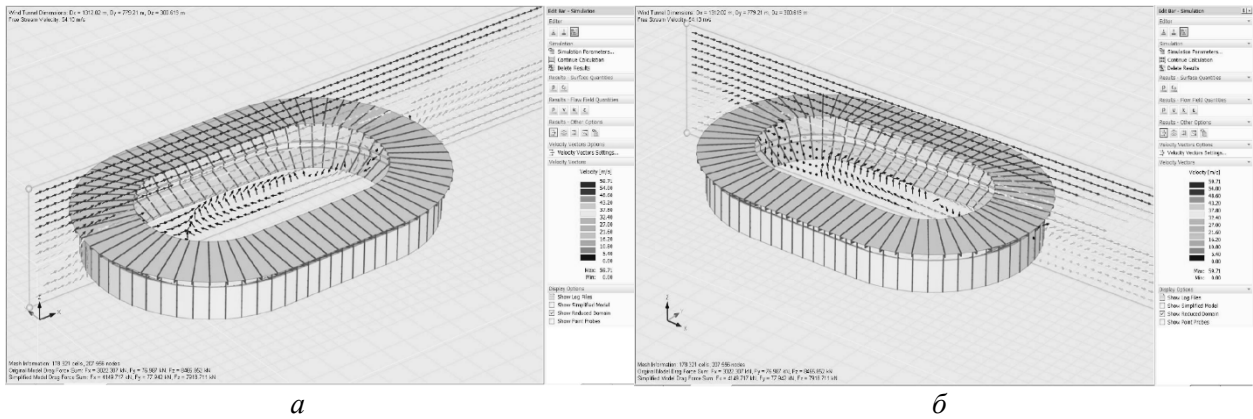
**Fig. 2.** Wind flows directions and speeds when simulating blowing in a wind tunnel when the wind flow direction is at  $0^\circ$ :

- a* — view for the left grandstand;
- b* — view for the right grandstand

При напрямку вітрового потоку, що спрямований вздовж споруди стадіону (рис. 3), що відповідає куту  $90^\circ$ , розподіл вітрових потоків у модулі RWIND показує схожі результати зі схемою  $0^\circ$ , однак за рахунок більших відстаней між протилежними трибунами характер циркуляції вітрових потоків всередині стадіону дещо

відрізняється. Те саме спостерігається в зоні пасивного тиску (рис. 3, *б*).

Отримано значення аеродинамічних коефіцієнтів для кожного з напрямків вітрового потоку для зон активного та пасивного тиску на конструкції стінової огорожі і конструкції покриття, а також на трибуни стадіону.



**Рис. 3.** Напрямки та швидкості вітрових потоків при імітації продування в аеродинамічній трубці при напрямку дії вітрового потоку під кутом 90°:

*a* — вид з боку трибуни ліворуч;

*б* — вид з боку трибуни праворуч.

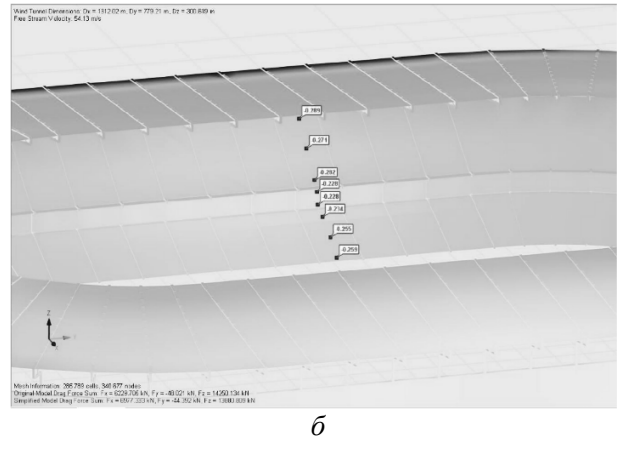
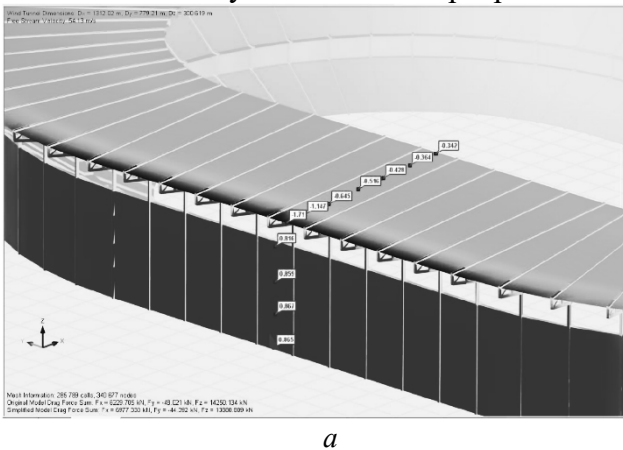
**Fig. 3.** Wind flows directions and speeds when simulating blowing in a wind tunnel when the wind flow direction is at 90°:

*a* - view for the left grandstand;

*b* - view for the right grandstand.

Результати визначення аеродинамічних коефіцієнтів, які були обчислені за допомогою модулю RWIND програмного

комплексу Dlubal RFEM наведені на діаграмах на рис. 4 – 7.



**Рис. 4.** Значення аеродинамічних коефіцієнтів для трибуни ліворуч при напрямку вітрового потоку 0° (див. рис. 2, *a*):

*a* — для стінової огорожі та покрівлі;

*б* — для трибун

**Fig. 4.** The aerodynamic coefficients values for the left grandstand when the wind flow direction is 0° (see Fig. 2, *a*):

*a* — for the wall fence and the roof;

*b* — for the spectators seats

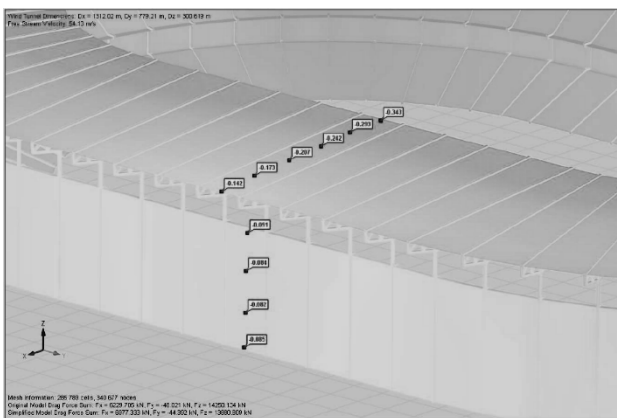
Відповідно до діаграми на рис. 4, *a* розподіл аеродинамічних коефіцієнтів на конструкції стінової огорожі для зони активного вітрового тиску лежить в межах від +0,816 до +0,865; для конструкцій навісу характерним є розподіл коефіцієнтів в межах від -0,342 (крайня точка консолі 30 м,

всередині чаші стадіону) до -1,71 (крайня точка консолі 6 м, назовні будівлі), додатних значень коефіцієнтів на покрівлі не спостерігається, що свідчить про підймальний характер дії вітрового навантаження для наведеної конструкції навісу.

Як видно з діаграми на рис. 5, *a*, на стінові конструкції огорожі для трибуни праворуч діє пасивний тиск вітрового навантаження, що виникає в зоні розрідженого повітря, при цьому розподіл аеродинамічних коефіцієнтів лежить в межах від  $-0,091$  до  $-0,085$ . Для конструкцій навісу розподіл аеродинамічних коефіцієнтів лежить в межах від  $-0,343$  (крайня точка консолі 30 м, всередині чаші стадіону) до  $-0,142$  (крайня точка консолі 6 м, назовні будівлі).

Відповідно до діаграми на рис. 6, *a* на стінові конструкції огороження діє активний вітровий тиск, при цьому розподіл аеродинамічних коефіцієнтів лежить в

межах від  $+0,805$  до  $+0,858$ . Найбільш навантаженою є зона кола, що обмежена сімома кроками рам від вершини. Для покрівлі ситуація схожа з діаграмою на рис. 4, значення коефіцієнтів лежать в межах від  $-0,234$  (крайня точка консолі 30 м, всередині чаші стадіону) до  $-1,229$  (крайня точка консолі 6 м, назовні будівлі). Для трибуни праворуч при напрямку вітрового потоку  $90^\circ$  для стінового огороження розподіл аеродинамічних коефіцієнтів лежить в межах від  $+0,111$  до  $+0,220$ , при цьому зона розподілу максимального вітрового тиску по колу лежить в межах трьох кроків рам відносно вершини.

*a**b*

**Рис. 5.** Значення аеродинамічних коефіцієнтів для трибуни праворуч при напрямку вітрового потоку  $0^\circ$  (див. рис. 2, *b*):

*a* — для стінової огорожі та покрівлі;

*b* — для трибун

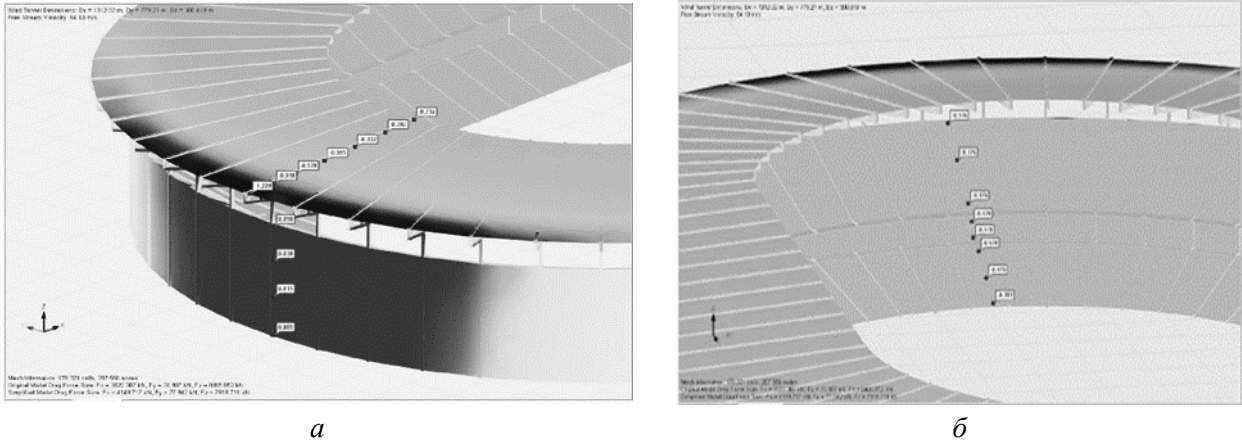
**Fig. 5.** The aerodynamic coefficients values for the right grandstand when the wind flow direction is  $0^\circ$  (see Fig. 2, *b*):

*a* — for the wall fence and the roof;

*b* — for the spectators seats

Для покрівлі ситуація дещо відрізняється від напрямку дії вітрового потоку  $0^\circ$  (рис. 5, *a*), розподіл коефіцієнтів складає від  $-0,073$  (крайня точка консолі 30 м) до  $+0,084$  (крайня точка консолі 6 м), де перехід від від'ємних до додатних значень відбувається приблизно в зоні розташування опори навісу. Наявність додатних коефіцієнтів свідчить про напрямок дії вітрового тиску до поверхні навісу. Для трибун (рис. 4, *b* – 7, *b*) розподіл аеродинамічних коефіцієнтів є схожим для обох напрямків дії вітрового потоку. Так при напрямку  $0^\circ$ : для трибуни ліворуч коефіцієнти знаходяться в межах від

$-0,259$  до  $-0,289$  знизу до верху відповідно; для трибуни праворуч — в межах від  $-0,157$  до  $-0,174$  зверху до низу відповідно. При напрямку вітрового потоку  $90^\circ$ : трибуна ліворуч матиме коефіцієнти від  $-0,176$  до  $-0,181$  згори до низу відповідно; трибуна праворуч — в межах від  $-0,005$  до  $-0,017$  згори до низу відповідно.



**Рис. 6.** Значення аеродинамічних коефіцієнтів для трибуни ліворуч при напрямку вітрового потоку 90° (див. рис. 3, а):

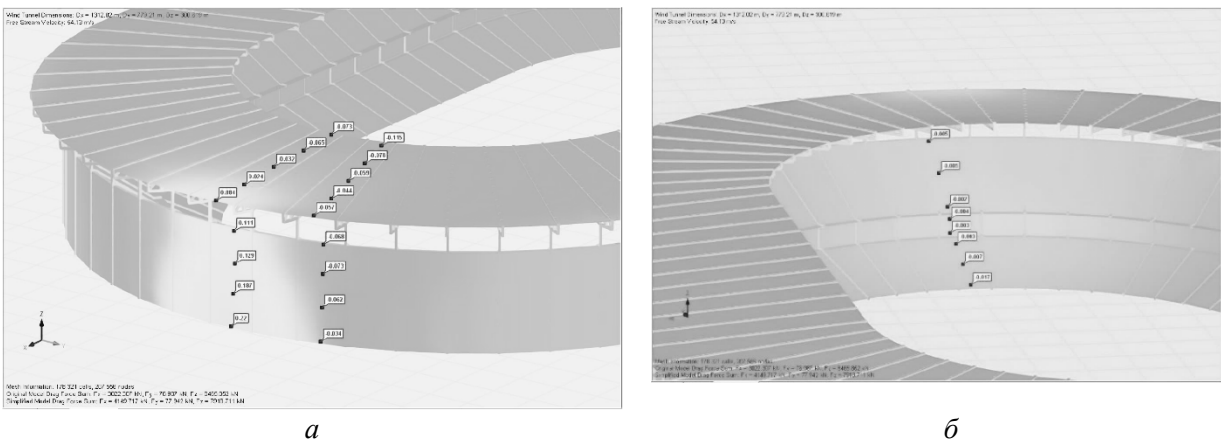
*a* — для стінової огорожі та покрівлі;

*б* — для трибун

**Fig. 6.** The aerodynamic coefficients values for the left grandstand when the wind flow direction is 90° (see Fig. 3, a):

*a* — for the wall fence and the roof;

*b* — for the spectators seats



**Рис. 7.** Значення аеродинамічних коефіцієнтів для трибуни праворуч при напрямку вітрового потоку 90° (див. рис. 3, б):

*a* — для стінової огорожі та покрівлі;

*б* — для трибун

**Fig. 7.** The aerodynamic coefficients values for the right grandstand when the wind flow direction is 90° (see Fig. 3, b):

*a* — for the wall fence and the roof;

*b* — for the spectators seats

Аеродинамічні коефіцієнти для вертикальних поверхонь за [1, додаток І] мають відомі значення +0,8 для зони активного тиску та -0,4 для зони пасивного тиску для прямолінійної ділянки стадіону. Для криволінійної ділянки стадіону, для найбільш навантаженої рами каркасу згідно схеми 12,б [1] аеродинамічний коефіцієнт

для активного тиску складає +0,780. Чисельним моделюванням в модулі RWIND програмного комплексу Dlubal RFEM уточнює ці значення, які для інших ділянок поверхні досліджуваного об'єму відрізняються від наведених в ДБН [1]. Через складний рух вітрового потоку всередині чаші тиск на консольні ділянки



покриття не корелюється з даними ДБН і дає зворотні результати порівняно із спрощеними схемами. Так для навісу при кутах нахилу покрівлі близько  $5^\circ$  матимемо значення аеродинамічних коефіцієнтів +1,36 за для схеми 11-III та +1,29 для схеми 11-IV, тобто при розрахунку несучих конструкцій покрівлі врахуванні додатних значень коефіцієнту призводить до довантаження ферм покриття при одночасному врахуванні вітрового тиску разом з гравітаційними навантаженнями. Проте за результатами чисельного моделювання вітровий тиск спрямований в зворотному напрямку та дещо розвантажує консольні конструкції ферм, що окрім вітрового впливу зазнають

впливу гравітаційних навантажень (сніг, власна вага, корисне в міжферменному просторі).

Якщо звернутись до гармонізованих норм ДСТУ [2] де враховується коефіцієнт заповнення  $\phi$ , то для навісу згідно для зони «С» буде -1,8, що наближене до результатів чисельного моделювання, де в цій зоні отримано -1,71. Зона «А» має сталі значення коефіцієнту, натомість чисельне моделювання показало змінні значення коефіцієнтів зі зменшенням в напрямку 30-метрової консолі, максимальне значення коефіцієнту для зони «А» збігається з результатами, отриманими за допомогою RWIND.

**Табл.1.** Порівняльна таблиця аеродинамічних коефіцієнтів для частин споруди  
**Tabl. 1.** Comparisons of aerodynamic coefficients in building zones

Напрямок вітрового потоку та характер взаємодії з спорудою		Вертикальні зовнішні поверхні/стіни		Покриття					Трибуни
				навіс над трибунами			зовнішня консоль		
		модель	ДБН	модель	ДБН	ДСТУ	модель	ДСТУ	модель
90°	Навітрений бік	+0,816... +0,805	+0,8	-0,342	+1,36	-0,34	-1,710	-1,8	-0,259 ... -0,289
	Підвітрений бік	-0,091... -0,085	-0,4	-0,343	+1,29	-	-0,142	-	-0,157... -0,174
0°	Навітрений бік (торець)	+0,805... +0,858	+0,78	-0,234	+1,36	-	-1,229	-	-0,174... -0,181
	Поздовжні конструкції	+0,111... +0,220	-0,4	-0,073	-	-	+0,084	-	-0,005... -0,017

При застосування модулю RWIND встановлено оптимальне розташування будівлі стадіону з точки зору роботи під вітровими навантаженнями. Як найефективніша обрана орієнтація будівлі стадіону в поздовжньому напрямку, яка збігається з переважним напрямком рози вітрів, що для Маріуполя є північно-східним, східним та південно-західним.

Порівняння результатів моделювання поведінки просторової конструкції стадіону з критими трибунами наведено в табл. 1 та свідчить про те, що положення вітчизняного ДБН [1] не дозволяють з належною точністю визначити аеродинамічні показники просторової будівлі складної конфігурації, проте передбачають можливість використання даних як орієнтовних щодо деяких її частин. Положення Єврокод 1 [2] більше орієнтовані на машинне

проектування, що дозволяє використовувати їх для виконання чисельного моделювання вітрового впливу на просторову структуру та надає можливість отримати повні дані щодо навантажень на проєктовану конструкцію.

## ВИСНОВКИ

1. Отримані результати чисельного моделювання поведінки просторової системи у вітровому потоці при застосуванні інструментів модулю RWIND в складі програмного комплексу Dlubal RFEM дозволили підвищити складність системи як на рівні конструктивного рішення, так і на рівні розрахункової моделі. Отримані результати не протирічать концепції Єврокод 1, положення якого щодо

вітрового впливу використані як базові модулю RWIND.

2. Отримано повну якісну картину розподілу вітрового потоку на зовнішніх поверхнях та всередині чаші стадіону, яка кількісно представлена у виді діаграм аеродинамічних коефіцієнтів. Отримані результати дозволяють визначити значення вітрового тиску на несучі конструкції для подальшого статичного розрахунку сталевих каркасів.
3. Проведений аналіз конструктивного рішення при експериментальному проєктуванні із застосуванням методів і інструментів чисельного моделювання вітрового потоку надав можливість кваліфіковано обрати необхідні конструктивні рішення несучих конструкцій сталевих каркасів споруди з урахуванням вимог чинних норм проєктування та нормативних положень Єврокод 1.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проєктування. – К.: Мінбуд України, 2006. – 75 с. - (зі змінами від 1.10.2007). – Чинні з 1.01.2007
2. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-4. Загальні дії. Вітрові навантаження (EN 1991-1-4:2005, ITD) - К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 157 с. – Чинний з 27.12.2010
3. Biagini, P., Borri, C., Facchini, L. (2007). Wind response of large roofs of stadiums and arena, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 95(9–11), 871–887. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2007.01.025>
4. Терещенко Ю.И., (2010). Особенности реконструкции областного спортивного комплекса «Металлист» в г. Харькове. *Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проєктного інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського (5)*, 15–24,
5. Бензель О., Лаврінченко Л. (2021). Інформаційне моделювання сталевих будівлі з підвищеними вимогами жорсткості. *Будівельні конструкції. Теорія і практика. (9)*, 30–44. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.30-44>
6. Махінько А.В. (2021). Два погляди на сучасну аеродинаміку опор зв'язку. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво), ПолтНТУ. - Вип. 2 (30)*, 118–121.
7. Borri C., Majowiecki M., Spinelli P.. (1992). Wind response of a large tensile structure: The new roof of the Olympic stadium in Rome. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. V. 42. Issues 1–3(1992)*. 1435–1446. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90151-Y](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90151-Y).
8. Man, Liu., Qiu-Sheng, Li., Sheng-Hong, Huang., Feng, Shi., Fubin, Chen. (2018). Evaluation of wind effects on a large span retractable roof stadium by wind tunnel experiment and numerical simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. (179)*, 39–57. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.05.014>.
9. Yi, Zhao., Ruibin, Li., Lu, Feng., Yan, Wu., Jianlei, Niu., Naiping, Gao. (2022) Boundary layer wind tunnel tests of outdoor airflow field around urban buildings: A review of methods and status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (167), 112717 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112717>.
10. Wacker J., (2012). Windkanaltests zur Ermittlung der Windlasten auf Stadionsdächer. *Stahlbau*, (81), 481–485. <https://doi.org/10.1002/stab.201201573>
11. Goliger, AM. (2010). Wind-tunnel testing of sports stadia to optimise their use and safety. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 52(1) Retrieved January 22, 2024, from [http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1021-20192010000100004&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-20192010000100004&lng=en&tlng=en).
12. Sun, W. B., Li, Q. X., Chen, H. X., & Zhou, W. J. (2011). Wind-Induced Responses Study and Wind-Resistant Design of Super-Long-Span Cable-Membrane Roof Structure of Shenzhen Baoan Stadium. In *Applied Mechanics and Materials* (71–78), 666–672. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.71-78.666>
13. Кінаш Р.І., Копилов О.Є., Копилова І.В. (2007). Дослідження впливу форми даху стадіону на аеродинамічне навантаження. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Теорія і практика будівництва*, (600), 165–170.
14. Kawulok M, Freijerová N, Horňáková M, Juračka D, Krejsa M. (2023). Hyperbolic Paraboloid Tensile Structure—Numerical CFD Simulation of Wind Flow in RWIND Software. *Buildings*. 13(3), 681. <https://doi.org/10.3390/buildings13030681>

15. Кінаш Р.І., (2010). Аеродинамічні дослідження моделей легких покриттів над трибунами стадіонів. *Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проєктного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського* (5), 60-71.
16. Yin, Z. X., & Zhang, S. (2012). Distribution Rule Analysis and Research of Wind Loads of Stadium by Numerical Simulation. In *Applied Mechanics and Materials* (256–259), 826–830. Trans Tech Publications, Ltd.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.256-259.826>
17. Guo J, Zhu M, Hu C., (2020). Study on wind load shape factor of long-span stadium roof. *Advances in Structural Engineering*. 23(11). 2333-2342.
18. Weijun, Mei., Ming, Qu. (2016). Evaluation and Analysis of Wind Flow for a Football Stadium, *Procedia Engineering*, (145), 774-781, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.101>.
19. Huang, Y., & Guo, P. (2011). Research on Numerical Simulation of Flow-Field around the Building Based on FLUENT. *Mechanics and Materials*, (94–96), 2123–2129.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.94-96.2123>
20. Li, Lei., Hu, Fei., Cheng, Xue-Ling., Han, Hao-Yu., (2004). The application of computational fluid dynamics to pedestrian level wind safety problem induced by high-rise buildings. *Chinese Physics*, (13. Issue 7), 1070-1075.  
<https://dx.doi.org/10.1088/1009-1963/13/7/018>
21. Jin, Xing., Luca, Patruno., Stefano, de Miranda., Stefano, Pinardi., Massimo, Majowiecki., Francesco, Ubertaini. (2023) Early stages wind load assessment using Computational Fluid Dynamics: The new Bologna Stadium roof. *Structures*, (47), 1912-1926.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.089>.
22. Лавріненко Л.І., Будко Т.Г. (2021) Застосування методів і моделей ВІМ-технологій при проєктуванні купольного покриття аквапарку з дерев'яними арками. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини: Збірник наукових праць, ОДАБА*, (25), 72-84 <https://doi.org/10.31650/2707-3068-2021-25-72-84>
23. Samofalov M., Kazakov A., Pavlovsky R. M. (2011). The basic principles of the algorithm recalculating data on experimental aerodynamic tests into wind affected load strains, *Journal of Civil Engineering and Management* 17(2), 296–307.  
<http://dx.doi.org/296-307.10.3846/13923730.2011.583676>
24. Majowiecki, M., Pinardi, S., Berti, G., Patruno, L.. (2019) Upgrading the Spoke Wheel Stadium Roof Concept. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, (60, 4), 249-256,
25. Лавріненко Л.І., Уманець Д.В. (2013). Особливості проєктування та аналіз конструктивного рішення металевого купольного покриття аквапарку. *Містобудування та територіальне планування*, КНУБА, (50), 328 – 336
26. Dlubal Software. RWIND—Simulation Generation of Wind Induced Loads on General Models: User Manual. 2021., [Електронний ресурс] <https://www.dlubal.com>

## REFERENCES

1. DBN V.1.2-2:2006 Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. – K.: Minbud Ukrainy, 2006. – 75 s. - (zi zminamy vid 1.10.2007). – Chynni z 1.01.2007
2. DSTU-N B EN 1991-1-4:2010 Yevrokod 1. Dii na konstruksii. Chastyna 1-4. Zahalni dii. Vitrovi navantazhenn (EN 1991-1-4:2005, ITD) - K.: Minrehionbud Ukrainy, 2011. – 157 c. – Chynnyi z 27.12.2010
3. Biagini, P., Borri, C., Facchini, L. (2007). Wind response of large roofs of stadiums and arena, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 95(9–11), 871–887.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2007.01.025>
4. Tereshchenko Yu.Y., (2010). Osobennosti rekonstruksyy oblastnoho sportyvnoho kompleksa «Metallyst» v h. Kharkove. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho naukovo-doslidnoho ta proektnoho instytutu stalevykh konstruksii im. V.M. Shymanovskoho* (5), 15-24,
5. Benzel O., Lavrinenko L. (2021). Informatsiine modeliuвання stalevoi budivli z pidvyshchenymy vymohamy zhorstkosti. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, (9), 30–44.  
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.30-44>
6. Makhinko A.V. (2021). Dva pohliady na suchasnu aerodynamiku opor zviazku. *Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo)*, PoltNTU. - Vyp. 2 (30), 118-121.
7. Borri C., Majowiecki M., Spinelli P. (1992). Wind response of a large tensile structure: The new roof of the olimpic stadium in Rome. *Journal of Wind Engineering and Industrial*

- Aerodynamics*. V. 42. Issues 1–3(1992). 1435-1446.  
[https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90151-Y](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90151-Y).
8. **Man, Liu., Qiu-Sheng, Li., Sheng-Hong, Huang., Feng, Shi., Fubin, Chen.** (2018). Evaluation of wind effects on a large span retractable roof stadium by wind tunnel experiment and numerical simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. (179), 39-57.  
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.05.014>.
  9. **Yi, Zhao., Ruibin, Li., Lu, Feng., Yan, Wu., Jianlei, Niu., Naiping, Gao.** (2022) Boundary layer wind tunnel tests of outdoor airflow field around urban buildings: A review of methods and status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (167), 112717  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112717>.
  10. **Wacker J.**, (2012). Windkanaltests zur Ermittlung der Windlasten auf Stadiondächer. *Stahlbau*, (81), 481-485.  
<https://doi.org/10.1002/stab.201201573>
  11. **Goliger, AM.** (2010). Wind-tunnel testing of sports stadia to optimise their use and safety. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 52(1) Retrieved January 22, 2024, from  
[http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1021-20192010000100004&lng=en&tln=en](http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-20192010000100004&lng=en&tln=en).
  12. **Sun, W. B., Li, Q. X., Chen, H. X., & Zhou, W. J.** (2011). Wind-Induced Responses Study and Wind-Resistant Design of Super-Long-Span Cable-Membrane Roof Structure of Shenzhen Baoan Stadium. In *Applied Mechanics and Materials* (71–78), 666–672.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.71-78.666>
  13. **Kinash R.I., Kopylov O.Ie., Kopylova I.V.** (2007). Doslidzhennia vplyvu formy dakhu stadionu na aerodynamichne navantazhennia. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*. Serii: Teoriia i praktyka budivnytstva, (600), 165-170.
  14. **Kawulok M, Freiherrová N, Horňáková M, Juračka D, Krejsa M.** (2023). Hyperbolic Paraboloid Tensile Structure—Numerical CFD Simulation of Wind Flow in RWIND Software. *Buildings*. 13(3), 681.  
<https://doi.org/10.3390/buildings13030681>
  15. **Kinash R.I.**, (2010). Aerodynamichni doslidzhennia modelei lehkykh pokryttiv nad trybunamy stadioniv. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainkoho naukovo-doslidnoho ta proektnoho instytutu stalevykh konstruksii imeni V.M. Shymanovskoho* (5), 60-71.
  16. **Yin, Z. X., & Zhang, S.** (2012). Distribution Rule Analysis and Research of Wind Loads of Stadium by Numerical Simulation. In *Applied Mechanics and Materials* (256–259), 826–830. Trans Tech Publications, Ltd.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.256-259.826>
  17. **Guo J, Zhu M, Hu C.**, (2020). Study on wind load shape factor of long-span stadium roof. *Advances in Structural Engineering*. 23(11). 2333-2342.
  18. **Weijun, Mei., Ming, Qu.** (2016). Evaluation and Analysis of Wind Flow for a Football Stadium, *Procedia Engineering*, (145), 774-781,  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.101>.
  19. **Huang, Y., & Guo, P.** (2011). Research on Numerical Simulation of Flow-Field around the Building Based on FLUENT. *Mechanics and Materials*, (94–96), 2123–2129.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.94-96.2123>
  20. **Li, Lei., Hu, Fei., Cheng, Xue-Ling., Han, Hao-Yu.**, (2004). The application of computational fluid dynamics to pedestrian level wind safety problem induced by high-rise buildings. *Chinese Physics*, (13. Issue 7), 1070-1075.  
<https://dx.doi.org/10.1088/1009-1963/13/7/018>
  21. **Jin, Xing., Luca, Patruno., Stefano, de Miranda., Stefano, Pinardi., Massimo, Majowiecki., Francesco, Ubertini.** (2023) Early stages wind load assessment using Computational Fluid Dynamics: The new Bologna Stadium roof. *Structures*, (47), 1912-1926.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.089>.
  22. **Lavrinenko L.I., Budko T.H.** (2021) Zastosuvannia metodiv i modelei BIM-tekhnologii pry proektuvanni kupolnoho pokryttia akvaparku z derevianymy arkamy. *Suchasni budivelni konstruksii z metalu ta derevyny: Zbirnyk naukovykh prats, ODABA*, (25), 72-84  
<https://doi.org/10.31650/2707-3068-2021-25-72-84>
  23. **Samofalov M., Kazakov A., Pavlovsky R. M.** (2011). The basic principles of the algorithm recalculating data on experimental aerodynamic tests into wind affected load strains, *Journal of Civil Engineering and Management* 17(2), 296–307.  
<http://dx.doi.org/296-307>.  
<https://doi.org/10.3846/13923730.2011.583676>

24. **Majowiecki, M., Pinardi, S., Berti, G., Patruno, L.** (2019) Upgrading the Spoke Wheel Stadium Roof Concept. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, (60, 4), 249-256,
25. **Lavrinenko L.I., Umanets D.V.** (2013). Osoblyvosti proektuvannia ta analiz konstruktyvnoho rishennia metalevoho kupolnoho pokryttia akvaparku. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia, KNUBA*, (50), 328 – 336
26. **Dlubal Software.** RWIND—Simulation Generation of Wind Induced Loads on General Models: User Manual. 2021., [Електронний ресурс] <https://www.dlubal.com>

**WIND INFLUENCE NUMERICAL  
SIMULATIONS ON STADIUM  
STRUCTURES IN RWIND MODULE OF  
THE DLUBAL RFEM SOFTWARE**

*Vitalii TONKACHEIEV  
Dmytro MALYSHKO  
Liudmyla LAVRINENKO*

**Summary.** This paper examines the effect of wind load on the stadium building, designed as a possible replacement for the stadium in the city of Mariupol, which was destroyed as a result of hostilities. The problems of using domestic standards in the design of stadium structures are considered. The approach of European regulatory documents to taking into account the effect of wind influence is considered. An analysis of previous scientific studies concerning the determination of aerodynamic parameters for stadium structures has

been carried out. An analysis of the domestic regulatory document regulating the collection of wind loads showed the need for additional research into the aerodynamic parameters for stadium structures. Using a special RWIND module as part of the Dlubal RFEM software package, numerical modeling was used to simulate the wind flow flowing around the model of the stadium building, which best corresponded to the adopted design decisions, as if it were carried out in a real wind tunnel. A project was considered for an ellipsoidal stadium, the configuration of the stands and the covering of which is a full bowl with an incomplete covering. The covering over the stadium stands is designed in the form of a canopy formed by cantilever flat steel trusses. The basis of the stadium building frame is made up of vertical steel frames with a rigid connection of nodes, to the central post of which cantilever trusses of the canopy are attached. The result of theoretical testing of the stadium model was distribution diagrams of aerodynamic coefficients, the maximum values of which were used to further determine the values of wind pressure on these structures. An analysis of the research results was carried out. The use of numerical simulation tools for wind flows made it possible to increase the complexity of the system both at the level of the design solution and at the level of the calculation model. Analysis of the design solution allowed us to competently select the necessary design solutions for load-bearing structures, taking into account the requirements of current design standards and Eurocode 1 regulations.

**Keywords.** Stadium; canopy; numerical modeling; wind flow; aerodynamic coefficients.

*Стаття надійшла до редакції 06.02.2024*