

УДК 624.012

Аеродинамічні дослідження моделей легких покриттів над трибунами стадіонів

Кінаш Р.І., д.т.н.

Національний університет «Львівська політехніка», Україна

Анотація. У статті наведено результати порівняльного аналізу аеродинамічних досліджень моделей легких покриттів над трибунами стадіонів в аеродинамічній трубі та числових досліджень за допомогою програмного комплексу FLUENT. Отримані результати модельних досліджень дозволяють одержати найбільш ефективну форму покриття стадіону.

Аннотация. В статье приведены результаты сравнительного анализа аэродинамических исследований моделей легких покрытий над трибунами стадионов в аэродинамической трубе и числовых исследований с помощью программного комплекса FLUENT. Полученные результаты модельных исследований позволяют получить наиболее эффективную форму покрытия стадиона.

Abstract. In the article the results of comparative analysis of aerodynamic researches of models of easy coverages are resulted above the tribunes of stadiums in a wind-channel and numerical researches by a programmatic complex FLUENT. The results of model researches are got allow to get the most effective form of coverage of stadium.

Ключові слова: покриття стадіону, аеродинамічна труба, числові дослідження

Вступ. Сучасний розвиток методів комп'ютерного моделювання уможливило повний аналіз конструкції будівель і споруди під впливом аеродинамічних навантажень [1–4, 8–10].

Мембранні покриття, що застосовуються в будівництві покриттів стадіонів, є надлегкими конструкціями і характеризуються значною вразливістю до дії вітру.

У роботі представлено порівняння результатів числових досліджень із результатами модельних досліджень в аеродинамічній трубі [6]. Результати комп'ютерної симуляції, отримані в роботі за допомогою моделі Турбуленції $k-\varepsilon$, можна вважати якісно сумісними з експериментом, натомість стверджуються істотні кількісні відмінності.

Модель стадіону. Модель стадіону побудовано на плані еліпса з осями 500 мм і 350 мм. Ігрове поле спортивного майданчика розміщено в заглибленні на 48 мм нижчому від рівня підлоги трибун (поле також має форму еліпса з осьовими вимірами 375 і 260 мм). Покриття, що знаходиться над трибунами, має увігнуту (випуклу) форму, його зовнішній контур знаходиться на висоті 32 мм над рівнем землі і 80 мм над рівнем ігрового поля стадіону – але внутрішня на висоті 48 мм від рівня – 80 мм від платів-

ки стадіону. Внутрішня частина ввігнутого покриття закінчується на висоті 48 мм від рівня ігрового поля (рис. 1).

Область напливу утворює прямокутний паралелепіпед довжиною 7,5 м і квадратним перерізом зі стороною квадрата 1 м. Модель стадіону знаходилася на віддалі 1,75 м від краю аеродинамічної труби (середина еліпса), при цьому головна вісь стадіону (еліпса) лежала в поздовжній площині симетрії прямокутного паралелепіпеда. Моделювання виконано для середньої швидкості напливу, рівної 25 м/с і турбуленції 1,5 % (що було досягнуто у дослідженнях в аеродинамічній трубі). Потік повітря був скерований на модель паралельно до головної осі стадіону.

Моделювання виконано за допомогою програми FLUENT 6.1 [5].

Числова модель. Прийнято, що процес протікання повітря є стабілізованим і нестислим. Означена проблема описана системою рівнянь неперервності руху (1), а також рівнянь Нав'є-Стокса і моделі турбуленції k-ε у загальному вигляді (2) [1] – [5].

$$\frac{\partial(\rho v_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j \Phi) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j}) = S_\Phi. \quad (2)$$

Значення змінної Φ , коефіцієнта Γ у вигляді ключових членів S_Φ наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Величини символів, які застосовані у формулі (2)

Змінна величина	Коефіцієнт	Ключові члени
Φ	Γ	S_Φ
v_i	μ_{ef}	$\frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_{ef} \frac{\partial v_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu \frac{\partial v_l}{\partial x_l}) -$ $-\frac{\partial}{\partial x_i}(p + \frac{2}{3}k\rho\delta_{ij}) + \rho g_i$
k	$\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \varepsilon$
ε	$\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}$	$C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$

де v_i – складова вектора усередненої швидкості в i -му напрямку, м/с; ρ – місцева густина середовища, кг/м³; $\mu_{ef} = \mu + \mu_T$ – молекулярний і турбулентний коефіцієнти динамічної в'язкості, кг/м·с; g_i – складова вектора гравітаційного прискорення в i -му напрямку, м²/с; k – кінетична енергія турбулентності, м²/с²; ε – швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності, м²/с³; δ_{ij} – символ Кронекера; $C_1, C_2, C_3, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – постійні моделі.

Член, який репрезентує генерування кінетичної енергії турбулентції, яка викликана усередненим градієнтом поля швидкості G_k , має вид

$$G_k = \mu_T \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_T \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}. \quad (3)$$

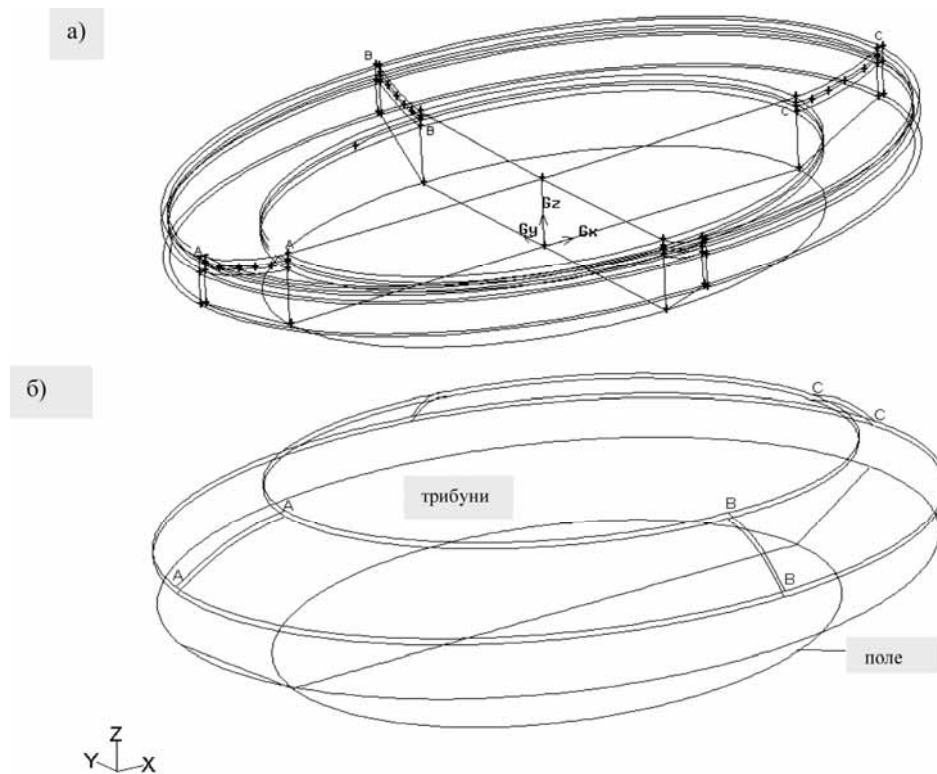


Рис. 1. Схема розміщення вимірювальних пунктів на поверхні моделі:
а – увігнутої оболонки; б – випуклої оболонки

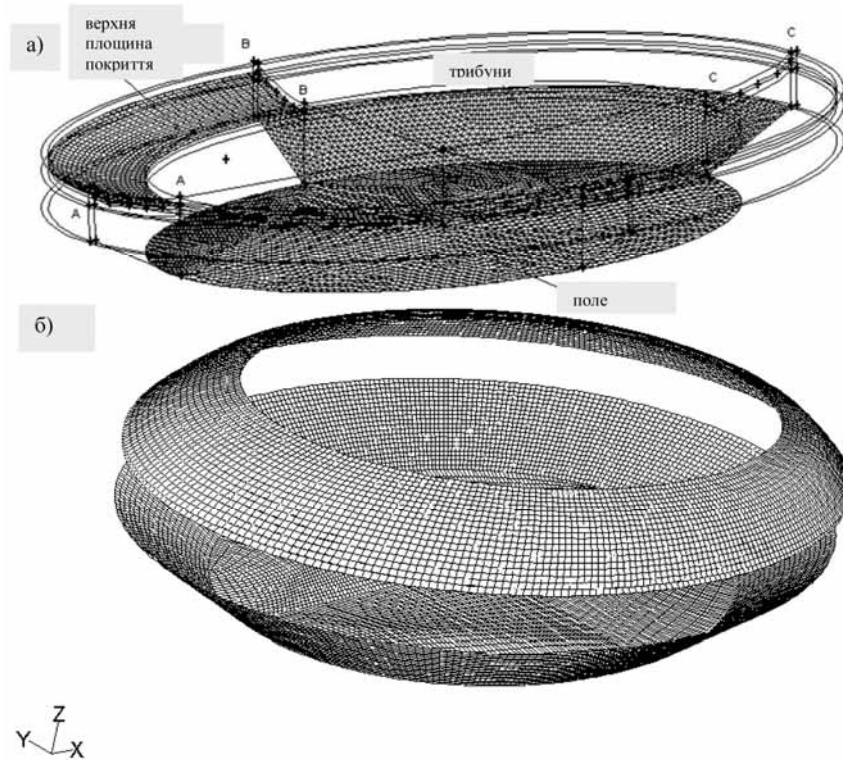


Рис. 2. Геометрія області елементів цифрової мережі:
а – увігнутої оболонки; б – випуклої оболонки

Граничні умови. У вхідних отворах прийнято постійну швидкість течії повітря, а також постійні величини кінетичної енергії турбуленції та швидкості розсіювання цієї енергії, підрахованих для умов 1,5 % турбуленції на вході та відношенні молекулярної в'язкості турбуленції до молекулярної, рівної $10 \div 50$. У програмі FLUENT 6.1 така умова носить назву *inlet velocity*.

У перерізі отвору вильоту закладається, що тиск є постійним, натомість для інших змінних приймають, що у напрямі течії $\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$ (так звана умова *pressure outle*).

Для описання пристінних умов використано класичну модель функції стіни, приймаючи, що поверхні жорстких стін є гідравлічно гладкі.

На площині симетрії прийнято нульові величини складових швидкості та градієнтів усіх нормальних змінних до цієї площини.

Опис області напливання, використаного при моделюванні. Область напливання покрито цифровою мережею, згущеною поблизу об'єкта, що перебуває в припливі, особливо біля поверхні покриття стадіону. Оскільки течія симетрична відносно вертикальної площини, що проходить через головну вісь моделі стадіону, розрахунки виконано для половини області напливу, яка містила близько 1250000 елементарних комірок (розташування покриття вздовж горизонтальної та вертикальної осі). Геометрію області разом із картиною елементів числової мережі показано на рис. 1 і 2. Проте у випадку коли кут між прямою, яка проходить через середину моделі та горизонтальною віссю, складав 45° кількість комірок була вдвічі більшою – обчислення виконано для всієї площини (рис. 2).

Результати досліджень. На кафедрі аеродинаміки Варшавського політехнічного університету проведено аеродинамічні дослідження моделі стадіону – з розмірами як в п. 2 – в аеродинамічній трубці. Вимірювали середні величини статичних тисків на поверхні покриття стадіону. Дослідження виконано при швидкості напливу повітря 25 м/с і при турбуленції 1,5 %. Результати вимірювань і розрахунків подано в формі розкладів коефіцієнтів тисків (рис. 3 і 4). Коефіцієнт тиску підраховано згідно з (1):

$$C_p = (p_{st} - p_{\infty}) / (\rho v_{\infty}^2 / 2), \quad (4)$$

де p_{st} – статичний тиск на поверхні покриття, p_{∞} – статичний тиск незбуреного потоку, ρ – густина повітря, v – швидкість незбуреного потоку.

Потік повітря, що напливає направлено уздовж головної осі моделі стадіону. Початок системи координат знаходиться в середині еліпса, моделюючого плити спортивного майданчика. Коефіцієнти тиску на верхній (рис. 3) і нижній (рис. 4) площинах покриття представлено як функцію віддалі з початку координат у трьох розрізах:

- для кута напливу 0° і 180° (паралельний розріз до головного напрямку течії повітря, на рис. 1 представлено перерізом А-А і С-С),
- для кута напливу 90° (перпендикулярний розріз до головного напрямку течії повітря, на рис. 1 розріз В-В).

Тиск у кожному перерізі вимірювався в 5 точках, при цьому крайні з них були віддаленими від краю покриття приблизно по 5 мм. Коефіцієнт тиску, виміряний на верхній частині покриття стадіону (рис. 3), змінювався від -0,4 до +0,35, тоді як підрахований – від -1,21 до +0,55. З підрахунків випливає, що уздовж паралельного розрізу до головного напрямку течії А-А (рис. 3,а) тиск на всій протяжності – від'ємний і змінюється в

значних границях, що віддзеркалює змінність коефіцієнта тиску від -1,21 до -0,62.

Експериментальні дані вказують натомість на практично постійну його величину, рівну близько -0,4. Розрахунки та результати вимірів свідчать, що переріз В-В (рис. 3, б) є переломним щодо дії аеродинамічного навантаження – в його границях відбувається зміна тиску з від'ємного на додатній.

Коефіцієнт тиску майже не змінюється, а його величина, визначена теоретично, знаходиться в границях $(-0,077 \div -0,065)$, а отримана шляхом вимірювання $(-0,013 \div -0,052)$. У розрізі С-С (рис. 3,в) на верхній поверхні покриття виступає додатний тиск, розрахунково визначений коефіцієнт тиску змінюється від +0,55 до +0,23, натомість заміряний від +0,35 до +0,23.

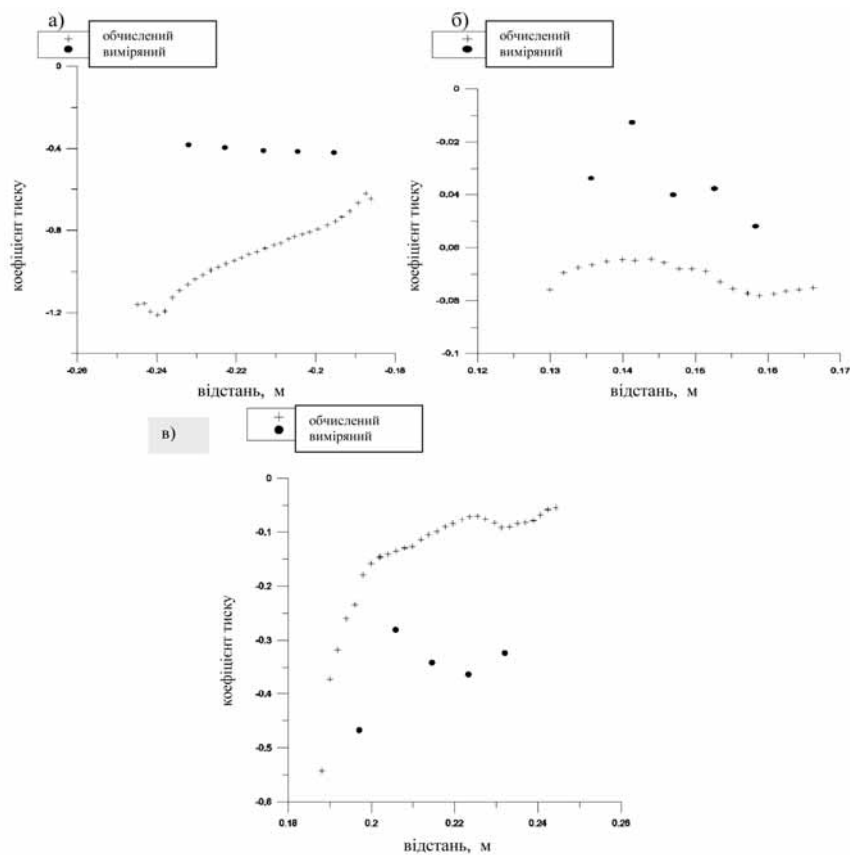


Рис. 3. Розподіл коефіцієнтів тиску на верхній поверхні покриття в розрізах:
а – паралельний до головного напрямку течії по навітряній стороні А-А;

б – перпендикулярний до головного напрямку течії В-В; в – паралельний до головного напрямку течії по підвітряній стороні С-С

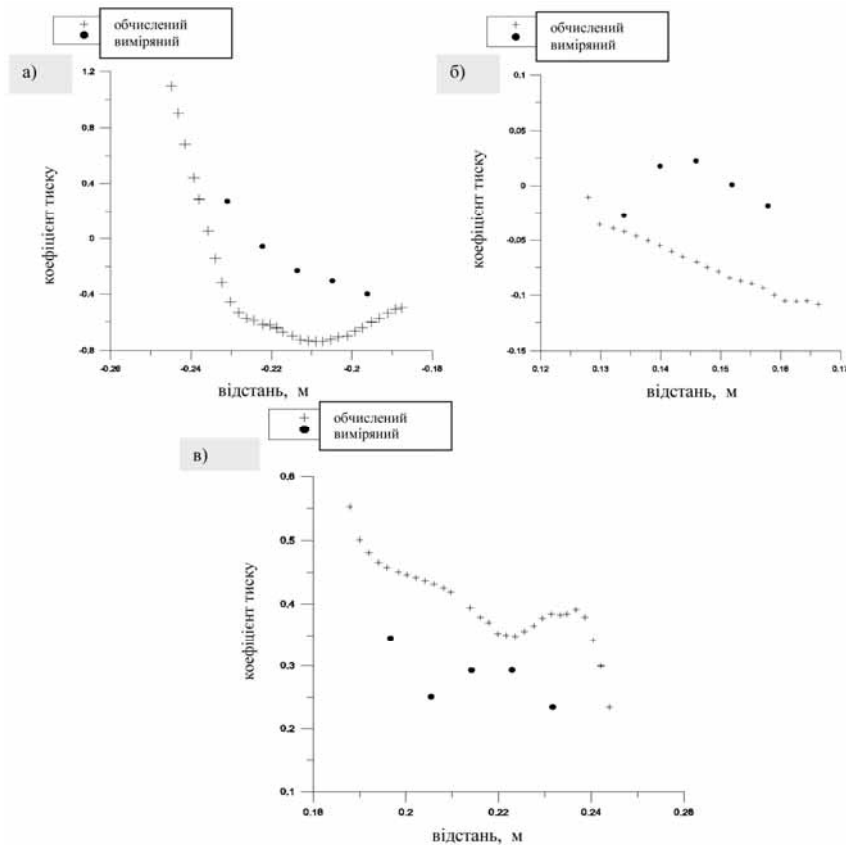


Рис. 4. Розподіл коефіцієнтів тисків на нижній поверхні покриття в розрізах:
а – паралельний до головного напрямку течії по навітряній стороні А-А;
б – перпендикулярний до головного напрямку течії В-В; в – паралельний до головного напрямку течії по підвітряній стороні С-С

При визначенні розподілу тисків на нижній поверхні покриття (рис. 4) мінімальні і максимальні величини отримано в перерізі, перпендикулярному до головного напрямку течії. Виміряні величини коефіцієнта C_p знаходяться в границях (+0,27 ÷ -0,47), а визначені розрахунково – (+1,10 ÷ -0,73).

Паралельний розріз А-А (рис. 4, а) характеризується значними змінами тиску, уздовж якого відбувається перехід від додатного тиску до від'ємного. Виміряні величини коефіцієнтів тиску змінюються від +0,27 до -0,4,

тоді як підраховані від +1,1 до -0,73. Подібно як і у випадку верхньої поверхні покриття, в його нижній частині в перерізі В-В (рис. 4, б) статичний тиск змінюється незначно, на це вказує коефіцієнт тиску, рівний відповідно до підрахунків від -0,01 до -0,11, а відповідно до вимірів від -0,027 до +0,023. У паралельному перерізі С-С (рис. 4, в) коефіцієнт тиснення, визначений чисельно, приймає величини від -0,54 до -0,07, натомість виміряні змінюються від -0,47 до -0,28.

Обчислені поля швидкості за допомогою програмного комплексу FLUENT представлено на рис. 5 і 6.

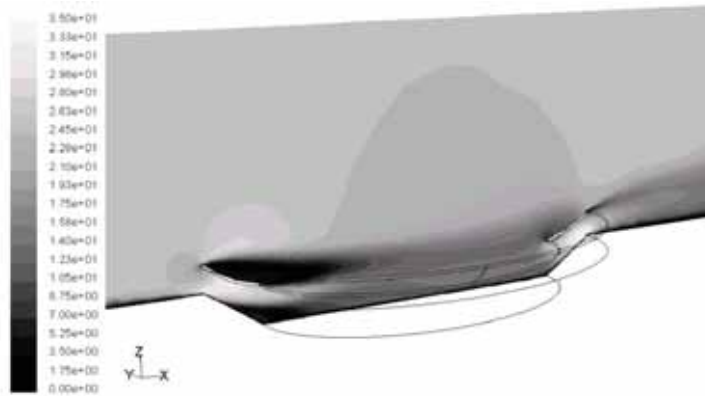


Рис. 5. Поле швидкості на площині симетрії моделі стадіону (вздовж головної осі еліпса)

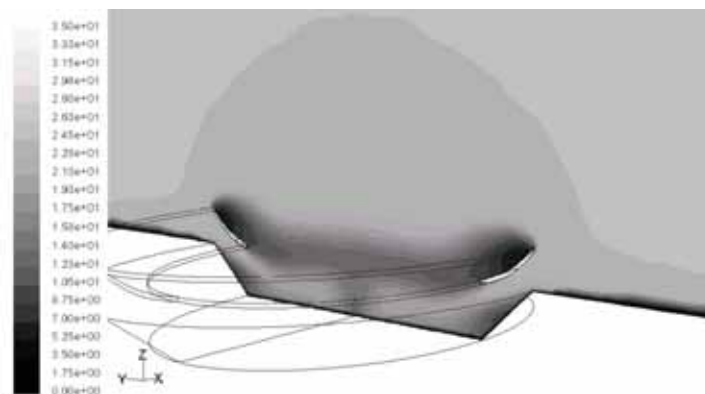


Рис. 6. Поле швидкості в перпендикулярному розрізі до головного напрямку течії

Найбільші швидкості течії виникають між покриттям та трибунами (корона стадіону незабудована) як на навітряній, так і завітряній стороні, де швидкість збільшується понад 30 м/с (30÷32 м/с). Також поблизу зовніш-

нього краю покриття реєструється збільшення значення швидкості. Над полем стадіону швидкість повітря менша від величини швидкості незбуреної течії і складає приблизно 18÷21 м/с. Над верхньою поверхнею покриття на навітряній стороні (розріз А-А) створюється вихор (рис. 7). Повітряний вихор над верхньою поверхнею покриття (переріз С-С) показано на рис. 8. Аналіз полів швидкостей у зоні виникнення вихорів засвідчив зниження максимальних значень на завітряній стороні до 10÷12 м/с. У дослідженнях моделі стадіону в аеродинамічній трубі поле швидкості не вимірювали через відсутність відповідного обладнання, звідси відсутність можливості порівняння цих результатів.

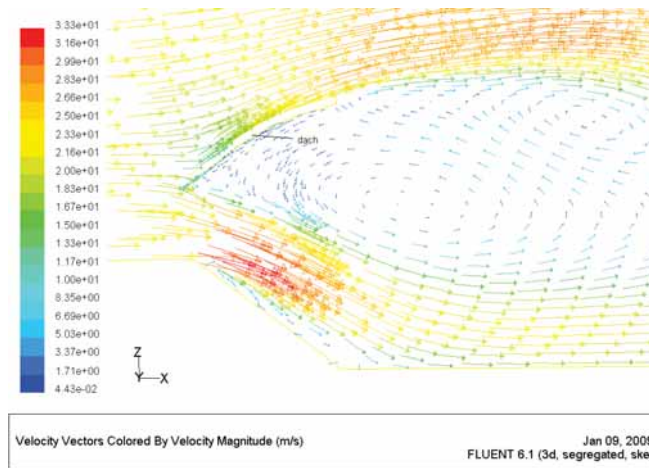


Рис. 7. Вихор над верхньою поверхнею покриття (розріз А-А на рис. 1)

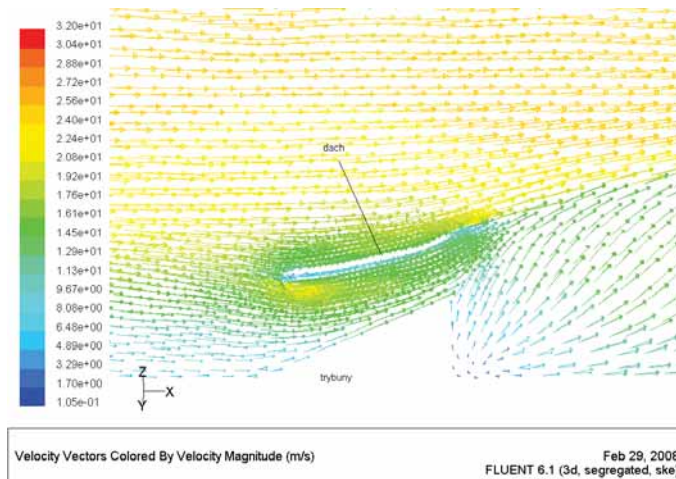


Рис. 8. Повітряний вихор над верхньою поверхнею покриття (переріз С-С)

Ізополя відносних тисків для кута атаки вздовж малої півосі для верхньої та нижньої поверхонь покриття ввігнутої оболонки наведено на рис. 9 і 10.

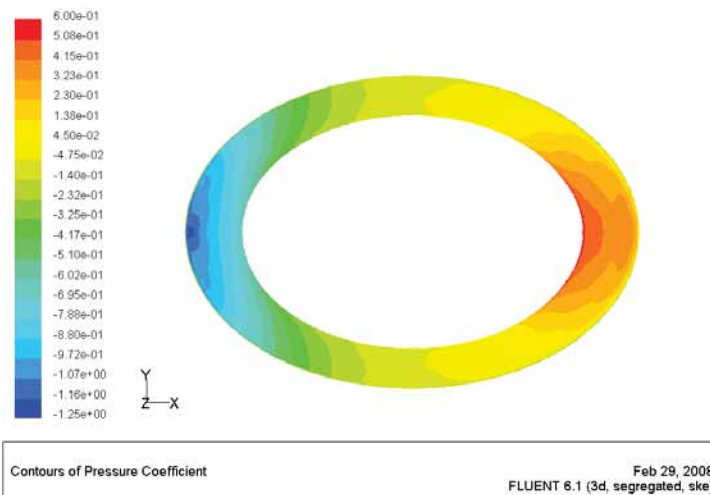


Рис. 9. Ізополя відносних тисків для кута атаки вздовж малої півосі для верхньої поверхні оболонки

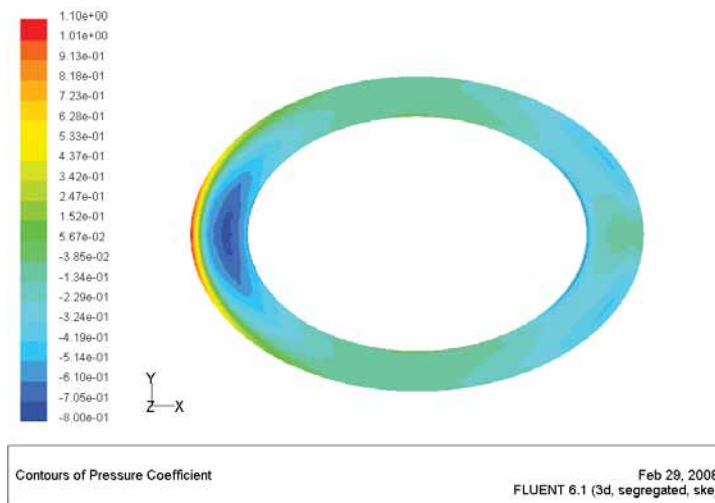


Рис. 10. Ізополя відносних тисків для кута атаки вздовж малої півосі для нижньої поверхні оболонки

Різниця між вимірним і обчисленим статичним тиском на верхній поверхні покриття стадіону склала близько 250 Па. Порівняння результатів визначення різниці тисків для випуклої та ввігнутої оболонок покриття наведено на рис. 11.

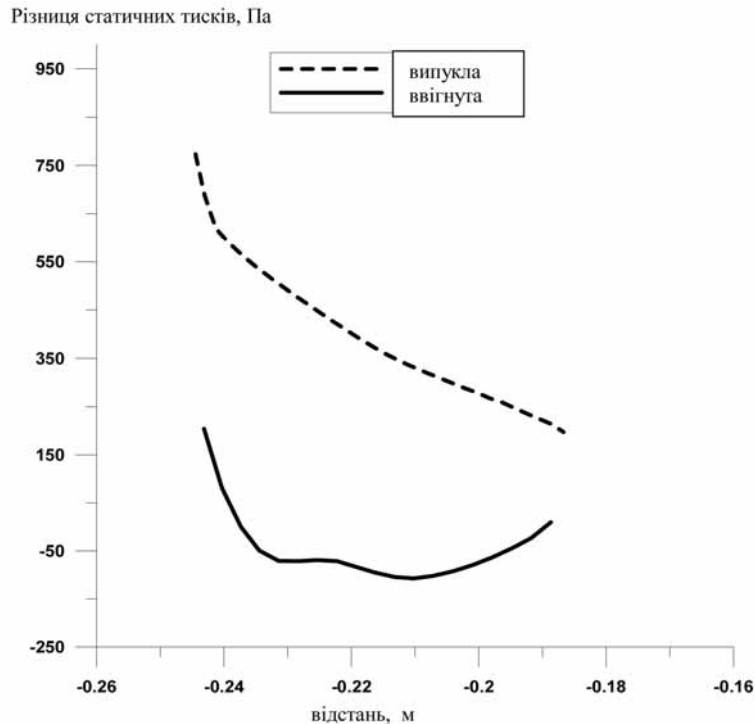


Рис. 11. Порівняння результатів визначення різниці тисків для випуклої та ввігнутої оболонок покриття

Висновки

Цифрові моделі все частіше використовуються для розв'язання багатьох технічних задач, особливо якщо течія має характер 2D чи 3D. Зазвичай велику складність спричиняє підтвердження документами вірогідності числового моделювання з огляду на малу кількість відповідних вимірjuвальних даних.

Виникає це як через технічні складнощі, так і відсутність коштів на виконання вимірювань у реальних і лабораторних умовах. Також у цьому випадку доступні результати вимірювань не дають повної перевірки моделі, бо стосуються вимірювань тільки деяких параметрів, які характеризують течію. З другого боку, в ряді публікацій зазначається задовільна вірогідність для практичних цілей використання числових моделей.

Результати комп'ютерної симуляції, отримані в роботі за допомогою моделі $k-\epsilon$, якісно сумісні з експериментальними даними, натомість виявлено істотні кількісні відмінності. Різниця між виміряним і обчисленим статичним тиском на верхній поверхні покриття стадіону склала близько 250 Па.

Одержані результати досліджень дозволяють обрати найбільш ефективну форму покриття. Серед досліджуваних форм найбільш ефективною з точки зору величини аеродинамічного навантаження є ввігнута форма, але вона мало використовується через експлуатаційні труднощі. Найбільше навантаження, незалежно від форми покриття, спостерігалися в перерізах, паралельних до напрямку напливу повітря.

У проведених аеродинамічних дослідженнях моделі стадіону величезний вплив на достовірність одержаних результатів має рівень турбулентності потоку повітря.

Одержані результати будуть використані для аналізу роботи програмного комплексу FLUENT з метою віднайти найбільш ефективну форму покриття стадіону.

Література

- [1] Kazimierski Z. Podstawy Mechaniki Płynów i Metod Komputerowej Symulacji Przepływów, Politechnika Łódzka, 2004.
- [2] Daugherty R.L., Franzini J.B. Fluid Mechanics with Engineering applications, McGraw-Hill, Inc., 1977.
- [3] White F.M., Fluid Mechanics, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [4] Robertson J.A., Crowe C.T., 1993, Engineering Fluid Mechanics, John Wiley&Sons, Inc.
- [5] FLUENT Inc., FLUENT 6.1 Dokumentation, 2005.
- [6] Kinasz R., Kopylov O., Walaszczyk J. Research on the influence of stadium's roof shape on its aerodynamic load // W: Environmental effects on buildings, structures, materials and people. – Lublin : University of Technology, 2007. – P. 97–108.
- [7] Kinasz R., Branny M., Kopylov O., Walaszczyk J. Numerical investigation on circular cylinders under aerodynamic influences / W: Environmental effects on buildings, structures, materials and people. – Lublin: University of Technology, 2007. – P. 141–149.
- [8] Elsner J.W. Turbulencja Przepływów. Wydawnictwo PWN. Warszawa, 1987. – 380 p.
- [9] Teranath B.S. Wind and Earthquake Resistant Buildings Structural Analysis and Desing. Marcee Dekker. Los Angeles, California, 2005. – 882 p.
- [10] Simiu E., Miyata T. Design of buildings and bridges for wind. Wiley, 2006. – 308 p.

Надійшла до редколегії 04.06.2010 р.