

УДК 624.042.5

О.І. Лапенко, Н.О. Махінько

Національний авіаційний університет, м. Київ

## МЕТОДИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ АЕРОДИНАМІКИ ВИСОТНИХ СПОРУД

*В статті обумовлена необхідність та принципова можливість застосування методів обчислювальної аеродинаміки для визначення вітрових впливів на висотні будівлі. Сформульована актуальність проблеми в рамках методу контрольних об'ємів, виконаний аналіз моделей атмосферної турбулентності, які реалізовані в сучасних програмних комплексах комп'ютерного моделювання та надані рекомендації із побудови комп'ютерних моделей будівель*

**Ключові слова:** аеродинаміка, висотні споруди, аеродинамічні труби, обчислювальна аеродинаміка, геометрична форма.

### Постановка проблеми

Висотні будівлі і споруди – це особливий клас будівельних об'єктів різної геометричної форми і призначення. Їх окремий класовий розгляд можна пояснити двома речами – переважним впливом вітрового навантаження і специфічною динамічною поведінкою при цьому навантаженні. На протязі багатьох років для цього класу було сформульовано й розроблено чимало різноманітних методів розрахунку. Перші різнилися ступенем схематизації вітрового навантаження, другі – точністю результатів, треті – складністю застосування, четверті – вузькою цільовою спрямованістю і т. п. Однак об'єднуючим фактором цих методів є необхідність розгляду ідеалізованих розрахункових схем не тільки під час розрахунку, але і на етапі кількісної оцінки параметрів вітрового впливу. Для переважної більшості споруд минулого (башти, щогли, димові труби, будівлі підвищеної поверховості) така подвійна ідеалізація призводила до цілком прийнятних результатів і не може викликати нарікань. Проте як бути з постійно зростаючим інтересом до будівель і споруд великої висоти, геометрична і конструктивна форма яких не відповідає вимогам застосовності старих методів. Особливо коли мова йде не про окремо розташовані будівлі, а про будівництво в умовах щільної міської забудови, що супроводжується появою складних інтерференційних картин обтікання.

До недавнього часу теорія не мала в своєму арсеналі засобів для рішення подібних завдань, і вони вирішувалися експериментально шляхом модельних випробувань в аеродинамічних трубах. Природно, що моделі будівель ідеалізувалися, швидкісні режими приводилися до аеродинамічно еквівалентних, а вітровий вплив оцінювався в

окремих інтуїтивно обраних точках. Однак практика будівництва та експлуатації висотних будівель і споруд підтвердила придатність такого підходу, незважаючи на всі його недоліки. До числа останніх можна віднести високу вартість досліджень, випадкові і систематичні похибки вимірювань і тривалість проведення експерименту.

З розвитком комп'ютерної техніки і програмною реалізацією методу контрольних об'ємів з'явилася можливість прямого чисельного моделювання вітрових впливів на будівлі і споруди, що позбавлена зазначених недоліків. Слід підкреслити, що саме можливість, так як сучасне програмне забезпечення, в якому реалізований метод контрольних об'ємів, не має цільової спрямованості на завдання будівельної аеродинаміки, а являє собою лише набір засобів для рішення систем рівнянь Нав'є-Стокса. Однак уявна простота використання цих засобів сформувала в наукових колах цілу дискусію про можливість і неможливість застосування чисельного моделювання вітрових впливів. З одного боку це можна пояснити відсутністю єдиної методології комп'ютерного моделювання вітрових впливів на будівлі і споруди, з іншого – бажанням мати подібну методологію, як потужне доповнення до теоретичних методів розрахунку і як альтернативу дорогим експериментальним випробуванням.

Розробка і впровадження подібної методології дозволить не тільки діагностувати проблеми аеродинамічного формоутворення будівель і споруд на етапі варіантного архітектурного проектування, але і виконувати постійний моніторинг вітрових впливів на будівлі при їх експлуатації в умовах майбутньої інтенсивної забудови поблизу них. Це особливо актуально, зважаючи на стрімкий розвиток ринку висотного будівництва по всьому світу і зростаючий інтерес інвесторів до будівель і споруд

оригінальної архітектурної, але аеродинамічно незручної форми.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В останні півтора десятиліття було розроблено велику кількість підходів стосовно комп'ютерного моделювання турбулентних течій навколо тіл різної геометричної форми. Найбільш вдалі чисельні схеми, які реалізовані у відомих комерційних обчислювальних програмах (FLUENT, CFX, STAR-CD, NUMECA), отримали широке розповсюдження і відносно успішно використовуються при вирішенні багатьох прикладних задач [1-8]. Проте при вирішенні задач будівельної аеродинаміки ці програми потребують використання значних комп'ютерних і людських ресурсів, що призводить до помітного удорожчання результатів обчислень або взагалі до неможливості проведення чисельного експерименту. У зв'язку з цим виникає необхідність у розробці раціональних розрахункових схем для комп'ютерного аналізу, які б вважались достатньо точними та простими [9, 10]. Інша проблема сучасних методів обчислювальної аеродинаміки пов'язана з необхідністю мінімізації впливу людського фактору, що виникає в процесі «ручної» побудови розрахункових моделей [11]. Для подолання цієї перепони, очевидно, слід мати чітку методологічну основу комп'ютерного моделювання, яка б чітко покроково регламентувала "правила гри".

### Формулювання мети статті

В рамках даної роботи авторам хотілось би звернути увагу на принципову необхідність та можливість застосування методів обчислювальної аеродинаміки для визначення вітрових впливів на висотні будівлі та споруди складної геометричної форми. Сформулювати актуальність проблеми в рамках методу контрольних об'ємів, виконати аналіз моделей атмосферної турбулентності, які реалізовані в сучасних програмних комплексах комп'ютерного моделювання, а також надати рекомендації із побудови комп'ютерних моделей будівель і споруд, моделювання вітрових режимів місцевості навколо них та сформулювати ряд принципових тез для правильного обрання граничних та початкових умов чисельного моделювання.

### Виклад основного матеріалу

**Коротка характеристика методів комп'ютерної аеродинаміки.** Чисельні методи, які застосовуються для розв'язання задач газової динаміки, по суті, є інструментом, що дозволяє використовувати задану математичну модель – систему Нав'є-Стокса. Їх використання розширило можливості досліджень, для яких стало можливим моделювати поведінку рідини або газу при самих різноманітних умовах, іноді нездійснених в реальному світі. З цією метою

створювались програмні алгоритми, які з часом використовувались для розрахунків на комп'ютерах. Проте кількість користувачів обмежувалось вузьким колом спеціалістів, які безпосередньо займалися обчислювальною газовою динамікою. Природним кроком в еволюції чисельного моделювання динаміки рідин та газів стало створення спеціалізованих програмних пакетів (CFD-пакетів або комплексів), орієнтованих на широку аудиторію користувачів. В такому вигляді математичний апарат, покладений в основу чисельних методів, став універсальним, а з урахуванням стрімкого розвитку обчислювальної техніки й потужним засобом у проведенні чисельних розрахунків із газової динаміки.

Обчислювальні CFD-пакети та комплекси для задач газової динаміки характеризуються за рівнем складності задач, які вони вирішують (максимальна кількість вузлів розрахункової сітки, ступінь врахування нелінійності і т.п.) та за кількістю моделей поведінки рідин та газів. На сьогоднішній день можна розмежувати наступні три класи CFD-пакетів та комплексів:

- професійні – комплекси високого класу, які підходять як для наукових, так й інженерних розрахунків, здатні розв'язувати складні задачі із урахуванням великої кількості різноманітних ефектів та використанням широкого набору математичних підходів, у тому числі специфічних. До класу професійних відносяться світові лідери серед комерційних пакетів: Ansys CFX, Star-CD, Fluent, Numeca. Всі вони містять велику кількість моделей турбулентності, здатні розв'язувати задачі різної складності із урахуванням температурних полів, багатофазних потоків, підтримують різноманітні типи кінцево-елементних сіток і т.п.;

- середнього класу – комплекси, які призначені, головним чином, для розрахунків інженерного рівня складності. Набор моделей та методів, якими оперують комплекси даного класу може також бути достатньо широким, проте кількість опцій, за допомогою яких користувач може впливати на підготовку вихідних даних комп'ютерної моделі є обмеженим. До цього класу можна віднести пакети COSMOS Flow Simulation, STAR-CCM+, Ansys Flotran, Flow Vision;

- приватні – комплекси, які використовують алгоритми невисокої точності, або мають вузьку направ-леність розрахунку (наприклад, створені під деяку проблематику). Прикладів таких пакетів можна назвати достатньо багато, тому обмежимося посиланнями на петербурзькі розробки VP2/3 [1, 2] та SINF [3].

В умовах сьогодення методи CFD-аналізу набули широкого поширення в авіації, машинобудуванні, екології, гідроенергетики і т.п., став популярною альтернативою експериментальній

аеродинаміці. У той же час все більше з'являється робіт присвячених застосуванню чисельного CFD-моделювання для якісного та кількісного прогнозування інтенсивності вітрових впливів. Проте їх практичне застосування для реального наукового пошуку та проектування викликає сумніви у спеціалістів у галузі wind engineering. Перш за все заперечення викликає занепокоєння внаслідок численних параметрів суб'єктивного характеру, які можуть вільно та помилково бути призначені користувачами програмних комплексів. Так, минулі та сьогоднішні принципи помилки деяких спеціалістів із незаперечним досвідом розрахунків в галузі аеронавтики та машинобудуванні, підривають довіру до методів CFD-аналізу в будівельній галузі. Справа в тому, що розрахунок вітрових впливів має достатньо багато нюансів та відмінностей від тих задач обчислювальної аерогідродинаміки, які вона з успіхом розв'язує в інших галузях науки. Моделі турбулентності, параметри розв'язання, критерії збіжності, принципи побудови розрахункових моделей та топологія кінцево-елементних (кінцево-об'ємних) сіток, що найбільш ефективні, наприклад, для потреб авіації, стають, м'яко кажучи, неоптимальними при аналізі аеродинамічних особливостей поганообтікаємих опор зв'язку, які характеризуються зовсім іншим рівнем турбулентності та наявністю розвинутих відривних течій. У зв'язку з цим, необхідною умовою застосування методів та комп'ютерних пакетів CFD-аналізу повинна стати постійна верифікація отриманих результатів з еталонними моделями, які досліджувались та досліджуються в натурних умовах, або в лабораторіях будівельної аеродинаміки світу. При цьому під верифікацію повинні підпадати не тільки програмні продукти, але й сукупності алгоритмів числових досліджень, які реалізуються у цих програмах науковими та інженерними колективами. Тільки вироблення загальних верифікаційних критеріїв і постійно оновлювальної бази даних дозволить підвищити довіру до методів CFD-аналізу у будівництві, та поставити їх на одну ланку із випробуваннями в аеродинамічних трубах. На рис. 1 наведені приклади подібних верифікаційних процедур, виконаних авторами для тіл простої форми.

Розрахунок вітрових впливів на висотні споруди зводиться до розв'язання тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса й рівняння збереження маси (нерозривності): Нестационарні рівняння Нав'є-Стокса утворюють змішану систему гіперболічно-параболічних рівнянь, розв'язання якої може бути отримане тим чи іншим маршовим методом, який і лежить в основі більшості числових алгоритмів для цих рівнянь. Нажаль, розв'язання у строгій математичній постановці повних рівнянь

Нав'є-Стокса без використання певних спрощень, при сучасних можливостях комп'ютерів практично реалізуємо тільки для дуже малих швидкостей потоку і задач чисто теоретичного значення. Для задач будівельної аеродинаміки, в яких фігурують числа Рейнольдса більше ніж  $10^7$ , пряме чисельне розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса потребує загранично потужних ресурсів комп'ютерної техніки і за оцінками спеціалістів стане можливим не раніше, ніж через декілька десятиліть.

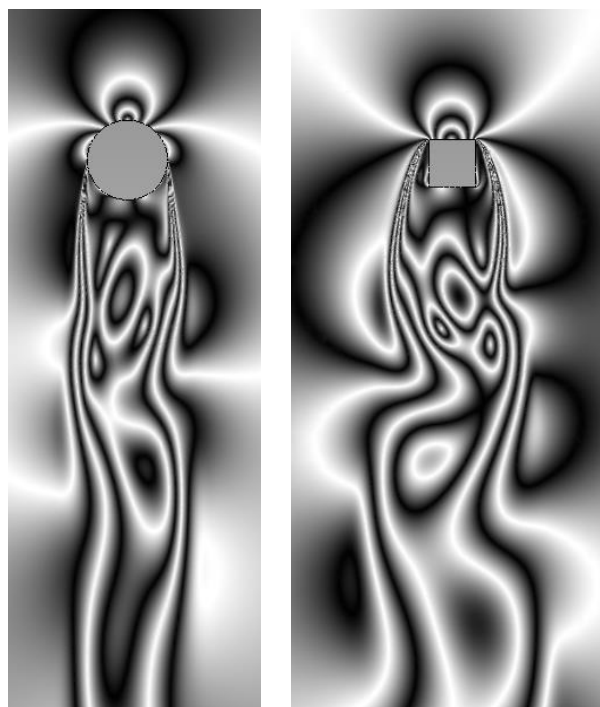


Рис. 1. Приклади комп'ютерного моделювання вітрових впливів на циліндр та квадратну призму

У зв'язку з цим, в задачах CFD-аналізу набули широкого поширення різні спрощуючі процедури, відомі як моделі турбулентності. Серед багатьох моделей турбулентності виділимо наступні п'ять:

- Reynolds Averaged Navies-Stokes Model (RANS) – модель осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса;
- Reynolds Stress Model (RSM) – модель напружень Рейнольдса;
- Large Eddy Simulation (LES) – модель крупних вихорів;
- Detached Eddy Simulation (DES) – модель відокремлених вихорів;
- Scale Adaptive Simulation Detached Eddy Simulation (SAS DES) – модель адаптивного масштабу відокремлених вихорів.

Кожен з наведених типів турбулентності містить окремі підтипи, пов'язані з іменами різних вчених. Приблизний перелік цих підтипів наведений у табл. 1. Не зупиняючись на математичних нюансах моделей турбулентності, які можна знайти у

спеціальній літературі з даного питання, коротко охарактеризуємо їх в контексті задач будівельної аеродинаміки.

Таблиця 1. Моделі турбулентності, які можуть мати місце в будівельній аеродинаміці

№	Моделі турбулентності	
	Тип	Підтип
1	RANS	0-eq. (Chen и Xu, 1998)
2		Standard $k-\varepsilon$ (Launder и Spalding, 1974)
3		RNG $k-\varepsilon$ (Yakhot и Orszag, 1986)
4		Realizable $k-\varepsilon$ (Shih., 1995)
5		LRN-LS (Launder и Sharma, 1974)
6		LRN-JL (Jones и Launder, 1973)
7		LRN-LB (Lama и Bremhorst, 1981)
8		LRN $k-\omega$ (Wilcox, 1994)
9		<b>SST <math>k-\omega</math> (Menter, 1994)</b>
10		v2f-dav (Davidson2003)
11		v2f-lau (Laurence., 2004)
12	RSM	RSM RSM-IP (Gibson и Launder, 1978)
13		RSM-EASM (Gatski и Speziale, 1993)
14	LES	LES-Sm (Smagorinsky, 1963)
15		LES-Dyn (Germano, 1991; Lilly, 1992)
16		LES-Filter (Zhang и Chen, 2000, 2005)
17	DES	S-A DES(Spalart, Allmaras, 1994)
18		ASM-DES (Batten., 2002)
19		CEASM DES (Lubcke, 2002)
20		Zonal S-A DES (Deck, 2005)
21		OEM DES (Braza, Elakoury, 2007)
22		DDES (Spalart, 2006)
23		SAE, CEASM IDDES (Mockett, 2007)
24		S-A, M-SST ID-DES (Travin, Shur, 2008)
25	SAS DES (Menter, Yegorov, 2005)	

До недавнього часу найбільшою популярністю серед диференційних моделей турбулентності користувались двопараметричні моделі, засновані на розгляді кінетичної енергії  $k$  турбулентних пульсацій. В якості другого рівняння має місце або рівняння переносу швидкості дисипації енергії  $\varepsilon$  ( $k-\varepsilon$  моделі [5]) або питомої швидкості дисипації енергії  $\omega$  ( $k-\omega$  моделі [3, 4]). Головний недолік двопараметричних моделей полягає у використанні уявлення про ізотропію турбулентної в'язкості і

моделюванні її у вигляді скалярної величини. Відсутність якого-небудь впливу анізотропії турбулентності у деяких моделях компенсується вдалим обранням емпіричних констант. У значній мірі складність застосування для потреб будівельної аеродинаміки моделей турбулентності, заснованих на кінетичній енергії турбулентних пульсацій  $k$ , пов'язана з необхідністю коректно врахування впливу стінки при моделюванні пристіночного обтікання. Справа в тому, що первинно  $k-\varepsilon$  моделі розроблялися для опису потоків із розвинутою турбулентністю при великих турбулентних числах Рейнольдса. Однак у пристіночній області, біля самої стінки, розташований дуже тонкий в'язкий підшар, в якому течія визначається молекулярною в'язкістю. Найбільш розповсюджений підхід до моделювання пристіночних ефектів пов'язаний із використанням пристіночних функцій – напівемпіричних співвідношень, які пов'язують параметри потоку із відстанню від стінки тіла ( $k-\omega$  моделі). В результаті моделюється тільки зовнішня область пограничного шару, що дозволяє скоротити обчислювальні ресурси.

Перспективною моделлю, яка дозволяє відмовитися від застосування турбулентної в'язкості і враховувати при цьому анізотропію турбулентності, є модель RSM, у якій для замикання рівнянь Нав'є-Стокса використовуються рівняння переносу напружень Рейнольдса сумісно із рівнянням для швидкості дисипації турбулентних пульсацій  $\varepsilon$ . Остання, незалежно від форми запису рівнянь для напружень Рейнольдса, виступає в якості основного невідомого в рівняннях руху потоку і для її визначення, як правило, використовуються емпіричні залежності. Нажаль на сьогоднішньому ступені розвитку моделі даного типу потребують подальшого і суттєвого уточнення для пристіночних потоків, а тому мало придатні як для аеродинаміки висотних суцільностінчастих споруд, так й для аеродинаміки ґратчастих опор зв'язку.

При моделюванні крупних вихрів (модель LES) та відокремлених вихрів (модель DES) використовуються спеціальні фільтри для виведення рівнянь на розв'язних масштабах. Мілкомасштабна турбулентність є слабкою та містить меншу кількість напружень Рейнольдса, ніж крупномасштабні вихрові структури і тому вона виключається із розрахунку. Головна проблема у моделюванні крупних вихрів полягає в тому, що поблизу тіла всі вихрі настільки малі, що розміри енергоємних та дисипативних вихрів співпадають. Це створює суттєві обмеження по числу Рейнольдса для LES і робить варіантні розрахунки реальних задач будівельної аеродинаміки недоступними більшості дослідників. При застосуванні моделі DES

підходи LES та RANS комбінуються, що робить можливим у багато разів зменшити трудомісткість, у порівнянні із класичною моделлю LES. При цьому вихрі у пограничному шарі та поблизу нього моделюються інтегрально, а відокремлені – детально, на основі достатньо розріджених сіток. Доволі перспективною також виглядає модель SAS DES, яка комбінує моделі DES та RANS в процесі ітерацій, гнучко змінюючи розмір турбулентних вихрів у пристіночних областях. Слід підкреслити, що моделі LES, DES та SAS DES є принципово тривимірними (навіть в умовах номінальної двовимірної задачі) нестационарними підходами і, в цьому сенсі, вони безумовно поступаються за економічністю традиційним стационарним рівнянням Рейнольдса в моделях RANS. Проте моделі DES та SAS DES не накладають жорстких обмежень на розміри комірок сітки у пристіночній області у напрямках, паралельних стінці: ці розміри можуть бути такими самими, як при розв'язанні рівнянь Рейнольдса, тобто на багато порядків перевищувати відповідні розміри, необхідні для опису мілких пристіночних вихрів в рамках моделі LES. Саме ця обставина і визначає величезні переваги DES та SAS DES в задачах будівельної аеродинаміки у порівнянні із LES. Завдяки своїм перевагам перед іншими моделями і простоті реалізації, DES та SAS DES достатньо швидко зацікавили увагу провідних наукових груп Європи та США, які почали його інтенсивні дослідження. Це, в свою чергу, дозволило на протязі доволі короткого часу накопити значний досвід із застосування DES та SAS DES при розв'язанні широкого кола прикладних задач. Нажаль це «широке» коло обмежується в основному задачами аерокосмічної галузі й не торкається проблем аеродинаміки споруд.

**Вимоги до комп'ютерних моделей.** Процес створення комп'ютерної моделі висотної споруди зводиться до виконання певних послідовних кроків:

*Вибір розрахункових змінних.* Перед виконанням комп'ютерних симуляцій вітрових впливів перш за все необхідно визначити змінні, що відповідають цілям даного розрахунку, які можуть бути зіставлені із експериментами і найбільш сильно впливають на кінцеві результати та характер збіжності. Критерії наступні: чутливість до порядку апроксимації та густоті сітки, застосування ефективних засобів постпроцесінга, моніторинг результатів в процесі розрахунку.

*Вибір рівнянь апроксимації фізики потоку* повинен починатися із вибору процедури розрахунку: стационарний або нестационарний. Оскільки атмосфера турбулентна, необхідний нестационарний розв'язок із застосуванням рівнянь Нав'є-Стокса. При стационарному RANS-розрахунку осереднення у часі відповідає статистичному опису турбулентного

потoku. Необхідне врахування впливу неврахованих вихрів на середні характеристики потоку, шляхом введення тензора напружень Рейнольдса та скалярного рівняння турбулентного переносу. Вибір моделі турбулентності слід виконувати в рамках конкретного комп'ютера, оскільки їх реалізації можуть бути різними.

*Вибір геометричного подання деталей споруди та умов прилеглої забудови.* Необхідним початковим етапом є вибір форми та розмірів розрахункової області. При моделюванні реальних споруд розглядається, як правило, зона радіусом 200 – 350 м і висотою до 400 м. Для формування моделі вітрового потоку (розрахункової області) використовується бульова різниця об'єму, який займає дослідна споруда. Далі виконується генерування кінцево-об'ємної сітки безпосередньо у розрахунковій області. Слід пам'ятати, що суттєвий ефект на формування турбулентних вітрових потоків створює орографія місцевості. Ступінь деталізації визначається відстанню від дослідної споруди: віддалені споруди можна моделювати спрощено (призмами), а зона із дослідною моделлю повинна моделюватися якомога детальніше. У зв'язку з цим обов'язковими для оцінки необхідних ресурсів є попередні тестові розрахунки, без урахування та з урахуванням характерних деталей.

*Призначення розмірів розрахункової області у вертикальному, поперечному та поздовжньому напрямках* слід виконувати, керуючись розмірами дослідної споруди та граничними умовами. Для моделі LES присутні додаткові вимоги по загальному розміру області так, щоб вона включала в себе крупні енергетично значимі турбулентні структури. Із досвіду випробувань в аеродинамічних трубах приймається, що споруда висотою  $H$  впливає майже до відстаней  $10H$ . Це і можна рекомендувати як необхідну вимогу до моделі. Як показали тестові розрахунки Японського Інституту Архітектури, розмір розрахункової області по вертикалі для ізольованих споруд повинен складати мінімум  $5H$ . В деяких рекомендаціях слід застосовувати параметр затінення  $\Omega$ , рівний відношенню площі поперечного перерізу споруди до площі поперечного перерізу розрахункової області. Пропонується застосовувати висоту області  $5H$  при малому  $\Omega$  та  $10H$  при великому. Рекомендується також, щоб  $\Omega$  не перевищувало 3 %, так як великий вільний простір дозволяє виключити зайві прискорення вітрового потоку над спорудою. Граничні умови на верхівки розрахункової області не повинні дозволяти потоку виходити за її межі. При відтворенні дослідів в аеродинамічних трубах розумно приймати аналогічний трубні поперечний переріз, якщо висота аеродинамічної труби більше

ніж  $6H$ . Після вибору висоти області, її ширину можна призначити таким чином, щоб  $\Omega \leq 0.03$ . Оскільки вплив поперечних границь може мати доволі суттєвий вплив, рекомендується виконати розрахунок принаймні для двох розмірів розрахункової області. Розмір вздовж потоку ізольованої споруди повинен бути не менше ніж  $5H$ , при умові, що профіль вітрового потоку достеменно відомий. Якщо профіль потоку невідомий, слід призначити більшу відстань для можливості формування реального профілю. Відстань за спорудою рекомендується обирати не менше ніж  $20H$ .

*Вибір граничних та початкових умов.* Вибір граничних умов дозволяє мінімізувати похибку, яка викликана обмеженням розрахункової області. В цьому випадку необхідно впевнитися, що розміри області достатньо великі, щоб зміна типу граничних умов не створювало суттєвого впливу на результати. Профіль середньої швидкості вітру на вході, як правило, отримують відповідно до настанов нормативних документів. Якщо відомі дані замірів для турбулентної кінетичної енергії, то їх слід ввести, якщо замірялися напруження Рейнольдса, турбулентне розсіювання також може бути задано. Необхідно обов'язково контролювати, щоб заданий профіль основних характеристик (середнього вітру, інтенсивності турбулентності, масштабу турбулентності) не змінювався до центральної зони, де розташовується дослідна споруда. В якості непоганого тестового розрахунку для перевірки профілю рекомендується моделювання у розрахунковій області у відсутності споруди при однаковій деталізації кінцево-об'ємної сітки та періодичних граничних умовах на бокових сторонах.

Для швидкостей вітру на стінках необхідно використовувати умову Дірихле повного прилипання для зсувних напружень. На гладких стінках можна порекомендувати моделювати в'язкий пограничний шар детально і зсувні напруження визначити за градієнтом локальних швидкостей по нормалі до стінки із введенням демпферних функцій для зменшення впливу турбулентності, що викликана молекулярною в'язкістю. При цьому сітка поблизу поверхні повинна бути дуже мілкою. Звичайно дрібність сітки характеризує безрозмірна відстань  $y^+$ :

$$y^+ = y \cdot u_\tau / \nu_a, \quad (1)$$

де  $y$  – відстань до першого вузла сітки за нормаллю до стінки тіла;  $u_\tau$  – осереднені зсувні напруження при швидкості поверхневого тертя  $u_\tau$ .

Так як дійсний розподіл напружень  $\tau_w$  невідомий поки не отримано числове рішення, то **іноді доводиться перебудовувати сітку** за результатами отриманої картини обтікання та корегувати значення  $y^+$ . Щоб понизити ймовірність перебудови сітки, для задач будівельної аеродинаміки можна порекомендувати наступний алгоритм із оцінки орієнтовної відстані до першого вузла сітки.

Зсувні напруження визначаються за формулою:

$$\tau_w = 0.5 \cdot C_f \cdot \rho_a \cdot U^2, \quad (2)$$

де  $U$  – середня швидкість вітру на вході у розрахункову область;  $C_f$  – коефіцієнт аеродинамічного тертя вітрового потоку; наприклад, для плоскої пластини даний коефіцієнт визначається у вигляді:

$$C_f = 0.058 \cdot \text{Re}^{-0.2}. \quad (3)$$

З іншого боку швидкість поверхневого тертя  $u_\tau$  може бути знайдена як:

$$u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho_a}. \quad (4)$$

Поєднуючи залежності (2) – (4) у виразі (1) із підстановкою числових значень для густини та кінематичної в'язкості повітря ( $\rho_a = 1.25 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu_a = 0.15 \text{ см}^2/\text{с}$ ), отримаємо наступне співвідношення:

$$y^+ \approx 3.75 \cdot y \cdot U^{9/10} / d^{1/10}, \quad (5)$$

де  $d$  – характерний розмір споруди (м), перпендикулярний вітровому потоку із швидкістю  $U$  (м/с); розмір  $y$  необхідно підставляти в мм.

Наприклад, якщо  $d = 1.2$  м, то при  $U = 20$  м/с будемо мати  $y^+ = 54.4 \cdot y$ . Таким чином, прийнявши  $y^+ = 5$ , слід забезпечити висоту першої комірки розрахункової сітки приблизно 0.1 мм, а при  $y^+ = 1.0$  взагалі  $y \approx 0.02$  мм. По мірі віддалення від стінки тіла висота комірок сітки поступово збільшується, досягаючи в невимушених областях величини співрозмірних із розміром тіла.

Із наведеного вище прикладу можна бачити із якої великої кількості комірок буде складатися кінцево-об'ємна сітка моделі. Для зменшення розмірів моделі і, відповідно, потрібних ресурсів комп'ютера можна застосовувати умовні пристіночні функції, коли напруження  $\tau_w$  визначаються емпірично, виходячи із логарифмічного профілю швидкості поверхневого тертя  $u_\tau$ . В результаті значення  $y^+$  суттєво підвищуються і в практичних задачах для гладких стінок знаходяться в межах від 30 до 500. Проте слід пам'ятати, що такий підхід може оказатися

неправомірним в зонах від'єднання, повторного приєднання потоку і в зонах великих градієнтів тиску. Крім того, перехід від ламінарного до турбулентного потокам може супроводжуватись корекцією стандартних пристіночних функцій. Нами рекомендується в задачах обтікання споруд замість підбору пристіночних функцій або корекції їх стандартних параметрів застосовувати по можливості максимально реалістичне представлення моделі (врахування рельєфу місцевості, фактичну забудову і т.п.). Якщо цікавлять результати безпосередньо поблизу тіла (наприклад, миттєві поля швидкості або турбулентності), то рекомендується передбачати не менше двох проміжних вузлів між елементами споруди, що досліджується у комп'ютерній симуляції.

*Просторово-часова дискретизація.* Для реалізації задач обчислювальної аеродинаміки на комп'ютері розроблена ціла низка різноманітних схем дискретизації у просторі та часі: метод дискретних вихрів, метод кінцевих об'ємів, метод кінцевих різниць, метод контрольних об'ємів і т.п. Найбільш ефективним на даний момент визнаний метод кінцевих об'ємів (МКО), який не вимагає настільки детального моделювання пограничного шару, як метод кінцевих елементів (МКЕ), та більш зручний при описі складних розрахункових областей реальних споруд, ніж метод кінцевих різниць. Основна ідея МКО полягає в тому, що апроксимація рішення проводиться в межах не кінцевих елементів, а в межах деяких зон змінного розміру із гнучко змінною кількістю точок інтегрування. Для процедури дискретизації використовуються стандартні процедури розбивки на кінцеві елементи (тетраедри, піраміди або гексаедри), але після завантаження сітка інтерпретується іншим чином. Комірки взаємно стикуються своїми гранями. Існує багато різних типів сіток: структуровані, багатоблочні, неструктуровані та сітки із довільним спряженням (див. рис. 2). Вагомою перевагою МКО є те, що в ньому закладене точне інтегральне збереження таких величин, як маса, кількість руху та енергія на будь-якій групі контрольних об'ємів і, відповідно, на всій розрахунковій області. Ця властивість проявляється при будь-якій кількості вузлових точок, що дозволяє розв'язок навіть на грубій сітці задовольняти точним інтегральним балансам.

Сучасні підходи (схема адвекції другого порядку, застосування пристіночних функцій та збільшення кількості точок інтегрування в комірці) суттєво знижують трудомісткість, вимоги до розрахункової сітки та ресурсам комп'ютера. Проте створення оптимальної, в рамках поставленої задачі, розрахункової сітки є доволі важким процесом, підсумок якого напряму впливає на точність

моделювання. Найбільш доцільно розрахункову сітку створювати в основному із тетраедрів із призмами у пристіночних областях (див. рис. 2). Цікаво відмітити, що більшість програмних продуктів, в яких реалізований метод МКО, допускають автоматичну розбивку на тетраедри. Однак слід пам'ятати, що така «сліпа» процедура допустима тільки в зонах малих градієнтів, значно віддалених від дослідних об'єктів. При цьому слід забезпечувати максимальну плавність зміни ступеню дискретизації між суміжними комірками.

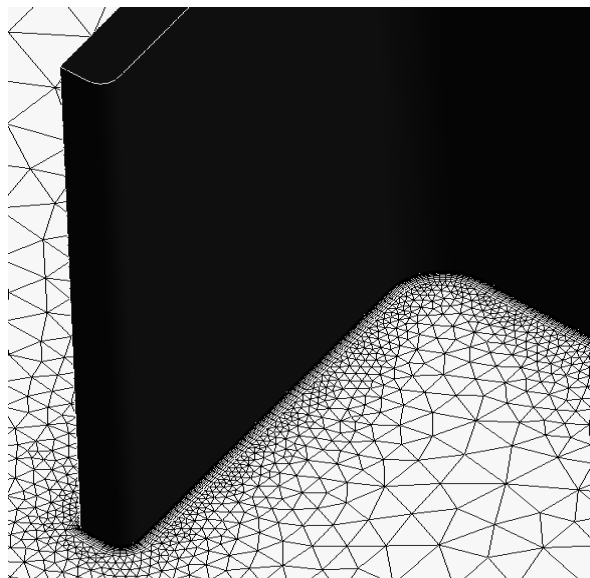


Рис. 2. Неструктурована кінцево-елементна сітка із блочною структурою у пограничних шарах

## Моделювання вітрових впливів на будівлі

При комп'ютерному моделюванні вітрових впливів на висотні будівлі використовується загальна концепція моделювання, сформульована вище. Побудова геометрії опор та генерування розрахункової сітки виконувалось на персональному комп'ютері з процесором Intel(R)Core(TM) i7-4790K 4.0GHz під керуванням операційної системи Windows 7 в єдиному середовищі пакету Ansys Workbench 16.2, із наступною передачею кінцево-елементної сітки в Ansys CFX. В розрахунок закладались наступна геометрія та параметри вітрового потоку: пропорції моделей 1:1; швидкість горизонтального вітру 30 – 50 м/с; температура повітря 20°C. Розмір кінцево-елементної сітки для різних в конструктивному відношенні будівель коливався від 10 до 30 млн. об'ємних елементів (тетраедри, призми й піраміди).

Розрахунки виконувались в паралельній постановці із залученням восьми фізичних ядер процесора та оперативної пам'яті 32 GB. Для розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса, що описують в'язкі турбулентні течії, використовувався метод

кінцевого об'єму, чисельна схема високого порядку точності для конвективних і в'язких членів та модель турбулентності SST, що дозволяє моделювати вітрові потоки із розвинутими турбулентними відривами. Розрахунки в пакеті Ansys CFX, дозволили відобразити основні особливості відривного турбулентного обтікання висотних будівель як поганообтікаємих тіл і визначити значення аеродинамічних сил і моментів та їх безрозмірні коефіцієнти. На рис. 3 показані приклади комп'ютерного моделювання.

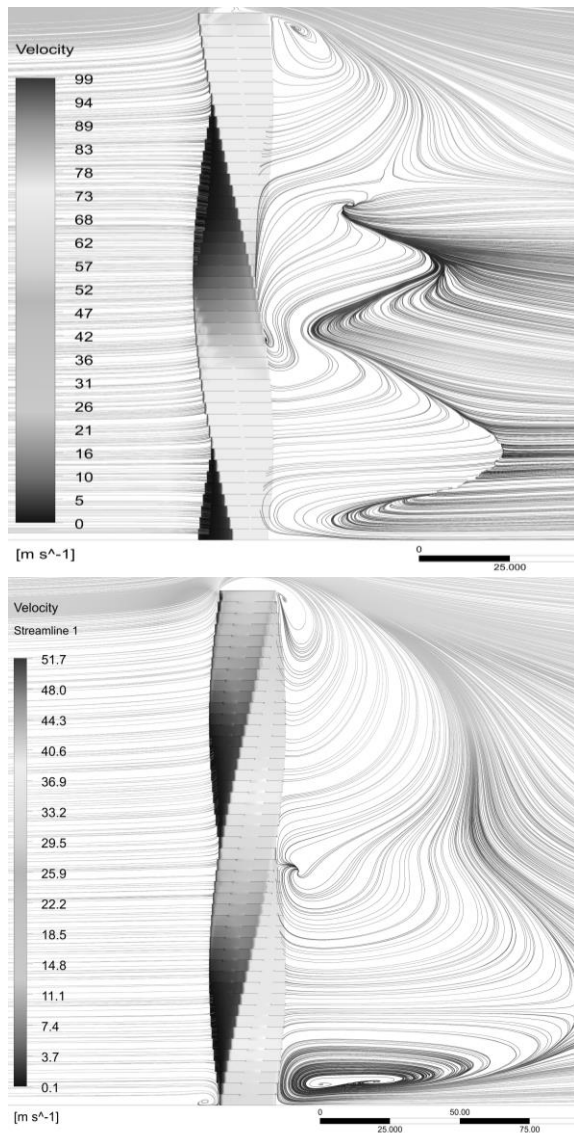


Рис. 3. Комп'ютерне моделювання вітрових впливів на висотні будівлі складної геометричної форми

### Висновки

Відсутність в існуючих нормативних документах та технічних довідниках інформації про аеродинамічні характеристики висотних будівель складної геометричної форми стимулює розвиток чисельних методів, за допомогою яких ця інформація

може бути отримана. Висловлені міркування, на наш погляд, дозволяють правильно організувати дослідження в галузі будівельної аеродинаміки висотних будівель і споруд. При цьому раціонально поєднуючи класичні прийоми модельних випробувань в аеродинамічних трубах із сучасними досягненнями обчислювальної аеродинаміки, можна досягти набагато більших і точніших результатів, ніж при диференціації цих двох напрямів експериментальних досліджень.

### Література

1. Исаев С.А. Численное моделирование нестационарного теплообмена при турбулентном обтекании кругового цилиндра. Часть I. Методическое исследование / С.А. Исаев, П.А. Баранов, Н.А. Кудрявцев, Ю.В. Жукова. // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – Т. 12, №1. – С. 27–39.
2. Исаев С.А. Численное моделирование нестационарного теплообмена при турбулентном обтекании кругового цилиндра. Часть II. Анализ автоколебательного режима / С.А. Исаев, П.А. Баранов, Н.А. Кудрявцев, Ю.В. Жукова // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – Т. 12, №1. – С. 271–283.
3. Смирнов Е.М. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидро-газодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии / Е.М. Смирнов, Д.К. Зайцев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2005. – С. 70–81.
4. Launder B.E. The numerical computation of turbulent flows / B.E. Launder, D.B. Spalding // Comp. Meth. Appl. Mech. Engng., 1974. – Vol. 3, №2. – P. 269–289.
5. Menter F.R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model / F.R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry // Turbulence : Heat and Mass Transfer 4 : Proc. Intern. Conf. Begell House, Inc. 2003. – 8 p.
6. Menter F.R. A Scale-Adaptive Simulation Model using Two-Equation Models / F.R. Menter, Y. Egorov // AIAA Paper, 2005. – 1093–1095 p.
7. Wilcox D.C. Turbulence Modelling for CFD / D.C. Wilcox // DCW Industries Inc. – California, 1993. – 460 p.
8. Wilcox D.C. Simulation of Transition with a Two-Equation Turbulence Model / D.C. Wilcox // AIAA J. 32. – 1994. – P. 247–254.
9. Махінко А.В. Імовірнісний розрахунок багатовисотних опор зв'язку / А.В. Махінко. – Полтава, 2012. – 407 с.
10. Махінко А.В. Два погляди на сучасну аеродинаміку опор зв'язку / А.В. Махінко // Зб. наук. пр. – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – Вип. 2(24). – С. 72–76. – (Серія «Галузеве машинобудування, будівництво»).
11. Дубинский С.И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» / С.И. Дубинский. – М., 2010. – 25 с.

### References

1. Isaev, S. A., Baranov, P. A., Kudryavtsev, N.A., Zhukova, Y.V. (2005). Numerical simulation of transient heat transfer in turbulent flow past a circular cylinder. Part I.



Methodological study. *Thermophysics and Aeromechanics*. Vol.12, №1. 27-39.

2. Isaev, S. A., Baranov, P. A., Kudryavtsev, N.A., Zhukova, Y.V. (2005). Numerical simulation of transient heat transfer in turbulent flow past a circular cylinder. Part II. Analysis of self-oscillating mode. *Thermophysics and Aeromechanics*. Vol.12, №1. 271-283.

3. Smirnov, E. M., Zaitsev, D. K. (2005). Finite volume method in application to problems of hydro-gas dynamics and heat transfer in domains of complex geometry. *Scientific and technical Gazette of SPbGPU*. 70-81.

4. Launder, B.E., Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol.3, №2. 269-289.

5. Menter, F.R., Kuntz, M., Langtry, R. (2003). Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, Begell House, Inc.

6. Menter, F.R., Egorov, Y. (2005). A Scale-Adaptive Simulation Model using Two-Equation Models. In *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 1093-1095.

7. Wilcox, D.C. (1993). *Turbulence Modelling for CFD*. DCW Industries.

8. Wilcox, D.C. (1994). Simulation of Transition with a Two-Equation Turbulence Model. *AIAA Journal*. Vol.32, № 2 (1994), 247-255.

9. Makhinko, V.A. (2012). Probabilistic calculation towers communications.

10. Makhinko, V.A. (2012). Two views of modern aerodynamics supports connection. *Industry engineering, construction*. Vol.2 (24). 72-76.

11. Dubinsky, S. I. (2010). Numerical simulation of wind effects on high rise buildings and complexes.

**Автор:** ЛАПЕНКО Олександр Іванович  
Національний авіаційний університет, доктор  
технічних наук, професор.  
E-mail: my-partner@ukr.net

**Автор:** МАХІНЬКО Наталія Олександрівна  
Національний авіаційний університет, кандидат  
технічних наук.  
E-mail: pasargada@yandex.ua

## МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ АЭРОДИНАМИКИ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

А.И. Лапенко, Н.А. Махинько

В статье сформулирован ряд положений о необходимости и принципиальной возможности применения методов вычислительной аэродинамики для определения ветровых воздействий на высотные здания. Сформулирована актуальность проблемы в рамках метода контрольных объемов, выполнен анализ моделей атмосферной турбулентности, реализованных в современных программных комплексах компьютерного моделирования и поданы рекомендации по построению компьютерных моделей зданий.

**Ключевые слова:** аэродинамика, высотные сооружения, аэродинамические трубы, вычислительная аэродинамика, геометрическая форма.

## METHODS OF COMPUTER MODELING IN PROBLEMS OF HIGH-RISE BUILDINGS AERODYNAMICS

A. Lapenko, N. Makhinko

The article formulates several provisions for principal possibility of application of computational aerodynamics methods for determination of wind effects on tall buildings with complex geometric shapes. Formulated urgency of problem in framework of control volumes method, analysis of atmospheric turbulence models that are implemented in modern software systems of computer simulation. Recommendations on construction of buildings computer models, simulation of wind regimes of fields around buildings and formulate a set of theses for a correct choice of boundary and initial conditions of simulation. Computer modeling, addition to developed software modules that are allowed to display main features of separated turbulent flow in the flow around high-rise buildings and to determine the value of the aerodynamic forces and moments that act on them.

**Key words:** aerodynamics, high-rise buildings, wind tunnel, computational aerodynamics, geometric shape.