

## ДЕЯКІ ПИТАННЯ АЕРОДИНАМІКИ ВИСОТНИХ СПОРУД

О.І.Лапенко, *д.т.н., проф.*, Н.О.Махінько, *к.т.н.*

*Національний авіаційний університет, Київ, Україна*

**Постановка проблеми.** Дослідження в аеродинаміці висотних споруд складної геометричної форми полягають в обчисленні сил та моментів, що діють на них. Традиційно, для одержання відповіді, в аеродинаміці проводять експериментальні випробовування, застосовуючи новітні засоби вимірювання, що переважно дає задовільний результат. Натомість, теоретичні методи розрахунків дозволяють отримати кількісну оцінку характеристики течій лише в рамках обраної математичної моделі, що не завжди коректно описує їх.

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** На сьогоднішній день є доволі поширеними дискусії щодо вибору методу досліджень в галузі аеродинаміки будівельних конструкцій та зокрема висотних споруд складної геометричної форми. Загальноприйняті підходи полягають у використанні складних інженерних комплексів – аеродинамічних труб, які створюють потік із зазначеними характеристиками. Також останнім часом бурхливого розвитку дістає обчислювальна комп'ютерна аеродинаміка, що в багатьох дослідженнях позиціонує себе як альтернативний підхід. Таке радикальне обмеження у виборі шляху вирішення практичних задач аеродинаміки будівельних конструкцій є сумнівним, оскільки обидва підходи мають не конкурувати, а узгоджуватися та доповнювати один одного.

**Аналіз останніх досліджень.** База теоретичних досліджень в аеродинаміці будівельних споруд та основні напрямки її розвитку сформульовані у фундаментальних роботах [1 – 5]. Проте порівнянню теоретичних досліджень з результатами, отриманими в ході аеродинамічного експерименту, в зазначених джерелах приділено мало уваги. Ця проблема наразі є новою та недостатньо вивченою.

**Формулювання цілей статті.** В рамках роботи формулюються шляхи щодо гармонізації та поєднання нових і перспективних можливостей теоретичного отримання кількісних оцінок характеристик потоків за допомогою комп'ютерної техніки із накопиченим досвідом отримання результатів при проведенні цілеспрямованого аеродинамічного експерименту.

**Виклад основного матеріалу.** Основні аеродинамічні характеристики будівельного об'єкту можуть бути отримані двома шляхами. В першому випадку дослідження базуються на застосуванні технічних пристроїв для відтворення повітряного потоку і використанні сучасних точних засобів вимірювання його характеристик. Даний метод є історично першим та достатньо вивченим, він містить величезну практичну базу, сформовану дослідниками різних країн. Експериментальна аеродинаміка будівельних конструкцій стала підґрунтям для отримання первинної інформації про вітрові впливи на будівлі та споруди, що знайшла своє відображення у всіх будівельних нормах світу. Не виключені й очевидні недоліки при проведенні експериментальних випробувань у аеродинамічній трубі. Зокрема, можна зазначити недосконалість технічних пристроїв окремих лабораторій та різну техніку проведення експерименту, питання чіткої відповідності моделі та реального будівельного об'єкту, задача коректного моделювання споруди. Окремою проблемою експериментальних досліджень є їх висока вартість, великий термін виконання та залучення наукових кадрів.

Друга можливість отримання аеродинамічної інформації полягає у дослідженні характеристик потоків методами комп'ютерної аеродинаміки. Вони є доволі ефективними, менш витратними та не вимагають значних трудових резервів. З фізичних ресурсів особлива увага приділяється потужності комп'ютерної техніки та програмному забезпеченню, які мають забезпечувати досить високі якісні та функціональні вимоги. Існує велика кількість програмних продуктів, які застосовуються для отримання кількісних характеристик потоків. Найбільше світове поширення серед них має комерційний програмний комплекс ANSYS SFX та ANSYS FLUENT.

Комп'ютерне моделювання вітрового потоку на перший погляд має багато переваг, оскільки дозволяє візуалізувати процес обтікання тіла, дослідити його в динаміці, керувати часом та здійснювати багаторазові випробовування моделі, інтерпретувати результати в числовому чи графічному вигляді. В разі проведення комп'ютерного експерименту, можливо відносно легко коректувати початкові дані геометричної моделі та змінювати граничні умови, по різному налаштовувати параметри розв'язуючих процедур, вдосконалювати алгоритм при отриманні результатів тощо. Проте такі переваги водночас є головним недоліком обчислювальної аеродинаміки. Величезний об'єм інформації, яким оперує дослідник, має бути коректно заданим та раціонально використаним при створенні комп'ютерної моделі. Це вимагає глибокого розуміння процесу дослідження та вагомої бази наукових знань. З одного боку, це унеможливує віднесення комп'ютерного моделювання до типових інже-

нерних задач, а з іншого – породжує чималу кількість суперечок та неузгодженостей у наукових колах. Частою є ситуація, коли в дослідженнях різних авторів, при однакових заданих умовах, кінцевий результат має значні розбіжності.

Комп'ютерне аеродинамічне моделювання є простішим, швидшим та більш зручним. Воно є незамінним для отримання даних аеродинамічних характеристик на початковому етапі проектування будівельної споруди та у випадках, коли фізичні експерименти унеможливаються з ряду незалежних причин – недостатності фінансування чи фізичних перешкод (не завжди технічне забезпечення лабораторії достатнє для точного відтворення дослідної моделі). В свою чергу, виключно теоретичне дослідження не гарантує достовірного результату, особливо при моделюванні висотних будівельних конструкцій чи об'єктів складної геометричної форми. Звичайно виконання числових операцій технічними засобами є точним, проте побудова моделі (введення вхідних умов, вибір спрощень і параметрів та інші вагомі фактори) виконується людиною, що у випадку недостатності широких професійних знань у різних областях підвищує ризик помилки.

Ідеальним варіантом розв'язання поставленої задачі є одночасне проведення обох експериментів. Це водночас забезпечить повну інформативність та надасть достатню точність проведеному дослідженню. Проте, в переважній більшості, результати розрахунку не матимуть повного збігу. Різниця фізичного та теоретичного експерименту здебільшого вказує на необхідність корегування моделі при комп'ютерній симуляції. Нерідко її доводиться доповнювати та уточнювати для отримання більш узгоджених значень з натурним модельним випробуванням.

Як бачимо, правильний вибір шляху отримання аеродинамічних даних в кожному конкретному випадку обтікання, є першочерговим питанням розрахунку конструкції. Лише правильний аналіз поставлених задач, точне розуміння вихідних результатів та вигляду їх отримання, вірна оцінка впливових параметрів та чинників, якими можливо знехтувати дозволить застосувати оптимальний метод. Раціональне поєднання фізичних та комп'ютерних методів інженерного аналізу надасть досліднику найбільш повну картину обтікання тіла.

До основних аеродинамічних чинників вітрового впливу на висотні споруди складної геометричної форми відносяться сила лобового опору, підйомна (бокова) сила та аеродинамічний момент. Як і більшість будівельних конструкцій, даний вид споруд відноситься до тіл поганообтікаємої форми, оскільки основну частку їх аеродинамічного опору складає не опір тертя, а опір тиску. Графічно, аеродинамічний вплив на об'єкт

можна представити у вигляді складових результуючої сили на координатні вісі системи координат, пов'язаної з тілом. В загальному випадку величина аеродинамічних сил та моменту залежить від тіла (форма, розміри, стан поверхні, орієнтація в потоці повітря і т.п.) та параметрів повітряного потоку (швидкості вітру, інтенсивності турбулентності).

Значний діапазон зміни форми споруд та зростання висоти будівель викликає великі відмінності їх аеродинамічних властивостей. Певно, що будівлі більш простих форм (призматичного, циліндричного опису, постійного перерізу) являлися об'єктами досліджень в першу чергу, а тому питань опису повного спектру вітрових впливів на них, як правило, не виникає. Постійно зростаючі технічні можливості будівництва, підвищені вимоги до художньої виразності форми будівлі та висока престижність, досконалість і виразність висотних будівель значно ускладнили їх архітектурну композицію. Інколи економічна ефективність спорудження таких об'єктів відходить на другий план, поступаючись іміджевій задачі створення витвору архітектури. Висотні конструкції постають символами технічного прогресу, сприяють розвитку економіки, бізнесу і туризму, являються символами міст та країн, а отже є вельми коштовними та технічно складними. Їх форму визначають світові новітні тенденції, тяжіння до енергозбережуваності та економічності – «еко-архітектура», гармонічне поєднання функціональності та естетики.

Певна річ, що такі споруди, в плані визначення аеродинамічних параметрів, здебільшого вимагають індивідуального підходу та не можуть бути підведені під єдині розрахункові стандарти. Іноваційні архітектурні рішення, специфічні композиційні особливості оболонки таких конструкцій унеможливають надання адекватної характеристики вітрових впливів за існуючими нормативними підходами. Підвищена відповідальність проєктувальників при розрахунку висотних споруд складної геометричної форми породжує необхідність одночасного виконання натурних, модельних і теоретичних аеродинамічних досліджень.

Вагомим чинником, який неодмінно має місце при зборі вітрового навантаження для висотних будівель, є вплив існуючої забудови. Тільки при такому комбінованому підході можна претендувати на об'єктивну оцінку напружено-деформованого стану споруди. Проте іноді цей фактор є значною технічною перешкодою при проведенні модельних випробувань в аеродинамічній трубі. Для врахування аеродинамічної інтерференції споруд, при моделюванні цілого комплексу забудови, необхідно мати аеродинамічну трубу значно великих розмірів. Ці перешкоди безпосередньо впливають як на якість і точність проведення експерименту, так і на його вартість й трудомісткість. Тому обов'язковим етапом для отримання інформації про аеродинамічні сили та моменти має бути

також виконання комп'ютерної симуляції, з наступним співставленням із результатами реальної обдувки в аеродинамічній трубі. Певно, що комп'ютерне моделювання передусе проведенню фізичного експерименту. Отримавши початкові дані про поведінку споруди у повітряному потоці, можливо виявити проблеми на самій ранній стадії досліджень та внести необхідні корективи в її конструкцію, досягнувши архітектурного компромісу. Наступне проведення продувки узгодженого макету споруди в аеродинамічній трубі надасть більш уточнену інформацію, на основі якої можуть бути внесені необхідні зміни до комп'ютерної моделі та отримати уявлення про найдрібніші подробиці.

Таким чином, аеродинамічні властивості висотних споруд складної геометричної форми характеризуються наступними параметрами: конструктивними особливостями зовнішньої оболонки, формою поперечного перерізу на різних висотних рівнях, місцем розташування споруди та присутності об'єктивних перешкод (міська забудова), що зумовлюють утворення складних інтерференційних ефектів.

Певно, що не можливо врахувати всі описані фактори в рамках норм проектування, оскільки в розглядуваному класі споруд архітектори «змагаються» в унікальності, оригінальності та неповторності форми. Натомість доцільним є надати загальні вказівки для однотипних розрахункових положень, котрі завжди присутні в кожному проекті та створити прогностичні прототипи аеродинамічних моделей на базі найпростіших вихідних форм. Водночас це дозволить уникнути «грубих» помилок при розгляді взаємодії вітрового потоку та споруди і задасть орієнтири при створенні комп'ютерної моделі обдування.

**Висновки.** Наведені судження, на наш погляд, дозволяють правильно організувати дослідження в галузі будівельної аеродинаміки висотних споруд складної геометричної форми. Раціонально поєднуючи традиційні прийоми модельних випробувань з використанням складних інженерних комплексів із сучасними досягненнями обчислювальної аеродинаміки, можна досягти набагато більших і точніших результатів, ніж при диференціації цих двох напрямів експериментальних досліджень.

### **Summary**

**The article investigates some aspects of aerodynamics of high-rise buildings with complex geometric shapes. In particular, questions of experimental aerodynamics and simulation of the environment with the help of computer devices.**

## *Литература*

1. Yeatts B.B. Field experiments for building aerodynamics / B.B. Yeatts, K.C. Mehta. – Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1993. – Vol. 50. – P. 213-224.
2. Mendis P. Wind Loading on Tall Buildings / P. Mendis, T. Ngo, N. Haritos A. Hira, B. Samali, J. Cheung. – EJSE Special Issue: Loading on Structures. – 2007. – Vol. 3. – P. 41-54. – Режим доступа до журн. : <http://www.ejse.org>
3. 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 (CD-ROM Proceedings) Redding, CT: Begell House Inc. – 2003. – P. 625-632.
4. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications / F.R. Menter. – AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32(№8). – P. 1598 - 1605.
5. Menter F.R. Scale-Adaptive Simulation Model using Two-Equation Models / F.R. Menter, Y.A. Egorov. – AIAA paper. – 2005. – P. 1093-1095.
6. Menter F.R. Development and application of a zonal DES turbulence model for CFX-5 / F.R. Menter, M. Kuntz // ANSYS CFX Validation Report. – 2001. – Vol. CFX-VAL 17/0703. – P. 1-34.
7. Meroney R.N. Wind tunnel and numerical simulation of pollution dispersion: a hybrid approach / R.N. Meroney // Croucher Advanced Study Insitute on Wind Tunnel Modelin. – 2004. – 60 p.
8. Moonen P. Numerical modeling of the flow conditions in a closed circuit low-speed wind tunnel / P. Moonen, B. Blocken, S. Roels, J. Carmeliet. – JWEIA, 2006.