

УДК 697.32

С.О. Шевченко, Є.О. Шквар

Національний авіаційний університет, Київ

## АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ МОДЕЛЮВАННЯ ОБТІКАННЯ РЕЛЬЄФУ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

*Виконано аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень щодо обтікання рельєфу земної поверхні і, зокрема, міської забудови. Особливу увагу приділено визначальним фізичним процесам, що обумовлюють формування вихрових структурних особливостей при обтіканні вітром споруд значних розмірів, аспектам силової взаємодії та особливостям дифузійних процесів розповсюдження забруднень в елементах міської забудови. Обґрунтовано актуальність побудови математичних моделей цих процесів з метою розробки і впровадження в практику проектування сучасних наукових підходів для визначення гранично припустимої максимальної щільності міської забудови.*

**Ключові слова:** обтікання рельєфу, приземний примежовий шар, турбулентність, вихрова структура течії, пристінна дифузія.

### Вступ

Неухильно зростаючий темп життя і обумовлене цим збільшення використання енергоносіїв в умовах обмеженості ресурсів останніх, що має постійну тенденцію до загострення, вимагають докорінної перебудови принципів та заходів охорони природи з метою поліпшення екологічної обстановки, підвищення ефективності ресурсозберігаючих заходів та розробки ефективних стратегій раціонального природокористування.

Започаткована в радянські часи практика побудови міст в районах інтенсивного промислового розвитку привела в умовах зростання промислових викидів до інтенсифікації впливу негативного екологічного фону, що за сучасних умов актуалізує необхідність обліку забруднення повітря домішками і викидами підприємств енергетики, машинобудування, транспорту. Вагомою проблемою сучасного містобудування є також забезпечення вентилявання простору між будинками, вулицями і провулками шляхом своєчасного розсіювання вітром шкідливих

забрудненя та зменшення їх концентрації через змішування з чистим повітрям. Хоча стандарти для промислових об'єктів встановлені, виявляється, що існуючі норми, стосовно довкілля, зокрема, вітрових навантажень на будівельні споруди і припустимих забрудненя атмосфери, потребують перегляду, що стимулює потребу в розробці нових, точніших та надійніших методів розрахунку.

Розвиток нових архітектурних форм, поява гнучких конструкцій, що деформуються, впровадження нових будівельних матеріалів та технологій будівництва вимагає вивчення силової дії вітру. Адже споруди завдяки своїм розмірам можуть суттєво впливати на прилеглі до них інші будівлі, оскільки при обтіканні великих об'єктів формуються не лише великомасштабні застійні області та, як наслідок, зони підвищеного тиску, а й потужні та стійкі вихрові структури. Зазначені чинники можуть суттєво впливати на прилеглі території і будівлі, сприяючи формуванню застійних областей чи, навпаки, змінюючи з певною періодичністю опір тиску і навіть генеруючи коливання акустичного діапазону. Тому, вкрай бажано вміти ще на етапі проектування сучасних будівель, особливо великорозмірних, передбачати, як діятиме вітровий потік на будівельний об'єкт відомої геометрії, розташований поблизу інших споруд, як вже існуючих, так і передбачених до зведення. Крім того, є не менш важливим вміти надійно вирішувати й складнішу зворотню задачу – як будівельний об'єкт впливатиме на вітровий потік, трансформує його, міняє властивості та характер течії. Оскільки вітровий потік є турбулентним, задача розгляду обтікання комплексу будівель і споруд з урахуванням рельєфу місцевості, зелених насаджень тощо значно ускладнюється. Результати сучасних експериментальних і теоретичних досліджень фізики атмосфери, структури турбулентності в зсувних течіях поглиблюють рівень розуміння розвитку турбулентних процесів, механізму втрат енергії на турбулентне тертя, трансформацію турбулентного потоку при обтіканні перешкод, завдяки чому формують основу методологічних підходів подальших досліджень у цій галузі. Як розширення технологій лабораторних і натурних експериментальних досліджень турбулентних течій при обтіканні складних поверхонь в умовах тепломасообміну і дифузії домішок стає дедалі актуальнішим сучасний напрямок аналізу складних систем та процесів – створення відповідних математичних моделей і методів розрахунку [1]. Слід особливо зазначити, що зростання щільності забудови, як правило, має негативний характер впливу, оскільки перешкоджає вентиляції і погіршує комфортне перебування людей у безпосередній близькості до вищезазначених об'єктів. Крім того, потреба в достовірній оцінці характеристик обтікання вітровим потоком різноманітних будівельних споруд необхідна також для визначення віт-

рових навантажень на їх конструкції та для урахування впливу вітру на повітрообмін приміщень [2], що значно актуалізує дану проблему.

У даний час в Україні, як і в багатьох країнах Європи, одним з пріоритетних напрямків розвитку економіки є енергозбереження. Біля чверті частини палива, що спалюється в державі, витрачається на тепlopостачання житлових та громадських будівель. Навіть при загальному зниженні споживання енергії в галузях промисловості, сільського господарства, будівництва та транспорту об'єм споживання енергоносіїв громадським сектором має стабільний характер і розглядається як певна константа [3].

Вищезазначені проблеми для України є порівняльно новими, отже потребують своєчасного і ретельного дослідження, а також розробки відповідних методів для проведення необхідних оцінок.

З вищесказаного можна сформулювати мету даної статті – провести аналіз ряду існуючих методів визначення характеристик обтікання тіл різної конфігурації, які є найбільш придатними для подальшого дослідження обтікання нерегулярного рельєфу міської забудови; визначення перспектив та переваг математичних методів дослідження обтікання певних зон міської забудови; виділення структурних особливостей математичних моделей та розрахункових методів, а також оцінка можливостей здійснення відповідних статистичних оцінок складових процесу вихроутворення.

#### **Огляд досліджень і результатів у галузі промислової аерогідродинаміки**

Серед широкого фронту досліджень в галузі аерогідродинаміки проблема вивчення комплексних характеристик обтікання тіл різних нетипових конфігурацій, для яких є визначальними екранні ефекти та складні структури вихроутворення, стала інтенсивно вивчатися порівняно недавно, набувши особливої інтенсивності протягом останньої чверті століття. Дана проблематика почала розвиватися переважно для потреб транспортної галузі, і надалі поширилася на інші галузі науки, такі як екологія, енергетика, а також будівництво і архітектура.

Серед досліджень останнього часу у цій сфері, що проводилися українськими науковцями, виділимо, не претендуючи на повноту висвітлення, наступні найбільш характерні напрямки та результати, що стосуються тією чи іншою мірою предмету розгляду даної роботи: формування обтікання біляекранних течій (Сохацький А.В., Приходько О.А., Дніпропетровський національний університет, Інститут транспортних систем і технологій); обтікання тіл різної форми, призми, ромба та ін. (Остапів В.В., Піндус Н.М., Чеховський С.А., Івано-Франківський університет нафти і газу); обтікання аеродинамічного понування «механізований тілесний профіль «профіль-двигун»» з урахуванням роботи силової уста-

новки (Орловський М.М, Державний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»); обтікання поверхонь із заглибленнями складної геометрії, зокрема, лунок, вихрових камер, локальних елементів різноманітних форм тощо (Бабенко В.В., Турик В.М., Воскобойник О.А., Воскобойник В.А., Інститут гідромеханіки НАН України); обтікання напівсиметричних конічних пористих тіл (Зайцев О., Хорошилов О., Київський національний університет); обтікання різноманітних поверхонь з різноманітною природною чи штучною шорсткістю та цілеспрямоване управління вихровою структурою турбулентних течій (Шквар Є.О., Козлова Т.В., Національний авіаційний університет).

В найближчому зарубіжжі дослідження нетипових для класичної аерогідродинаміки геометрій, розвиваються, зокрема, по наступним напрямкам, цікавим у контексті даного дослідження: обтікання різноманітних тіл з пасивними та активними вихровими комірками (Ісаєв С.А., Судаков А.Г., Усачов А.Є., Баранов П.А., Пригородов Ю.С., Санкт-Петербурзький державний університет цивільної авіації, Михалев А.Н., Фізико-технічний інститут ім. Іоффе, РАН); обтікання системи циліндрів та сфер (Бедарев І.А., Федоров А.Ф., Інститут теоретичної і прикладної математики СВ РАН); обтікання групи тіл, які утворюють вузькі канали (Ніконов В.В., Самарський державний аерокосмічний університет); обтікання круглих циліндричних тіл (Матвеев С.К., Полянський А.Ф., Скурин Л.І., Санкт-Петербурзький державний університет); Леухин Ю.Л., Сабуров Є.Н., Усачев І.А., Архангельський державний технічний університет).

Усталеною практикою сьогодення, яка обумовлена складністю та тривалістю етапів формалізації, алгоритмізації, програмування та розв'язання задач аерогідродинамічного спрямування, стала розробка спеціалізованого програмного забезпечення як комерційними компаніями (ANSYS-CFX, FLUENT, STAR-CD, VP2/3, FLOW3D, FlowVision), так і спільнотами ентузіастів, які розробляють масштабні проекти на принципах вільного розповсюдження та відкритого коду (OpenFOAM, Code-Saturne). Вимогливість аерогідродинамічних розрахунків до обчислювальних ресурсів ініціює необхідність адаптації проблемно-орієнтованого програмного забезпечення до паралельних і, зокрема, розподілених архітектур сучасних суперкомп'ютерних систем. Попит на такі послуги і необхідність розробок як високопродуктивної обчислювальної техніки, так і адаптації під неї програмного забезпечення та постановок конкретних задач стимулюють розвиток відповідних нових форм інжинірингового бізнесу, що розвивається, зокрема, компаніями «Т-Платформи», «Т-сервіси» (Росія), Ustar (Україна).

Зазначені фактори є причинами того, що результати наведених вище напрямків досліджень не

можна безпосередньо і у повній мірі застосовувати для дослідження обтікання нерегулярного рельєфу міської забудови. Дослідження по даному напрямку пов'язані з наступними іменами українських та зарубіжних науковців: Кузнецов С.Г., Бутова А.П., Горохов Є.В., Лопатка С.С., Дубинський С.І., Сініцина І.Є., Гувернюк С.В., Гагарін В.Г., Микрюков А.В., Довгий С.О., Буланчук Г.Г., Буланчук О.М., Беданоків М.К., Коблева Р.Б.

### **Аналіз результатів по проблемі обтікання міської забудови**

Проаналізуємо більш детально результати науковців, які безпосередньо стосуються досліджень обтікання рельєфу міської забудови. Ураховуючи той факт, що дослідники цієї проблематики часто поєднують експериментальні методи досліджень з теоретичними, при висвітленні отриманих результатів було прийнято за правило об'єднувати при аналізі напрацювання одних колективів або результати, здобуті різними школами за одним і тим самим методом, намагаючись дотримуватися при цьому хронологічної послідовності.

В дисертаційній роботі на здобуття наукового ступеня д.т.н., 1993 р. «Модельовання вітрового потоку та забруднюючих домішок з метою прогнозування екологічної обстановки та сельбищних територіях» Сініцина І.Є. вивчає дію вітрового турбулентного потоку на будівельний об'єкт та вирішує обернену задачу – як об'єкт впливатиме на потік, трансформуватиме його та змінюватиме характер течії. Задачу ускладнено розглядом обтікання комплексу будівель і споруд з урахуванням рельєфу місцевості та зелених насаджень [1]. Загальна методика досліджень полягає в проведенні комплексного теоретичного і експериментального дослідження вітрового режиму і перенесення забруднюючих домішок на сельбищних територіях з використанням моделей і макетів тих об'єктів, що існують або проєктуються, а також шляхом здійснення натурних вимірювань. У даній роботі розроблено: модель повітряних течій в приземному шарі атмосфери, що відрізняється врахуванням процесів квазіперіодичного оновлення течії біля поверхонь, що відповідає сучасним поглядам на фізику турбулентності, підвищує надійність і точність при вирішенні завдань архітектурно-будівельної аеродинаміки; метод моделювання обтікання проникних зелених насаджень; модель обтікання вітром сельбищних територій як течії біля поверхонь з ізольованими і регулярними елементами шорсткості та дослідження впливу шорсткості на структуру приземного турбулентного шару; моделі перенесення і поширення забруднюючих домішок в приземному шарі атмосфери. На цій основі запропоновано: рекомендації по проєктуванню міських мікрорайонів; співвідношення для розрахунку турбулентного тепло- і масообміну при обтікан-

ні споруд, отримане з позиції існування регулярних структур у пристінній турбулентності; способи зниження тепло- і масообміну будівель при обтіканні вітром і поліпшення мікроклімату. Обґрунтованість і достовірність наукових положень вичерпно підтверджені зіставленням з відомими теоретичними результатами, а також постановкою власних лабораторних і натурних експериментів.

Недоліком даної роботи є розгляд «віртуальної» забудови у двовимірній області та акцент на експериментальні та натурні дослідження, що збільшує трудомісткість та кошторис подальших досліджень у даному напрямку.

У 2004 році Лопаткою С.С. опубліковані результати досліджень, присвячені визначенню профілів вітрового тиску на висотних конструкціях міста Львова шляхом безпосереднього вимірювання [4]. Визначення профілів вітрового тиску на будівельні конструкції проводилися вимірюваннями швидкості вітру на різній висоті з подальшою апроксимацією за відомими формулами, прийнятими в СНІП 2.01.07-85. Запропоновано багатоканальну вимірювально-реєстраційну комп'ютерну систему визначення вертикальних профілів вітрового тиску на висотні споруди. Її основу складає система давачів, що розміщені по висоті споруди, починаючи з умовної точки нульового відліку, в кількох проміжних місцях та закінчуючи точкою максимуму висоти. Система в автоматичному режимі реєструє одночасні покази приладів і записує їх в пам'ять. Використання такого високоефективного на перший погляд способу має, проте, ряд недоліків. Перш за все, експериментальне дослідження вимагає наявності коштовного обладнання, якого не було в розпорядженні автора, необхідності прокладання значної довжини кабелю (до 200 м для споруди заввишки 50 м кабелю) та потреби під'єднання до електричної мережі. Крім того, негативну роль відіграє громіздкість усього комплексу обладнання, яка шкодить мобільності його переміщення на завітрену сторону досліджуваних будівель. Отже така складність унеможливає одночасні вимірювання і не забезпечує належного врахування особливостей неоднорідності рельєфу забудови та змінності напрямків вітрових потоків. Тому дослідження профілів вітрового тиску в роботі [4] було вирішено проводити за допомогою доступного обладнання, яке не вимагає значних фінансових витрат. Швидкість вітру визначалась за допомогою трьох видів анемометрів – чашкового ручного, механічно-індукційного та пелюсткового. Для проведення досліджень було обрано дві висотні споруди у м. Львові – освітлювальну щоглу стадіону "Україна" та дзвіницю церкви Св. Покрови. Вимірювання профілю вітрового тиску проводились у два заходи: реєструвалися покази анемометра при підйомі на висотну споруду та при спуску з неї. За-

міри вітру визначались у приземному шарі періодично по ходу підйому та на максимальній висоті. Подвійні покази приладів усереднювались, що дало змогу визначити середню швидкість на обраній висоті. Під час проведеного дослідження автор зіштовхнувся зі складнощами вимірювань тиску вітру, спрямованого перпендикулярно до стін, методика виявилася працездатною лише за умови обтікання лише під деяким кутом до них, відмінним від прямого. З описаного вище можна зазначити, що даний метод може використовуватися лише для оцінки обтікання поверхні вітровими потоками лише одиничних споруд, немає можливості узагальнення отриманих результатів при змінні напрямку вітру, а також відсутня повна картина розподілу тиску та інших параметрів обтікання по усій поверхні будівлі при її огинанні та за нею. Таким чином, окрім досить наближених оцінок силових напружень, обумовлених тиском, застосування такої методології більш детальної інформації забезпечити не в змозі, до того ж навіть вимірювання профілю тиску не є одночасними. Отже цей підхід не є ефективним і якісним навіть для отримання вичерпної інформації про властивості обтікання окремої будівлі, тому його ніяк неможливо адаптувати до використання з метою дослідження вентиляції мікрорайону.

Плідний напрямок досліджень представлений роботами [5,6], у яких здійснено успішні спроби моделювання обтікання рельєфу міських забудов на основі методу дискретних вихорів. Так дослідження [5], виконане Довгим С.О., Буланчуком Г.Г., Буланчуком О.М., присвячене моделюванню ситуацій, коли в уже існуючій забудові планується розмістити нові будинки. Розглянуті приклади впливу появи нових будинків та їх висоти на існуючу аераційну ситуацію. У ролі дискретних особливостей використано, як і в роботі колективу дослідників під керівництвом Ліфанова І.К. [6], дискретні вихрові рамки, сукупністю яких замінюються обтічні поверхні досліджуваних тіл і вільні вихрові поверхні за ними. Поверхні споруд замінюються нерухомими рамками, інтенсивності яких невідомі і змінюються з часом, а вихрові сліди моделюються рамками, які сходять у потік і далі рухаються разом з рідиною без зміни циркуляції. Таким чином, згідно використаної в [5,6] методології при моделюванні приймається припущення про ідеальну нестисливу рідину. Нехтування в'язкими властивостями повітря унеможливає достовірне визначення лінії, вздовж якої відбувається відрив від обтічної поверхні і потребує її явного задання. Тому в [5,6] припускається, що відрив може відбуватися або на всіх гострих кромках будинків, або лише на окремих, що є певною мірою обмежувальним при використанні методу для обтікання споруд з криволінійними формами зовнішніх поверхонь. Поверхні будинків в даних роботах розг-

лядаються, як такі, що описуються кусково-гладкими функціями, продемонстровано працездатність даної методики для серії розташованих поруч багатопверхових будинків. Отже технологія дискретних вихорів при її застосуванні до моделювання обтікання міської забудови демонструє поєднання порівняльної простоти зі зручністю формалізації задачі та високою обчислювальною ефективністю чисельної процедури відшукування розв'язку. Але для складних форм об'єктів обтікання методика потребує явного введення додаткової інформації про лінії формування відриву.

Ще однією з успішних спроб моделювання обтікання наближеного до реального рельєфу місцевості є дослідження [7] Беданокова М.К. та Комлевої Р.Б. 2009 р., у якому побудовано нелінійну аналітичну трьохшарову модель для вивчення обтікання гір довольної форми. Для такої моделі використано систему рівнянь руху, адиабатичності і нерозривності. Основний акцент робиться на вплив нерівностей рельєфу на стан атмосфери з точки зору вихрової динаміки та стійкості. Недоліком даної роботи є те, що дана модель, як і [5, 6], побудована без урахування в'язкості, отже ефекти дисипативної, у тому числі й турбулентної природи в її рамках не можуть бути враховані належним чином. До того ж, аналітичні підходи часто є вкрай обмежувальними у випадках обтікання тіл складної геометрії.

Проблема моделювання обтікання міського рельєфу отримала подальший розвиток в дослідженнях Кузнецова С.Г. (Донбаська національна академія будівництва та архітектури – ДонНАБА), яким у 2009 році була захищена докторська дисертація «Вітрова дія на висотні будівлі в умовах міської забудови» [8]. Метою дослідження було вирішення науково-технічної проблеми визначення вітрової дії на висотну будівлю в умовах впливу навколишніх будівель і забудови та її реалізація в розрахунках для висотних будівель повної складової вітрового тиску, а також оцінки чинників, що впливають на формування території забудови. Автором застосовувався комплекс загальних методів емпіричного і теоретичного досліджень, а саме: експеримент, моделювання, аналіз і синтез; методи математичного моделювання; методи теоретичної гідроаеромеханіки; методи фізичного моделювання з використанням теорії подібності, аеродинамічних методів випробувань моделей будівель і їх комплексів, а також гідродинамічних методів виміру тиску. Результати розробки методики масштабного експериментального дослідження вітрових навантажень для аеродинамічних труб з короткою робочою частиною були реалізовані в аеродинамічній лабораторії кафедри аеродинаміки і льотної експлуатації Національного авіаційного університету, м. Київ (НАУ), а також при проектуванні лабораторії будівельної аеродинаміки ка-

федри металевих конструкцій ДонНАБА. Зокрема, оцінки вітрових навантажень на будівлі, обумовлені інтерференційними ефектами взаємодії тіл різної висоти, здійснені експериментальним шляхом в аеродинамічній лабораторії НАУ висвітлені Кузнецовим С.Г. у співавторстві з Гороховим Є.В. в статті «Вітрові навантаження на низьких будівлях у забудові з висотною будівлею», 2006 р. [3]. Дослідження проводилися на основі трьох схожих змінних забудов м. Донецька. Програма аеродинамічних досліджень масштабних моделей забудов в аеродинамічній трубі передбачала визначення коефіцієнтів тиску вітрового потоку на поверхнях будівель, розташованих поряд з висотною будівлею. Процес виміру вітрового тиску, перетворення його на електричний сигнал, обробка і відображення отриманих результатів було автоматизовано з використанням електронної системи. Основні результати роботи полягають у фіксації в кожній дренажній точці на більш ніж 80 моделях зрізів вентиляційних каналів низькоповерхових будівель значних змін значень коефіцієнтів повітряного тиску в різних умовах моделювання впливу дії вітру, а саме: за наявності дерев (“літо”) і за їх відсутності (“зима”) та з висотною будівлею чи без неї. Наступною вагомою та узагальнюючою в контексті даного аналізу роботою Кузнецова С.Г. стала стаття «Роль будівельної аеродинаміки в проектуванні будівель і споруд», 2008 р. [9], в якій наведено етапи становлення будівельної аеродинаміки та розглянуто особливості, притаманні методам будівельних аеродинамічних досліджень. Основним висновком, до якого приходять автор [9], є твердження про те, що технічною основою забезпечення безпеки експлуатації висотних будівель і споруд є вдосконалення методів модельних і натурних досліджень вітрового впливу. Сучасний рівень наукових розробок і технічних рішень на думку автора дає можливість проведення натурних спостережень і розвитку аеродинамічних труб, що дозволить точніше проектувати конструкції з заданими характеристиками, отже Кузнецов С.Г. надає перевагу результатам експериментальних та натурних досліджень.

Кузнецовим С.Г. і Назаровим Г.А. у статті [10] «Методи моделювання розподілу забруднення в міській забудові» (2010 р.) та Кузнецовим С.Г. і Бутовою А.П. у статті «Експериментальне дослідження обтікання вітром лінійної забудови» [11] (2012 р.) представлені огляд і аналіз існуючих фізичних методів дослідження розсіювання забруднюючих речовин в умовах забудови [10] та визначення властивостей течій і, зокрема, стійкості обтікання до періодичних збурень [11]. Моделювання в гідродинамічній трубі дозволило авторам відтворити властивості потоків шляхом їх візуалізації, яка в результаті виконання подальшого аналізу може бути ефектив-

но використана для розробки, а також оцінки властивостей теоретичних і емпіричних моделей поведінки домішок в атмосферному повітрі під впливом різних аеродинамічних умов. В рамках досліджуваної проблеми була підготовлена і апробована експериментальна установка на базі гідродинамічної труби ГТД-2М, призначена для дослідження аеродинамічних спектрів обтікання та визначення поля швидкостей збуреного потоку довкола моделей. Установка побудована за розімкненою схемою з вертикальною робочою частиною і має безперервний цикл роботи. В [10] представлені теоретичні передумови розробки макету будівель з дренажними точками, що імітують труби джерел автономного теплопостачання, а також приведені результати успішної апробації розробленого макету, що моделює забудову в гідродинамічній трубі. В основу аналізу вивчення особливостей двомірного і об'ємного стаціонарного і нестаціонарного обтікання [11] покладено визначення впливу зміни частоти і положення осі коливань на фізичну картину обтікання моделі лінійної забудови будівель. Використання саме гідродинамічної труби дозволило авторам суттєво зменшити габарити моделей у порівнянні з дослідженнями в аеродинамічній трубі при забезпеченні подібності по числу Рейнольдса. Але слід зауважити, що авторами [10] при розгляді питання розсіювання забруднень не порушується проблема забезпечення в гідродинамічних експериментах подібності дифузійних процесів і, зокрема, спосіб коректного вибору коефіцієнту дифузії в законі Фіка. Ця проблема ускладнюється також і тим, що режими течії в гідродинамічній трубі при зазначених в [10, 11] числах Рейнольдса  $10^3 - 10^4$  може бути не розвиненим турбулентним, а перехідним чи навіть ламінарним, що суттєво негативним чином вплине на аналогію між модельним експериментом у воді і реальним вітровим обтіканні.

У роботі [12] Кузнецовим С.Г. у співавторстві з Бутовою А.П. здійснено спробу чисельного моделювання обтікання вітровим потоком будівель середньої поверховості. Метою статті стала розробка методики чисельного розрахунку обтікання вітровим потоком будинків для визначення вітрових навантажень на їх конструкції та для урахування впливу вітру на повітрообмін приміщень та виявлення інтерференційних ефектів, які виникають у підвітряних зонах. Задача розв'язана шляхом проведення розрахунків вітрових навантажень та поєднання традиційних інженерних підходів з можливостями сучасних методів комп'ютерного моделювання, зокрема на основі економічних двовимірних нестационарних моделей течій. Чисельне дослідження проведене шляхом розв'язання повної системи рівнянь Нав'є-Стокса у двовимірному наближенні шляхом застосування методу розщеплення за фізич-

ними процесами. Значну увагу приділено коректному визначенню початкових і граничних умов, які дозволяють максимально точно описати особливості впливу геометрії обтічної поверхні на параметри течії та процеси тепломасопереносу, а також питанню вибору кроку за часом з метою забезпечення стійкості використаної явної скінченно-різницевої схеми. Отримані поля тиску і температур, а також коефіцієнти опору при обтіканні вітровим потоком одиночної будівлі та ряду комбінацій декількох будов. У результаті порівняльного аналізу чисельних розрахунків показано, що при обтіканні одиночної будівлі спостерігається максимальні значення тепловтрат. Такий ефект пояснюється тим, що збільшується негативний вплив відричних течій на опір споруди, зокрема спостерігається значне збільшення модуля коефіцієнта опору в кутових зонах, оскільки в цьому випадку виникає асиметрія течії у пристінній зоні та, як наслідок, виникнення нестационарних у часі вихрових доріжок і періодичного зриву вихрових структур з кромки будівлі. Отже, навіть спрощена двовимірна постановка задачі дала змогу відтворити, хоч і на якісному рівні, ряд ефектів, що спостерігаються в модельних фізичних дослідженнях. Головним недоліком даної публікації є неврахування турбулентного режиму обтікання, який реалізується при обтіканні реальних будівельних об'єктів. У результаті проведеного аналізу результатів досліджень [2,3,8-12] приходимо до висновку про те, що загальним недоліком підходів, що розвиваються та використовуються науковим колективом, очолюваним Кузнецовим С.Г., є розгляд задач переважно у двовимірній (плоскій) постановці і для ламінарного режиму обтікання, тоді як реальні будівлі є просторовими об'єктами, а враховуючи їх розміри та типові швидкості вітру, слід зауважити, що їх обтікання завжди буде розвиненим турбулентним. За умови щільної забудови турбулентністю не припустимо нехтувати, оскільки вона привносить у течію власний суттєвий дисипативний механізм, який впливає на динаміку вихроутворення та інтенсифікує дифузійні процеси при розповсюдженні домішок.

Питання вітрового режиму міської забудови також вивчалось в кандидатській дисертаційній роботі Микрюкова О.В. «Численное моделирование распространения примесей от источников загрязнения с учетом рельефа местности», 2004 р. [13]. Метою роботи є розробка проблемно-орієнтованого програмного комплексу для проведення обчислювального експерименту поширення домішків в приземному шарі атмосфери з врахуванням рельєфу підстилаючої поверхні на основі вирішення рівнянь гідромеханіки турбулентних течій. Для досягнення поставленої мети автор вирішував наступні наукові та практичні завдання: розробка математичної моделі поширення домішок в приземному шарі атмосфери з

врахуванням рельєфу підстилаючої поверхні і деформації турбулентних потоків; розробка алгоритму чисельного розрахунку параметрів просторової турбулентної течії біля криволінійної поверхні; дослідження деформації турбулентних потоків залежно від геометрії обтічної поверхні; дослідження впливу рельєфу і типу підстилаючої поверхні на розсіювання домішки від джерел забруднення різного типу, розробка програмного комплексу для збору і зберігання інформації про джерела забруднення, метеорологічні дані, рельєф і тип підстилаючої поверхні та моделювання поширення домішок в приземному шарі атмосфери. Для вирішення вказаних завдань використовувалися методи обчислювальної математики, засоби структурного і об'єктно-орієнтованого програмування, системи управління базами даних, геоінформаційні технології.

Результатами дослідження стали: розроблена математична модель поширення домішок в приземному шарі атмосфери з врахуванням рельєфу і типа підстилаючої поверхні, що дозволила істотно підвищити точність розрахунків в порівнянні з сучасними інженерними методиками за рахунок вирішення рівнянь гідроаеромеханіки в просторовій постановці для турбулентного режиму; розроблений алгоритм чисельного вирішення рівнянь, що описують формування і розвиток турбулентних течій в пограничному шарі; досліджений вплив геометрії поверхні, параметрів джерела забруднення і набігаючого потоку на розподіл концентрацій в приземному шарі атмосфери. Встановлені найбільш важливі чинники, що впливають на підйом домішки над джерелом і, відповідно, на величину приземної концентрації.

Питання вітрового режиму міста розглядалось і в Національному авіаційному університеті (НАУ). В статті Аксьонова О.О. та Ударцевої Т.Є. «Аеродинамічні умови комфорту та екологічної безпеки людини в умовах сучасної забудови міст і мегаполісів», 2009 р. [14] проаналізовано проблеми екології сучасних міських забудов та вплив аеродинамічних показників повітря на пішоходів. Дослідження проводилися в аеродинамічній трубі ТАД-2 НАУ. Досліджено навантаження на фундаменти будівель, монументів, квартали забудов великих міст, входи та виходи вентиляційних систем при взаємодії будівель, систем евакуації населення в умовах пожеж та ін. Результатами стали схеми обтікання висотних будівель на рівні пішоходів з відображеними на них напрямками руху повітря. На жаль, у даній роботі не розглядається перспектива математичного моделювання описаних вище процесів, що могло б прискорити отримання результатів та полегшити їх інтерпретацію.

Щодо проблеми розповсюдження домішок є також цікавими результати досліджень науковців ДонНАБА Гевлича І.Г. та Копичко О.М., «Чисельне моделювання розсіювання забруднень в приземному шарі багатоповерхової забудови», 2011 р. [15]. Авторами

розроблений чисельний алгоритм і програма, що дозволяють за геометричними параметрами забудови обчислювати її вихрову схему; розраховувати векторні поля швидкостей вітрового потоку в різних перетинах; визначати траєкторії переміщення забруднень від їх джерел у нестационарному режимі за часом; розраховувати дифузію забруднень від траєкторій їх переміщення; визначати концентрацію забруднень на території замкнутої забудови; будувати лінії рівних концентрацій у різних перетинах; отримувати інформацію в зручному для використання вигляді та масштабі. Також здійснено чисельне моделювання розсіювання забруднень, що переносяться повітряним потоком, з метою визначення впливу захисних екранів різної форми на зменшення забруднень дворових просторів. Розроблено рекомендації щодо зменшення забруднень сельбищної зони багатоповерхової забудови замкнутого типу на етапі проектування та у рамках реально існуючої забудови. Чисельне моделювання здійснювалося методом дискретних вихорів. Для вивчення процесів розсіювання була вибрана периметральна замкнута забудова, що є найтипівішою для наших міст. Таке розташування будівель надає суттєвий вплив на аеродинамічні характеристики групи будівель в забудові, оскільки принципово по-різному утворені розриви між будовами. Для дослідження впливу на поширення забруднень захисних екранів проведений чисельний експеримент. Недоліком даної роботи є те, що поширення забруднення розглядається без урахування дисипативних процесів, притаманних турбулентному руху через неможливість їх належного опису в межах методу дискретних вихорів, а тому розроблений підхід не дає повного представлення про реальну ситуацію на місцевості.

У 2010 році Дубинським С.І. захищена кандидатська дисертація на тему «Чисельне моделювання вітрових впливів на висотні будови та комплекси» [16], в якій на основі рівнянь гідрогазодинаміки було розроблено методику розрахунку характеристик обтікання висотних комплексів споруд. Першочерговими задачами були: визначення середньої і пульсаційної складової вітрових навантажень на несучі конструкції, пікових тисків на конструкції, що забезпечують рівень комфортності пішохідних переходів, які знаходяться в комплексі, а також розробка інженерної методики оцінки пульсаційної складової навантажень тиску на фасадні конструкції по результатам стаціонарних розрахунків. У всіх розглянутих випадках для дослідження використовувалось математичне моделювання процесів обтікання поверхонь спрощеної модельної форми шляхом застосування різних чисельних методів: одні дають наближені результати для поля течії у цілому, інші ж призначені для моделювання лише частини поля течії, але з підвищеною деталізацією та роздільною здатністю. Недоліками даного підходу є орієнтація при побудові моделей та виконанні розрахунків на

комерційний пакет ANSYS, що обмежує можливості застосування результатів за умови відсутності у користувача відповідної ліцензії, а також закритий код пакету ANSYS обмежує розробника лише закладеною у поточну чи доступну йому версію функціональністю.

У роботі [17] «Математичне моделювання просторових турбулентних течій в елементах поверхневого рельєфу» її авторами Шкваром С.О. та Козловою Т.В., 2011 р. висвітлені результати математичного опису характеристик течії в елементах поперечного рельєфу обтічних поверхонь з метою як з'ясування її структурних особливостей, так і перевірки спроможності моделі до відтворення визначальних рис, притаманних турбулентним течіям біля профільованих поверхонь. Розроблені гібридна математична модель турбулентного обміну та відповідний розрахунковий метод відтворюють ефекти взаємного впливу граней борозенок поздовжнього профілювання обтічної поверхні на формування турбулентної зсувної течії і, зокрема, вторинних течій в заглибленнях профілю рельєфу несуперечливо до відомих експериментальних даних та з належною мірою деталізації відтворення визначальних характеристик течії. Варто зазначити, що у цьому дослідженні течія розглядається як просторова і турбулентна, але рельєф досліджуваної обтічної поверхні є регулярним, а, отже, й суттєво простішим за геометрію реальної забудови, що вимагає відповідного доопрацювання розробленої в [17] методології.

У статті «Обчислювальна аеродинаміка будівельних споруд. Задачі та методи», 2011 р. [18] її автори Гувернюк С.В., Єгоричев О.О., Ісасєв С.А. виклали принципи побудови найбільш універсальної по відношенню до розглянутих раніше розрахункової методики, що ґрунтується на розв'язанні нестационарних осереднених за часом рівнянь Рейнольдса з однопараметричними (Спаларта-Аллармеса) чи двопараметричними (Ментера) диференціальними моделями турбулентності. Для якнайкращої адаптації використаного в роботі розрахункового методу SIMPLEC до особливостей комплексної геометрії фрагмента міської забудови запропоновано використання багатоблочних сіток та відповідних технологій спряження та алгоритмів інтерполяції. Водночас, на наш погляд, за наявності ряду беззаперечних переваг, найбільш суттєвим недоліком даного підходу є використання моделей турбулентності, в яких турбулентна в'язкість моделюється як ізотропна скалярна величина. Це унеможливує коректне врахування ефектів вихрогенератії другого роду за класифікацією Прандтля Л., тобто таких, що виникають внаслідок анізотропії рейнольдсових напружень.

## Висновки

1. Як показав результат аналізу сучасних вітчизняних і зарубіжних теоретичних і експериментальних досліджень, існуючі нормативні документи і методи-

ки не в повній мірі відображають специфіку вітрових впливів на сучасну міську забудову з притаманними їй висотністю будівель та щільністю.

2. Експериментальні методи потребують використання унікального аерогідродинамічного устаткування. Це не лише збільшує кошторис проєктів, а й збільшує час, потрібний для його виконання. Ураховуючи масштаби планетарних примежових шарів, а також розміри складових елементів рельєфу міста, обтікання слід вважати просторовим, а його режим – турбулентним, що, завдяки складності структури останнього, значно ускладнює задачу і суттєво обмежує та знижує надійність застосування методів експериментальних досліджень через важкість здійснення коректних перерахунків результатів останніх на натурні умови.

3. Сучасні методики розрахунку параметрів вітрових впливів на забудову ґрунтуються на числовому розв'язанні диференціальних рівнянь гідрогазодинаміки і є перспективними стосовно задач моделювання земного рельєфу та, зокрема, міської забудови, але розрахункові технології потребують адаптації та подальшого удосконалення з метою надійного відтворення фізичних особливостей, притаманних цим течіям і, у першу чергу, врахування впливу складності рельєфу на формування і подальшу динаміку вихрових структур.

4. На основі чисельного розв'язання відповідних диференціальних рівнянь та визначення структурних особливостей розрахункових методів та математичних моделей і, перш за все, належного врахування дисипативних властивостей, притаманних турбулентному обтіканню, виникає можливість ефективного здійснення надійних теоретичних оцінок генераційних та дифузійних складових процесу вихроутворення в зонах міської забудови, що забезпечить теоретичну базу проєктування сучасної високоповерхової міської архітектури.

5. Зазначені фактори дозволяють вважати розробку сучасних математичних моделей та відповідних чисельних методів розрахунку турбулентних течій над поверхнями з нерегулярним рельєфом пріоритетним напрямком досліджень, що складає суттєву наукову проблему.

6. Автори пов'язують також перспективи подальших досліджень моделювання процесів взаємодії вітру з рельєфом міської забудови із застосуванням досить молодій розрахунковій технології моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation – LES), яка при своїй значній вимогливості до обчислювальних ресурсів протягом останніх трьох десятиліть стає дедалі більш застосовною в практиці наукових досліджень завдяки стрімкому зростанню і здешевленню комп'ютерних потужностей. Ця методологія пропонує більш універсальний опис турбулентної в'язкості на підсітковому рівні та належну роздільну здатність



відтворення динаміки великомасштабних вихрових структурних особливостей потоку.

### Список літератури

4. Синицина И.Е. Моделирование ветрового потока и переноса загрязняющих примесей с целью прогнозирования экологической обстановки на селитебных территориях / И.Е. Синицина. – Ижевск, 2011. – 23 с.

5. Кузнецов С.Г. Чисельне моделювання обтікання вітровим потоком будівель середньої поверховості / С.Г. Кузнецов, А.П. Бутова. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.nbuv.gov.ua/portal/soc\\_gum/Vdnuet/tehn/2010\\_1/2.pdf](http://www.nbuv.gov.ua/portal/soc_gum/Vdnuet/tehn/2010_1/2.pdf).

6. Кузнецов С.Г. Вітрові навантаження на низьких будівлях у забудові з висотною будівлею / С.Г. Кузнецов, Є.В. Горохов // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2006. – Т. 2, №1. – С. 51-56.

7. Лопатка С.С. Визначення профілів вітрового тиску на висотних конструкціях м. Львова методом безпосереднього вимірювання / С.С. Лопатка. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/10463/1/26.pdf>.

8. Довгий С.О. Моделювання аеродинаміки міських забудов / С.О. Довгий, Г.Г. Буланчук, О.М. Буланчук. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [http://otherreferats.allbest.ru/emodel/0082381\\_0.html](http://otherreferats.allbest.ru/emodel/0082381_0.html).

9. Гутников В.А. Математическое моделирование аэродинамики городской застройки / В.А. Гутников, В.Ю. Кирякин, И.К. Лифанов, А.Н. Сетуха. – М.: Пасьева, 2002. – 244 с.

10. Беданок М.К. Модель обтекания гор производного профиля и климат / М.К. Беданок, Р.Б. Коблева // Режим доступу: [http://mkgtu.ru/docs/KONF\\_SEM/bedanokov\\_kobleva.pdf](http://mkgtu.ru/docs/KONF_SEM/bedanokov_kobleva.pdf).

11. Кузнецов С.Г. Вітрова дія на висотні будівлі в умовах міської забудови / С.Г. Кузнецов. Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.23.01 – Донбаська нац. академія будівництва і архітектури. – Макіївка, 2009. – 38 с.

12. Кузнецов С.Г. Роль строительной аэродинамики в проектировании зданий и сооружений / С.Г. Кузнецов // Проблемы архитектуры и мистобудування: Вісник Донбаської нац. акад. буд. і арх. – 2008. – Вип. 6(74) – С. 120-125.

13. Назаров Г.А. Методы моделирования распределения загрязнения в городской застройке / Г.А. Назаров,

С.Г. Кузнецов // Проблемы архитектуры и мистобудування: Вісник Донбаської нац. акад. буд. і арх. – 2010. – Вип. 2(82). – С. 158-162.

14. Бутова А.П. Експериментальне дослідження обтікання вітром лінійної забудови / А.П. Бутова, С.Г. Кузнецов // Коммунальное хозяйство городов: наук.-тех. зб. – Х., 2012. – № 103. – С. 182-188.

15. Бутова А.П. Чисельне моделювання обтікання вітровим потоком будівель середньої поверховості / С.Г. Кузнецов, А.П. Бутова. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [www.nbuv.gov.ua/ortal/soc\\_gum/Vdnuet/tehn/2010\\_1/2.pdf](http://www.nbuv.gov.ua/ortal/soc_gum/Vdnuet/tehn/2010_1/2.pdf).

16. Микрюков А.В. Численное моделирование распространения примесей от источников загрязнения с учетом рельефа местности / А.В. Микрюков. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. – Ижевск, 2004. – 25 с.

17. Аксьонов О.О. Аеродинамічні умови комфорту та екологічної безпеки людини в умовах сучасної забудови міст і мегаполісів / О.О. Аксьонов, Т.Є. Ударцева // Вісник НАУ. – 2009. – № 3. – С. 223-226.

18. Гевлич І.Г. Чисельне моделювання розсіювання забруднень в приземному шарі багатопверхової забудови / І.Г. Гевлич, О.М. Копичко // Проблемы архитектуры и мистобудування: Вісник Донбаської нац. акад. буд. і арх. – 2011. – Т. 7, № 1. – С. 59-64.

19. Дубинський С.И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы / С.И. Дубинский // автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.18 – Московский государственный строительный университет. – М., 2010. – 20 с.

20. Шквар Є.О. Математичне моделювання просторових турбулентних течій в елементах поверхового рельєфу / Є.О. Шквар, Т.В. Козлова // АБІА-2011: X міжнародна НТК, 19 – 21 квітня 2011 р. – К.: НАУ, 2011. – Том 1. – С. 6.17-6.20.

21. Вычислительная аэродинамика строительных сооружений. Задачи и методы / С.В. Гувернюк, О.О. Егорьев, С.А. Исаев и др. // Вестник МСГУ. – 2011. – № 2, Т. 2. – С. 113-118.

Надійшла до редколегії 19.07.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.А. Калкаманов, Харківський університет Повітряних Сил ім. Кожедуба, Харків.

### АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

С.А. Шевченко, Е.А. Шквар

Выполнен анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований обтекания рельефа земной поверхности и, в частности, городской застройки. Особое внимание уделено определяющим физическим процессам, которые обуславливают формирование вихревых структурных особенностей при обтекании ветром сооружений значительных размеров, аспектам силового взаимодействия и особенностям диффузионных процессов распространения загрязнений в элементах городской застройки. Обоснована актуальность построения математических моделей этих процессов с целью внедрения в практику проектирования современных научных подходов для определения предельно допустимой максимальной плотности городской застройки.

**Ключевые слова:** обтекание рельефа, приземный пограничный слой, турбулентность, вихревая структура течения, пристенная диффузия.

### AN ANALYSIS OF RESEARCHES OF URBAN AREAS RELIEF STREAMLINE MODELING

S.O. Shevchenko, Ye.O. Shkvar

The analysis of experimental and theoretical results respectively ground relief and, in particular, urban areas has been made. Special attention was paid to governing physical processes, which cause the formation of vortex structural features of the wind flow around buildings of large sizes, characteristics of the force interaction and the processes of pollution diffusion distribution in the elements of urban areas. The importance of developing the mathematical models of mentioned above processes with a goal of practical implementation of modern scientific approaches to determine the maximally allowable density of urban development is justified.

**Keywords:** relief streamline, ground boundary layer, turbulence, flow vortical structure, near-wall diffusion.