

УДК 532.526.4

НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ВИХРОВОЮ СТРУКТУРОЮ ТУРБУЛЕНТНИХ ТЕЧІЙ

Шквар Є.О.,
Козлова Т.В.,
Кравченко В.В.,
Самусенко О.В.,
Шевченко С.О.

Національний авіаційний університет

Обґрунтовано з позицій енергозбереження в транспортній галузі і, зокрема, в авіації, а також при плануванні забудови сучасних міст актуальність задач управління турбулентними зсувними течіями, що формуються на зовнішніх поверхнях перспективних швидкісних транспортних засобів та масштабних будівельних споруд.

Ключові слова: примежовий шар, турбулентність, вихрова структура, управління зсувною течією, профілювання обтічної поверхні, мікроелектромеханічні системи

Обґрунтування актуальності проблематики управління пристінними течіями. У теперішній час світове споживання енергетичних природних ресурсів, левову частку яких складають нафта та природний газ, зростає у геометричній прогресії. Проте їхні запаси неухильно вичерпуються, що стрімко збільшує актуальність розробки і впровадження різноманітних технологій ресурсозбереження. Одним із найбільших споживачів палива є транспортна галузь і, зокрема, авіація, а тому при потребі в невідпинному зростанні обсягів перевезень енергозбереження є ефективним засобом для перешкоджання різкому загостренню неминучої кризової ситуації, так і зменшення забруднення атмосфери. Відомо, що для авіаційної галузі втрати на пальне складають до 22% від прямих операційних витрат [3], а, наприклад, розхід найбільшого серійного транспортного літака Ан-124 при максимальному комерційному завантаженні становить 12600 кг палива за годину польоту. Якщо володіти можливістю зменшити опір на 1%, то витрати зменшуються на 0,2%, що еквівалентно додатковому перевезенню 10 пасажирів або 1,6 тонни вантажу, що у свою чергу дозволить зменшити шкідливі викиди в атмосферу. Єврокомісія поставила перед авіацією вимогу зменшити до 2020 року вдвічі викиди вуглекислого газу, що у свою чергу призведе до зменшення споживання пального [1].

Переважну частину лобового опору транспортних засобів складає опір тертя, а враховуючи розміри сучасних транспортних засобів і типові швидкості руху, можна конкретизувати, що це є опір тертя при

турбулентному режимі обтікання. Відомо, що ця складова опору складає відносно лобового опору для літаків близько 50 %, для підводних човнів – до 60 %, а для газогонних мереж – до 90 %, отже її зменшення слід розглядати як потужний резерв енергозбереження як для авіації, так і для інших видів транспорту. Одночасно варто зауважити, що форми сучасних літаків, а також інших транспортних засобів, авіаційних гвинтів та елементів проточного тракту авіадвигунів вже мають дуже високий рівень оптимізації геометрії їх обтічних поверхонь. Тому, урахувавши переважно турбулентний характер обтікання поверхонь транспортних засобів, можна конкретизувати, що на першочергову увагу заслуговують ті заходи по зменшенню опору тертя, які спрямовані, передусім, на впорядкування турбулентного руху і його вихрових структур.

Складність процесів, що обумовлюють турбулентний рух, важкість їх теоретичного опису, складнощі із практичним впровадженням методів управління та брак оптимальних стратегій, недосконалість чи відсутність відповідних математичних моделей фізики формування турбулентної течії та можливостей управління нею зумовлюють в основному експериментальний характер робіт у даній сфері, що, відповідно, визначає як **наукову актуальність**, так і **прикладну значущість** побудови математичних моделей дії методів управління турбулентним вихроутворенням.

Метою досліджень авторів є вивчення властивостей та побудова відповідних математичних моделей ряду сучасних методів управління турбулентними течіями, які ґрунтуються на знаннях про протікання вкрай складних фізичних процесів турбулентного обміну і відомих успішних спробах їх впорядкування. **Об'єктом** досліджень є вихрові структури турбулентного руху, що виникають в процесі обтікання поверхонь різної геометрії та з різноманітним рельєфом. **Предметом** вивчення та моделювання є методи цілеспрямованого впливу на механізми генерації, конвекції та дифузії вихрової структури турбулентних пристінних зсувних течій.

Пріоритетні задачі управління вихроутворенням та підходи до їх вирішення. Одним із досліджуваних працездатних засобів управління є здавна відомий, широко розповсюджений в живій природі, а тому найістотніший з усіх можливих метод мікропрофілювання обтічної поверхні (рис. 1). Найбільш вживаним у технічних реалізаціях є мікропрофілювання поверхні поздовжніми мікроборозенками з профілем поперечного перерізу трикутної, трапецієвидної або напівсферичної форми і розмірами, сумірними з товщиною в'язкого підшару примежового шару (рис. 2). Такі мікроборозенки отримали усталену назву – ріблети (riblets).

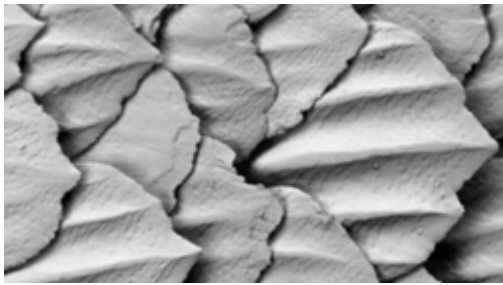


Рис. 1 Регулярне рифлене покриття шкіри дорослої акули – природна реалізація мікропрофілювання

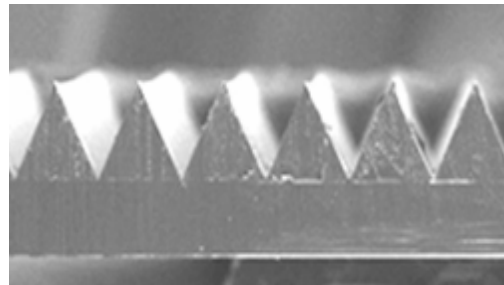


Рис. 2 Ріблети – технічне втілення технології профілювання обтічної поверхні

Дія ріблет спрямована на модифікацію пристінної дрібномасштабної вихрової складової турбулентного руху. Одне з пояснень механізму дії ріблет полягає в тому, що регулярна структура рельєфу поверхні з оребренням утворює впорядковану вихрову систему (рис. 3), яка демпфує поперечні складові збуреного руху [4 – 6]. Оребрення обтічної поверхні з правильно підібраними параметрами, що враховують очікувані режими експлуатації транспортного засобу, спроможне забезпечити ефект стабільного зменшення опору тертя до 8% (рис. 4), а для деяких співвідношень умов навіть до 15% і вище, але сам процес оптимізації геометрії мікропрофілювання вимагає не лише узагальнення накопиченого досвіду експериментальних досліджень розрізних конфігурацій, а й побудови відповідних математичних моделей. Ці моделі повинні ґрунтуватися на основі фундаментальних фізичних законів, втілених в рівняння аерогідродинаміки, надійних підходів до опису процесів турбулентного обміну та вихроутворення, а також наявної надійної інформації про тонкі ефекти впливу мікрорифлення поверхні на властивості турбулентної течії над нею. Для опису цих процесів створені різні алгебраїчні та диференціальні моделі. Отже, проблема математичного опису розглянутого засобу управління є актуальною і розглядається авторами як один з головних пріоритетів подальших досліджень.

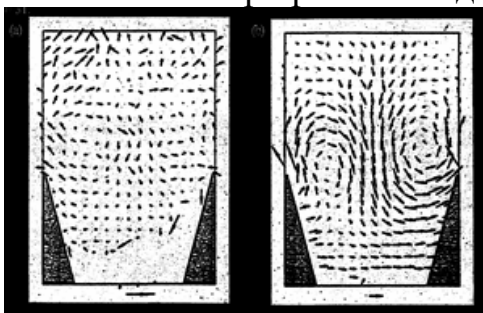


Рис. 3. Вторинні вихрові структури в околі оребреної поверхні [4-6]: а) – $s^+ = 15$, б) – $s^+ = 31$

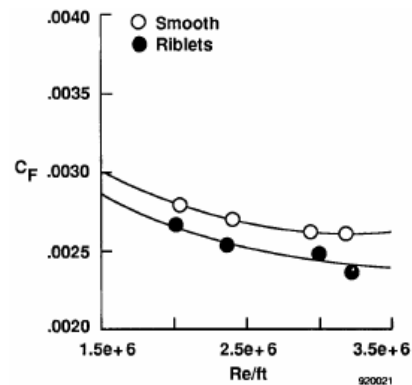


Рис. 4 Зменшення коефіцієнта тертя залежно від швидкості літака при $M=1.4$ [8].

Іншим досліджуваним авторами пріоритетним методом управління є мікроелектромеханічні системи (МЕМС). Ці системи неухильно здобувають

популярність у різних сферах техніки завдяки бурхливому розвитку електроніки та мініатюризації її елементної бази та неухильному падінню вартості виробництва. Для транспортних засобів МЕМС має всі підстави вважатися найновішим з відомих і є одним з найперспективніших методів управління їх обтіканням завдяки спроможності здійснювати управління за адаптивним принципом, тобто фіксувати виникнення турбулентних збурень і своєчасно їх гальмувати шляхом злагодженого сумісного функціонування системи мікродатчиків, виконавчих механізмів та мікропроцесорів, що дає змогу негайно реагувати на небажані процеси додаткового вихроутвоєння через турбулентні збурення. Адаптивний принцип здійснення управління робить МЕМС більш універсальним засобом модифікації турбулентних течій у порівнянні з іншими методами, суттєво розширюючи діапазон його ефективності на різних режимах руху транспортного засобу. Потенційними перевагами застосування МЕМС є покращення економічності, маневреності, перешкоджання відриву, збільшення підйомної сили, зменшення опору. Зокрема, на рис. 5 продемонстровано експериментально зафіксований ефект спроможності МЕМС залежно від частоти та фази функціонування актюаторів суттєво зменшувати опір обтічної поверхні зі встановленими на ній вихрогенераторами, а для деяких співвідношень частоти та фази навіть досягати опору, меншого за відповідні величини при ламінарному обтіканні. Тому є очевидним, що запорукою ефективності функціонування МЕМС є вироблення коректного фізично обґрунтованого алгоритму їх функціонування, що є неможливим без розуміння глибинних принципів формування турбулентного збуреного руху і відповідного математичного опису. З іншого боку, як і будь-яка комплексна технологія, МЕМС мають і недоліки, які гальмують їхнє впровадження в техніку. До них можна віднести наступні: висока ціна на даному етапі розвитку при необхідності в покритті маленькими за розмірами пристроями МЕМС значної площі обтічної поверхні; значна вартість і тривалість експериментальних робіт і, як результат, мала кількість відповідних експериментальних результатів. Це у свою чергу, створює іншу проблему – невідомий діапазон оптимальних режимних параметрів, при яких відбувається позитивний ефект; опосередкований характер впливу на течію через гальмування пристінних турбулентних збурень і необхідність розробки універсальних та ефективних алгоритмів управління; потреби в споживанні МЕМС додаткової енергії можуть зменшувати чи зовсім нівелювати ефект від їхнього використання, що треба враховувати при проектуванні та оцінці ефективності системи у цілому. Крім того, вибираючи оптимальні розміри цих приладів, важливо врахувати баланс між їх інерційними характеристиками та частотним діапазоном, в якому зберігається їх чутливість; складнощі контролю працездатності, надійності та обслуговування. Отже, з наведеного вище слідує істотний висновок про те, що витрати на пошукові дослідження з метою подолання вищезазначених проблем та час на впровадження та оптимізацію можна суттєво зменшити, якщо застосовувати технології математичного моделювання. Тому розробку відповідних математичних

моделей течій, модифікованих МЕМС, автори також вважають одним з актуальних напрямків своїх досліджень.

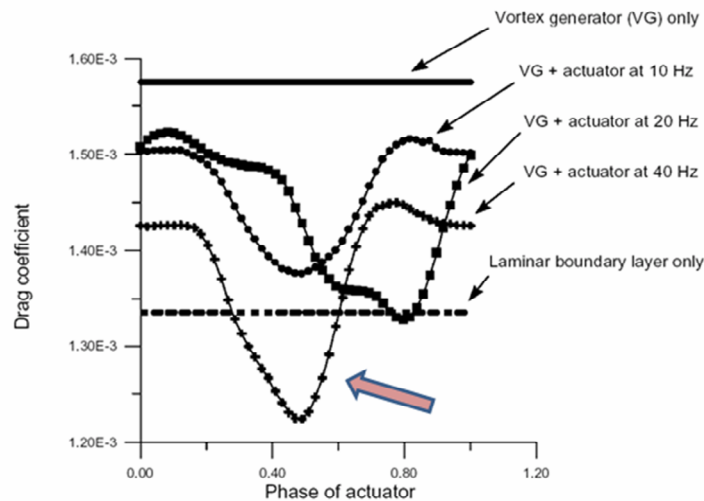


Рис. 5 Зменшення коефіцієнту тертя завдяки роботі МЕМС [7].

Ще одним вагомим і перспективним напрямком досліджень авторів, що також стосується проблем шкідливого вихроутворення і безпосередньо пов'язаний з задачами енергоспоживання та ресурсозбереження, є процес обтікання рельєфу сучасної міської забудови, невпинно зростаюча щільність якої поглиблює проблеми вентиляції великих міст. Проблема суттєво загострюється також у зв'язку зі швидким зростанням поверховості сучасних будинків і необхідністю їх інтеграції з вже існуючою забудовою, що призводить до формування складних вихрових систем, отже лише наявність засобів математичного прогнозування є запорукою уникнення помилок, неминучих при застосуванні традиційних будівельних норм. Експериментальні методи основані на використанні як коштовних аеродинамічних труб та вимірювального устаткування, потребують ретельного і розтягнутого в часі виготовлення моделей і вимагають забезпечення дотримання вимог подібності при проведенні вимірювань, що у повній мірі реалізувати не є можливим. Зазначені обставини не лише збільшують кошторис і час виконання проектів експериментальних досліджень, а й примушують розробляти альтернативні технології теоретичних чисельних досліджень, які ґрунтуються на числовому розв'язанні диференціальних рівнянь газодинаміки. Ураховуючи масштаби планетарних примежових шарів, а також розміри складових елементів рельєфу міста, режим обтікання слід розглядати як розвинений турбулентний, що, завдяки складності структури останнього, значно ускладнює як вирішення задачі теоретичним шляхом, так і суттєво обмежує та знижує надійність застосування методів експериментальних досліджень через важкість здійснення коректних перерахунків результатів останніх на натурні умови. Цей фактор дозволяє вважати пріоритетним необхідність розробки відповідних математичних моделей турбулентного руху та відповідних чисельних методів розрахунку течій над поверхнями складного нерегулярного рельєфу з метою забезпечення

належних точності та ефективності математичного моделювання вихрових структур, а також їх взаємодії з особливостями рельєфу та між собою, що складає суттєву наукову проблему. Таким чином, авторами пропонується єдиний підхід до вирішення широкого кола різних проблем класичної та промислової аеродинаміки, об'єднаних наявністю турбулентного вихроутворення та потреб у його гальмуванні, що сприятиме розробці конкурентних транспортних засобів, економному споживанню паливних ресурсів і екологічній безпеці.

Базові принципи і підґрунтя математичного моделювання досліджуваних ефектів. Основу математичного моделювання течій, які характеризуються наявністю переважаючого напрямку розвитку, на рівні осереднених за часом характеристик складає система диференціальних рівнянь у наближенні примежового шару:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{1}{r^\chi} \frac{\partial r^\chi \bar{v}}{\partial y} + \frac{\bar{u}}{u_h} \frac{du_h}{dx} = 0; \quad (1)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{1}{r^\chi} \frac{\partial r^\chi \bar{u}}{\partial y} + \bar{u}^2 \frac{1}{u_h} \frac{\partial u_h}{\partial x} = -\frac{dp}{dx} + \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{1}{r^\chi} \frac{\partial r^\chi \tau}{\partial y}; \quad (2)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{k}}{\partial x} + \bar{v} \frac{1}{r^\chi} \frac{\partial r^\chi \bar{k}}{\partial y} + 2\bar{u}\bar{k} \frac{1}{u_h} \frac{\partial u_h}{\partial x} = \frac{1}{r^\chi} \frac{\partial}{\partial y} \left(r^\chi D_k^{eff} \frac{\partial \bar{k}}{\partial y} \right) + P - \bar{\varepsilon}; \quad (3)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} + \bar{v} \frac{1}{r^\chi} \frac{\partial r^\chi \bar{\varepsilon}}{\partial y} + 3\bar{u}\bar{\varepsilon} \frac{1}{u_h} \frac{\partial u_h}{\partial x} = \frac{1}{r^\chi} \frac{\partial}{\partial y} \left(r^\chi D_\varepsilon^{eff} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial y} \right) + (C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} f_\varepsilon \bar{\varepsilon}) \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{k}}, \quad (4)$$

де (1) є рівнянням нерозривності, (2-4) – рівняння переносу поздовжньої складової швидкості u , кінетичної енергії турбулентності k та швидкості її дисипації ε , $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ – модельні коефіцієнти, f_ε – демпферна функція [2]. Поздовжня вісь x зв'язана з обтічною поверхнею і співнапрявлена з напрямком зовнішньої течії, а вісь y перпендикулярна обтічній поверхні, $r = r_w + y$, де r_w – радіус обтічного тіла, $\chi = 1$ – для тіл обертання, $\chi = 0$ – для плоских поверхонь обтікання. Рівняння (1-4) подано в безрозмірному вигляді. Збезрозмірювання поздовжньої та нормальної координат x та y виконується за характерним розміром розрахункової області L , тобто $\bar{x} = x/L$, $\bar{y} = y/L$. Швидкість зовнішньої течії u_h вважається відомою функцією поздовжньої координати x ; градієнт обезрозміреного тиску $\bar{p} = p/(\rho u_h^2)$ визначається розподілом зовнішньої швидкості u_h у відповідності до рівняння Бернуллі, ρ – густина, v – нормальна складова швидкості, $\bar{u} = u/u_h$, $\bar{v} = v/u_h$. Безрозмірне напруження тертя $\tau = \tau/(\rho u_h^2)$ у відповідності до припущення ньютонівської рідини моделюється формулою Буссінеска $\tau = \nu_{eff} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$, де $\nu_{eff} = \frac{(v + v_t)}{u_h L}$ – збезрозмірений кінематичний коефіцієнт ефективною в'язкості, ν , ν_t – кінематичні коефіцієнти молекулярної та турбулентної в'язкості відповідно. Кінетична енергія турбулентності k та швидкість її дисипації ε збезрозмірюються наступним

чином $\bar{k} = k/(\rho u_h^2)$, $\bar{\varepsilon} = \varepsilon L/(\rho u_h^3)$. Коефіцієнти дифузії для k і ε визначаються так: $D_{k_{eff}} = \frac{(v + v_t/\sigma_k)}{u_h L}$, $D_{\varepsilon_{eff}} = \frac{(v + v_t/\sigma_\varepsilon)}{u_h L}$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $P = v_t \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2$ - член породження k . Система (1-4) розв'язується при наступних межових умовах.

На обтічній поверхні ($\bar{y} = 0$), а для рівнянь (3,4) - в її околі ($\bar{y}_* = 30v/(v_*L)$):

$$\bar{u} = 0, \quad \bar{v} = 0, \quad \bar{k} = \frac{v_*^2}{u_h^2 \sqrt{C_\mu}}, \quad \bar{\varepsilon} = \frac{v_*^3}{u_h^3 k y_*}, \quad C_\mu = 0.09; \quad (5)$$

На зовнішній межі δ , що визначається умовою $\bar{u} = 0.995u_h$ ($\bar{y} = \delta$):

$$\bar{u} \rightarrow u_h(\bar{x}), \quad \frac{\partial \bar{k}}{\partial \bar{y}} \rightarrow 0, \quad \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial \bar{y}} \rightarrow 0; \quad (6)$$

У початковому розрахунковому перерізі ($\bar{x} = \bar{x}_0$):

$$\bar{u} = f(\bar{y}), \quad \bar{k} = \varphi(\bar{y}), \quad \bar{\varepsilon} = \psi(\bar{y}). \quad (7)$$

Функції (7) задають початкові профілі розрахункових характеристик, джерелом яких у даному дослідженні виступали інтерполяційні залежності наявних експериментальних даних для $\bar{u}(\bar{y})$, $\bar{k}(\bar{y})$ та їх перерахунки для $\bar{\varepsilon}(\bar{y})$.

Гібридна модель турбулентності. Дифузійні коефіцієнти для наведених вище задач, в яких є визначальною рисою необхідність належного опису динаміки вихроутворення, пропонується визначати на основі гібридної алгебраїчно-диференціальної моделі турбулентності, що була побудована Є.О.Шкваром [10] на базі алгебраїчної моделі В.Т.Мовчана [9] та диференціальної двопараметричної моделі Джонса-Лаундера [2]. З першої з цих моделей використано загальний принцип об'єднання залежностей для внутрішньої та зовнішньої областей пристінної течії

$$v_t = v_{twake} \tanh \frac{v_{twall}}{v_{twake}} \quad (8)$$

та гарно адаптовану до опису турбулентної в'язкості v_t у внутрішній області формулу

$$v_{twall} = \chi y_1^+ v \sqrt{\tau} D_m, \quad D_m = \text{th} \frac{\text{sh}^2[\chi_1 y_1^+ \sqrt{\tau}] \text{th}[\text{sh}^2(\chi_2 y_1^+ \sqrt{\tau})]}{\chi y_1^+ \sqrt{\tau}}, \quad (9)$$

де $\tau = 1 + \frac{dp}{dx} y$ при $\frac{dp}{dx} \geq 0$ та $\tau = 1 / \left(1 - \frac{dp}{dx} y \right)$ при $\frac{dp}{dx} < 0$; $v_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ - динамічна швидкість; $k = 0.4$, $\chi_1 = 0.072$, $\chi_2 = 0.223$ - модельні коефіцієнти; $y_1^+ = y^+ + \Delta y_{rh}^+$; Δy_{rh}^+ - узагальнений параметр, що враховує завдяки відповідним налаштуванням вплив будь-якого виду шорсткості обтічної поверхні і, зокрема регулярний мікрорельєф внаслідок мікропрофілювання. Аналогічним чином на достатньому для практичних потреб рівні наближення передбачається враховувати деякі зміни властивостей обтікання поверхонь і, зокрема, рельєфу останніх внаслідок їх обладнання пристроями МЕМС. Друга ж, диференціальна $k - \varepsilon$ модель, застосована також локально, але у зовнішній області, де вона у найбільшій мірі є адаптованою до характеристик турбулентної течії, а саме:

$$v_{wake} = C_{\mu} k^2 / \varepsilon, \quad C_{\mu} = 0.09. \quad (10)$$

Клас диференціальних моделей у порівнянні з алгебраїчними є більш обґрунтованим щодо опису інерційних властивостей великомасштабної турбулентності зовнішньої області та її реакції на керувальні фактори, спрямовані саме на крупні вихори завдяки моделюванню процесів енергетичного балансу на рівні диференціальних рівнянь переносу (3, 4).

Водночас слід зауважити, що $k-\varepsilon$ модель побудована на принципі локальної рівноваги турбулентності, який втрачає справедливість по мірі наближення до обтічної поверхні. Тому, відповідно, модель також має низький рівень обґрунтованості в околі поверхні обтікання, що й є причиною введення демпферних функцій f_{μ} та f_{ε} , а також додавання в праві частини рівнянь (3, 4) додаткових джерельних членів, суттєвих саме поблизу поверхні обтікання. Цей підхід через відсутність фізичного підґрунтя даного демпфування має декілька різних варіацій при побудові низькорейнольдсових версій $k-\varepsilon$ моделі, які ставлять на меті, перш за все, досягнення потрібної математичної асимптотики характеристик, що моделюються, поблизу обтічної поверхні. У рамках запропонованого в даному дослідженні підходу множник $\tanh(v_{twall} / v_{twake})$ алгебраїчної моделі (9) у виразі для внутрішньої області можна також розглядати і як демпфер $k-\varepsilon$ моделі (аналог традиційно вживаної функції f_{μ} [2]), але даний демпфер наділений значно більш інтелектуальними властивостями, що дозволяють відтворювати на його основі ряд ефектів пристінного управління, спрямованого, зокрема, і на пристінне вихроутворення. Отже, запропонована комбінація двох різних підходів до моделювання забезпечує згідно її структури кожній з використаних моделей лише той локальний діапазон її використання, де вона є найбільш обґрунтованою та застосовною. Це дає підстави сподіватися на отримання комплексу переваг від застосування даної гібридної моделі при розв'язанні задач, де одним з визначальних механізмів дослідження, опису та модифікації є саме турбулентне вихроутворення.

Висновки

1. Висвітлено ряд актуальних задач моделювання турбулентних пристінних течій та управління ними і виділено найсуттєвіший фізичний механізм – генерація та подальша динаміка турбулентних вихрових структур.

2. Розглянуто з єдиних позицій впливу на вихровий рух особливостей ряду традиційних та новітніх методів управління, а саме регулярний та нерегулярний рельєф обтічної поверхні та МЕМС, визначено проблеми, що стоять на заваді практичному впровадженню цих методів і обґрунтовано актуальність розробки відповідних математичних моделей як засобу ефективної оптимізації геометричних та режимних параметрів обладнання та устаткування, що забезпечують технічну реалізацію управління примежовими шарами.

3. Запропоновано базову основу побудови математичних модельних описів розглянутих методів управління у вигляді гібридної алгебраїчно-диференціальної моделі турбулентності, яка ефективно поєднує два різні підходи до опису турбулентної в'язкості і максимально адаптована до опису властивостей зовнішньої та внутрішньої областей зсувної пристінної течії.

Список літератури

1. *Argüelles P.* Report of the group of personalities. European Aeronautics: a vision for 2020. / P. Argüelles, J. Lumsden, M. Bischoff, D. Ranque, P. Busquin, S. Rasmussen // European Aeronautics. – January 2001. – 26 p.
2. *Launder B.E.* Mathematical Models of Turbulence / B.E. Launder, D.B. Spalding // Academic Press London and New Work. – 1972. – 162 p.
3. *Reneaux J.* Overview of drag reduction technologies for civil transport aircraft. / J. Reneaux // European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS. – 2004. – 18 p.
4. *Suzuki Y.* Drag Reduction Mechanism on Micro-grooved Riblet Surface / Y. Suzuki, N. Kasagi // Proc. of the International Conference on Near-Wall Turbulent Flows (Temple, 15-18 March 1993). – 1993. – 10 p.
5. *Suzuki Y.* On the Turbulent Drag Reduction Mechanism above a Riblet Surface / Y. Suzuki, N. Kasagi // AIAA 93-3257 AIAA Shear Flow Conference (July 6–9, 1993, Orlando, FL). – 1993. – 11 p.
6. *Suzuki Y.* Turbulent Drag Reduction Mechanism above a Riblet Surface / Y. Suzuki, N. Kasagi // AIAA Journal. – September, 1994. – Vol. 32, № 9. – P. 1781–1790.
7. *Tsao T.* An integrated MEMS system for turbulent boundary layer control / T. Tsao, F. Jiang, Y. Tai, B. Gupta, R. Goodman, S. Tung, C. Ho // 1997 International conference on solid-state sensors and actuators. – June 16-19 1997. – P. 315 – 318.
8. *Zuniga F.A.* Flight test results of riblets at supersonic speeds / F.A. Zuniga, B. T. Anderson, A. Bertelrud. // NASA technical memorandum 4387. – June 1992. – 37 p.
9. *Мовчан В. Т.*, Математические модели турбулентной вязкости в расчетах пристенных течений / В.Т. Мовчан // Сб. науч. трудов “Аэрогидродинамика: Проблемы и перспективы”, Национальный аэрокосмический университет “ХАИ”, 2006. – с. 272-286
10. *Шквар Є.О.* Фізичне та математичне моделювання напівобмежених турбулентних струменевих течій на оребрених поверхнях / Є.О. Шквар, Т.В. Козлова, А.О. Бондарець // "Промислова гідравліка і пневматика". – 2011. – №1(31) – С. 35-41.

Аннотация

Обоснована с позиций энергосбережения в транспортной отрасли и, в частности, в авиации, а также при планировании застройки современных городов актуальность задач управления турбулентными сдвиговыми течениями, формирующихся на внешних поверхностях перспективных скоростных транспортных средств и масштабных строительных сооружений.

Ключевые слова: пограничный слой, турбулентность, вихревая структура, управление сдвиговым течением, профилирование обтекаемой поверхности, микроэлектромеханические системы

The summary

The actuality of control of turbulent shear flows, developing on the external surfaces of perspective transport vehicles and great-scale buildings is justified from the standpoint of energy efficiency in the transport industry and, in particular, in the aviation industry, as well as in planning the of modern cities development.

Keywords: boundary layer, turbulence, vortical structure, shear flow control, streamlined surface micro-riffling, microelectromechanical systems