

УДК 532.526.4

В.В. Кравченко, Є.О. Шквар

Національний авіаційний університет, Київ

МІКРОПРОФІЛЮВАННЯ ОБТІЧНОЇ ПОВЕРХНІ ЯК МЕТОД ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ТУРБУЛЕНТНИМ ПРИМЕЖОВИМ ШАРОМ

Виконано аналіз результатів експериментальних досліджень щодо управління турбулентним примежовим шаром шляхом мікропрофілювання обтічної поверхні, виділені визначальні фізичні механізми регуляризації пристінного вихроутворення. Обґрунтовано актуальність побудови математичних моделей даного методу управління з метою скорочення процесу його впровадження в практику проектування перспективних транспортних засобів, оптимізації геометричних властивостей та пошуку ефективних заходів, націлених на подолання експлуатаційних недоліків.

Ключові слова: примежовий шар, турбулентність, вихрова структура, управління, мікропрофілювання поверхні.

Вступ і постановка проблеми

Вивчення і моделювання процесів, що обумовлюють формування примежового шару (ПШ), є важливою задачею аерогідродинаміки. Практична важливість цієї задачі пов'язана з необхідністю управління станом ПШ з метою здійснення цілеспрямованого впливу на аеродинамічні та термодинамічні характеристики літальних апаратів і, насамперед, зменшення опору тертя чи зміни теплообміну через обтічну поверхню. На даний час досить докладно вивчено ряд засобів керування ПШ, серед яких, передусім, вдув-відсмоктування ПШ, введення в ПШ слабких розчинів високомолекулярних та поверхнево активних сполук, а також профілювання обтічної поверхні. Слід зазначити переважання експериментальної методології досліджень у цій галузі, що обумовлено як складністю процесів турбулентного обміну, на протікання яких переважно спрямовується управління ПШ, так і важкістю побудови відповідних математичних моделей, що описували б низку найсуттєвіших взаємозв'язків між дією засобів управління, збуреним турбулентним рухом, осередненими характеристиками течії та, нарешті, зміною опору тертя чи теплового потоку через обтічну поверхню.

Саме брак коректних та довершених математичних моделей разом з обмеженістю можливостей експериментальних шляхів досліджень та досить вузьким діапазоном умов, при яких реалізується позитивний ефект, зумовлюють гальмування впровадження цих безумовно перспективних методів управління турбулентними пристінними течіями в практику проектування транспортних засобів, хоча жива природа демонструє безліч прикладів наявності та дієвості цих методів на різних біологічних істотах і, перш за все, на оперенні птахів і шкірі риб.

Метою даного дослідження є здійснення аналізу можливостей використання методу модифікації

властивостей турбулентної течії за допомогою профільованої поверхні, ребра якої спрямовані вздовж потоку. Хоча ці конструктивні заходи на перший погляд виглядають достатньо простими і є пасивними засобами управління течією, тобто не вимагають додаткових витрат енергії для своєї роботи, але, як це демонструється численними рухомими об'єктами живої природи та результатами значної кількості експериментів [1 – 46], вони при певному діапазоні умов здатні забезпечити стійкий ефект зниження опору тертя турбулентного ПШ.

Основний розділ

Фізичне та природне підґрунтя ефекту мікропрофілювання поверхні

Найбільш вживаним є мікропрофілювання поверхні поздовжніми мікроборозенками з профілем поперечного перерізу трикутної, трапецієподібної або напівсферичної форми і розмірами, сумірними з товщиною в'язкого підшару ПШ. Такі мікроборозенки отримали усталену назву – ріблети (riblets). Дія ріблет спрямована на модифікацію пристінної дрібномасштабної вихрової складової турбулентного руху. Одне з пояснень механізму дії ріблет полягає в тому, що регулярна структура поверхні з оребренням утворює впорядковану вихрову систему, яка демпфує поперечні складові збуреного руху [2, 7 – 10, 14 – 18] (рис. 1). Зокрема, у [2] зазначається, що ця впорядкована пристінна вихрова система виступає буфером між обтічною поверхнею та швидкою зовнішньою складовою потоку і не підпускає до поверхні вихрові утворення ззовні, чим і зменшує тертя, безпосередньо пов'язане з вихровим переміщенням. У [23] ефект від ребристості поверхні пов'язується зі збільшенням товщини в'язкого підшару і з утворенням на дещо більшій відстані від поверхні за рахунок завихреності зовнішньої течії струменів (викидів) загальмованої рідини, коливання яких і приводять до зниження опору поверхневого тертя.

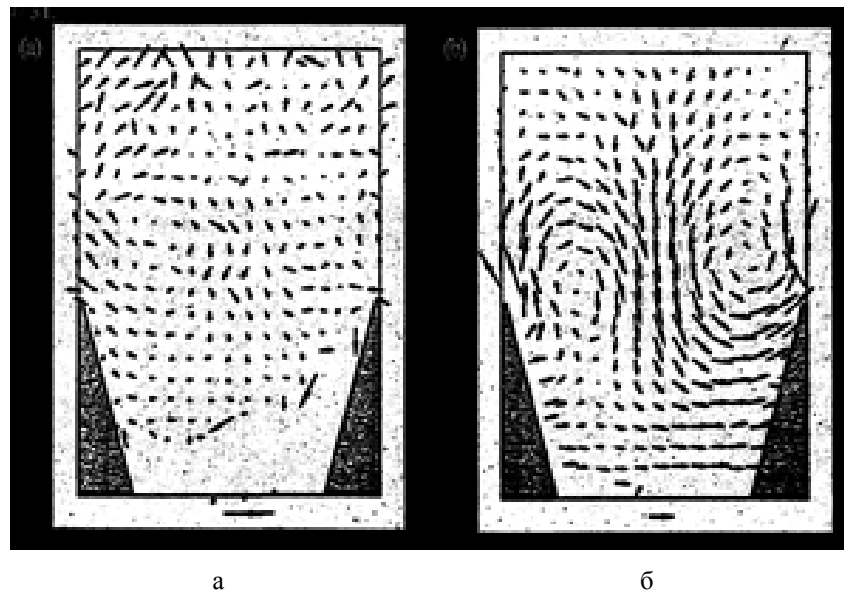


Рис. 1. Вторинні вихрові структури в околі оребреної поверхні [8 – 10]:

a – $s^+ = 15$; b – $s^+ = 31$

При аналізі фізичних основ ефекту дії ріблет слід зазначити, що вони мають безпосереднє природне підґрунтя. Зокрема, Моін П. і Кім Дж. в статті [2] посилаються на результати вчених-біоніків (у тому числі і радянської школи), якими на шкірі акул були знайдені геометричні структури зубоподібної форми, в зв'язку з чим вони і отримали назву зубчиків (denticles). Інші ж швидкоплаваючі акули мають лускоподібне покриття шкіри з маленькими ребрами, орієнтованими у поздовжньому напрямку з висотою близько 25 мкм (рис. 2). У [1] розглядаються види рельєфу зовнішніх поверхонь раковин та покривів шкіри молюскоподібних і зазначається, що цей рельєф часто має вид поздовжнього оребрення з параметрами, які з точки зору існуючих знань щодо впливу ріблет забезпечують суттєву перевагу при плаванні з характерними для цих істот швидкостями. Ці зубчики та поздовжня ребристість за структурою є елементами регулярної шорсткості поверхні, які можуть розглядатись саме як природне обґрунтування доцільності профілювання поверхні (Dinkelacker, Neumann, 1991; Schneider, 1993) [3].

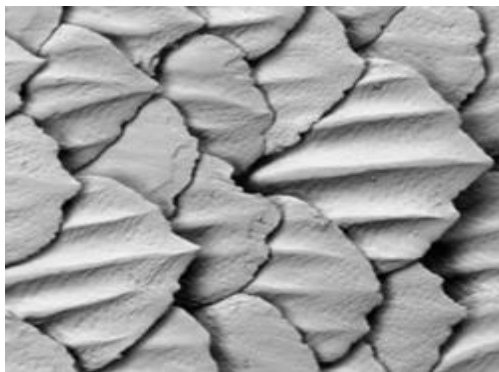


Рис. 2. Регулярне рифлене покриття шкіри дорослої акули

Аналіз результатів відомих досліджень механізмів та особливостей впливу мікропрофілювання на формування турбулентної течії. Визначальні фізичні ідеї

Перші дослідження турбулентного режиму течії в ядрі каналу трикутного поперечного перетину, тобто геометрично подібного до мікроборозенки, описані в роботі [11] (1956р.), показали, що потік у кутових областях (у діапазоні до 30°) залишається ламінарним на ділянці до 40% по висоті трикутника. Фізичну картину течії біля ріблет розглянуто в роботі [12] і вказано, що всередині ріблет потік рухається дуже повільно, а бічні переміщення поблизу них стають незначними.

У роботі [13] висунуто ідею про те, що зниження опору не є безпосереднім результатом взаємодії з турбулентною структурою, а визначається характером течії в'язкого середовища на рифленийій поверхні. Це, у свою чергу, дає змогу зробити вагомий висновок про комплексний характер процесу впливу профілювання поверхні при її обтіканні турбулентним потоком.

У результаті широкомасштабних експериментальних досліджень пристінних течій, виконаних у Ноттінгемському університеті (Великобританія) Kwing-So Choi (1985-1989) [14 – 17] запропонував власну концептуальну модель послідовності протікання квазіперіодичного процесу формування, витягування та віддалення від обтічної поверхні шпилькоподібних вихорів у пристінній ділянці турбулентних течій і обумовлених цією послідовністю викидів рідини. Крім цього, при аналізі і визначенні основного чинника дії ріблет, Kwing-So Choi відзначає наявність більш ніж одного механізму взаємодії ребристості поверхні з пристінною турбулентністю, що також підтверджує сформульовану авторами

точку зору щодо комплексності впливу профільованої поверхні. У результаті ще одного детального експериментального дослідження, проведеного в Токійському університеті, його автори, Y. Suzuki, N. Kasagi (1993, 1994) [8 – 10], на основі власних даних та результатів прямого чисельного моделювання інших дослідників, побудували ще одну концептуальну модель ефекту профільованої поверхні, в основі якої лежить аналіз динаміки однієї з пристінних когерентних структур – квазі-поздовжнього вихора.

Результатом взаємодії цього вихора з областями загальмованої рідини і високошвидкісного потоку, на думку авторів, є перерозподіл складових кінетичної енергії пульсаційного руху турбулентності з поздовжньої $\overline{u'u'}$ в нормальну $\overline{v'v'}$ та поперечну $\overline{w'w'}$. Ріблети з точки зору авторів [8 – 10] не впливають на динаміку вихора, але змінюють статистичні характеристики процесу перерозподілу пульсаційного руху.

Таким чином, підсумовуючи наведене вище, слід визнати відсутність єдиної однозначної точки зору на фізичні аспекти взаємодії ріблет з течією, що, у свою чергу ускладнює побудову як фізичних, так і, відповідно, математичних моделей впливу характеристик профілювання поверхні на параметри її турбулентного обтікання.

Аналіз впливу геометричних особливостей мікрорифлення

Експериментальні дослідження ефективності ріблет різної геометрії показали, що вони спроможні зменшити опір тертя на 8 – 10%, а для деяких оптимізованих конфігурацій і умов проведення експерименту навіть і більше – до 25% (Bacher, Smith, 1985; Bechert, Bruse, 1997; Bruse, 1993; Bechert, 1992, 1997, Walsh, 1979 – 1989) [19, 25 – 28]. Водночас було встановлено факт важливості співнапрявленості потоку і напрямку профілювання ріблет, оскільки при кутах розходження більш ніж 15° інтенсивність зменшення тертя завдяки ріблетам зменшується, а при 30° їх позитивний ефект зникає (Walsh, Lindemann, 1984 [26]; Gaudet, 1987). До того ж, важливим супутнім фактором взаємодії профільованої мікроборозенками поверхні та потоку є збільшення теплообмінних процесів при одночасному зменшенні тертя. Значна увага дослідників впливу ріблет була приділена визначенню оптимальних геометричних характеристик ріблет, в результаті чого було з'ясовано, що максимальний ефект зменшення тертя спостерігається при збезрозмірених за масштабом довжини “закоу стінки” u_* / ν висоті ребер h ($h^+ = h u_* / \nu \approx 10 - 15$) [20 – 24] та відстані між ними перпендикулярно до напрямку профілювання s ($s^+ = s u_* / \nu \approx 8 - 30$), а для деяких геометрій поперечного перерізу ріблет (тон-

ких поздовжніх ребер) навіть при $s^+ \leq 140$ [23]. Тут $u_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ – динамічна швидкість, τ_w – напруження тертя на обтічній поверхні, ρ – густина, ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості. Вже в перших експериментальних дослідженнях ріблет, проведених на межі 60-х та 70-х років минулого століття (Lin, 1966 [6]; Kennedy, 1973 [5]), було встановлено факт переваги мікроборозенок трикутного поперечного перерізу у порівнянні з прямокутними ребрами. Саме ріблети у формі V-подібних мікроборозенок виявилися більш ефективними до зменшення тертя. Значний обсяг систематичних досліджень ріблет для зниження турбулентного тертя було проведено в NASA Langley Research Center (Hampton, VA, USA), у ході яких зокрема було досліджено близько п'ятидесяти видів форм поперечного перерізу ребер (Walsh, 1969-1990; [25 – 28], Bandyopadhyay, 1986 [24]) і доведено перевагу саме ріблет трикутного профілю, причому найбільша ефективність (8%) була досягнута при $h^+ \approx s^+$. Крім того, було з'ясовано, що ці розміри мають мати той самий порядок, що й лінійні масштаби пристінних видовжених вихрових структур. Ефективність просторових конфігурацій ріблет на кшталт нерівностей поверхні акулячої шкіри була досліджена Berchert, Bruse, Nage, 2000 [29]. Вони варіювали щільність і розташування цього штучного мікропрофілювання поверхні, використовуючи в своїх експериментах від 1920 до 365000 малесеньких ріблетоподібних елементів, у результаті чого було отримано ефект зменшення тертя у порівнянні з обтіканням гладкої поверхні, але жодна з цих конфігурацій не виявилася спроможною перевищити ефективність просторових V-подібних борозенок.

Аналіз результатів щодо сумісного впливу мікрорифлення та визначальних параметрів турбулентної течії

Дослідження ефективності ріблет під впливом несприятливого градієнта тиску $dp/dx > 0$ проводилися Indinger, Nickel, Adams, 2004 [30], було зроблено висновок про те, що він є найсуттєвішим ззовні і гальмується при наближенні до обтічної поверхні. Автори зазначають, що вплив градієнта тиску призводить до варіювання як сталої логарифмічного закону C , так і коефіцієнта Кармана k . Обґрунтовується, що можна вважати дії ріблет і градієнта тиску незалежними один від одного щодо впливу на потік, але взаємодія цих впливів може бути доволі складною завдяки нелінійній структурі рівнянь руху рідини та властивостям процесів турбулентного обміну. Це дозволяє стверджувати і ефективно застосовувати при математичному моделюванні впливу ріблет, що результати, здобуті для мікропрофілюваної плоскої пластини при

$dp/dx = 0$, можна при застосуванні масштабування “закону стінки” використовувати і при вивченні та моделюванні градієнтних течій.

Проблеми, що виникають при експлуатації оребрених поверхонь, відомі. Вони, перш за все, обумовлені неухильним та поступовим забрудненням поверхонь пилом, брудом, а також за рахунок налипання комах. На початку 80-х років в США на основі результатів досліджень NASA виготовлено липку плівку з відформованими на ній борозенками потрібних розмірів з метою нанесення її на обтічну поверхню. Наступні випробування такої плівки спочатку в аеродинамічній трубі, потім в льотних умовах, а також на яхтах та автомобілях показали, що при малих швидкостях опір дійсно падає. Встановлено практичну та економічну доцільність використання липкої плівки у випадках, коли глибина борозенок не перевищує 25,4 мкм (Хефнер, 1988). В одному з провідних дослідницьких центрів з проблем зменшення опору – Experimental Aerodynamics Division, National Aerospace Laboratories, Бангалор, Індія у 1994 році Sundaram, Viswanath, Rudrakumar [31] досліджували аеродинамічні характеристики моделі прямокутного елемента крила з аеродинамічним профілем NACA-0012, обклеєної плівками з мікропрофілюваною зовнішньою поверхнею. Досліджувалися V-подібні ріблети з висотами 0,154 та 0,076 мм. Ефект зменшення тертя був отриманий як на верхній, так і на нижній поверхнях у діапазоні кутів атаки $\alpha = 0 \div 6^\circ$, причому на верхній поверхні, більша частина якої обтікається під впливом несприятливого градієнту тиску $dp/dx > 0$, ефект дії ріблет посилювався по мірі збільшення кута атаки. Максимальний позитивний ефект зменшення тертя на верхній поверхні аеродинамічного профілю за наявності ріблет було зафіксовано на рівні 15%, на підставі чого авторами було зроблено висновок про позитивну роль несприятливого градієнта тиску на ефективність дії поздовжнього рифлення поверхні. Для аеродинамічного профілю в цілому зменшення опору тертя за рахунок використання ріблет за результатами експериментальних досліджень оцінюється величиною від 4 до 7%. Подібні дослідження ефекту наявності ріблет (плівка 3М) на криловому профілі GAW(2), здійснені Channa Raju and P. R. Viswanath, 1997 [32] та Subaschandar, Kumar, Sundaram, 1999 [33]. Експериментальні результати Єнютіна, Лашкова, Самойлової, Фадєєва, Шумілкина, 1991 [22], які досліджували в Центральному аерогідродинамічному інституті (ЦАГІ, м. Жуковський) сумісний вплив градієнту тиску разом із ступенем зовнішньої турбулентності на ребристій поверхні, співпадають з наведеними раніше у випадку $dp/dx > 0$. За умови впливу сприятливого градієнту тиску $dp/dx < 0$ з'ясувалося, що він ніяким чином

не впливає на ефект дії ріблет. Зовнішня турбулентність при обтіканні ребристої поверхні впливає аналогічно несприятливому градієнту тиску, тобто її зростання підсилює дію ріблет. Авторами [22] на підставі результатів дослідження сумісного впливу цих двох факторів зроблено висновок про адитивність їхніх впливів на ефективність дії оребрення. Максимальне зменшення опору тертя, отримане в дослідженнях ефективності використання V-подібних ріблет ($h = 0,18$ мм, $s = 0,36$ мм) на зовнішній поверхні циліндру при його поздовжньому обтіканні (Sang-Joon Lee, Hee-Chang Lim, Manhee Han, Seung S. Lee, 2005, [34]), було досягнуто при обчисленому за діаметром циліндра D числі Рейнольдса $Re_D = U_\infty D / \nu = 3,6 \times 10^3$ і становило 7.6%. Разом з цим було зафіксовано зменшення розмірів ділянки вихроутворення за циліндром на 10% при одночасному зменшенні кількості вторинних вихорів у ближньому сліді на 20% і, як результат, було зафіксовано деяке зниження рівня кінетичної енергії турбулентності.

Дослідження обтікання повітрям внутрішньої поверхні кругового циліндру (труби) з мікрооребренням було здійснене Nitaschke, 1984, [18]. У цих експериментах були використані ріблети трикутного перерізу з округленими вершинами і зменшення тертя спостерігалось в діапазоні безрозмірних відстаней між ріблетами $8 \leq s^+ \leq 30$, що повністю корелює з результатами Walsh [25, 26, 28]. Але в експериментах Nitaschke ефект зменшення тертя не перевищував 3%, що, напевно, обумовлено використанням згладженої геометрії вершин мікроборозенок. Слід також зазначити, що Nitaschke не зафіксував у своїх експериментах суттєвих змін у розподілах осередненої поздовжньої швидкості та характеристик пульсаційного руху, хоча результати багатьох інших дослідників впливу ріблет на пристінні течії [14 – 17] переконливо свідчать про те, що при побудові розподілів осередненої поздовжньої швидкості в напівлогарифмічних координатах, його логарифмічна ділянка має незначну, але систематичну тенденцію до зсуву вгору відносно її типового розташування у випадку гладкої поверхні, що традиційно враховується збільшенням значення сталої логарифмічного закону C . Приклади отриманих у результаті обробки емпіричної інформації функцій, що визначають величину зсуву у залежності від ряду співвідношень геометричних параметрів ріблет, можна знайти в [4].

Аналіз результатів модельних та натурних випробувань і проблем впровадження мікропрофілювання поверхонь транспортних засобів

Огляди Reneaux, 2004 [35], Viswanath [36] вичерпно висвітлюють досвід використання ріблет на

поверхні літака Airbus A320. Застосовані на поверхні крила та фюзеляжа моделі літака V-подібні риблеті висотою $h = 0,023 \text{ мм}$ $h^+ = 8$ дозволили отримати в трубному аеродинамічному експерименті, проведеному в 1988р. зменшення лобового опору на 1.6%. У 1989р. аналогічний експеримент було здійснено вже на натурному об'єкті, для чого 75% обтічної поверхні (600 м^2) літака Airbus A320 було обклеєно плівкою з мікронасічками. Результати льотних випробувань підтвердили дані, отримані раніше на моделі. Експлуатаційні випробування цієї технології були здійснені на літаку A340, в результаті чого було з'ясовано, що ребриста плівка втрачає свої властивості вже через 2–3 роки, тоді як для комерційно ефективного практичного використання даного методу треба забезпечити тривалість її експлуатації не менш як 5 років. У [36] Viswanath, 2002 наводить дані щодо ефективності використання риблет у льотних випробуваннях суто звукового (Т-33) та надзвукового (F-104G) літаків. У першому випадку досягнутий позитивний ефект по опору тертя оцінюється в 6 – 7%, а у другому при числах Маха $M = 1,2\text{--}1,4$ складає 4 – 15%. Одночасно у цих дослідженнях було з'ясовано, що мікропрофілювання поверхні не впливає на несучі властивості літака.

Вартими уваги є також результати використання технології мікропрофілювання обтічної поверхні в спорті. Перше практичне застосування риблет на корпусах гоночних човнів було зроблено чоловічою командою США з греблі на Олімпійських іграх в Лос-Анжелесі в 1984р., а на Олімпійських іграх в Сіднеї в 2000р. плавці, використовуючи костюми з риблетами, неодноразово здобували золоті медалі.

Перспективні пошукові дослідження подальшого удосконалення і впровадження технології мікрорифлення

Поряд з дослідженнями описаних вище традиційних геометрій риблет не втрачають актуальності пошуки інших альтернативних можливостей штучного профілювання. У роботі [37] з метою визначення особливостей формування вихрової динаміки над негладкою поверхнею було розглянуто кілька видів поперечних борозенок прямокутної форми з різним співвідношенням відстані між виступами s та їх висотою h : $s/h > 1$ – шорсткість k -типу, $s/h \leq 1$ – шорсткість d -типу. Накамура, 1979 [38] експериментально досліджував вихрові системи, що формуються між та над поздовжніми прямокутними пазами. Відомі успішні спроби виготовлення хвилястої обтічної поверхні зі змінною за періодичним законом кривизною, яка демонструє спроможність до зниження опору тертя [39, 40]. У [19] запропоновано комбіновану систему поздовжнього оребрення, що складається з

поздовжніх ребер і масивів орієнтованих по потоку щілин між ними, а в [41, 42] розглядається система з масивів поздовжніх ребер, розташованих у впадинах поперечного оребрення квадратного профілю. Спостерігається також неухильне підвищення інтересу до пошукових досліджень, пов'язаних з наданням поверхні негладкої структури за допомогою лунок, які, створюючи складну регулярну просторову вихрову систему, спроможні аналогічно до риблет значно інтенсифікувати теплообмінні процеси при незначному підвищенні (а іноді навіть і зменшенні) опору тертя [43, 44].

Kramer, Thiele, Wassen, 2009 [45] вивчали ідеї про можливу рухомість риблет, зокрема, особливості обтікання поверхні з риблетами, що здійснювали вимушені крутильні осциляції відносно місць їх закріплення на обтічній поверхні у поперечному до потоку напрямку. В результаті цього коливального руху було теоретично продемонстровано покращення ефекту зменшення риблетами опору тертя з 8,6% для нерухомих риблетів до 11,1% – для осцилюючих. Ця ідея є новим витком розвитку відомих підходів по здійсненню мікроколивань обтічної поверхні [46], тому варто зауважити той факт, що подібні заходи відразу переводять тип методу використаного управління з пасивного в активний, оскільки для реалізації даних методів потрібно використовувати додаткову енергію, хоч і в порівняльно незначній кількості, а також враховувати її витрати при оцінці остаточного ефекту зменшення опору. Більш цікавим для подальших досліджень на думку авторів міг би виявитися підхід виготовлення ребер риблетів пружно-податливими, що є цілком можливим завдяки використанню сучасних синтетичних матеріалів з широким діапазоном механічних властивостей.

Висновки і перспективи подальших досліджень

Здійснений вище аналіз результатів значного кола різноманітних досліджень в галузі управління ПШ шляхом мікропрофілювання обтічної поверхні дозволяє дійти наступних висновків.

1. Оребрення обтічної поверхні з правильно підібраними параметрами з урахуванням очікуваних режимів експлуатації транспортного засобу спроможне забезпечити ефект стабільного зменшення опору тертя до 8%, а для деяких співвідношень умов навіть до 15% і вище, але сам процес оптимізації геометрії мікропрофілювання вимагає не лише узагальнення накопиченого досвіду експериментальних досліджень розрізнених 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 мікро-рифлення поверхні і турбулентної течії над нею. Отже проблема математичного опису розглянутого засобу управління є актуальною і розглядається авторами як один з головних пріоритетів подальших досліджень.

2. Є вкрай нагальним ретельне вивчення питань про експлуатаційну придатність мікропрофільованих поверхонь і, зокрема, про своєчасну очистку від пилу та бруду, а також втрату властивостей через старіння. Автори бачать шляхи подолання цих проблем у використанні тонких профільованих плівок-покриттів, виготовлених з перспективних матеріалів, що володіють стійкими антистатичними властивостями і одночасно не є коштовними при серійному виробництві. Зменшити вартість практичного впровадження цієї технології зменшення опору можна і шляхом покриття профільованою плівкою не усієї поверхні, а лише тієї її частини, де можна очікувати на досягнення максимального ефекту зниження опору тертя. Визначення цих зон локального профілювання автори вважають актуальною проблемою наступних етапів досліджень цієї проблематики.

Список літератури

1. Anderson E.J. Scallop shells exhibit optimization of riblet dimensions for drag reduction / E.J. Anderson, P.S. MacGillivray, M.E. DeMont // *Biological Bulletin* 192. – 1997. – P. 341-344.
2. Moin P. Tackling Turbulence with Supercomputers / P. Moin, J. Kim // *Scientific American*. – 1997. – №276. – P. 62-68.
3. Schneider M. Drag reduction by means of surface riblets on an inclined body of revolution / M. Schneider, A. Dinkelacker // *Near-Wall Turbulent Flows*. Elsevier Sci. Publ. B.V. – 1993. – P. 771-780.
4. Itiro Tani. Drag Reduction by Riblet Wiewed as Roughness Problem / Itiro Tani // *Proc. Japan Acad.: Ser. B*. – 1988. – № 64. – P. 21-24.
5. Kennedy J.F. Turbulent flow past boundaries with small longitudinal fins / J.F. Kennedy, S.-T. Hsu, J.-T. Lin // *J. Hydraulic Division*. – 1973. – Vol. 99. – No. 3.
6. Lin C.K. Experimental study of turbulent boundary layer on rough walls / C.K. Lin, S.J. Kline, T.P. Johnston // *Rep. of Thermosciences Div.: Dept. of Mechanical Engng, Stanford Univ. No. MD-15*. – Stanford Univ. Press. – 1966.
7. Хефнер Дж.Н. Проблема снижения сопротивления. Борьба за снижение стоимости горючего / Дж.Н. Хефнер // *Аэрокосмическая техника*. – 1988. – № 7. – С. 143-146.
8. Suzuki Y. Turbulent Drag Reduction Mechanism above a Riblet Surface / Y. Suzuki, N. Kasagi // *AIAA Journal*. – September, 1994. – Vol. 32, № 9. – P. 1781-1790.
9. 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.
10. 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.
11. Eckert E.R., Irvine T.F. Ir. Flow in corners of passages with noncircular cross sections // *Trans. ASME*. – Vol. 78, No. 4. -1956. -P.709-718.
12. Becher E.V., Smith C.R. A combined visualisation-anemometry study of turbulent drag reducing mechanisms of triangular micro-groove surface modifications// *AIAA. Pap.*, 1985. –No.85-0548.- 8p.
13. Galaggher T.A., Thomas A.S.W. Turbulent boundary layer characteristics over streamwise groove// *AIAA. Pap.*, 1984. – No. 84-2185. – 9 p.
14. Choi K.-S. A New Look at the Near-Wall Turbulence Structure / K.-S. Choi // *Advances in Turbulence*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1987. – P. 373-382.
15. Choi K.-S. Near-wall structure of a turbulent boundary layer with riblets / K.-S. Choi // *J. Fluid Mech.* – 1989. – Vol. 208. – P. 417-458.
16. Choi K.-S. Drag Reduction Mechanisms and Near-wall Turbulence Structure with Riblets / K.-S. Choi // *IUTAM Symposium Zurich (Switzerland, 1989) [Ed. A. Gyr]*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990. – P. 553-559.
17. Choi K.-S. Turbulence Structure Revisited; Results and Implications from Riblets Research / K.-S. Choi // *Near-Wall Turbulent Flows R.M.C. So, C.G. Speziale and B.E. Launder (Editors), 1993 Elsevier Science Publishers B.V.* – 1993. – P. 699-707.
18. Nitashke P. Experimental Investigation of the Turbulent Flow in Smooth and Longitudinal Grooved Tubes / P. Nitashke // *NASA TM77480*. – 1984.
19. Bruse M. Experiments with conventional and novel adjustable drag-reducing surfaces / M. Bruse, D.W. Bechert, van Hoeven J.G.T. et al. // *Near-Wall Turbulent Flows*. – Amsterdam: Elsevier, 1993. – P. 719-738.
20. Гад-эль-Хак М. Управление отрывом пограничного слоя. Обзор / М. Гад-эль-Хак, Д.М. Бушнелл // *Современное машиностроение: серия А*. – 1991. – № 7. – С. 2-35.
21. Енютин Г.В. Экспериментальное исследование влияния продольного оребрения на сопротивление трения плоской пластины / Г.В. Енютин, Ю.А. Лашков, Н.В. Самойлова и др. // *Изв. АН СССР: Сер. МЖТ*. – 1987. – № 2. – С. 140-145.
22. Енютин Г.В. Влияние продольного оребрения на сопротивление турбулентного трения / Г.В. Енютин, Ю.А. Лашков, Н.В. Самойлова и др. // *Уч. зап. ЦАГИ*. – 1988. – Т. 19, № 4. – С. 37-44.
23. Лазос Б. Уменьшение турбулентного сопротивления трения с помощью тонких ребер / Б. Лазос, С.Р. Уилкинсон // *Аэрокосмическая техника*. – 1989. – №2. – С. 62-64.
24. Bandyopadhyay P.R. Review – Mean Flow in Turbulent Boundary Layers Distributed to Alter Skin Friction (NASA Langley Research Center, Hampton, VA) / P.R. Bandyopadhyay // *AIAA/ASME 4-th Fluid Mechanics: Plasma Dynamics and Lasers (Atlanta, GA, Conference 12 – 14 May 1986)*. – 1986.
25. Уоли М. Сопротивление пластины с продольными пазами и ребрами / М. Уоли // *Снижение вязкостного трения: сб. докладов симпозиума, (Даллас, 1979). Под ред. Г.Р. Хью; пер. с англ. под ред. В.Я. Нейланда*. – М.: Машиностроение. – 1984. – С. 189-206.
26. Walsh M.J. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction / M.J. Walsh, A.M. Lindemann // *NASA, Langley Research Center, Hampton, Virginia 23665-5225, AC 804 865-3281. Technology Utilization Office. Technical Support Package for Tech Brief LAR-132866*. – 1984. – P. 1-10.
27. Walsh M.J. Riblet/LEBU research at NASA Langley / M.J. Walsh, J.B. Anders // *Applied Scientific Research*. – 1989. – № 46. – P. 255-262.
28. Walsh M.J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets / M.J. Walsh // *AIAA Pap.* – 1982. – № 169. – P. 1-8. (Переклад: Снижение сопротивления турбулентного пограничного слоя с помощью канавок на омываемой

поверхности). – Экспресс информация: серия Авиастроение. – 1983. – № 6. – С. 14-20.

29. Berchert, D. W. Experiments With Three-Dimensional Riblets as an Idealized Model of Shark Skin / D.W. Berchert, M. Bruse, W. Hage // *Exp. Fluids*. – 2000. – Vol. 28, № 5. – P. 403-412.

30. Indinger Thomas. 3D-Measurements in an adverse-pressure-gradient turbulent boundary layer over smooth and ribbed surfaces / Thomas Indinger, Stefan Hickel, Nikolaus A. Adams // XXI ICTAM (15–21 August 2004, Warsaw, Poland). – 2004.

31. Sundaram S. Studies of turbulent drag reduction using riblets on a NASA 0012 airfoil / S. Sundaram, P.R.Viswanath, S. Rudrakumar // *National Aerospace Laboratories, PD EA 9401*. – 1994. – P. 1-26.

32. Channa Raju. Base drag reduction due to riblets on a GAW (2) airfoil / Channa Raju, P.R. Viswanath // *Experimental Aerodynamics Division*. – National Aerospace Laboratories, Bangalore, PD EA 9710, Nov. 1997. – 15 p.

33. Subaschandar N. Drag Reduction Due to Riblets on a GAW(2) Airfoil / N. Subaschandar, Rajeev Kumar, S. Sundaram // *Journal of aircraft*. – September-October 1999. – Vol. 36, № 5. – P. 890-892.

34. Sang-Joon Leea. Flow control of circular cylinder with a V-grooved micro-riblet film / Sang-Joon Leea, Hee-Chang Limb, Manhee Hana, Seung S. Leea // *Fluid Dynamics Research*. – 2005. – № 37. – P. 246-266.

35. Reneaux J. Overview On Drag Reduction Technologies For Civil Transport Aircraft: European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS 2004 P. [Neittaanmäki, T. Rossi, S. Korotov, E. Oñate, J. Périaux, D. Knörzer (eds.)], (Jyväskylä, 24–28 July 2004). – 2004. – 18p.

36. Viswanath P.R. Aircraft viscous drag reduction using riblets / P.R. Viswanath // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2002. – № 38. – P. 571-600.

37. Bandyopadhyay P.R. Structure of roughwall turbulent boundary layers / P.R. Bandyopadhyay, R.D. Watson // *The physics of fluids*. – July 1988. – Vol. 31, № 7. – P. 1877-1883.

38. Накамура И. Турбулентный пограничный слой при обтекании пластины с продольными выступами / И. Накамура // *Нихон кикай гаккай ромбунсю*. – 1979. – Т. 45, № 400. – С. 1816-1824.

39. Кэри (мл.) О.М. Уменьшение сопротивления твердой поверхности с помощью волн малой амплитуды

контура поверхности / О.М. Кэри (мл.), Л.М. Вайнштейн, Д.М. Бушинел, под ред. Г.Р. Хью; [пер. с англ.] // *Снижение вязкостного трения: сб. докладов симпозиума (Даллас, 1979). Под ред. В.Я. Нейланда*. – М.: Машиностроение. – 1984. – С. 165-188.

40. Launder B.E. On the prediction of riblet performance with engineering turbulence models / B.E. Launder, S.P. Li // *Applied Scientific Research*. – 1993. – № 50. – P. 283-298.

41. Shinsuke Mochizuki. Turbulent Drag Reduction of a D-Type Rough Wall Boundary Layer with Longitudinal Thin Ribs Placed within the Grooves (Reduction rate and Time mean Properties) / Shinsuke Mochizuki, Hideo OSAKA // *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers: Academic Journal*. – 1991. – 57 / 535. – P. 950-957.

42. Shinsuke Mochizuki. Drag Reduction with submerged ribs and its mechanism in a turbulent boundary layer over D-type roughness / Shinsuke Mochizuki, Hideo OSAKA // *Workshop: High speed body motion in water (September 1–3, 1998, Kyiv: Institute of Hydro-mechanics)*. – AGARD/NATO Report 827. – 1998. – P. 121-129.

43. Исаев С.А. Идентификация самоорганизующихся смерчеобразных структур при численном моделировании турбулентного обтекания лунки на плоскости потоком несжимаемой жидкости / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, П.А. Баранов // *Письма в ЖТФ*. – 2000. – Т. 26, Вып. 1. – С. 28-35.

44. Voropayev G.A. Vortical Flow Features In A Hemispherical Cavity on a Flat Plate / G.A. Voropayev, V.A. Voskoboinick, N.V. Rozumnyuk, A.V. Voskoboinick // *Sixth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (Seoul, Korea, 22–24 June 2009)*. – 2009. – P. 563-568.

45. Kramer Felix. DNS of oscillating riblets for turbulent drag reduction / Felix Kramer, Frank Thiele, Erik Wassen // *Sixth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (Seoul, Korea, 22–24 June 2009)*. – 2009. – P. 587-591.

46. Choi K.-S. The mechanism of turbulent drag reduction with wall oscillation / K.-S. Choi, B.R. Clayton // *Int. J. Heat and Fluid Flow*. – 2001. – Vol. 22. – P. 1-9.

Надійшла до редколегії 17.02.2012

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

МИКРОПРОФИЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАК МЕТОД ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ

В.В. Кравченко Е.А. Шквар

Выполнен анализ результатов экспериментальных исследований по управлению турбулентным пограничным слоем путем микропрофилирования обтекаемой поверхности, выделены определяющие физические механизмы регуляризации пристенного вихреобразования. Обоснована актуальность построения математических моделей данного метода управления с целью сокращения процесса его внедрения в практику проектирования перспективных транспортных средств, оптимизации геометрических характеристик и поиска эффективных мероприятий, направленных на преодоление эксплуатационных недостатков.

Ключевые слова: пограничный слой, турбулентность, вихревая структура, управление, микропрофилирование поверхности.

A STREAMLINED SURFACE MICRO-RIFFLING AS A METHOD OF EFFECTIVE CONTROL OF TURBULENT BOUNDARY LAYER

V.V. Kravchenko, Ye.O. Shkvar

The analysis of experimental results respectively turbulent boundary layer control by using the streamlined surface micro-riffling has been made. The physical mechanisms of generating the near-wall vorticity are identified. The actuality of constructing the mathematical models of the investigated method of control is justified from the standpoint of reducing the process of its implementation in practice of advanced transport vehicles design, optimizing the geometrical characteristics and searching the effective measures to overcome the operational problems.

Keywords: boundary layer, turbulence, vortical structure, control, surface micro-riffling.