

УДК 533.6.013.124

В.І. Коробов, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.
Н.О. Клешня, старш. викл.

ГІДРОДИНАМІЧНИЙ ОПІР ТЕРТЯ ПЛАСТИНИ З ПОЗДОВЖНИМИ МІКРОБОРІЗДКАМИ ТА ТОНКИМ ЕЛАСТИЧНИМ ПОКРИТТЯМ

За допомогою вагових вимірів у гідродинамічній трубі показано, що для дрібноребристої поздовжньо-обтічної поверхні існує діапазон параметрів, у якому опір турбулентного тертя менший, ніж у гладкої плоскої пластини з такою ж площею проекції. Покриття з тонкого шару еластичного матеріалу, яке має внутрішні поздовжні ребра жорсткості (перевернуті ріблети), є більш ефективним, ніж звичайні ріблети.

Weight measurements in a water tunnel have shown that there exist a range of parameters of longitudinally fine-ribbed surface such that turbulent friction in flow over the surface is less than that over a smooth flat plate of the same projected area. Damping coating made from the thin layer of an elastic material and have interior longitudinal ribs of rigidity (overturn riblets) is more effective than usual riblets.

Постановка проблеми

Розроблення заходів, спрямованих на зниження гідродинамічного опору поверхні, є важливим резервом підвищення аеродинамічної досконалості літальних апаратів і гідротранспортних систем. Відомо ряд засобів керування примежовим шаром (ПШ). Деякі з них вивчені досить докладно, наприклад: вдув – відсмоктування ПШ, введення в ПШ високомолекулярних та поверхневоактивних сполук. Деякі засоби керування ПШ потребують більш глибоких та різнобічних досліджень.

У цій роботі експериментально вивчаються ряд аспектів двох засобів зменшення опору тертя. Одна частина роботи присвячена дослідженню можливостей методу зниження турбулентного тертя за допомогою дрібноребристої поверхні (ріблети), ребра якої спрямовані вздовж потоку. Другий цикл експериментів спрямований на оцінювання гідродинамічної ефективності застосування тонкого демпфувального покриття.

Аналіз публікацій

Одним із перших досліджень про вплив поздовжнього оребрення поверхні на її гідродинамічні характеристики можна вважати роботу [1], у якій експериментально було показано, що при турбулентному режимі течії в ядрі каналу трикутного поперечного перетину потік у кутових областях (у діапазоні до 30°) залишається ламінарним на ділянці до 40 % по висоті трикутника. Було висловлене припущення, що спостерігається ефект, який обумовлений придушенням турбулентності в кутових областях внаслідок малості поперечних масштабів.

У роботі [2] розглянуто фізичну картину течії біля ріблет, де вказується, що всередині їх потік рухається дуже повільно, а бічні переміщення рідини поблизу ріблет стають незначними.

У роботі [3] запропоновано модель процесу, яка ґрунтується на ідеї про те, що зниження опору не є безпосереднім результатом взаємодії з турбулентною структурою, а визначається характером поздовжньої течії в'язкого середовища в середині рифленої поверхні. Течії в канавках відповідають малі числа Рейнольдса. Характер течії повзучий, тому місцеві дотичні напруги на стінці малі й максимальні на верхівці канавки через наявність градієнта швидкості. У такому випадку менша частка поверхні випробовує великі дотичні напруги.

В одній із ранніх робіт [4], де розглянуто вплив оребрення на характеристики ПШ при дозвуковій швидкості потоку, висота ребер h прямокутної форми варіювалася в діапазоні $h^+ = 45 \dots 111$, а відстань S між ними змінювалася у межах $S^+ = 190 \dots 373$.

Тут і нижче значення h і S виражені в безрозмірному вигляді в одиницях закону стінки:

$$h^+ = h u_\tau / \nu;$$

$$S^+ = S u_\tau / \nu,$$

де u_τ – динамічна швидкість;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Було встановлено, що за певних значень висоти й відстані між ребрами частота турбулентних викидів зменшується на 20...25 %, а опір тертя оребреної поверхні на 3...4 % менше порівняно з опором тертя гладкої пластини.

У роботі [4] також згадано про інші експериментальні дослідження впливу прямокутного оребрення на опір, у яких було отримано протилежні результати. Якщо $h^+ = 70 \dots 150$ і $S^+ = 50 \dots 1100$, оребрення спричиняло збільшення сили тертя на 10...50 %. Трикутні ребра за рівних умов меншою мірою збільшують омивану потоком поверхню ніж ріблети іншої форми.

Досить докладне експериментальне дослідження турбулентного опору тертя оребрених поверхонь проведено в роботах [4–9], де було досліджено кілька десятків поверхонь із різним профілем оребрення. Для штучного збільшення товщини ПШ використовувався дротовий турбулізатор. У деяких роботах, зокрема [4; 7], вказуються оптимальні розміри ріблетів: $h^+ \approx S^+ \approx 10 \dots 14$. Використання ріблетів на пластинах і тілах обертання, тобто в течії майже без градієнта тиску, привело до зниження опору до 7...8 %.

Другий засіб керування ПШ ґрунтується на наданні поверхні, що обтікається потоком рідини, в'язкопружних властивостей. Завдяки цьому вона стає деформівною. Установлено, що нанесення шару еластичного матеріалу на поверхню тіла може привести до покращання умов його обтікання потоком рідини з точки зору енергетичних витрат. Багато бібліографічних вказівок на експериментальні та теоретичні дослідження з цього напрямку аерогідродинаміки ПШ містяться в роботах [10; 11]. Експериментальні дослідження проводились за різних умов (в повітряному та водному середовищах) із застосуванням різного типу покриттів (пінополіуретанові, мембранні тощо). У деяких випадках було зафіксовано від'ємний гідродинамічний ефект.

Механізм взаємодії податливої стінки з ПШ досить складний. Результати дослідження моделі енергетичної та кінематико-динамічної взаємодії наведено в роботах [12; 13].

У роботах [14–17] наведено результати експериментального дослідження інтегральних характеристик турбулентного ПШ на податливих стінках монолітного типу, які були виготовлені на основі поліуретанових компаундів.

Досліди проводились у широкому діапазоні чисел Рейнольдса: $Re = 2,5 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^7$. У цих експериментах вимірювались також динамічні в'язкопружні характеристики еластомерів, які використовувались як податливі стінки.

Установлений взаємозв'язок [14; 16] між динамічними в'язкопружними властивостями стінки, з одного боку, та параметрами ПШ, з іншого боку. На основі цього характеризується механізм впливу податливої поверхні на примезову турбулентність у вигляді запропонованої моделі та критеріїв енергетичної взаємодії.

Позитивний гідродинамічний ефект обумовлено тим, що частка пульсаційної енергії потоку поглинається в'язкопружною стінкою, внаслідок чого зменшується інтенсивність породження турбулентності на межі в'язкого підшарку.

Зафіксовано існування оптимального режиму обтікання еластичної стінки (Re_{opt}), за якого існує найбільше відносне зменшення гідродинамічного тертя (близько 30 %). У цьому випадку частоти, на яких в еластичному матеріалі відбувається максимальне поглинання енергії коливань, складають більшу частину спектру турбулентних пульсацій. Зафіксована відповідність між верхньою межею діапазону енергонесучих частот пульсацій ПШ, з одного боку, та величиною частоти, яка відповідає максимальному значенню коефіцієнта механічних втрат еластомера, з іншого боку. Спостерігалась кореляція між динамічними механічними властивостями стінки, що деформується, та гідродинамічною ефективністю демпфівального покриття.

В експериментальний спосіб було встановлено, що динамічна жорсткість еластичної стінки зумовлює верхню межу гідродинамічної ефективності за числом Рейнольдса, котра характеризується допустимим рівнем примусових коливань податливої стінки під дією турбулентного навантаження. Перевищення граничнодопустимої шорсткості на еластичній межі в 1,5 рази, відносно жорсткої стінки, не протирічить фізичній картині обтікання, тоді як природно припустити, що на поверхні еластичної стінки зі зростанням рівня пульсаційного навантаження утворюється хвиляста, а не зерниста шорсткість. Оскільки реалізується не статична, а динамічна шорсткість, її прояви зі зростанням швидкості запізнюються на відміну від випадку обтікання жорсткої стінки.

Мега досліджень

У роботах, в яких досліджувався вплив оребрених поверхонь на гідродинамічні характеристики ПШ, результати з відносної зміни тертя приводились як функція безрозмірної відстані між ребрами S^+ у координатах закону стінки. Це пов'язано з гіпотезою про вплив поздовжніх канавок на зародження й розвиток турбулентних пристінних викидів у ламінарному підшарку. Як відомо, область зародження турбулентних викидів обмежена за товщиною ПШ координатою $y^+ \approx 30$, а поперечна відстань між ними в безрозмірному вигляді характеризується величиною $Z^+ \approx 100$. Тому вважається за доцільне виконати дослідження на поверхні такої геометрії, співвідношення характерних розмірів її оребрення було близьким до згаданих параметрів.

У роботах з керування ПШ із межею, що деформується, у великій кількості дослідів податлива стінка моделювалась у вигляді покриття мембранного типу. Значно менше робіт виконано на еластичних покриттях, зроблених у вигляді монолітного шару, причому з ізотропними механічними властивостями. Такі покриття мали зазвичай значну товщину – декілька міліметрів [16]. Зі зростанням швидкості потоку в експериментах, а також ростом рівня гідродинамічного навантаження, виконали обриви обшивки.

З метою розширення діапазону робочих швидкостей і підвищення міцності еластичного покриття доцільно його підсилити поздовжніми ребрами жорсткості. При цьому демпфівальне покриття виявиться з анізотропними механічними (динамічними) властивостями в трансверсальному напрямі поперек потоку. У такому випадку з'являється можливість реалізувати комбінований механізм взаємодії податливої межі. Таке покриття демпфірує пульсаційне навантаження, а також може стабілізувати течію, підтримуючи когерентні поздовжні вихорові структури в прирежовому прошарку турбулентного ПШ [18]. Причому демпфівальне покриття має бути тонким, а масштаб поперечної анізотропії наближатися до масштабу турбулентних викидів у в'язкому підшарку.

Таким чином, можна реалізувати й перевірити ідею „перевернутих ріблет” [19].

Експериментальні дослідження

У цій роботі наведено результати експериментального дослідження опору тертя плоскої жорсткої оребреної поверхні, а також пластини, що оребрена і в якій пази між ребрами заповнені м'яким еластичним матеріалом порівняно із гладкою жорсткою поверхнею. Оребрення дослідних пластин виконано „через зуб”. Геометричні параметри оребрення показано на рис. 1.

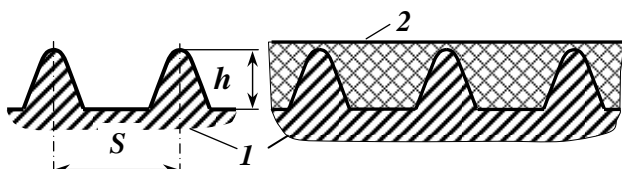


Рис. 1. Поперечний перетин ріблет 1 і демпфівального покриття 2

Перетин ребра виконано у вигляді трикутника з кутом при вершині 40° з округленою вершиною. Висота ребра $h = 0,4$ мм. Між трикутними виступами є плоска площадка, розмір якої дорівнює підставці ребра.

Крок між ребрами $S = 0,8$ мм. Відношення $h/S = 0,5$ і близько до співвідношення між параметрами y^+ і Z^+ [20].

Поперечний перетин демпфівального покриття із внутрішніми ребрами показано на рис. 1 [18]. Зовнішня поверхня покриття, що обтікається потоком, гладка. Еластичний шар було виконано із компаунда на основі ізопренового каучуку. Величина статичного модуля пружності за нормальних умов становить близько $E' \approx 1,5$ МПа. Тестовані поверхні було виконано у вигляді тонких прямокутних пластин 1, які розташовувалися на моделі (рис. 2).

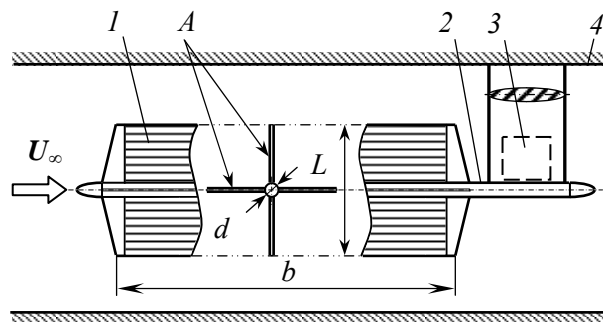


Рис. 2. Схема розміщення моделі з тестованими пластинами в ГДТ:

- 1 – пластина;
- 2 – модель;
- 3 – тензометр;
- 4 – робоча ділянка

Модель являла собою тонкий циліндр (подовження $\lambda_{\text{цил}} > 40$), на якій хрестоподібно закріплювалися чотири досліджувані пластини малого подовження

$$\lambda_{\text{пл}} = L_{\text{пл}} / b_{\text{пл}}, \lambda_{\text{пл}} \approx 0,33,$$

де $L_{\text{пл}}$, $b_{\text{пл}}$ – відповідно розмах і хорда пластини.

Відношення розмаху пластини до діаметра циліндра $L_{\text{пл}}/d_{\text{цил}} \approx 12,5$. Пластини обтікалися вздовж більшого боку $b_{\text{пл}}$. На оребрених пластинах рифлення було виконано з обох боків (A). Випробування проводилися в гідродинамічній трубі (ГДТ) із закритою робочою частиною, яка має квадратний поперечний перетин розміром $0,4 \times 0,4$ м і довжину 1,8 м. Швидкість потоку в робочій ділянці труби U_∞ змінювалася в межах від 0,2 до 2,5 м/с. Швидкість потоку реєструвалася приймачем швидкісного напору, чутливим елементом якого був напівпровідниковий термокомпенсований та калібрований диференціальний датчик тиску з нормованим вихідним сигналом. Модель 2 установлювалася посередині робочої ділянки 4 ГДТ і своєю хвостовою частиною кріпилася до тензометра 3 із напівпровідниковими датчиками, розташованими всередині обтічника державки.

У дослідях вимірювалися значення швидкості потоку й гідродинамічний опір поздовжньо обтічної моделі, які через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) реєструвалися в ПЕОМ. Число Рейнольдса в дослідях змінювалося в діапазоні від $Re = 1,6 \cdot 10^5$ до $Re = 2 \cdot 10^6$.

Результати багаторазових вимірів опору турбулентного тертя гладкої поверхні відтворювалися з імовірною похибкою до $\sigma \sim 2,1\%$ у разі малих швидкостей потоку. Зі зростанням швидкісного напору похибка зменшувалася до значень $\sigma \sim 0,7\%$ наприкінці діапазону вимірювання.

Було виконано три цикли дослідів. Спочатку вимірювався гідродинамічний опір тертя жорсткої гладкої пластини. Ці дані використовувалися як еталонні. На другому етапі досліджувалися ріблети. У третьому циклі виконувалась продувка пластин з анізотропним демпфірувальним еластичним покриттям. Причому кожного разу виконувалося по три серії експериментів. Спочатку відбувалось продування без турбулізатора. У другій серії кожного циклу в передній частині тестової пластини на її поверхні, що обтікається, поперек потоку (у трансверсальному напрямку) установлювався малий дротовий турбулізатор, який мав діаметр перетину $D_{1\text{ turb}} = 0,7$ мм. У третій серії використовувався турбулізатор більший за розміром, ніж той, що використовувався перед цим, $D_{2\text{ turb}} = 1,5$ мм.

Виміряні значення коефіцієнта гідродинамічного тертя по числах Рейнольдса для гладкої жорсткої пластини $C_{F0}(Re)$ подані на рис. 3, де криві, що відповідають кожній із трьох серій продувок, позначені цифрами 4, 5, 6.

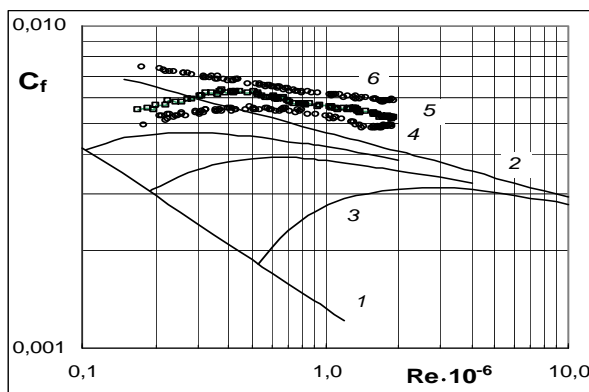


Рис. 3. Коефіцієнт гідродинамічного тертя пластини за числами Рейнольдса:

1, 2, 3 – ламінарний, турбулентний, перехідний режими течії в ПШ [21];

4 – модель з жорсткими гладкими пластинами без турбулізатора;

5 – модель з турбулізатором $D_{1\text{ turb}} = 0,7$ мм;

6 – модель з турбулізатором $D_{2\text{ turb}} = 1,5$ мм

Дані для еталона цілком задовільно узгоджуються з відомими результатами [21], з урахуванням складової донного опору тестової моделі, на якій розміщувалися дослідні пластини.

Під час продувок без турбулізатора на пластині формувалась ПШ із перехідною зоною. У разі встановлення малого турбулізатора $D_{1\text{ turb}}$ зона перехідного ПШ зменшувалась. У третій серії застосування великого турбулізатора $D_{2\text{ turb}}$ сприйняло більш інтенсивному породженню завихореності, що забезпечило встановлення турбулентного ПШ майже вздовж усієї поверхні тестової пластини.

Експериментальні значення коефіцієнта гідродинамічного тертя пластин, що відрізнялися граничними умовами на поверхні (C_{F0} , $C_{F\text{ rib}}$, $C_{F\text{ DP}}$) за числами Рейнольдса зображено на рис. 4, де позначено $C_{F\text{ rib}}(Re)$ (криві 7; 9; 11) і $C_{F\text{ DP}}(Re)$ (криві 8; 10; 12) коефіцієнти тертя відповідно оребреної поверхні та пластини з еластичним покриттям за числами Рейнольдса.

Результати вагових вимірів випробуваних поверхонь, де проявляються найбільш характерні режими обтікання, показано на рис. 5. Дані подані у вигляді залежності відносного коефіцієнта тертя $\xi = f(S^+)$ від безрозмірного кроку оребрення S^+ , де $\xi = (C_{F0} - C_{F\text{ rib}}) / C_{F0}$. Остання форма подання результатів такого типу експериментів досить поширена [7]. Криві 1; 2; 3 та 4; 5; 6 на рис. 5 відповідають кривим 7; 9; 11 та 8; 10; 12 на рис. 4.

На рис. 5 чітко видно, що поздовжнє оребрення дозволяє суттєво знизити гідродинамічний опір тертя у разі зіставлення із гладкою пластиною. Ефект зберігається при режимах обтікання, коли $S^+ < 25 \dots 30$. Причому зі зростанням інтенсивності пульсаційного навантаження в ПШ гідродинамічна ефективність ріблетів спочатку дещо підвищується, а потім зменшується і за $S^+ > 30$ стає від'ємною. Стала величина максимального ефекту сягає значень 8...10% в робочому діапазоні швидкостей.

Ці результати кореспондуються з даними інших авторів, особливо у випадках, коли форма перетину оребрення та безрозмірні геометричні параметри близькі до таких, що обрані й застосовані в цьому експерименті. Величина максимального гідродинамічного ефекту трохи перевищує дані інших авторів [4; 7] за рахунок більш вдалої форми ріблет.

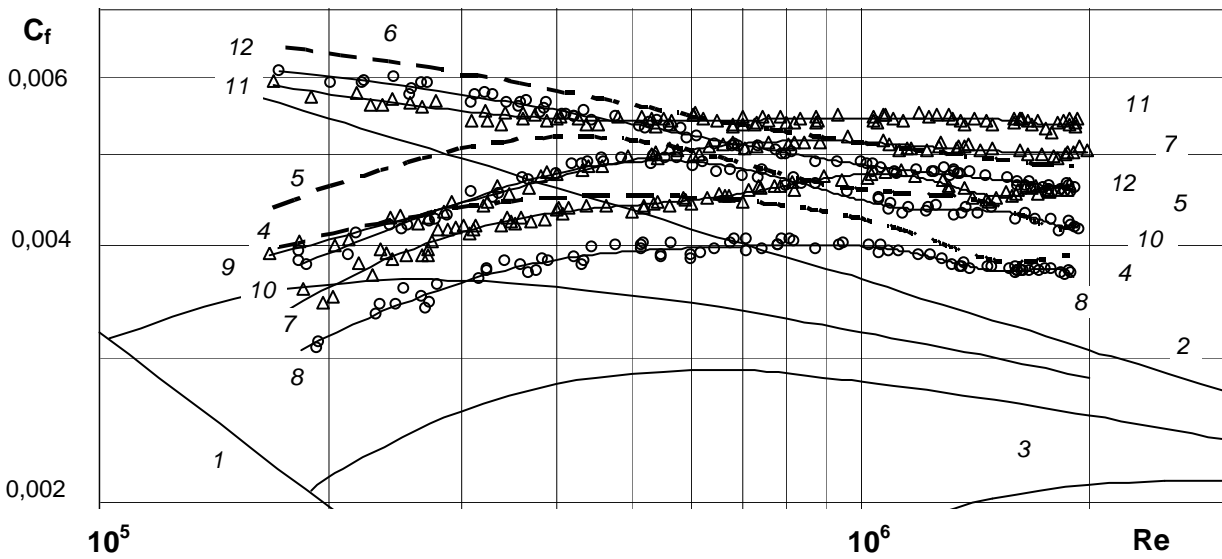


Рис. 4. Коефіцієнт гідродинамічного тертя пластини за числами Рейнольдса: 1, 2, 3 – ламінарний, турбулентний, перехідний режим течії в ПШ; 4 – модель з жорсткими гладкими пластинами без турбулізатора; 5 – модель з турбулізатором $D_{1\text{ turb}} = 0,7$ мм; 6 – модель з турбулізатором $D_{2\text{ turb}} = 1,5$ мм; 7, 9, 11 – пластини з риблетами; 8, 10, 12 – пластини з еластичним покриттям

Опір пластини з еластичним демпфувальним покриттям на відміну від риблетів, не перевищує величину гідродинамічного тертя жорсткої гладкої поверхні в межах усього досліджуваного діапазону швидкостей. На більшості режимів обтікання така модифікована пластини забезпечила суттєве зниження енерговитрат. Причому гідродинамічна ефективність демпфувального покриття із внутрішніми ребрами жорсткості була вищою, ніж у рифленої поверхні. Вона досягала значень 20 % за $S^+ \approx 8$, з поступовим зменшенням до рівня 5 % за $S^+ \approx 45 \dots 50$.

Спостерігалось це на таких режимах продувок, коли було реалізовано змішану форму обтікання, тобто за наявності як перехідного, так і турбулентного режимів течії в ПШ. У випадку інтенсивної турбулізації ПШ по всій поверхні пластини, величина зниження гідродинамічного опору тертя була меншою і становила 4...5 %, але це значення було сталим у межах усього діапазону швидкостей. Відносно невелика величина ефекту, що зафіксований на режимах обтікання з підвищеним рівнем пульсаційного навантаження, може мати наступне пояснення. У зв'язку з відносно малою товщиною еластичного покриття, а також значною анізотропією в'язкопружного шару в трансверсальному напрямку, величина динамічної жорсткості по нормалі до стінки в цілому сягає більших значень, ніж у „м'яких” обшивок.

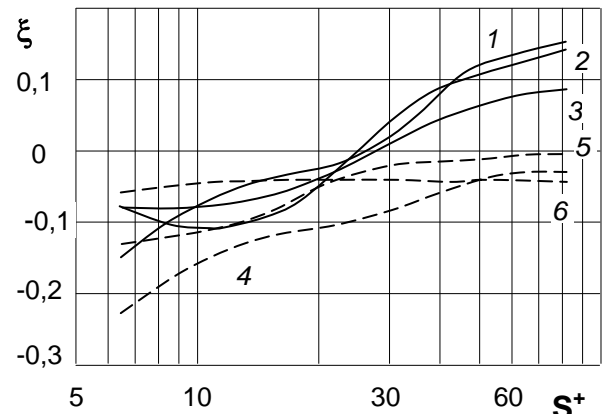


Рис. 5. Значення коефіцієнта тертя модифікованих пластин відносно еталона залежно від кроку оребрення:

1, 2, 3 – пластини з рибрами; 4, 5, 6 – пластини з еластичним покриттям

Через це зменшується потік пульсаційної енергії, який сприймається покриттям. І, відповідно, уже не в такій мірі зменшується баланс породження турбулентності на межі в'язкого підшарку порівняно з демпфувальним покриттям, але яке має суттєво більшу товщину.

Висновки

Виходячи з гіпотези про вплив поздовжніх канавок на зародження та розвиток турбулентності в примежовому шарі на межі в'язкого підшарку, на основі експериментальних даних можна вважати, що цей вплив найбільш ефективний

(з точки зору зменшення енерговитрат) у тому випадку, коли висота оребрення є того ж порядку, що й розмір області виникнення турбулентних викидів. Величина кроку між ребрами може бути такою ж або перевищувати її майже вдвічі.

З наведених даних видно, що для оребреної поверхні є діапазон швидкостей U_∞ , в якому її опір тертя виявляється меншим, ніж у гладкої пластини. На відміну від відомих робіт, максимальне зниження коефіцієнта тертя за рахунок оребрення з модифікованою геометрією, порівняно з гладкою пластиною, досягає трохи більших значень і становить 10...12 %, а оптимальні значення параметра S^+ , що відповідають мінімуму поверхневого тертя, існують у більшому діапазоні: $S^+ \approx 12...20$.

Зі збільшенням швидкості зростання опору оребреної поверхні, порівняно з гладкою пластиною, відбувається не настільки інтенсивно. У дослідях коефіцієнт тертя у разі великих значень S^+ не досяг значень, що відповідають перевищенню площі змоченої поверхні, яка для оребреної моделі на 53 % більша, ніж у гладкої пластини. Це може вказувати на структуруючу дію риблет, що приводить до підвищення стійкості примезових когерентних вихрових структур у ПШ.

На відміну від риблетів, у демпфірувального покриття зовнішня поверхня, що обтікається потоком, може залишатися гідравлічно гладкою в широкому діапазоні швидкостей.

Покриття, що демпфірує і стабілізує, яке виконане з тонкого шару еластичного матеріалу та має внутрішні поздовжні ребра жорсткості (яке може називатись „перевернуті риблети”), є більш ефективним задля зменшення гідродинамічного опору тертя, ніж звичайні риблети.

Література

1. *Eckert E.R., Irvine T.F.* Flow in corners of passages with noncircular cross sections // *Trans. ASME.* – Vol. 78, No. 4. – 1956. – P. 709–718.
2. *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. – 8 p.
3. *Galagher T.A., Thomas A.S.W.* Turbulent boundary layer characteristics over streamwise grooves // *AIAA Pap.* – 1984. – No. 84-2185. – 9 p.
4. *Уоли М.Д.* Сопротивление пластины с продольными пазами и ребрами // *Снижение вязкого трения.* – М.: Машиностроение, 1984. – С. 189–206.
5. *Walsh M.J., Weinstein L.M.* Drag and heat transfer on surfaces with small longitudinal fins // *AIAA Pap.* – 1978. – No. 78-1161. – 11 p.
6. *Walsh M.J.* Turbulent boundary layers drag reduction using ribbllets // *AIAA Pap.* – 1982. – No. 82-0169. – 8 p.
7. *Влияние продольного оребрения на сопротивление турбулентного трения* / Г.В. Енютин, Ю.А. Лашков, Н.В. Самойлова и др. // *Учен. зап. ЦАГИ.* – 1988. – Т. 19, № 4. – С. 37–44.
8. *Park S.-R., Wallace J.M.* Flow alteration and drag reduction by riblets in boundary layer // *AIAA Journal.* – 1994. – Vol. 32, No.1. – P. 31–38.
9. *Белов И.А., Енютин Г.В., Литвинов В.М.* Влияние продольного и поперечного оребрения плоской пластины на ламинарно-турбулентный переход // *Учен. зап. ЦАГИ.* – 1994. – Т. 21. – № 6. – С. 107–111.
10. *Bushnell D.M., Hefner J.N., Ash R.L.* Effect of compliant wall motion on turbulent boundary layers // *Phys. Fluids.* – 1977. – Vol. 20, No. 10, pt. 11. – P. 31–48.
11. *Flow past highly compliant boundaries and in collapsible tubes* / P.W. Carpenter, T.J. Pedley (Eds.) // *Proc. of the Symposium held at the Univ. Warwick, Coventry, UK 26-30 March 2001, Kluwer Acad. Publ.*, 2003. – 323 p.
12. *Воропаев Г.А., Бабенко В.В.* Турбулентный пограничный слой на эластичной поверхности // *Гидромеханика.* – К.: Наук. думка, 1978. – № 38. – С. 71–77.
13. *Семенов Б.Н.* Влияние упругих покрытий на турбулентный пограничный слой // *Исследования по управлению пограничным слоем.* – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1976. – С. 92–101.
14. *Коробов В.И., Бабенко В.В.* Об одном механизме взаимодействия эластичной стенки с потоком // *Инж.-физ. журн.* – Минск: Наука и техника. – 1983. – Т. 44, № 5. – С. 730–733.
15. *Козлов Л.П., Коробов В.И., Бабенко В.В.* Дія еластичної стінки на пограничний шар // *Доп. Акад. наук УРСР. Сер. "А".* – К., 1983. – № 1. – С. 45–47.
16. *Коробов В.И., Бабенко В.В., Козлов Л.Ф.* Взаимодействие турбулентного пограничного слоя с эластичной пластиной // *Инж.-физ. журн.*, – Минск: Наука и техника. – 1989. – Т. 46, № 2. – С. 220–225.
17. *Бабенко В.В., Канарский М.В., Коробов В.И.* Пограничный слой на эластичных пластинах. – К.: Наук. думка, 1993. – 264 с.
18. *Пат. України на корисну модель, №18126, F15D 1/00* / В.І. Коробов. Покриття, що демпфірує і стабілізує. 2006, Бюл. № 10.
19. *А. с. № 483538 СССР, МК F 15d I/12.* Демпфирующее покрытие / Л.Ф. Козлов, В.В. Бабенко, В.И. Коробов. – 1975. Бюл. № 33.
20. *Коробов В.И., Клешина Н.О.* Вплив поздовжніх мікробороздок на гідродинамічний опір тертя // *Вісн. НАУ.* – 2005. – № 1. – С. 94–96.
21. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 742 с.