

УДК 532.5(045)

¹В.І. Коробов, канд. техн. наук
²Н.О. Клешня**ВПЛИВ ПОДОВЖНИХ МІКРОБОРОЗДОК
НА ГІДРОДИНАМІЧНИЙ ОПІР ТЕРТЯ ПЛАСТИНИ**¹Інститут гідромеханіки Національної академії наук України, e-mail: korobov@ukr.net²Інститут комп'ютерних технологій НАУ

За допомогою вагових вимірів у гідродинамічній трубі показано, що для дрібноребристої подовжньо обтічної поверхні існує діапазон параметрів, в якому опір турбулентного тертя менший, ніж у гладкої плоскої пластини з такою самою площею проекції. При цьому максимальне зниження коефіцієнта тертя за рахунок оребрення становило до 16%.

Вступ

Розробка заходів, спрямованих на зниження гідродинамічного опору поверхні, є важливим резервом підвищення аеродинамічної досконалості літальних апаратів і гідротранспортних систем. У наш час досить докладно вивчений ряд засобів зменшення опору тертя. Дана робота присвячена дослідженню можливості використання методу зниження турбулентного тертя за допомогою дрібноребристої поверхні (ріблети), ребра якої спрямовані уздовж потоку.

Аналіз публікацій

Одним із перших досліджень у цьому напрямку можна вважати працю [1], в 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 висловлено припущення, що спостерігається ефект, який обумовлений придушенням турбулентності в кутових областях внаслідок малості поперечних масштабів.

У праці [2] розглянута фізична картина течії біля ріблетів, де вказується, що всередині ріблетів потік рухається дуже повільно, а бічні переміщення рідини поблизу ріблетів стають незначними.

У праці [3] запропонована модель процесу, яка ґрунтується на ідеї про те, що зниження опору не є безпосереднім результатом взаємодії з турбулентною структурою, а визначається характером течії в'язкого середовища в рифленій поверхні. Течії в канавках відповідають малі числа Рейнольдса. Зона за своїм характером є повзучою, тому місцеві дотичні напруги на стінці малі і максимальні на верхівці канавки через наявність градієнта швидкості. У такому випадку менша частка поверхні витримує великі дотичні напруги. У праці [4], де розглянуто вплив оребрення на частоту турбулентних викидів і опір тертя при дозвуковій швидкості потоку, висота

ребер h прямокутної форми варіювалася в діапазоні $h^+ = 45 - 111$, а відстань S між ними змінювалася в межах $S^+ = 190 - 373$. Значення h і S подані в безрозмірному вигляді в одиницях закону стінки:

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

де u_τ – динамічна швидкість; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

При певних значеннях висоти і 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 праці [4] згадано про інші експериментальні дослідження впливу прямокутного оребрення на опір, в яких були отримані протилежні результати: при $h^+ = 70 - 150$ та $S^+ = 50 - 1100$ оребрення приводило до збільшення сили тертя на 10 – 50%. У цій роботі відзначено, що трикутне ребро за інших рівних умов менше збільшує омивану потоком поверхню.

Досить докладне експериментальне дослідження турбулентного опору тертя оребрених поверхонь проведено в працях [4–9], де було досліджено декілька десятків поверхонь із різним профілем оребрення. Для штучного збільшення товщини примежового шару використовувався дровий турбулізатор.

У працях [4; 7] вказуються оптимальні розміри ріблетів: $h^+ \approx S^+ \approx 10 - 14$. Використання ріблетів на пластині і тілах обертання, тобто в течії практично без градієнта тиску, призвело до зниження опору до 7 – 8%, а в деяких випадках до 10%.

Мета досліджень

У результатах досліджень оребрених поверхонь відносна зміна тертя наводиться залежно від безрозмірної відстані між ребрами S^+ у координатах закону стінки. Це пов'язано з гіпотезою про вплив подовжніх канавок на зародження і розвиток турбулентних пристінних викидів у ла-

мінарному підшарку. Як відомо, область зародження турбулентних викидів обмежена за товщиною прилежого шару координатою $y^+ \approx 30$, а поперечна відстань між ними в безрозмірному вигляді $Z^+ \approx 100$. Тому вважається за доцільне виконати дослідження на поверхні такої геометрії, щоб співвідношення характерних розмірів її оребрення було близьким до згаданих параметрів.

Експериментальне дослідження

У даній роботі наведені результати експериментального дослідження опору тертя плоскої оребреної поверхні порівняно з гладкою поверхнею. Геометричні параметри оребрення наступні. Перетин ребра трикутний з кутом при вершині 40° з округленою вершиною. Висота ребра $h = 0,4$ мм. Між трикутними виступами є плоска площадка, розмір якої дорівнює основі ребра. Крок між ребрами $S = 0,8$ мм. Відношення $S/h = 2$ і близьке до співвідношення між параметрами Z^+ і y^+ .

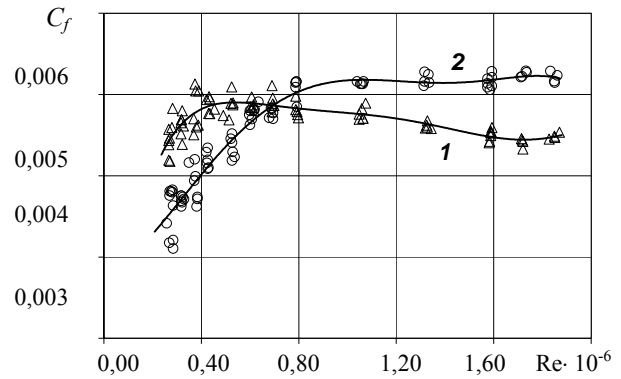
Поверхні, що тестувалися, були виконані у вигляді тонких прямокутних пластин, які розташовувалися на моделі. Модель являла собою тонкий циліндр (подовження $\lambda_{\text{цил}} > 40$) із хрестоподібно закріпленими на ній чотирма досліджуваними тонкими прямокутними пластинами малого подовження $\lambda_{\text{пл}} = L_{\text{пл}} / b_{\text{пл}} \approx 0,33$, де $L_{\text{пл}}$, $b_{\text{пл}}$ – відповідно розмах і хорда пластини. Відношення розмаху пластини до діаметра циліндра $L_{\text{пл}} / d_{\text{цил}} \approx 12,5$.

Випробування проводилися в гідродинамічній трубі з закритою робочою частиною, що 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 0,3 м/с до 2,5 м/с. Швидкість потоку реєструвалася приймачем швидкісного напору, чутливим елементом якого був напівпровідниковий калібрований термокомпенсований диференціальний датчик тиску з нормованим вихідним сигналом. Модель устанавлювалася всередині робочої ділянки гідродинамічної труби і своєю хвостовою частиною кріпилася до тензометра з напівпровідниковими датчиками, що розташовані всередині обтічника державки. У дослідях вимірювалися значення швидкості потоку і гідродинамічний опір подовжньо обтічної моделі, що через аналого-цифровий перетворювач реєструвалися в ПЕОМ. Число Рейнольдса в дослідях змінювалося від $Re = 2,4 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^6$.

Результати багатократних вимірювань опору турбулентного тертя гладкої поверхні відтворювалися з ймовірною похибкою $\pm 2,1$ % при малих

швидкостях потоку. Зі зростанням швидкісного напору похибка зменшувалася до значень $\pm 0,68\%$ наприкінці діапазону вимірювань.

Виміряні значення коефіцієнта тертя за числами Рейнольдса для гладкої пластини $C_{F_0}(Re)$ і для поверхні з мікробороздками $C_{F_{\text{rib}}}(Re)$ зображені на рисунку.



Коефіцієнт гідродинамічного тертя залежно від числа Рейнольдса:

1 – для гладкої пластини $C_{F_0}(Re)$; 2 – для поверхні з мікробороздками $C_{F_{\text{rib}}}(Re)$

Дані для гладкої пластини цілком задовільно узгоджуються з відомими результатами [10].

Результати вагових вимірювань випробуваних поверхонь для найбільш характерних режимів обтікання наведені в таблиці. Дані подані у вигляді залежності відносного коефіцієнта тертя ξ від числа Рейнольдса, де

$$\xi = [(C_{F_0} - C_{F_{\text{rib}}}) / C_{F_0}] 100\%.$$

Гідродинамічна ефективність дрібноребристої поверхні при різних числах Рейнольдса

Re · 10 ⁻⁶	Smooth	Riblet			ξ , %
	$C_{F_0} \cdot 10^3$	$C_{F_{\text{rib}}} \cdot 10^3$	S^+	h^+	
0,28	5,48	4,57	11,94	6,0	16,6
0,32	5,66	4,73	13,8	6,9	16,4
0,40	5,82	5,02	17,0	8,5	13,7
0,70	5,85	5,85	30,0	15	0
1,20	5,70	6,17	51,2	25,6	-8,2
1,60	5,48	6,20	68,0	34,0	-13

Висновки

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, у порівнянні з гладкою пластиною, досягає більших значень і становить 14 – 16,5%, а оптимальні значення параметра S^+ , що відпові-

дають мінімуму поверхневого тертя, лежать у більшому діапазоні $S^+ \approx 12 - 20$.

Із збільшенням швидкості підвищення опору оребреної поверхні порівняно з гладкою пластиною, відбувається не настільки інтенсивно. У дослідах коефіцієнт тертя не досягнув значень, що відповідають перевищенню площі змоченої поверхні, що для оребреної моделі на 53% більше, ніж у гладкої пластини. Це може вказувати на структуруючу дію ріблетів, що призводить до підвищення стійкості пристінних когерентних вихрових структур у примежовому шарі.

Список літератури

1. *Eckert E.R., Irvine T.F.* Flow in corners of passages with noncircular cross sections // *Trans. ASME*. – 1956. – Vol. 78. – №4. – 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. – № 0548. – P. 8.
3. *Galagher T.A., Thomas A.S.W.* Turbulent boundary layer characteristics over streamwise grooves // *AIAA Pap.* – 1984. – № 2185. – P. 9.
4. *Уолли 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. – № 1161. – P. 11.
6. *Walsh M.J.* Turbulent boundary layers drag reduction using riblets // *AIAA Pap.* – 1982. – № 0169. – P. 8.
7. *Экспериментальное исследование влияния продольного оребрения на сопротивление трения плоской пластины / Г.В. Енютин, Ю.А. Лашков, Н.В. Самойлова и др.* // *Изв. АН СССР. МЖГ*. – 1987. – №2. – С. 140–145.
8. *Park S.-R., Wallace J.M.* Flow alteration and drag reduction by riblets in boundary layer // *AIAA Journal*. – 1994. – Vol. 32, №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. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 742 с.

Стаття надійшла до редакції 19.01.05.

В.И. Коробов, Н.А. Клешня

Влияние продольных микробороздок на гидродинамическое сопротивление трения пластины

С помощью весовых измерений в гидродинамической трубе показано, что для мелкоробристой продольно обтекаемой поверхности существует диапазон параметров, в котором сопротивление турбулентного трения меньше, чем у гладкой плоской пластины с такой же площадью проекции. При этом максимальное снижение коэффициента трения за счет оребрения составило до 16%.

V.I. Korobov, N.O. Kleshnya

The influence of longitudinal micro grooves on hydrodynamic friction drag of a plate

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 plane of the same projected area. Maximum drag reduction due to ribbing is up to 16%.