

Streszczenie

Modelowanie numeryczne turbulentnej warstwy przyściennej na powierzchniach falistych i nieregularnych

Piotr Kamiński

Niniejsza rozprawa poświęcona jest pasywnemu, t.j. niewymagającemu zewnętrznego źródła energii, sterowaniu turbulentną warstwą przyścienną (ang. turbulent boundary layer, TBL) poprzez odpowiednie kształtowanie pofalowanej powierzchni ściany (ang. wavy wall, WW). Rozprawa oparta jest na pięciu artykułach (Papers 1–5) oraz jednym preprincie (Paper 6). Praca koncentruje się na dwóch zagadnieniach związanych z aerodynamiką i wymianą ciepła. Główny nacisk położono na pierwsze z nich, gdzie jako cel przyjęto redukcję bądź eliminację oderwania TBL. Zjawisko to, wywołane dodatnim gradientem ciśnienia (ang. adverse pressure gradient, APG) i zachodzące, gdy naprężenie styczne na ścianie zanika ($\tau_w=0$), stanowi fundamentalny problem w aerodynamice, prowadząc do wzrostu współczynnika oporu i znacznych strat energii. Historycznie, w literaturze badano liczne metody kontroli przepływu, oddziałujące w sposób pasywny na przepływ przyścienny i umożliwiające jego modyfikację w zależności od potrzeb. Spośród nich WW, będąca głównym obiektem badań w niniejszej pracy, wyłania się jako obiecujące rozwiązanie pozwalające sterować oderwaniem TBL.

Cztery artykuły (Papers 1–4), stanowiące cykl badań, poświęcono sterowaniu oderwaniem TBL. W pierwszym etapie (Paper 1) zastosowano symulacje wielkich wirów (ang. Large Eddy Simulations, LES) do analizy przepływu pod wpływem APG oraz zerowego gradientu ciśnienia (ang. zero pressure gradient, ZPG) nad powierzchniami płaskimi i pofalowanymi. Szczególną uwagę poświęcono badaniom fizyki przepływu w pobliżu ściany. Zastosowano prostopadłościenny obszar obliczeniowy, stanowiący uproszczenie rzeczywistej konfiguracji przepływowej, a gradient ciśnienia narzucano poprzez warunki brzegowe. Ze względu na ograniczoną długość domeny nie zaobserwowano oderwania; wnioski na jego temat wyciągano z analizy zmian τ_w – jego wzrost wskazuje na przesunięcie oderwania w dół przepływu. Wyniki LES, zweryfikowane danymi eksperymentalnymi, pokazują, że WW o sinusoidalnym kształcie prowadzi do zwiększenia τ_w . Ponadto zaobserwowano, że globalny gradient ciśnienia silnie wpływa zarówno na skuteczność WW w modyfikowaniu τ_w , jak i na

struktury przepływu rozwijające się nad ścianą. Następnie przeprowadzono analizę parametryczną (Paper 2), w której zbadano wpływ amplitudy WW (A) i długości fali (λ) na τ_w . Wyniki wskazują, że oba parametry w sposób istotny determinują τ_w , umożliwiając jego zwiększenie lub zmniejszenie względem konfiguracji referencyjnej. Zidentyfikowano optymalną kombinację A i λ , która zapewnia istotny wzrost τ_w w porównaniu z przypadkiem referencyjnym, co powinno skutkować opóźnieniem separacji. W oparciu o te obserwacje, w następnym kroku badań, wprowadzono udoskonalenie kształtu WW poprzez jego pochylenie zgodnie lub przeciwnie do kierunku przepływu (Paper 3). Modyfikacja ta prowadzi do wzrostu τ_w o 70% względem najlepszego WW o sinusoidalnym kształcie z Paper 2. Co więcej, pochylenie WW eliminuje lokalne oderwanie w zagłębieniach WW, redukując całkowity współczynnik oporu (C_d) o 14%. W końcowym etapie badań (Paper 4), związanym z głównym celem rozprawy, zastosowano domenę obliczeniową odzwierciedlającą geometrię profilu lotniczego. Zastosowanie takiej konfiguracji umożliwiło odwzorowanie warunków przepływu zbliżonych do rzeczywistych i, w szczególności, pozwoliło na zbadanie wpływu WW na przepływ w obszarze oderwania. Wykazano, że zintegrowanie WW z krzywizną profilu lotniczego zapewnia przyrost τ_w oraz zaobserwowano przesunięcie punktu oderwania w dół przepływu, potwierdzając wnioski z wcześniejszych prac (Papers 1–3). Dodatkowo, przeprowadzona analiza czułości na liczbę Reynoldsa (Re) ujawniała, że skuteczność WW w zwiększaniu τ_w jest silnie zależna od warunków napływowych; działanie WW słabnie wraz ze spadkiem Re .

Zaobserwowana w Papers 1–4 możliwość znacznego przesunięcia punktu oderwania TBL za pomocą WW skłoniła do podjęcia dalszych badań (Papers 5–6), w których poszerzono jej zastosowanie i wykorzystano ją do intensyfikacji wymiany ciepła w przewodzie cylindrycznym (ang. pipe) oraz kanale (ang. channel). Analiza ta jest szczególnie ważna, ponieważ obie te konfiguracje geometryczne są elementami kompaktowych wymienników ciepła, a ich kształt w istotny sposób wpływa na pola przepływu. Odpowiednio zaprojektowana ich powierzchnia może zatem znacząco poprawić sprawność termiczną wymiennika. Celem tego etapu badań jest optymalizacja kształtu WW tak, aby maksymalnie zintensyfikować wymianę ciepła przy minimalnych stratach ciśnienia. Dla przewodu cylindrycznego optymalna ściana charakteryzuje się dwoma zagłębieniami WW skierowanymi na zewnątrz (względem osi przepływu), natomiast dla kanału – narastającą amplitudą WW. Taki kształt sprzyja powstawaniu obszarów recyrkulacji wewnątrz zagłębień, co intensyfikuje mieszanie płynu i

zwiększa wymianę ciepła między grzaną ścianą a rdzeniem przepływu, przy jednoczesnym utrzymaniu niewielkich strat ciśnienia.