



Конструкція і міцність

ПОБУДОВА CFD МОДЕЛІ ТЕРМОПАРИ ГТД

Я. С. Веклич

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

У сучасних газотурбінних двигунах (ГТД) критично важливим є точне вимірювання температури газу. Ця інформація є необхідною для реалізації ефективного керування двигуном, діагностики його технічного стану та контролю ресурсу. Особливої складності набуває завдання вимірювання температури в умовах нестаціонарних режимів. Неточність у динамічному вимірюванні може призводити до двох протилежних, але однаково небажаних наслідків: або до штучного обмеження температури й втрати рвучкості, або до небезпечного перегріву та зниження ресурсу елементів турбіни, зокрема — прогару лопаток. Враховуючи постійне зростання робочих температур у сучасних ГТД, точність термометрії залишається одним із ключових викликів.

Для вимірювання температури газу традиційно використовуються термопари, які являють собою пару спаїв з двох дротів (хромель та алюмель), гарячий спай закріплений в корпусі з жароміцної сталі за допомогою корундового ізолятора. При зміні температури на гарячій частині спаю виникає електрорушійна сила (ЕРС) яка поступає на автоматику системи керування двигуном. Незважаючи на конструктивну простоту, вони мають складну теплову динаміку. Їхній сигнал формується з тепловою інерційністю, обумовленою теплоємністю спаю, корпусу, ізоляторів та інших конструктивних елементів.

Сьогодні відомі спрощені математичні моделі термопари, серед яких найбільш поширені одноємнісні(1) та двоємнісні(2). Одноємнісна модель описує тільки теплову інерцію спаю та через простоту опису рівняння, може описувати невеликі температурні зміни. Двоємнісна модель, враховує вплив теплообміну між спаєм та корпусом в якому вона встановлена. Хоча вона має більш складний запис, ця модель має більшу точність у порівнянні з одноємнісною моделлю.

$$\tau \frac{dT_{\text{ТП}}}{dt} + T_{\text{ТП}} = T_{\Gamma}, \quad (1)$$

$$\tau_1 \tau_2 \frac{d^2 T_{\text{ТП}}}{dt^2} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{dT_{\text{ТП}}}{dt} + T_{\text{ТП}} = \tau \frac{dT_{\Gamma}}{dt} + T_{\Gamma}. \quad (2)$$

Існують також моделі з трьома тепловими ємностями, які дозволяють частково враховувати складність внутрішнього теплообміну. Проте в інженерній практиці залишається відкритим питання: чи є триємнісна модель універсальним компромісом між точністю та швидкодією, чи в окремих випадках доцільно використовувати модель вищого або нижчого порядку? Важливо не лише врахувати теплову інерційність, а й коректно оцінити залежність динамічних параметрів моделі від геометрії, положення термопари в потоці, властивостей матеріалів та режиму обтікання.

Для надання обґрунтованих відповідей на ці питання використовується точна базова модель термопари, створена на основі методу скінченних елементів у



середовищі Ansys Fluent. Така CFD-модель дозволяє врахувати реальні геометричні та теплофізичні параметри, визначити вплив характеру потоку, а також глибоко проаналізувати всі процеси теплопереносу у зоні чутливого елемента. Попри високу обчислювальну складність, така модель виступає еталоном, на основі якого можливо дати ґрунтовні відповіді на ключові питання: яким порядком слід обмежитися при побудові спрощеної моделі? Які явища слід враховувати, а якими можна знехтувати без суттєвої втрати точності? Як впливають параметри потоку та геометрія конструкції на перехідну характеристику термопари? Такий підхід надає можливість встановити зв'язок між геометрією термопари, параметрами потоку та її динамічним відгуком.

У межах побудови CFD-моделі особливу увагу приділено вибору моделі турбулентності. Після порівняння кількох варіантів було обрано модель $k-\omega$ SST, яка поєднує переваги моделей $k-\epsilon$ та $k-\omega$. Цей вибір обумовлений її здатністю точно відтворювати поведінку потоку поблизу стінки без необхідності застосування емпіричних пристінкових функцій, що критично важливо при моделюванні процесів теплообміну поблизу поверхні термопари. До того ж, ця модель стійка до сильних градієнтів та локальних відривів потоку, що характерно для умов обтікання термопари високошвидкісним газовим потоком. Налаштування сітки з контролем параметра y^+ дозволяє гарантувати адекватність опису пристінкових явищ.

На поточному етапі роботи створено тривимірну модель обчислювальної області, здійснено генерацію сітки (рис.1), підібрано модель турбулентності. Виконано попередні розрахунки в усталеному режимі (рис.2) з метою оцінки якісної адекватності, збіжності та стійкості результатів, які показали відповідність моделі фізичним очікуванням і дають підстави для переходу до моделювання нестационарних режимів.

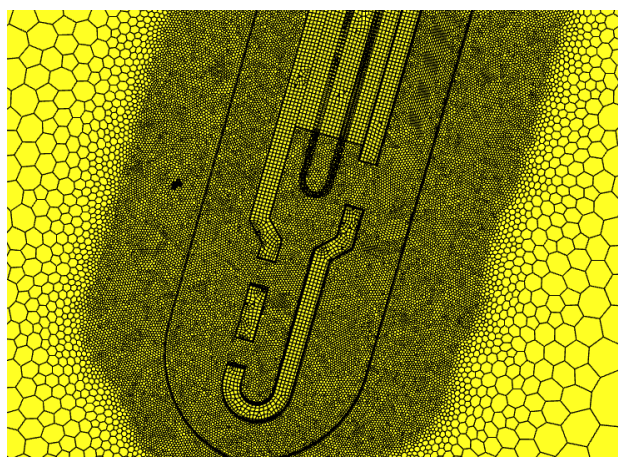


Рис.1 – Скінченно-елементна сітка

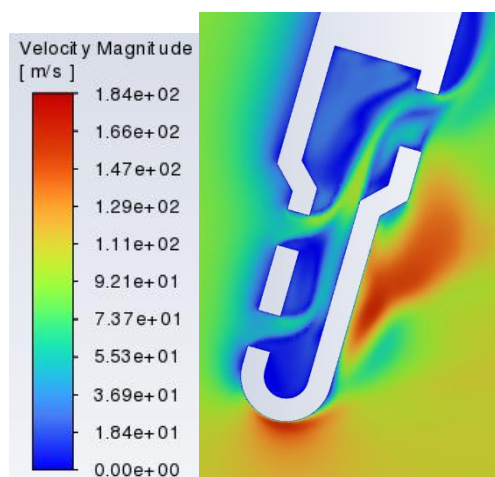


Рис.2 – Розподіл швидкості вздовж площини симетрії

Метою подальшої роботи є дослідження перехідних характеристик термопари на основі CFD-розрахунків, побудова спрощеної моделі заданого порядку та ідентифікація її параметрів залежно від умов обтікання та конструктивних особливостей. На основі цього планується сформулювати методику побудови швидкодіючих моделей термопар, придатних до впровадження в системи керування, моніторингу та діагностики ГТД.