



Рисунок 3 – Варіант підігріву циліндрів пневмодвигуна за допомогою індукційного нагріву

Література

1. Концепция создания пневматического двигателя для автомобиля: монография / А.И. Воронков, Д.Б. Глушкова, В.А. Карпенко и др. – Харьков : ХНАДУ, 2019. – 256 с.

2. Патент на корисну модель 151743 Україна, МПК F02В 47/10. Спосіб роботи поршневого теплового двигуна з індукційним підігрівом повітря у вхідному каналі / Гнатов А. В.; Аргун Щ. В.; Воронков О. І.; Гнатова Г. А.; Нікітченко І. М. – № u202107638; заяв. 28.12.2021; опубл. 07.09.2022, бюл. № 36.

3. Патент на корисну модель 151744 Україна, МПК F02В 47/00. Спосіб роботи поршневого теплового двигуна з індукційним підігрівом повітря у циліндрах / Гнатов А. В.; Аргун Щ. В.; Воронков О. І.; Гнатова Г. А.; Нікітченко І. М. – № u202107641; заяв. 28.12.2021; опубл. 07.09.2022, бюл. № 36.

Петухов Ілля Іванович, к.т.н., доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» ilya2950@gmail.com

Лисиця Олексій Юрійович, к.т.н., доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» a.lisitsa@khai.edu

CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКОРОЗПОДІЛУ ТА ТЕПЛООБМІНУ В ЕЛЕМЕНТАХ СИСТЕМИ ПОДАЧІ ВОДНЮ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

На сьогоднішній день можливості підвищення енергетичної та екологічної ефективності двигунів на вуглеводневих паливах практично

вичерпані. Серед альтернативних палив, особливо для двигунів внутрішнього згорання, беззаперечним лідером є водень. Він має найвищу масову теплоту згорання, не утворює вуглецевих викидів, однак відрізняється дуже низькою густиною та високим коефіцієнтом дифузії, а у рідкому стані ще й низькою температурою зберігання. Усе це суттєво ускладнює реалізацію потенціалу водню як палива. Тому методи накопичення водню поряд з технологіями його виробництва та транспортування активно удосконалюються з урахуванням енерго-економічних показників.

Стиснення та зрідження є основними способами ефективного накопичення водню на транспортних засобах. Для використання в газотурбінних двигунах ефективним рішенням є зберігання водню у рідкому стані. Кріогенні компоненти доцільно заправляти у паливні баки в переохолодженому (нижче температури насичення при атмосферному тиску) стані. Це зменшує втрати на випаровування, збільшує кавітаційний запас, густину та холодоресурс рідини. Однак низькі температури компонентів та вибухонебезпечність водню значно ускладнюють реалізацію охолодження, а отже – ці питання також потребують детального вивчення.

Використання рідкого водню додатково ускладнюється реалізацією парорідинного стану потоку на окремих етапах технологічного циклу. Такі парорідинні стани сильно змінюють характер течії і теплообміну, а також умови реалізації критичних явищ в потоці. Достовірний опис теплофізичних властивостей водню і врахування режимів течії у всьому діапазоні робочих та геометричних параметрів є обов'язковими умовами при математичному моделюванні процесів транспортування від бака до камери згорання, а також в усіх елементах системи подачі палива.

Ступінь деталізації процесів в потоці, а також рівень розрахункової моделі визначаються задачею, що необхідно вирішити. Так, для швидкоплинних перехідних процесів у трубопроводах та інших елементах системи подачі водню використовується CFD-моделювання потоку в тривимірній нестационарній постановці. Для окремих елементів системи подачі палива раціонально розглядати двовимірну чи одновимірну моделі з відповідними картами режимів течії киплячого водню.

Для математичного моделювання течії водню використовуються моделі механіки однофазних і гетерогенних середовищ з відповідними граничними умовами. Для розрахунку теплообмінного апарату чи трубопроводу без теплоізоляції задача зовнішнього теплообміну вирішується з урахуванням осідання на зовнішній стінці конденсованої фази (водяного льоду і компонентів повітря).

При CFD-моделюванні теплогідролічних процесів у водневому двигуні використовується RANS-підхід, оскільки він вважається для даного класу задач найбільш надійним та потребує відносно небагато комп'ютерних ресурсів у порівнянні з іншими підходами. Проте для деяких процесів, зокрема з можливими вираженими зонами інтенсивної турбулентності, доцільно використовувати LES-підхід.

З урахуванням того, що на сьогоднішній день питання моделювання

однофазних течій вивчені достатньо, найбільший інтерес представляють питання опису саме багатofазних течій. Для цього при CFD-моделюванні використовуються моделі багатofазного потоку «VOF» і «Euler». Незважаючи на те, що Ейлерова модель є гетерогенною, а отже більш точною, для ряду задач доцільніше використовувати гомогенну модель «VOF». Такий спрощений підхід виправданий у випадках моделювання складної геометрії і використання розрахункових сіток з великою кількістю елементів, а також – коли швидкості рідкої і газоподібної фаз водневого потоку є близькими.

Для моделювання більшості теплогідравлічних процесів в системі подачі водневого палива застосовується модель турбулентності «Realizable k-ε». Для описання течії в теплообмінному апараті та деяких елементах з можливим інтенсивними локальними вихровими зонами альтернативою може виступити модель турбулентності «k-ω». Задача може розглядатися як у стаціонарній, так і у нестаціонарній постановці, для чого використовуються «Steady» і «Transient» вирішувачі, відповідно.

При моделюванні процесів в окремих елементах необхідне врахування теплоізоляції, без якої внаслідок великого градієнту температури між внутрішнім контуром та зовнішнім середовищем фактично неможливе транспортування водню в рідкому стані. Вакуумно-порошкова теплоізоляція забезпечує ефективний коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{эф}=(1...8)\times 10^{-3}$ Вт/(м К), режими теплообміну в розрідженому газі реалізуються вже при тисках 1...10 Па. При багатoshаровій екрано-вакуумній теплоізоляції коефіцієнт ефективної теплопровідності становить $\lambda_{эф}=(0,04...0,8)\times 10^{-3}$ Вт/(м К), але необхідно для цього вакуумувати до 0,01 Па.

Таким чином, детальне CFD-моделювання потокорозподілу та теплообміну в елементах системи подачі водню дозволить проектувати та виготовляти ефективніші елементи двигуна та паливної системи. Це дасть можливість підвищити ефективність використання холодоресурсу рідкого водню, уникнути нерозрахункових та критичних режимів роботи систем, покращити безпеку зберігання та подачі палива, забезпечити більш контрольований процес подачі водню в камеру згоряння. Зазначене, зрештою, призведе до зниження витрати рідкого водню та маси паливної системи, зменшення забруднення навколишнього середовища, підвищення безпеки використання водню в якості палива.