

УДК 629.7.035.03

Л.Г. Волянська, канд. техн. наук
 О.В. Драч
 Хагані Курош (Іран)

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВХІДНОГО ПРИСТРОЮ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА НА ПАРАМЕТРИ ТЕЧІЇ

НАУ, кафедра авіаційних двигунів
 E-mail: avsacosm@nau.edu.ua

На підставі аналізу результатів досліджень проблеми підвищення ефективності дифузорів сформульовано задачу дослідження впливу геометричних параметрів вхідного пристрою на характеристики течії та рівень втрат енергії у вхідному пристрої газотурбінного двигуна.

The analysis of research results of increase a diffuser efficiency problem has been done. Research problems of inlet geometrical parameters influence on flow characteristics and a level of energy loss in inlet of the gas-turbine engine are generated on the basis of this analysis.

Вступ

Один із найважливіших елементів силової установки літальних апаратів, які визначають її ефективність – вхідний пристрій (повітрозабирач). Розміри повітрозабірних пристроїв, їх кількість, характер розташування, режими роботи істотно змінюють умови обтікання й аеродинамічні властивості літального апарата, що, у свою чергу, впливає на тягові і економічні характеристики двигунів.

Розвиток двигунобудування потребує розробки повітрозабирачів нових схем і всебічного вивчення їх аеродинаміки.

Під час проектування сучасних двигунів значну роль відіграє процес профілювання проточної частини, особливо для надзвукових швидкостей течії робочого тіла.

Вхідний пристрій служить для підведення повітря до компресора з визначеною швидкістю. Тому вхідний пристрій профілюється так, щоб перетворення швидкісного напору повітря, яке надходить у польоті, у статичний тиск відбувається повністю або в значній частині до входу в двигун. Це супроводжується вирівнюванням поля тиску повітряного потоку, який надходить до компресора.

Не аналізуючи усього газодинамічного тракту, розглянемо основні питання та вимоги щодо профілювання вхідного каналу газотурбінного двигуна. За своїми характеристиками вхідний пристрій має форму дифузора, тому надалі будемо називати його дифузором.

Постановка завдання

Основними вимогами до вхідного пристрою [1] є:

- малі втрати повного тиску повітря в процесі його підведення до двигуна;
- мінімальний зовнішній опір;

- рівномірність повітряної течії (поля швидкостей і тиску) на вході в двигун;
- стабільність повітряної течії за будь-яких умов польоту і режимів роботи двигуна;
- простота конструкції, мала маса і габаритні розміри;
- ефективний захист двигуна від потрапляння в нього сторонніх предметів.

Під час розробки вхідного пристрою необхідно забезпечити в зоні входу в повітрозабирач формування повітряного потоку з найменшим збуренням. Тому останнім часом дослідження були спрямовані на таке:

- пошук оптимальних схем гальмування потоку в стрибках ущільнення;
- визначення впливу в'язкості на ефективність процесу гальмування потоку;
- розробку методів регулювання повітрозабирача в широкому діапазоні швидкостей;
- зниження рівня неоднорідності потоку на виході з повітрозабирача на всіх режимах польоту літального апарата;
- вирішення проблеми сумісної роботи повітрозабирача і двигуна;
- забезпечення газодинамічної стійкості силової установки.

Теоретичні та експериментальні дослідження в цьому напрямі були відображені в роботах Л.І. Сорокіна, Д.А. Огороднікова, Д.А. Брюшкова, Н.Н. Захарова, А.М. Волкова та ін.

Зокрема, для оцінки аеродинамічної довершеності вхідного пристрою було введено коефіцієнт $\sigma_{вх}$, який характеризує втрати енергії на тертя повітря об стінки каналу і виникнення вихорів під час відриву течії від стінок каналу.

Мета профілювання каналу вхідного пристрою – зменшення втрат від тертя і забезпечення безвідривності повітряної течії.

Аналіз форм дифузорів

Для течії у вхідному пристрої проблема відривання течії принципово важлива. Адже кінетична енергія при вповільненні течії перетворюється на потенціальну.

У свою чергу, підвищення статичного тиску вниз за течією сприяє виникненню відриву. Якщо є гвинт, то він уже є сильним турбулізатором течії, але й без гвинта течія в каналі, який розширюється, турбулентна.

Раніше дифузору було присвячено багато досліджень, але більшість із них носили експериментальний характер і не були безпосередньо пов'язані з процесом відривання течії.

У праці П. Чжена [2] було проаналізовано результати досліджень дифузорів Гібсоном [3], Паттерсоном [4], Полциним [2].

Гібсоном були проведені дослідження водяних течій у дифузорах різних видів. Він виготовив з дерева двадцять п'ять дифузорів різної форми та випробував їх в інтервалі середніх швидкостей течії 1,2–8 м/с.

Площа поперечного перерізу дифузорів круглої, квадратної і прямокутної форм змінювалась уздовж осі за лінійним законом.

Відношення площ перерізів становило 2,25, 4 і 9. Було визначено, що при значенні кута розкриття 2Θ , який формувався з протилежних боків дифузора, від $5,5$ до 11° розкриття, втрати енергії максимальні. Найменші втрати (13,5%) дифузора з круглим перерізом. При квадратному перерізі втрати становили від 20 до 33%.

Подібні дослідження проводив Паттерсон.

При куті розкриття $2\Theta=10\div 14^\circ$ втрати в дифузорах з прямокутним перерізом майже такі самі, як у дифузори з круглим перерізом при куті 2Θ .

При більших або менших значеннях кута 2Θ втрати в дифузори з квадратним перерізом значно вищі. Були запропоновані три оптимальних форми профільованих дифузорів:

– перша забезпечує розподіл швидкості потенційної течії $\frac{du_e}{dl} = \text{const}$ за всією довжиною дифузора (u_e – складова вектора швидкості на зовнішній межі в напрямку течії, l – характерний лінійний розмір);

– друга забезпечує розподіл швидкості потенційної течії $\frac{du_e}{dx} = \text{const}$ за всією довжиною дифузора (x – координата напрямку течії);

– третя забезпечує постійну втрату повного напору на одиницю довжини дифузора (найефективніший).

У праці [2] Чжен робить висновок, що ефективність дифузора при заданих довжині й відношенні площ переважно залежить від розподілу площ поперечного перерізу, тобто від форми самого каналу. За Гібсоном, дифузор з лінійним розподілом площ не має інших переваг, крім простої форми.

Ведерніковим [6] проведено дослідження двовимірного дифузора з прямолінійними стінками. Найменші втрати спостерігалися при куті розкриття $2\Theta=8\text{--}10^\circ$.

Після перегляду результатів цих дослідів Паттерсон запропонував такі рекомендації для розробки дифузорів:

– оптимальні кути розкриття 2Θ для дифузора з круглим поперечним перерізом $6\text{--}8^\circ$, для дифузора з квадратним поперечним перерізом – 6° , для дифузора з прямокутним поперечним перерізом, у якого дві стінки залишаються паралельними, – 11° ;

– при заданому рівні розширення найбільш ефективний дифузор з круглим поперечним перерізом;

– чим тонший примежовий шар на вході, тим більша ефективність дифузора;

– при куті розкриття більшим ніж 50 % втрати у дифузори можна знизити на 40–50 % шляхом закручування течії за законом твердого тіла або за допомогою дефлекторів, які відхиляють і закручують течію.

Якісні характеристики відривання течії були досліджені в праці Полцина [5], який використовував метод візуалізації. Було проведено дослідження впливу шорсткості стінок на місце відривання.

Відривання виникає раніше на шорсткій поверхні. Слід зазначити, що поверхню можна вважати гладкою лише умовно, бо неможливо на практиці відтворити гідравлічно гладку поверхню. Якщо примежовий шар відносно до висоти шорсткості затовстий, то таку поверхню можна умовно вважати гладкою.

Конкретні співвідношення можна знайти в спеціальній літературі, наприклад, у Г. Шліхтинга [7], де є опис детальних досліджень та огляд дослідницького матеріалу про опір течії в технічно шорстких трубах. У праці [7] знаходимо порівняльне дослідження течії у прямолінійних і криволінійних дифузорах.

На рисунку показано залежність ефективності дифузора від кута розкриття 2Θ .

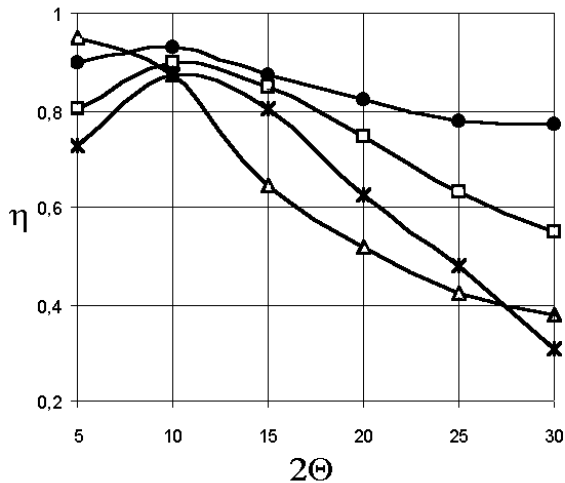
Величина η набуває максимального значення при $6^\circ < 2\Theta < 10^\circ$, потім швидко знижується.

За Г. Шліхтингом максимальна ефективність спостерігається при $3^\circ < 2\Theta < 8^\circ$.

Величина ефективності дифузора η є відношенням дійсного прирощення тиску до прирощення тиску без втрат:

$$\eta = 1 - (u_\theta / u_e)^2,$$

де $u_\theta = u$, якщо товщина примежового шару $y = \theta$; u – складова вектора швидкості в напрямку течії; θ – товщина втрати імпульсу примежового шару.



Ефективність дифузора:

Δ – $A_1/A_2 = 4$ – прямокутний поперечний переріз [4];

□ – $A_1/A_2 = 4$ – квадратний поперечний переріз [4];

× – прямокутний поперечний переріз [3];

● – $A_1/A_2 = 2, 3, 4$ – круглий поперечний переріз [2];

A_1 – площа входу; A_2 – площа виходу; 2Θ – кут розкриття дифузора

Порівнюючи дифузори з однаковим відношенням тисків, можна зробити висновок про те, що при малих кутах розкриття превалюють втрати на тертя, а при великих – викликані відривом і збуренням течії.

Досліджено також вплив напрямних лопаток на характеристики дифузоров [2]. Характеристики дифузора поліпшуються при використанні коротких або довгих напрямних лопаток.

Зворотна течія за таких умов зникає взагалі, або послаблюється; напрямок основної течії стає більш стійким і впорядкованим.

Підвищення ефективності дифузоров за допомогою розподільних стінок запропонував Ідельчик [8].

Процес створення нових вхідних пристроїв базується на досвіді вдосконалення існуючих зразків і доведенні серійних екземплярів у процесі накопичення і аналізу дослідних даних [9].

У праці [9] вирішується проблема вибору оптимального компоновання двигуна на літальному апараті для зниження протидії вибраної аеродинамічної конфігурації.

Розміщення повітрозабирачів і правильний вибір їх двовимірної орієнтації дозволяють на 46% знизити величину протидії всієї конфігурації за нульового кута атаки.

Розрахунки, проведені в широкому діапазоні визначальних газодинамічних і геометричних параметрів, допомагають проводити дослідження, які служать основою вибору оптимальних конфігурацій і пояснюють особливості течії [10].

За результатами фізичного дослідження течії в дозвукових повітрозабирачах різної геометричної форми встановлено, що причина збільшення рівня неоднорідності потоку на вході в двигун для неvistупаючих за мідель фюзеляжу повітрозабирачів – утворення двох вихрових джгутів, які стікають з двох бокових крайок і прямують до входу в двигун [11].

В аеродинаміці чисельний дослід доповнює її дослідну і теоретичну гілки, являючи собою альтернативний і економічно ефективний засіб моделювання реальних течій. Прикладом є результати сумісного дослідного і розрахункового дослідження надзвукових турбулентних течій у повітрозабирачах сучасних і перспективних літальних апаратів [12–14].

У праці [13] проведено аналіз характеристик повітрозабирача й основних фізичних особливостей течії за різних кутів атаки і числа Маха. Коефіцієнт відновлення повного тиску повітрозабирача при збільшенні кута нахилу бокових стінок від 0 до 40° зростає на 0,01.

У результаті досліджень отримано візуальні зображення течій і проведено вимірювання розподілу статичного тиску на поверхні моделі, поля тиску гальмування в поперечних перерізах каналу і поверхні тертя [12; 14].

Розрахункові дослідження виконано на базі повних осереднених рівнянь Нав'є–Стокса, доповнених двопараметричною моделлю турбулентності Уїлкокса.

Досліджено питання щодо впливу стану примежового шару і положення ламінарно-турбулентного переходу на течію в каналі.

Урахування стану примежового шару, що розвивається на поверхні верхньої й нижньої стінки каналу, істотно змінює хвильове зображення течії та розподіл параметрів течії.

Об'єднання результатів проектування з використанням програмних комплексів і результатів дослідів дозволяє зменшити витрачений на проектування час і забезпечити більш широкий аналіз можливих проектних рішень. Вплив форми на розвиток примежового шару і на характеристики повітрозабирача досліджено в праці [15].

Отримані результати показують, що вплив форми елемента конструкції на параметри примежового шару істотний, і його необхідно враховувати під час вибору конфігурацій елементів аеродинамічних компоновань літальних апаратів.

Висновки

Основні завдання у вирішенні проблеми інтеграції параметрів і характеристик вхідного пристрою та газотурбінного двигуна в цілому, які ще не мають прийнятної для практики конструкції і експлуатації літальних апаратів, можна сформулювати таким чином:

- дослідження характеристик вхідного пристрою і впливу неоднорідності потоку перед двигуном на його характеристики;
- дослідження щодо вдосконалення параметрів і характеристик вхідних пристроїв авіаційних газотурбінних двигунів з повітряними гвинтами;
- програми оптимізації параметрів вхідного пристрою з урахуванням багаторежимності роботи силової установки й адаптації її до умов польоту;
- дослідження впливу зривання потоку і запуску повітрязабирача на газодинамічну стійкість двигуна.
- розроблення методики розрахунку тривимірної течії в дифузори та рекомендацій щодо профілювання каналу вхідного пристрою.

Література

1. *Теорія теплових двигунів* / Ю.М. Терещенко, Л.Г. Бойко, С.О. Дмитрієв та ін. // За ред. Ю.М. Терещенко. – К.: Вища шк., 2001. – 382 с.
2. *Чжен П.* Отрывные течения. Т.1. – М.: Мир, 1972. – 299 с.
3. *Gibson A. H.* On the Flow of Water Through Pipes and Passages Having Converging or Diverging Boundaries // Proc. Roy. Soc. London. – A, 83. – №563. – P. 50–72 (March 1910).
4. *Patterson G.N.* Modern Diffuser Design // Aircraft Engine. – 10. – №115. – P. 267–273 (September 1938).
5. *Polzin J.* Strömungsuntersuchungen an einem ebenen Diffusor // Ing.-Arch. – 1940. – №5. – S. 361–385.
6. *Ведерников А.Н.* Экспериментальное исследование движения воздуха в плоском расширяющемся канале // Тр. ЦАГИ. – 1926. – Вып. 21.
7. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
8. *Идельчик И. Е.* Повышение эффективности диффузоров с помощью распределительных стенок // Теплоэнергетика. – 1958. – №8. – С. 21–26.
9. *Воеводенко Н.В., Губанов А.А., Притулко Т.М.* Решение задачи оптимизации сверхзвуковой компоновки крыло-фюзеляж с воздухозаборниками с учетом эффектов полезной интерференции // Модели и методы аэродинамики: Материалы I и II междунар. школ-семинаров. – М.: МЦНМО, 2002. – С. 73–75.
10. *Численное моделирование и экспериментальное исследование сверхзвуковых турбулентных течений в плоских каналах переменного сечения* / А.В. Борисов, И.А. Бедарев, Н.Н. Федорова и др. // Модели и методы аэродинамики: Материалы I и II междунар. школ-семинаров. – М.: МЦНМО, 2002. – С. 68–70.
11. *Пиотрович Е.В., Старухин В.П.* Физические исследования течения в дозвуковых воздухозаборниках // Модели и методы аэродинамики: Материалы I и II междунар. школ-семинаров. – М.: МЦНМО, 2002. – С. 47–48.
12. *Иванюшкин А.К., Карпов Е.В.* Исследование физических особенностей обтекания воздухозаборников при больших закритических углах атаки // Модели и методы аэродинамики: Материалы I и II междунар. школ-семинаров. – М.: МЦНМО, 2002. – С. 92–93.
13. *Головина Н.В., Коротков Ю.В.* Численный расчет обтекания модели лоткового воздухозаборника сверхзвуковым потоком идеального газа // Модели и методы аэродинамики: Материалы I и II междунар. школ-семинаров. – М.: МЦНМО, 2002. – С. 79–80.
14. *Федорова Н.Н., Федорченко И.А.* Математическое моделирование взаимодействия косоугольного уплотнения с турбулентным пограничным слоем // Модели и методы аэродинамики: Материалы I и II междунар. школ-семинаров. – М.: МЦНМО, 2002. – С. 52–54.
15. *Губанов А.А., Таковицкий С.А.* Расчетные исследования параметров пограничных слоев на несущих элементах различных форм в плане при их обтекании воздушным потоком с большой сверхзвуковой скоростью // Модели и методы аэродинамики: Материалы I и II междунар. школ-семинаров. – М.: МЦНМО, 2002. – С. 29–30.

Стаття надійшла до редакції 22.02.06.