



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 92255

(13) C2

(51) МПК (2009)

F01D 9/00

F01D 25/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СТУПІНЬ ТУРБИНИ

1

(21) а200902309

(22) 16.03.2009

(24) 11.10.2010

(46) 11.10.2010, Бюл.№ 19, 2010 р.

(72) ІСАКОВ БОРИС ВОЛОДИМИРОВИЧ, КОТОВ
АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ, ОСІПОВ ЄВГЕНІЙ
ВОЛОДИМИРОВИЧ, УСАТЕНКО АНДРІЙ АНАТО-
ЛІЙОВИЧ(73) ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО "НАУКОВО-
ВИРОБНИЧИЙ КОМПЛЕКС ГАЗОТУРБОБУДУ-
ВАННЯ "ЗОРЯ"- "МАШПРОЕКТ"

(56) UA 76574, F01D9/00, 15.08.2006

RU 2199016, F01D25/30, 20.02.2003

JP 62279202, F01D9/02, 04.12.1987

SU 1482282, F01D9/02, 13.07.1987

US 5203674, F01D1/02, 20.04.1993

RU 2032812, F01D25/30, F15D1/08, 10.04.1995

ХОМЫЛЕВ С.А. Особенности проектирования
авиационных высоконагруженных многоступенча-
тых газовых турбин. /Збірка наукових праць інсти-
туту проблем машинобудування ім.А.Н.Підгорного
НАН України: Вдосконалення турбоустановок ме-
тодами математичного і фізичного моделювання",
Харків, 2003, тому 1, с.211-216, рис.1(57) Ступінь турбіни, що складається з соплового
апарата з внутрішньою і зовнішньою полицями і

2

робочого колеса, що має на вході похилий дифу-
зор, що містить внутрішній і зовнішній обводи, яка
відрізняється тим, що внутрішній обвід містить
прямолінійну ділянку з межами $0,55L_d$ і $0,8L_d$ і від-
ношенням діаметрів початку і кінця ділянки
 $D_1/D_2=0,84...0,87$, за якою розташована криволіній-
на вихідна ділянка з межами $0,8L_d$ і $1,0L_d$ і відно-
шенням діаметрів початку і кінця ділянки
 $D_2/D_3=0,93...0,96$, урівень сполучена з внутрішньою
полицею соплового апарата, при цьому зовнішній
обвід містить криволінійну ділянку з межами $0,25L_d$
і $0,9L_d$ і відношенням діаметрів початку і кінця
ділянки $D_4/D_5=0,78...0,80$, за якою розташована
криволінійна вихідна ділянка з межами $0,9L_d$ і
 $1,0L_d$ і відношенням діаметрів початку і кінця діля-
нки $D_5/D_6=0,92...0,94$, урівень сполучена із зовніш-
ньою полицею соплового апарата,
де L_d - осьова довжина дифузора,
 D_1, D_2 - діаметри початку і кінця прямолінійної ді-
лянки внутрішнього обводу дифузора,
 D_2, D_3 - діаметри початку і кінця криволінійної ви-
хідної ділянки внутрішнього обводу дифузора,
 D_3, D_4 - діаметри початку і кінця криволінійної ді-
лянки зовнішнього обводу дифузора,
 D_5, D_6 - діаметри початку і кінця криволінійної ви-
хідної ділянки зовнішнього обводу дифузора.

Винахід відноситься до енергетичного маши-
нобудування і може бути використаний при проєк-
туванні і модернізації газотурбінних двигунів (ГТД),
що мають між турбінами перехідний дифузор.

Дифузор між турбінами в ГТД призначений
для підведення газового потоку від одного каскаду
турбін до іншого і перетворення кінетичної енергії
потoku в потенційну. При цьому стоїть задача за-
безпечення мінімальних втрат енергії в дифузорі і
в примикаючих до нього турбінних ступенях. Тур-
біни, що сполучаються за допомогою дифузора,
часто знаходяться на різних діаметрах, що приво-
дить до нахилу дифузора і різких змін напрямку
потoku по тракту двигуна. В результаті різких по-
воротів відбуваються відриви газового потоку і
погіршується коефіцієнт корисної дії (ККД) вузлів і

всього двигуна. ГТД з різними діаметрами турбін -
це установки для вироблення електроенергії, ГТД
авіаційного, морського і газоперекачувального
призначення. Загальною рисою таких двигунів
служить знижена частота обертання турбіни, на-
ступної за дифузором, що обумовлює її високий
діаметр і, відповідно, великий кут нахилу дифузо-
ра.

Відомі турбіни, які мають на вході нахилений
дифузор. Наприклад, турбіна з дифузором на вхо-
ді авіаційного ГТД AI-22 [С.А.Хомильов. Особли-
вості проєктування авіаційних високонавантаже-
них багатоступінчатих газових турбін. Збірка
наукових праць інституту проблем машинобуду-
вання ім.А.Н.Підгорного НАН України: "Вдоскона-
лення турбоустановок методами математичного і

(13) C2

(11) 92255

(19) UA

фізичного моделювання", Харків, 2003, тому 1, с.211-216, рис.1], турбіна з дифузorzом на вході за авторським свідоцтвом UA 76574, F01D9/00, 2006г.

У першому випадку підвищення ККД турбіни з нахиленим дифузorzом на вході може бути досягнуте за рахунок відмови від виконання внутрішнього обводу турбіни з постійним діаметром і реалізації його складної форми. Проте, при цьому ускладниться технологія виготовлення турбіни.

У другому випадку для збільшення ККД турбіни з нахиленим дифузorzом на вході запропоноване застосування дифузorzа із ступінчастим переходом обводів до соплового апарату. Такий варіант має менший ступінь дифузorzності, ніж у дифузorzа з безступінчастим переходом до соплового апарату і, на думку його авторів, має нижчі втрати повного тиску. Проте, згідно виконаним авторами даного винаходу дослідженням, зменшення ступеня дифузorzності подібного дифузorzа не приводить до зменшення в ньому втрат. У свою чергу, ступінчастий перехід обводів дифузorzа до соплового апарату викликає зростання втрат в сопловому апараті, що веде до однозначного збільшення втрат в турбіні з дифузorzом на вході.

Як прототип прийнята ступінь турбіни з розташованим на вході дифузorzом двигуна ГТД ДН80 [Ісаков Б.В., Котов А.В., Осипов Е.В., Усатенко А.А. Аеродинамічні дослідження діагонального перехідного дифузorzа осьової турбіни ГТД. Авіаційний - космічна техніка і технологія, 2007, №10, з. 28-36]. Даний двигун відноситься до класів наземного і морського застосування.

Розглянута конструкція має ряд особливостей, які роблять негативний вплив на ефективність,

Однією з таких особливостей є не плавність проточної частини при переході від дифузorzа до ступеня турбіни, що є джерелом додаткових втрат в ступені турбіни. Дифузorz складається із зовнішнього і внутрішнього обводів. На довжині дифузorzа $(0...0,5)L_d$ обводи криволінійні складної форми, з'єднуються з турбіною низького тиску, де L_d - осьова довжина дифузorzа.

На довжині дифузorzа $(0,5...1,0)L_d$ обводи прямолінійні, з'єднуються під нахилом із зовнішньою і внутрішньою полицями соплового апарату ступеня турбіни. В результаті нахилу прямолінійного внутрішнього обводу дифузorzа між ним і внутрішньою полицею соплового апарату утворюється злам, а перед ступенем турбіни створюється великий меридіональний кут потоку - кут між напрямом потоку і віссю двигуна. Великі меридіональні кути потоку приводять до додаткових втрат в ступені турбіни через відрив потоку в кореновому перетині, а також через не оптимальне обтікання середнього і периферійного перетинів.

Згідно виконаним авторами експериментальним дослідженням даного ступеня з вхідним нахиленим дифузorzом, перед і за сопловим апаратом в коренових перетинах проточної частини зафіксовано інтенсивне зменшення повного тиску. Це свідчить про відрив потоку і зменшення ККД ступеня турбіни.

В основу винаходу поставлена задача підвищення ККД ступеня турбіни, що містить вхідний

нахилений дифузorz, шляхом зміни геометрії зовнішнього і внутрішнього обводів дифузorzа.

Для вирішення поставленої задачі в ступені турбіни, що складається з соплового апарату з внутрішньою і зовнішньою полицями і робочого колеса і що має на вході нахилений дифузorz, який містить внутрішній і зовнішній обводи, згідно винаходу, внутрішній обвід містить прямолінійну ділянку, яка має межі $0,55L_d$ і $0,8L_d$ і відношення діаметрів початку і кінця ділянки $D_1/D_2=0,84...0,87$. За ним розташована криволінійна вихідна ділянка з межами $0,8L_d$ і $1,0L_d$ і відношенням діаметрів початку і кінця ділянки $D_2/D_3=0,93...0,96$. Вихідна ділянка урівень сполучена з внутрішньою полицею соплового апарату. Зовнішній обвід містить криволінійну ділянку з межами $0,25L_d$ і $0,9L_d$ і відношенням діаметрів початку і кінця ділянки $D_4/D_5=0,78...0,80$. За ним розташована криволінійна вихідна ділянка з межами $0,9L_d$ і $1,0L_d$ і відношенням діаметрів початку і кінця ділянки $D_5/D_6=0,92...0,94$, урівень сполучений із зовнішньою полицею соплового апарату,

де L_d - осьова довжина дифузorzа,

D_1, D_2 - діаметри початку і кінця прямолінійної ділянки внутрішнього обводу дифузorzа,

D_2, D_3 - діаметри початку і кінця криволінійної вихідної ділянки внутрішнього обводу дифузorzа,

D_3, D_4 - діаметри початку і кінця криволінійної ділянки зовнішнього обводу дифузorzа,

D_5, D_6 - діаметри початку і кінця криволінійної вихідної ділянки зовнішнього обводу дифузorzа.

Завдяки оптимальним значенням меж ділянок, що становлять внутрішній і зовнішній обводи дифузorzа, а також оптимальним співвідношенням діаметрів їх початків і кінців потік є вирівняним перед ступенем турбіни, що дозволило забезпечити мінімальний меридіональний кут потоку на вході в турбіну і реалізувати течію, близьку до осі двигуна. В результаті був усунений відрив потоку в кореновій частині турбіни і збільшений ККД ступеня турбіни разом з нахиленим дифузorzом на вході.

На малюнку приведено ступінь турбіни, що містить вхідний нахилений дифузorz.

На виході з турбіни 1 газогенератора розташований нахилений дифузorz, утворений зовнішнім 2 і внутрішнім 3 обводами. У вхідній частині дифузorzа розташовані опорні стійки 4 і обтічники 5 відповідних і відвідних комунікацій. За дифузorzом слідує ступінь турбіни, що складається з соплового апарату 6, який має внутрішню 7 і зовнішню 8 полиці, і робочого колеса 9. Обводи 2 і 3 дифузorzи криволінійні і мають складну форму.

Вхідні ділянки 10 і 11 відповідно зовнішнього 2 і внутрішнього 3 обводів забезпечують монотонне зростання кільцевої площі у вхідній частині дифузorzа з урахуванням наявності в ньому стійок 4 і обтічників 5.

За вхідною ділянкою 11 внутрішнього обводу 3 розташована прямолінійна ділянка 12 з межами $0,55L_d$ і $0,8L_d$ і відношенням діаметрів початку і кінця ділянки $D_1/D_2=0,84...0,87$. За нею слідує вихідна ділянка 13 з межами $0,8L_d$ і $1,0L_d$ і відношенням діаметрів початку і кінця ділянки $D_2/D_3=0,93...0,96$, урівень сполучена з внутрішньою полицею 7 соплового апарату 6.

Ділянка 13 виконана криволінійною з радіусом кривизни, який забезпечує плавне сполучення її кінця з внутрішньою полицею 7 соплового апарату 6.

У випадку, якщо початок ділянки 12 буде менше або більше $0,55L_d$, порушиться довжина ділянки 11, форма якої забезпечує монотонне зростання кільцевої площі дифузора з урахуванням наявності в ньому стійок 4 і обтічників 5, в результаті зростуть втрати тиску. Аналогічно зростуть втрати тиску за умов $D_1/D_2 < 0,84$ і $D_1/D_2 > 0,87$, оскільки при цьому значно зміняться діаметри кінця ділянки 11 і дифузор у області стійок і обтічників виявиться сильно розкритим або сильно затисненим. Якщо кінець ділянки 12 буде менше $0,8L_d$, сильно зросте його нахил при стиковці із заданим діаметром початку подальшої ділянки 13, порушиться плавне з нею сполучення і збільшаться втрати тиску. Якщо кінець ділянки 12 буде більше $0,8L_d$, зменшиться довжина ділянки 13, що також приведе до зростання втрат тиску.

Довжина ділянки 13 вибрана виходячи з умови, щоб потік на цій довжині встиг вирівнятися, за рахунок чого забезпечується мінімальний меридіональний кут потоку на вході в ступінь турбіни. Якщо початок ділянки 13 буде менше $0,8L_d$, то сильно зросте нахил попередньої ділянки 12, в результаті збільшиться кривизна поверхні внутрішнього обводу 3 дифузора, на ньому виникнуть відриви потоку і збільшаться втрати тиску в дифузори. Якщо початок ділянки 13 буде більше $0,8L_d$, то потік на ньому через малу довжину ділянки не встигне вирівнятися, в результаті перед ступенем турбіни буде присутнім значний меридіональний кут потоку і ККД турбіни зменшиться. За умови $D_2/D_3 < 0,93$ ділянка 13 матиме виражений нахил, через що перед ступенем турбіни створиться значний меридіональний кут потоку і ККД турбіни зменшиться. За умови $D_2/D_3 > 0,96$ сильно зросте кривизна внутрішнього обводу 3 дифузора, на ньому виникнуть відриви потоку і збільшаться втрати тиску в дифузори. Завдяки вибраному оптимальному відношенню діаметрів початку і кінця ділянки 13 $D_2/D_3 = 0,93 \dots 0,96$ внутрішній обвід 3 дифузора має помірну кривизну, потік на ньому стійкий, безвідривний, а сама ділянка 13 утворює плавну поверхню з попередньою ділянкою дифузора 12 і внутрішньою полицею 7 соплового апарату 6 ступеня турбіни. Завдяки цьому створюються сприятливі умови для зменшення меридіонального кута потоку на вході в ступінь турбіни і підвищення її ККД.

Безпосередньо зменшення меридіонального кута потоку здійснюється за рахунок підтискання потоку до внутрішнього обводу 3 дифузора на ділянці 14 з межами $0,25L_d$ і $0,9L_d$ і відношенням діаметрів початку і кінця ділянки $D_4/D_5 = 0,78 \dots 0,80$.

На ділянці 14 потік до внутрішнього обводу 3 підтискається максимально можливо. При цьому дотримується умова приблизної рівності кільцевої площі будь-якого подальшого перетину дифузора F_{k+1} попередньому F_k , тобто $F_{k+1}/F_k \approx 1,0$. Порушення даної умови в меншу сторону $F_{k+1}/F_k < 1,0$ приведе до розгону потоку у відповідній області дифузора і значному збільшенню втрат тиску, по-

рушення умови у більшу сторону $F_{k+1}/F_k > 1,0$ приведе до меншого зниження меридіонального кута потоку в дифузори і, в результаті, меншому підвищенню ККД ступеня турбіни. Довжина криволінійної ділянки 14 вибрана як можна більшою, з радіусом кривизни, який забезпечує виконання умови $F_{k+1}/F_k \approx 1,0$, що дозволило спільно з ділянками 12 і 13 внутрішнього обводу 3 підтиснути потік і максимально зменшити його меридіональний кут на вході в ступінь турбіни і підвищити її ККД. Початок і кінець ділянки 14, рівні відповідно $0,25L_d$ і $0,9L_d$, обмежені довжинами ділянок 10 і 15, що примикають до неї. Якщо початок ділянки 14 буде менше $0,25L_d$, то порушиться довжина ділянки 10, форма якої забезпечує монотонне зростання кільцевої площі у вхідній частині дифузора з урахуванням наявності в ньому стійок 4 і обтічників 5 і зростуть втрати тиску. Якщо кінець ділянки 14 буде більше $0,9L_d$, то сильно зросте нахил ділянки 15, що примикає до неї. В результаті на ділянці 15 і на наступній за нею зовнішній полиці 8 соплового апарату 6 виникнуть відриви потоку, що приведе до зменшення ККД ступеня турбіни. Втрати тиску зростуть за умов $D_4/D_5 < 0,78$ і $D_4/D_5 > 0,80$, оскільки при цьому значно зміняться діаметри кінця ділянки 10 і дифузор у області стійок і обтічників виявиться сильно затисненим, або сильно розкритим.

За ділянкою 14 зовнішнього обводу 2 розташована вихідна ділянка 15 з межами $0,9L_d$ і $1,0L_d$ і відношенням діаметрів початку і кінця ділянки $D_5/D_6 = 0,92 \dots 0,94$, урівень сполучена із зовнішньою полицею 8 соплового апарату 6.

Ділянка 15 виконана криволінійною з радіусом кривизни, що забезпечує плавне сполучення її кінця із зовнішньою полицею 8 соплового апарату 6.

Довжина ділянки 15 вибрана мінімально можливою виходячи з безвідривного обтікання цієї ділянки і зовнішньої полиці 8 соплового апарату 6. Якщо початок ділянки буде менше $0,9L_d$, то зменшиться довжина попередньої ділянки 14, в результаті потік підтискатиметься на меншій довжині дифузора, меридіональний кут в дифузори і перед ступенем турбіни зменшиться слабо і ККД ступеня турбіни збільшиться трохи. Якщо початок ділянки буде більше $0,9L_d$, то сильно збільшиться його нахил, що приведе до відриву потоку від його поверхні, а також із зовнішньої полиці 8 соплового апарату 6, в результаті ефект підвищення ККД ступеня турбіни знизиться. Аналогічні явища присутні за умови $D_5/D_6 < 0,92$. У зворотному випадку, за умови $D_5/D_6 > 0,94$, попередня ділянка 14 слабо підтискатиме потік до внутрішнього обводу 3 дифузора, в результаті меридіональний кут потоку в дифузори зменшиться слабо і ККД ступеня турбіни підвищиться трохи.

При роботі ГТД потік робочого тіла з турбіни 1 газогенератора, що приводить в обертання компресор, поступає в оптимізований дифузор. На ділянках 10 і 11 зовнішнього 2 і внутрішнього 3 обводів дифузора потік розширюється. Далі, на ділянці 14 потік підтискається до внутрішнього обводу дифузора 3 і його меридіональний кут зменшується. Довжина ділянки 13 дозволяє потоку встигнути вирівнятися і забезпечує його мінімаль-

ний меридіональний кут на вході в сопловий апарат 6 ступеня турбіни, а плавний перехід зовнішнього 2 і внутрішнього 3 обводів дифузора до соплового апарату 6 на ділянках 13 і 15 забезпечує безвідри-

вне обтікання соплового апарату, що дозволяє підвищити ККД ступеня турбіни, яка виробляє корисну потужність двигуна.

