УДК 621.452.3.035-543.2:519.6

doi: 10.32620/aktt.2022.4sup2.03

О. Г. ЖИРКОВ¹, О. П. УСАТИЙ², О. П. АВДЄЄВА², Ю. І. ТОРБА¹

¹ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна

² Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

ПРОЦЕС ДРОСЕЛЮВАННЯ В СОПЛОВИХ АПАРАТАХ З ПОВОРОТНИМИ ДІАФРАГМАМИ

У процесі розробки методу чисельного дослідження плоского обтікання соплової решітки з поворотною діафрагмою були виконані розрахунки при різних ступенях відкриття поворотної діафрагми і перепадах тисків на решітці. У статті наведено деякі результати чисельного дослідження течії в каналі соплового апарату за ступенем відкриття поворотної діафрагми $\delta = (1...0, 15)$. Моделювання та розрахунок течиї робочого тіла виконано з використанням програмного комплексу Fluent. Проведено побудову розрахункових областей, обмежених одним міжлопатковим каналом, для різного ступеня відкриття діафрагми соплового апарату. Побудовано сітки для розрахункових областей. Проведено розрахунки для $\delta = (1 \div 0, 15)$ та при різних ступенях перепаду тиску на решітці. В результаті виконаних розрахунків були отримані картини течії в міжлопатковому каналі та за ним, і розподіл коефіцієнтів втрати кінетичної енергії по фронту решітки при різних ступенях відкриття діафрагми на вході в сопловий апарат. За результатами проведеної роботи можна зробити наступні висновки: роботу соплової решітки з поворотною діафрагмою при різних ступенях відкриття поворотної діафрагми б і перепадах тисків π на решітці можна розділити в діапазоні ступенів відкриття $\delta = (1...0,77)$ як роботу в режимі сопла, а у діапазоні $\delta = (0,77...0,15)$ як у режимі дроселя, при зміні кута атаки величини коефіцієнтів втрати кінетичної енергії значно (до 25 %) збільшуються лише для $\pi = 0,7$ і $\delta = 1$. При $\pi = 0,3$ і $\delta = 1$ коефіцієнт збільшується незначно (до 0,5 %); при $\pi = 0,7; 0,3$ і $\delta = 0,3$ коефіцієнт збільшується до 5 %, при цьому коефіцієнт ζ_i змінюється менше, щодо коефіцієнта ζ_{90} при розрахунковому куті атаки $\alpha_0 = 90^\circ$, при менших перепадах тиску на решітці профілів (при збільшенні швидкості потоку на виході з соплової решітки). Результати, отримані у цій роботі, будуть використані розробки методики чисельного дослідження просторового обтікання сопловых решіток з поворотними діафрагмами.

Ключові слова: поворотна діафрагма; чисельне дослідження; коефіцієнти втрат енергії; теплофікаційні турбіни; моделі турбулентності.

Вступ

Постійний розвиток та вдосконалення конструкції та робочих режимів теплофікаційних турбін призвело до використання пари надкритичними параметрами. На даний момент часу одним із перспективних напрямків розвитку теплофікаційних турбін e ïx робота на супернадкритичних перепадах тиску [1]. Підвищення параметрів пари спричиняє підвищення швидкості потоку в міжлопаткових каналах соплових і робочих каналах. При цьому необхідно перепрофілювання проточної частини для отримання оптимальної геометрії з найменшими коефіцієнтами втрати кінетичної енергії. Розробка методів оптимізації проточної частини теплофікаційних турбін є актуальним завданням [2].

Для теплофікаційних турбін, що мають регульовані відбори пари, часто застосовуються соплові решітки з поворотними діафрагмами [3]. Зміна витрати пари через турбіну при змінних режимах досягається перекриттям на вході каналів соплового апарату (рис. 1).

Частина соплового апарату, що перекриває канал на вході, називається поворотною діафрагмою.

На структуру течії та процеси, що відбуваються в міжлопатковому каналі соплової решітки, великий вплив має ступінь відкриття діафрагми δ [4].

Тут
$$\delta = \frac{a}{a_0}$$
 – відношення площі закритої

поворотної діафрагми до площі повністю відкритої діафрагми (рис. 2).

Сопловий апарат з поворотною діафрагмою є органом регулювання, зокрема витрати пари, роботи теплофікаційної турбіни та може бути розглянутий як елемент пневмоавтоматики. З одного боку, при ступені відкриття діафрагми $\delta = 1$, сопловий апарат



Рис. 1. Регулююча діафрагма турбіни Т-175-130: 1 – поворотна діафрагма; 2 – нерухома частина соплового апарату; 3 – робоче колесо турбіни

подібний до таких елементів пневмоавтоматики як конфузор або сопло.

Призначення цих елементів – перетворення механічної енергії газу (пара) з однієї форми (потенційна або кінетична енергія) в іншу, яке має здійснюватися по можливості без втрат. Дійсно сопловий апарат повинен перетворити тиск на вході в нього (потенційна енергія) у швидкість потоку (кінетична енергія) з одночасним його поворотом, з мінімально можливими втратами кінетичної енергії. З іншого боку наявність поворотної діафрагми (при ступені відкриття діафрагми $\delta < 1$) перетворюють сопловий апарат у пристрій подібний до дроселя або редукційного клапана, що використовуються в пневмоавтоматиці. Дроселі, на відміну від сопел, призначені для створення опору течії газу. При цьому процес дроселювання характеризується незворотними втратами механічної енергії потоку газу незворотним переходом механічної енергії в тепло. У зв'язку з цим слід підкреслити відмінність дроселів від раніше згаданих сопел. Чітке уявлення цієї відмінності важливо для правильного розуміння процесів, що відбуваються при роботі соплової решітки з поворотною діафрагмою. Далі, в статті, робота соплової решітки з поворотною діафрагмою буде умовно розділена на режим «сопла» та режим «дроселя».

В статті наведені деякі результати отримані при розробці методики чисельного дослідження плоского обтікання соплової решітки, з поворотною діафрагмою, на базі програмного комплексу Fluent.

1. Чисельне дослідження

На даний момент часу практично всі дослідження характеристик подібних решіток полягали в експериментальному випробуванні плоских решіток. Дуже висока вартість проведення подібних експериментів не дозволяють досліджувати велику кількість конфігурацій решіток і режимів їх роботи з метою оптимізації проточної частини для отримання мінімальних втрат при різних режимах роботи теплофікаційних турбін. У зв'язку з чим, розроблена методика чисельного дослідження плоского обтікання соплової решітки, з поворотною діафрагмою [5], на базі програмного комплексу Fluent.



Рис. 2. Розрахункова область для профілю C-9013P: $a - \delta = 1; \delta - \delta = 0,15$

Для розрахунку течії була використана модель двовимірної течії в'язкого газу програмного комплексу Fluent з використанням різницевого методу другого порядку. Робоче тіло – в'язкий газ, що стискається – повітря. В якості граничних умов на вході в розрахункову область використовувалися:

– параметри гальмування: тиск (P_0^*) та температура (T_0^*) повітря;

- напрямок потоку повітря;

- інтенсивність турбулентності;

- гідравлічний діаметр.

Граничною умовою на виході з розрахункової області задавався тиск повітря (P₁).

Моделювання турбулентних явищ здійснювалося з використанням моделями турбулентності k-ω SST (модель Ментера) [6].

На рис. 2, наведена розрахункова область каналу, утвореного профілями C-9013P [7].

2. Результати розрахунків

В результаті аналізу отриманих даних з виконаних чисельних досліджень роботи соплової решітки з поворотною діафрагмою при різних ступенях відкриття поворотної діафрагми δ і перепадах тисків π на решітці можна розділити роботу соплової решітки в діапазоні ступенів відкриття $\delta = (1...0,77)$ як в режимі «сопла», а в діапазоні $\delta = (0,77...0,15)$ як у режимі «дроселя».

2.1. Робота соплової решітки у режимі «сопла»

Як правило, профілі решіток турбомашин проектують з урахуванням забезпечення мінімальних втрат для дозвукового, навколозвукового або надзвукового режиму роботи. Аналізуючи графік залежності втрат решітки з профілів C-9013P від швидкості потоку на виході з решітки (рис. 3) при $\delta = 1$, ми бачимо, що профіль добре оптимізований для роботи в широкому діапазоні чисел М. Так, коефіцієнти втрати енергії ζ в діапазоні M = (0,4...1,4) становлять від 0,05 до 0,075.



Рис. 3. Залежність коефіцієнтів втрат енергії решітки профілів C-9013P від швидкості потоку на виході

Така картина характерна для роботи соплової решітки в діапазоні ступенів відкриття діафрагми $\delta = (1 \div 0,77)$. При цьому при зміні ступенів відкриття діафрагми в діапазоні $\delta = (1 \div 0,77)$ не спостерігається значного зростання втрат кінетичної енергії. Особливістю є те, що для ступеня відкриття $\delta = 1$ втрати кінетичної енергії зменшуються при зменшенні перепаду тисків на решітці від $\pi = 0.7$ до $\pi = 0.5$ (з ростом швидкості потоку на виході w₁ із соплової решітки). Далі при зменшенні перепаду тисків на решітці від $\pi = 0.5$ до $\pi = 0.3$ втрати кінетичної енергії знову зростають. При швидкості потоку на виході $w_1 < w_{1rpah}$ та розрахунковому натіканні $(\Delta\beta_0=0)$ зростання W_1 збільшує прискорення потоку на конфузорних ділянках течії, котрі займають більшу частину обводу профілю. Але для конфузорної решітки швидкості течії у межлопаточному каналі й максимальна місцева швидкість на спині w_{1max} збільшується у меншій ступені, ніж швидкість w1. У результаті чого з збільшенням w1 зменшується ступінь вихідної дифузорністі, яка багато в чому визначає величину профільних втрат. З цих причин (прискорення потоку у каналі та зменшенню вихідної дифузорністі) втрати у решітці при збільшенні w1 зменшуються. Однак, при збільшенні w1 починають виявлятися хвильові явища у течії в міжлопатковому каналі, що позначається на збільшенні втрат.

У конфузорних решітках зі зростанням w_1 знижуються відносні швидкості течії w / w_1 в передній частині каналу і вплив цієї частини на загальні характеристики падає. З цієї причини зі зростанням w_1 послаблюється вплив кута атаки $\Delta\beta_0$ та втрати $\Delta\zeta$ знижуються.

При помірних значеннях $\Delta\beta_0$ (не більше 10...15°) у решітці ці втрати можуть знижуватися до нуля. Швидкість виходу потоку із соплової решітки w_1 , при якій це відбувається, близька до $w_{1\text{гран}}$ (M \approx 1) у першому наближенні.

Кут атаки $\Delta\beta_0$ змінює течію головним чином у вхідній частині каналу решітки: на спинці профілю до горла каналу, на кориті в передній половині його контуру [8]. Зростання позитивного кута атаки підвищує пік швидкості на спинці поблизу вхідної кромки та збільшує інтенсивність подальшого гальмування потоку. Вплив цих змін переважає над впливом покращень умов обтікання корита і є основною причиною виникнення втрат $\Delta\zeta$ від кута атаки $\Delta\beta_0$.

При зміні кута атаки $\Delta\beta_0$ величини коефіцієнтів втрати кінетичної енергії значно (до 25 %) збільшуються лише для $\pi = 0,7$ і $\delta = 1$. При $\pi = 0,3$ і $\delta = 1$ коефіцієнт збільшується незначно (до 0,5 %).

Профіль C-9013Р має радіус вихідної кромки всього 0,18 мм, це добре позначається на втратах у закромковій ділянці. Розподіл приведених швидкостей λ_1 та λ_{1ag} на виході із соплової решітки, вимірювання проводилося на відстані 0,1 в ід розміру хорди в профілю, при різних перепадах тисків π та для ступені відкриття поворотної діафрагми $\delta = 1$ представлено на рисунку 4.

λ 1,4 2 1,3 1,2 1 - • λ1; π=0,3; δ=100 1,1 2 - ■λ1ад; π=0,3; δ=100 3 - Δλ1; π=0,7; δ=100 1 **4** - ×λ1ад; π=0,7; δ=100 0.9 0.8 4 0,7 3 0.6 0.5 0.105 0,11 0,115 0,12 0,125 0.13 0.135

Рис. 4. Розподіл приведених швидкостей λ_1 та λ_{1ag} на виході із соплової решітки

2.2. Робота соплової решітки у режимі «дроселя»

Як було зазначено раніше, на структуру течії та процеси, що відбуваються в міжлопатковому каналі соплової решітки, великий вплив має ступінь відкриття діафрагми $\delta = \frac{a}{a_0}$ – відношення площі закритої поворотної діафрагми до площі повністю відкритої діафрагми (див. рис. 2), що саме відповідає за процес дроселювання. При цьому, для решітки профілів C-9013P, мінімальний переріз поворотної діафрагми знаходиться на лінії AB, що є перпендикуляром до поверхні коритця від точки A (рис. 5), а не на лінії AБ.

Також введемо параметр τ як відношення ширини каналу на вході поворотної діафрагми (відрізок AB рис. 5) до горла решітки а₂ (див. рис. 2). Відповідно при $\tau < 1$ перерізом, що визначає витрату повітря крізь сопловий апарат стає поворотна діафрагма, а не горло решітки ($\tau = 1$ відповідає значенню ступеня відкриття діафрагми $\delta = 0,456$). Аналіз залежності відношення G / G₀ від δ (рис. 6) показує, що дроселювання потоку починається при значеннях $\tau > 1$. Це зумовлено значним зменшенням площі перерізу (лінія AB) за рахунок зони відриву потоку в точці Б (рис. 5) та втратами повного тиску на вході в поворотну діафрагму. Зона відрива виникає на всіх режимах відмінних від $\delta = 1$.

На рисунку 7 наведена залежність коефіцієнта витрати від відношення G / G₀. При цьому коефіцієнт витрати та відношення G / G₀ практично не залежать від перепаду тисків на решітці π (рис. 6, 7).



Рис. 5. Течія в розрахунковій області. Ізолінії чисел Маху при $\pi = 0,7$ і $\delta = 0,4$



Рис. 6. Залежність відношення G / G₀ від б



Рис. 7. Залежність µ від відношення G / G₀

Основною характеристикою любого дроселя є характеристика зміни масової секундної витрати повітря залежно від тиску до та після дроселя. Зручно визначати витрату функції від відношення цих тисків π . На рисунку 8 представлена залежність фізичної витрати повітря від відношення тисків для ступенів відкриття $\delta = 0,3$ та 0,5 поворотної діафрагми.



Рис. 8. Залежність фізичної витрати повітря від відношення тисків для ступенів відкриття $\delta = 0,3$ та 0,5 поворотної діафрагми

Теоретичне значення критичного перепаду тисків $\pi_{kp} = 0,528$, у якому настає найбільша витрата повітря G_{kp} , відповідає переважно лише соплам типу Лаваля. Для інших форм каналів, отворів і щілин критичний режим течії встановлюється при перепадах тисків, які не збігаються з теоретичними даними, тобто величина π_{kp} визначається формою отвору, якою тече газ.

Наприклад, для діафрагм, що являють собою диск з отвором, що має гостру кромку на стороні входу газу, критичний перепад тисків $\pi_{\rm kp}$ становить 0,037. Для отворів, у яких d = l, критичний перепад тисків встановлюють при $\pi_{\rm kp \ oтB} = 0,13$ для повітря і $\pi_{\rm kp \ oTB} = 0,27$ для перегрітої водяної пари, тоді як максимальна витрата для сопел встановлюється при критичному перепаду тисків, що дорівнює відповідно 0,528 і 0,546 [9].

Іноді такі значення $\pi_{\kappa p}$ називають другим критичним відношенням тисків. Пояснюються ці особливості тим, що у вузьких перерізах критична швидкість встановлюється не по всьому перерізу. Витрата газу не досягає максимального значення і продовжує збільшуватися при зниженні перепаду тиску доти, доки зона критичних швидкостей стабілізується.

На рисунку 9 представлена залежність зведеної витрати повітря через поворотну діафрагму від відношення тисків π для ступенів відкриття $\delta = 0,5$ і 0,3. Як видно з графіка при відношенні тисків $\pi \le 0,5$ величина зведеної витрати залишається постійною, відповідно для поворотної діафрагми для режиму дроселя $\pi_{\kappa p} = 0,528$. Але особливістю роботи соплового апарата в режимі «дроселя» є можливість спрацьовувати надкритичні перепади тисків [10].



Рис. 9. Залежність зведеної витрати повітря від відношення тисків π для ступенів відкриття δ = 0,3 та 0,5 поворотної діафрагми

Зміна кута атаки $\Delta\beta_0$, при роботі соплового апарата в режимі «дроселя», при $\pi = 0,7$; 0,3 і $\delta = 0,3$ призводить до незначного збільшення коефіцієнту втрат (порівняно з режимом роботи соплового апарата в режимі «сопла») до 5 %, при цьому коефіцієнт ζ_i змінюється менше, щодо коефіцієнта втрат ζ при розрахунковому куті атаки $\alpha_0 = 90^\circ$, при менших перепадах тиску на решітці профілів (при збільшенні швидкості потоку на виході з соплової решітки).

Висновок

За результатами проведеної роботи можна зробити такі висновки:

 дроселювання потоку, що проходить через поворотну діафрагму соплового апарату, починає відбуватися при значеннях відношень ширини каналу на вході до горла решітки більше одиниці;

використання соплового апарату з поворотною діафрагмою у вигляді дроселя можливе при ступені відкриття δ < 0,77;

– при ступені відкриття поворотної діафрагми в діапазоні $\delta = (1...0,77)$ дроселювання не відбувається, але збільшуються втрати кінетичної енергії;

 – оптимальними, при дроселюванні потоку, для одного ступеня відкриття поворотної діафрагми є режими з меншим ставленням перепаду тиску на решітці (зменшуються втрати кінетичної енергії); – зміна кута атаки при роботі соплового апарату в режимі «дроселя» призводить до меншого зростання коефіцієнта втрат кінетичної енергії, ніж при роботі соплового апарата в режимі «сопла».

Результати, отримані у цій роботі, будуть використані розробки методу багатопараметричної оптимізації теплофікаційних парових турбін з регульованими відборами пари.

Література

1. Развитие паровых турбин на сверхкритические и суперсверхкритические параметры газа [Текст] / А. А. Кондратьев, В. А. Рассохин, С. Ю. Олейников, Е. А. Кондратьев, А. В. Осипов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 1 (54). DOI: 10.12737/24894.

2. Усатый, А. П. Создание инженерной методики оценки эффективности сопловых решеток с поворотными диафрагмами [Текст] / А. П. Усатый, Т. А. Фам // Вестник Национального техничного университета «ХПИ». – 2018. – № 12. – С. 21-27.

3. Бененсон, Е. И. Теплофикационные паровые турбины [Текст] / Е. И. Бененсон. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 270 с.

4. Слабченко, О. Н. Результаты расчета течения в каналах регулирующей поворотной диафрагмы теплофикационной турбины [Текст] / О. Н. Слабченко, Д. В. Кирсанов // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2008. – № 6. – С. 73-75.

5. Чисельне дослідження обтікання соплових решіток з поворотними діафрагмами [Текст] / О. Г. Жирков, О. П. Усатий, О. П. Авдєєва, Ю. І. Торба // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2020. – № 2(4). – С. 5–10. DOI: 10.20998/2078-774X.2020.02.01.

6. Menter, F.R. Zonal two equation k-ω turbulence models for aerodynamic flows [Text] / F. R. Menter // AIAA. – 1993. – Vol. 93. – Article No. 2906. – P. 1-21.

7. Дейч, М. Е. Атлас профелей решеток осевых турбин [Текст] / М. Е. Дейч, Г. А. Филипов, Л. Я. Лазарев. – М. : Машиностроение, 1965. – 96 с.

8. Дейч, М. Е. Газодинамика решеток турбомашин [Текст] / М. Е. Дейч. — М. : Энергоатомиздат, 1996. — 527 с.

9. Sanders, V. D. Review of High–Temperature Immersion Thermal Sensing Devieces for In–Flight Engine Control [Text] / V. D. Sanders // The Review of scientific instruments. – 1958. – Vol. 29, Iss. 11. – Article No. 917. DOI: 10.1063/1.1716061.

10. Supersonic Flow in the Blade Channel of the Nozzle with a Rotary Diaphragm at Small Degrees of Opening [Text] / O. Zhyrkov, O. Usatyi, O. Avdieieva, Y. Torba // Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2022. – P. 66-78. DOI: 10.1007/978-3-031-06044-1_7.

References

1. Kondrat'ev, A. A., Rassohin, V. A., Olejnikov, S. Ju., Kondrat'ev, E. A., Osipov, A. V. Razvitie parovyh turbin na sverhkriticheskie i supersverhkriticheskie parametry gaza [Development of steam turbines for supercritical and super-critical gas-rame meters]. *Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta [Herald of the Bryansk State Extension University]*, 2017, no. 1 (54). DOI: 10.12737/24894.

2. Usatyj, A. P., Fam, T. A. Sozdanie inzhenernoj metodiki ocenki jeffektivnosti soplovyh reshetok s povorotnymi diafragmami. [Creating an engineering methodology for assessing the effectiveness of nozzle lattices with rotary diaphragms]. *Vestnik Nacional'nogo tehnichnogo universiteta «HPI»* [Bulletin of the National Technical University "KPI"], 2018, no. 12, pp. 21-27.

3. Benenson, E. I. *Teplofikacionnye parovye turbiny* [Heat steam turbines]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1986. 270 p.

4. Slabchenko, O. N., Kirsanov, D. V. Rezul'taty rascheta techenija v kanalah regulirujushhej povorotnoj diafragmy teplofikacionnoj turbiny [Results of calculating the flow in the channels of the regulating rotary diaphragm of the heat turbine]. Vestnik Nac. tehn. un-ta "HPI" : sb. nauch. tr. Temat. vyp. : Jenergeticheskie i teplotehnicheskie processy i oborudovanie [Bulletin of Nats. tehn Un-ta "KPI": Sat Scientific Tr. Temop. Vol.: Energy and heat engineering processes and equipment], Kharkov, NTU "HPI", 2008, no. 6, pp. 73-75.

5. Zhyrkov, O. H., Usatyi, O. P., Avdieieva, O.P., Torba, Yu. I. Chyselne doslidzhennia obtikannia soplovykh reshitok z povorotnymy diafrahmamy [Numerical study of the flow around nozzle gratings with rotating diaphragms]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriia: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energy and heat engineering processes and equipment], 2020, no. 2(4), pp. 5–10. DOI: 10.20998/2078-774X.2020.02.01.

6. Menter, F. R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows [Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows]. *AIAA*, 1993, vol. 93, article no. 2906, pp. 1-21.

7. Dejch, M. E., Filipov, G. A, Lazarev, L. Ja. *Atlas profelej reshetok osevyh turbin* [Atlas of chairs of lattices of axial turbines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965. 96 p.

8. Dejch, M. E., *Gazodinamika reshetok turbomashin* [Gas dynamics of gratings of turbomachines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1996. 527 p.

9. Sanders, V. D. Review of High–Temperature Immersion Thermal Sensing Devieces for In–Flight Engine Control. *The Review of scientific instruments*, 1958, vol. 29, iss. 11, article no. 917. DOI: 10.1063/1.1716061.

10. Zhyrkov, O., Usatyi, O., Avdieieva, O., Torba, Y. Supersonic Flow in the Blade Channel of the Nozzle with a Rotary Diaphragm at Small Degrees of Opening. Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2022, pp. 66-78. DOI: 10.1007/978-3-031-06044-1_7.

Надійшла до редакції 10.05.2022, розглянута на редколегії 8.08.2022

THROTTLE PROCESS IN THE NOZZLE APPARATUS WITH A ROTARY DIAPHRAGM

Oleksandr Zhyrkov, Oleksandr Usaty, Olena Avdieieva, Yuriy Torba

In the process of developing a method for numerically investigating a plane flow around a nozzle array with a rotary diaphragm, calculations were performed for various degrees of opening of the rotary diaphragm δ and pressure drops π on the array. The article presents some results of a numerical study of the flow in the nozzle channel at the degree of opening of the rotary diaphragm $\delta = (1...0.15)$. Modeling and calculations of the flow of the working fluid were performed using the Fluent software package. The construction of computational areas, limited by one interblade channel, for a different degree of opening of the diaphragm of the nozzle apparatus has been carried out. The grids for the computational domains were constructed. Calculations were carried out for $\delta = (1...0.15)$ and for various degrees of pressure drop across the grate. Because of the performed calculations, flow patterns in the interblade channel and behind it, and the distribution of kinetic energy loss coefficients along the grating front at various degrees of aperture opening at the nozzle inlet, were obtained. Based on the results of the work carried out, the following conclusions can be drawn: the operation of a nozzle array with a rotary diaphragm at different degrees of opening of the rotary diaphragm δ and pressure drops π on the grate can be divided in the range of opening steps $\delta = (1...0.77)$ as operation in the nozzle mode, and in the range $\delta = (0.77...0.15)$ as in throttle mode; when the angle of attack changes, the values of the kinetic energy loss coefficients increase significantly (up to 25 %) only for $\pi = 0.7$ and $\delta = 1$; at $\pi = 0.3$ and $\delta = 1$, the coefficient increases slightly (up to 0.5 %); at $\pi = 0.7$; 0.3 and $\delta = 0.3$, the coefficient increases to 5 %, while the coefficient ζ_i changes less relative to the coefficient ζ_{90} at the calculated angle of attack α_0 = 90 grids). The results obtained in this work will be used to develop a technique for numerically investigating the spatial flow around nozzle arrays with rotary diaphragms.

Keywords: rotary diaphragm; numerical study; energy loss coefficients; heat turbines; turbulence models.

Жирков Олександр Григорович – провідний інженер-дослідник сектору газової динаміки експериментально-випробувального комплексу ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Усатий Олександр Павлович – д-р техн. наук, старш. наук. співроб., зав. каф. турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

Авдєєва Олена Петрівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

Торба Юрій Іванович – канд. техн. наук, начальник експериментально-випробувального комплексу ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Oleksandr Zhyrkov – Leading Engineer-Researcher of the Gas Dynamics Sector of the Experimental Testing Complex of the SE "Ivchenko-Progress", Zaporizhzhia, Ukraine,

e-mail: zhirkov@i.ua, ORCID: 0000-0003-4003-6078, Scopus Author ID: 57413275400.

Oleksandr Usaty – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Turbine Construction, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: alpaus@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8568-5007.

Olena Avdieieva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Turbine Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine,

e-mail: Olena.Avdieieva@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9358-4265.

Yuriy Torba – Candidate of Technical Sciences, Head of the Experimental and Testing Complex of the SE "Ivchenko-Progress", Zaporizhzhia, Ukraine,

e-mail: torba.yuriy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8470-9049.