

О. Г. ЖИРКОВ, О. П. УСАТИЙ, О. П. АВДЄЄВА, Ю. І. ТОРБА

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ КУТА АТАКИ НА ВЕЛИЧИНУ КОЕФІЦІЄНТА ВТРАТ КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА КУТІВ ВИХОДУ ПОТОКУ ДЛЯ СОПЛОВИХ РЕШТОК З ПОВОРОТНИМИ ДІАФРАГМАМИ

Представлені результати чисельного дослідження плоского обтікання соплової решітки з поворотною діафрагмою, при кутах входу потоку в решітку профілів С-9013Р відмінних від розрахункового кута атаки і їх вплив на величину коефіцієнта втрат кінетичної енергії і кути виходу потоку з решітки. Розрахунки виконувалися за допомогою програмного комплексу *Fluent* (№ клієнта 01067322). В результаті виконаних розрахунків були отримані: картини течії у міжлопаточному каналі і за ним; розподіл коефіцієнтів втрати кінетичної енергії по фронту решітки при різних ступнях відкриття вхідної частини каналів соплової решітки.

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

О. ZHYRKOV, O. USATY, O. AVDIEIEVA, Y. TORBA

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF A CHANGE IN THE ANGLE OF ATTACK ON THE VALUE OF THE KINETIC ENERGY LOSS COEFFICIENT AND FLOW EXIT ANGLES FOR NOZZLE ARRAYS WITH ROTARY DIAPHRAGMS

The goal of one of the steps of this research is to develop a technique for numerical study of the flow around a nozzle array with a rotary diaphragm, for its further use for solving the problem of optimal design of the flow part of heating turbines. Due to an ample amount of numerical studies, the development of the methods is divided into several parts. The paper presents some results of numerical studies of flat flow around a nozzle array with a rotating diaphragm at angles of flow entry into the array of S-9013R profiles different from the calculated angle of attack equal to 90° . Modeling and calculation of the flow of the working fluid was performed using the *Fluent* software package. The construction of computational domains restricted by one interblade channel was carried out for different degrees of opening of the diaphragm of the nozzle apparatus. Grids for computational domains have been constructed. Calculations were carried out for the angles of entry into the profile grid in the range of 45° to 135° . The calculations done enabled the generation of flow patterns in the interblade channel and behind it, and the distribution of kinetic energy loss coefficients along the front of the array at various degrees of opening of the diaphragm at the entrance to the nozzle apparatus. Based on the results of the work done, the following conclusions can be drawn: a change in the angle of attack affects the distribution of static pressure along the profile only in its front part, and does not affect the distribution in the output part; a change in the angles of attack does not affect the exit angles from the nozzle array of S-9013R profiles; a decrease in the pressure difference across the nozzle array results in a change in the exit angles from the nozzle array at an opening degree of the rotary diaphragm of $\pi > 0.5$.

Key words: rotary diaphragm, numerical study, energy loss coefficients, heating turbines, and turbulence models.

Вступ

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

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, розробка методики чисельного дослідження обтікання соплових решіток з поворотними діафрагмами різних конфігурацій, для подальшого її використання при розв'язанні задач оптимального проектування проточної частини теплофікаційних турбін є актуальним завданням, що підтверджується сучасними роботами в цьому напрямку [2].

Для розрахунку змінного режиму роботи ступенів парових турбін необхідно знати вплив кута входу потоку в соплові і робочі решітки на втрати

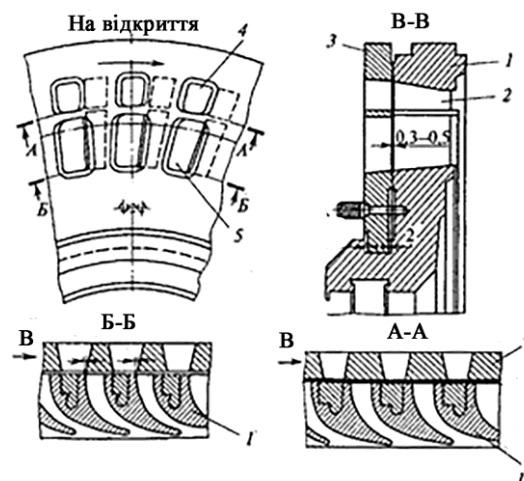


Рис. 1 – Регулююча діафрагма турбіни:

1 – діафрагма; 2 – соплові лопатки;

3 – поворотне кільце; 4 – 5 – вікна

в них. Для профілів розрахованих на $\alpha_0 < 90^\circ$, особливо несприятливими є режими з малими кутами входу ($\alpha_0 < 45^\circ$), коли на вхідній ділянці спинки з'являється помітна дифузійна ділянка. Для профілів з $\alpha_0 > 120^\circ$ більш несприятливими виявляються режими з великими кутами входу ($\alpha_0 > 140^\circ$).

© О. Г. Жирков, О. П. Усатий, О. П. Авдєєва, Ю. І. Торба, 2023

При відхиленні кута входу потоку від розрахункового змінюються епюри розподілу тиску за профілем, з'являються дифузійні ділянки, на протязі яких інтенсивно зростає товщина пограничного шару, а в деяких випадках виникає відрив потоку [3].

В статті наведені деякі результати, чисельного дослідження плоского обтікання соплової решітки з поворотною діафрагмою, при кутах входу потоку в решітку профілів С-9013Р відмінних від розрахункового кута атаки і їх вплив на величину коефіцієнта втрат кінетичної енергії і кути виходу потоку з решітки, що з продовженням роботи [4]. Розрахунки виконані на базі програмного комплексу *Fluent*.

Мета роботи

Метою дослідження є оцінка впливу зміни кута атаки робочого тіла на величину коефіцієнта втрат кінетичної енергії та кутів виходу потоку соплових решіток з поворотними діафрагмами з урахуванням впливу перепаду тиску на решітку та ступені відкриття вхідної частини каналів соплової решітки.

Об'єкт дослідження

Об'єктом досліджень є соплова решітка з поворотною діафрагмою утворена з профілів С-9013Р.

На рис. 2, наведено позначення кутів входу та виходу потоку з решітки профілів С-9013Р.

Розрахунковий кут входу потоку у соплову решітку профілів С-9013Р становить $\alpha_0 = 90^\circ$. Кут виходу потоку $\alpha_{1e} = 13^\circ$.

Сітка в розрахунковій області

Розрахункова область представляла собою один міжлопатковий канал, обмежений спинкою однієї соплової лопатки з одного боку і коритцем сусідньої лопатки з другого боку. Так як параметри потоку змінюються на деякому віддаленні, як на вході, так і на виході з решітки, розрахункова область була збільшена: на вході в решітку на величину $0,4b$, на виході на величину $0,5b$, де b – хорда профілю решітки. Для поліпшення умов побудови сітки на виході з решітки, так як профіль С-9013Р має радіус вихідної кромки всього $0,18$ мм, межі області на виході з решітки були побудовані з умовою поділу дуги вихідної кромки на рівні частини (рис. 3).

На рис. 3 $\delta = \frac{a}{a_0}$ – ступінь відкриття вхідної частини каналів соплової решітки.

Розрахункову область можна розділити на дві частини: рухому, обмежену поворотною діафраг-

мою і нерухому, обмежену міжлопатковим каналом за поворотною діафрагмою. У зв'язку, з чим можна один раз побудувати окремі сітки для цих

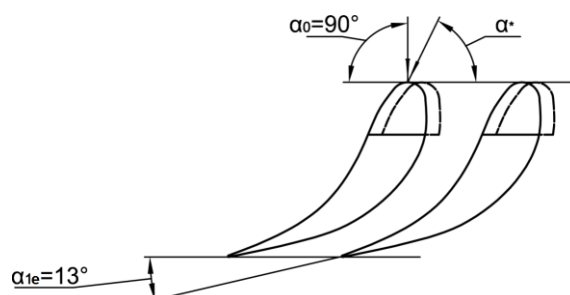


Рис. 2 – Позначення кутів входу та виходу потоку з решітки профілів С-9013Р

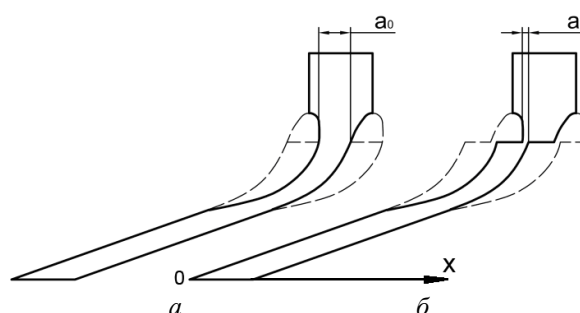


Рис. 3 – Розрахункова область для профілю С-9013Р: $a - \delta = 1$; $b - \delta = 0,15$

областей і в подальшому, використовуючи неконформний інтерфейс, переміщати їх відносно один одного імітуючи різні ступені відкриття δ діафрагми. На практиці, через необхідність ущільнення сітки під стінками для забезпечення вимог по величині $y^+ \approx 1$, виходить неконформний інтерфейс, що погано співпадає і має викривлення. Тестові розрахунки показали наявність «розривів» і «стрибків» на ізолініях параметрів, що змусило відмовитися від використання неконформного інтерфейсу. Далі, для розрахункової області кожної з обраних ступенів відкриття поворотної діафрагми будувалася своя сітка.

З огляду на все вище сказане, при побудові сітки в розрахунковій області, був застосований наступний підхід. Так як положення, в каналі і за ним, стрибків ущільнень, відривів потоку та іншого невідомо, то сітка будувалася для забезпечення умови $y^+ \approx 1$ біля стінки [5].

Товщина пограничного шару розбивалася на 25 підшарів, з коефіцієнтом збільшення елементів 1,2. Розмір решітки сітки встановлювався рівним розміру сітки в останньому шарі.

В результаті число елементів сітки становило від $1,8 \cdot 10^5$ до $2,4 \cdot 10^5$ в залежності від ступеня відкриття δ .

Чисельне дослідження

Теоретичний розрахунок профільних втрат при змінних кутах входу досить складний, так як на структуру потоку в решітці при змінних кутах входу потоку має вплив велика кількість геометричних і режимних параметрів: відносний крок, форма і товщина вхідної кромки, ступінь конфузності каналу, геометричні кути входу α_0 і виходу α_1 , числа M і Re і ін.

Тому 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 (P_1).

Модель турбулентності використана для розрахунків: *k- ω SST*, що найбільш часто використовується для розрахунків такого типу [6], [7].

Проводилися розрахунки течії при параметрах $\pi = 0,7; 0,5; 0,3$ і $\delta = 1; 0,5; 0,3; 0,15$. Кут атаки α^* (див. рис. 1) змінювався в діапазоні $45^\circ - 135^\circ$.

Виконувався «чорновий» розрахунок течії, з використанням утиліти *FMG (Full-Approximation Storage (FAS) Multigrid)*. Утиліта *FMG* використовує технологію *ANSYS FLUENT FAS Multigrid* та дозволяє виконати розрахунок на наборі послідовно вкладених сіток.

Розрахунок починається на найбільш грубій сітці і в міру його встановлення результати інтерполюються на наступну, більш дрібну, сітку. Як правило, всі «чорнові» розрахунки, для досягнення величин нев'язок 10^{-6} , вимагали не більше 1000 – 2000 ітерацій. За результатами «чорнового» розрахунку проводилася адаптація сітки в місцях великих градієнтів розрахункових параметрів для забезпечення умови $y^+ \leq 1$. В результаті адаптації виходила сітка з підвищеними вузлами.

Для «чистових» розрахунків, в залежності від величин числа Маха M і ступеня відкриття вхідних частини каналу соплової решітки δ , кількість ітерацій становила 20000 – 33000 шт. Збіжність розрахунку оцінювалася за встановленням рівності витрат на вході і виході з розрахункової області і за встановленням нев'язок коефіцієнта втрат кінетичної енергії.

Результати розрахунків

На рис. 4 представлені розподіл статичного тиску по профілю С-9013Р при різних кутах входу

потоку в решітку для перепаду тиску $\pi = 0,5$ та ступеня відкриття діафрагми $\delta = 1$. Я видно з рисунку зміна кута атаки впливає на розподіл статичного тиску лише на вхідній кромці профілю, далі по каналу, як для спинки так й для коритця профілю, розподіл тисків однаковий.

На рис. 5 представлені розподіл статичного тиску по профілю С-9013Р при різних кутах входу потоку в решітку для перепаду тиску $\pi = 0,3$ та ступеня відкриття діафрагми $\delta = 1$. Я видно з рисунку зміна кута атаки також впливає на розподіл статичного тиску лише на вхідній кромці профілю, але у меншій ступені ніж при перепаді тиску $\pi = 0,7$.

При цьому кути атаки $\alpha^* < 90^\circ$ призводять до зниження тиску на вхідній кромці профілю з сторони коритця та збільшення зі сторони спинки. Кути атаки $\alpha^* > 90^\circ$ навпаки призводять до збільшення тиску на вхідній кромці профілю з сторони коритця та зменшення тиску зі сторони спинки.

На рис. 6 та 7 представлено розподіл статичного тиску P по профілю С-9013П при $\delta = 0,3$ і $\pi = 0,7$ та $\pi = 0,3$ відповідно. Характер зміни статичного тиску відповідає розподілу при $\delta = 1$ і $\pi = 0,7; 0,3$, але виражений в меншій ступені за рахунок перекриття діафрагми соплового апарату. За діафрагмою зміна кута атаки не впливає на розподіл статичного тиску як вздовж спинки так і вздовж коритця профілю.

Для приведення до безрозмірних величин розраховувався відносний кут атаки \bar{i} :

$$\bar{i} = \frac{i}{\alpha_0 k},$$

де $i = \alpha_0 - \alpha^*$; $k = \frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha_1}$.

На рис. 8 наведена залежність коефіцієнту втрат ζ від відносного кута атаки \bar{i} при $\pi = 0,7; 0,3$ і $\delta = 1$. Для ступеня відкриття поворотної діафрагми $\delta = 1$ і перепаді тиску на решітці $\pi = 0,7$:

– в діапазоні відносного кута атаки $\bar{i} = (0,0125 - 0,0312)$, що відповідає кутам атаки $\alpha^* = (85^\circ - 77,5^\circ)$ коефіцієнт втрати кінетичної енергії збільшується, в середньому на 20,44 %, щодо коефіцієнта при розрахунковому куті атаки $\alpha_0 = 90^\circ$;

– в діапазоні відносного кута атаки \bar{i} від мінус 0,0125 до мінус 0,0312, що відповідає кутам атаки $\alpha^* = (95^\circ - 102,5^\circ)$ коефіцієнт втрати кінетичної енергії збільшується, в середньому на 19,04 %, щодо коефіцієнта при розрахунковому куті атаки $\alpha_0 = 90^\circ$;

– подальше зменшення кута атаки до $\alpha^* = 45^\circ$ або збільшення до $\alpha^* = 135^\circ$ не призводить до значного збільшення коефіцієнту втрат ζ .

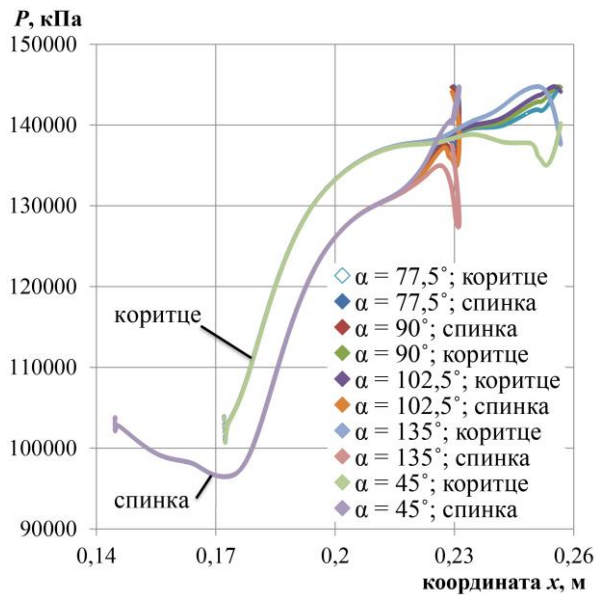


Рис. 4 – Розподіл статичного тиску P по профілю С-9013П при $\pi = 0,7$; $\delta = 1$

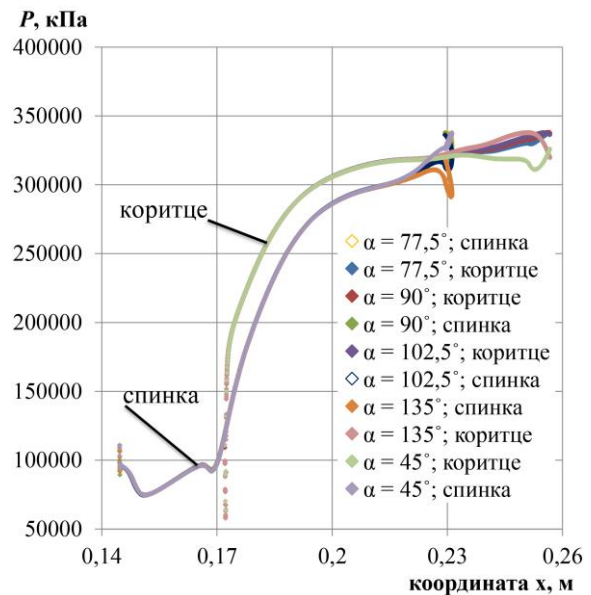


Рис. 5 – Розподіл статичного тиску P по профілю С-9013П при $\pi = 0,3$; $\delta = 1$

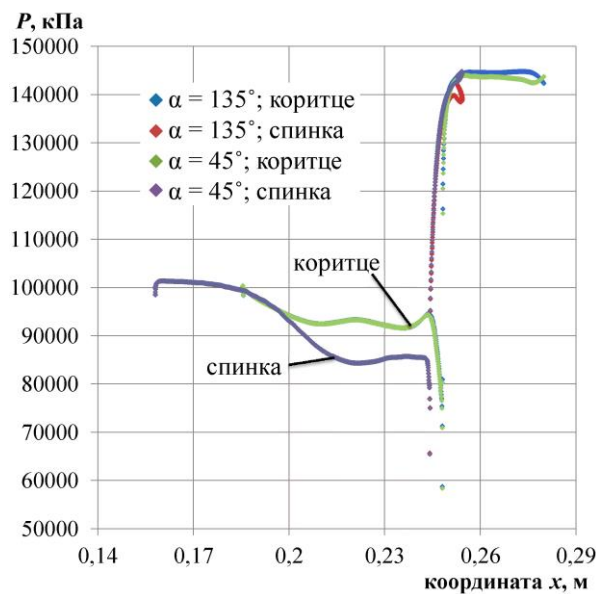


Рис. 6 – Розподіл статичного тиску P по профілю С-9013П при $\pi = 0,7$; $\delta = 0,3$

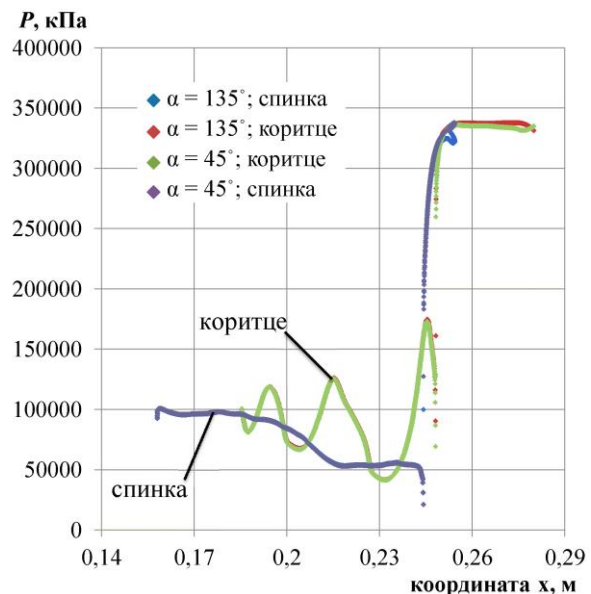


Рис. 7 – Розподіл статичного тиску P по профілю С-9013П при $\pi = 0,3$; $\delta = 0,3$

Для ступеня відкриття поворотною діафрагмою $\delta = 1$ і перепаді тиску на решітці $\pi = 0,3$:

- в діапазоні відносного кута атаки $\bar{i} = (0,006 - 0,0312)$, що відповідає кутам атаки $\alpha^* = (85^\circ - 77,5^\circ)$ коефіцієнт втрати кінетичної енергії збільшується, в середньому на 3,34 %, щодо коефіцієнта при куті атаки $\alpha_0 = 90^\circ$;

- в діапазоні відносного кута атаки \bar{i} від мінус 0,006 до мінус 0,0312, що відповідає кутам атаки $\alpha^* = (95^\circ - 102,5^\circ)$ коефіцієнт втрати кінетичної енергії збільшується, в середньому на 2,43 %, щодо коефіцієнта при вугіллі атаки $\alpha_0 = 90^\circ$;

- подальше зменшення кута атаки до $\alpha^* = 45^\circ$ або збільшення до $\alpha^* = 135^\circ$ не призводить до значного збільшення коефіцієнту втрат ζ .

На рис. 9 наведена залежність коефіцієнту втрат ζ від відносного кута атаки \bar{i} при $\pi = 0,7$; $0,3$ і $\delta = 0,3$. Для ступеня відкриття поворотною діафрагмою $\delta = 0,7$ і перепаді тиску на решітці $\pi = 0,7$:

- в діапазоні відносного кута атаки $\bar{i} = (0,0125 - 0,0312)$, що відповідає кутам атаки $\alpha^* = (85^\circ - 77,5^\circ)$ коефіцієнт втрати кінетичної енергії збільшується, в середньому на 4,67 %, щодо коефіцієнта при розрахунковому куті атаки $\alpha_0 = 90^\circ$;

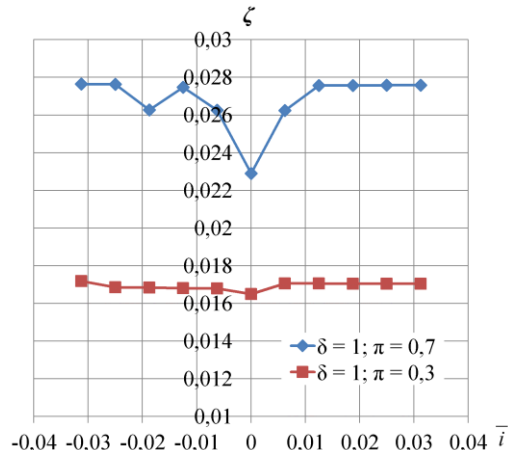


Рис. 8 – Залежність коефіцієнту втрат ζ від відносного кута атаки \bar{i} при $\pi = 0,7; 0,3$ і $\delta = 1$

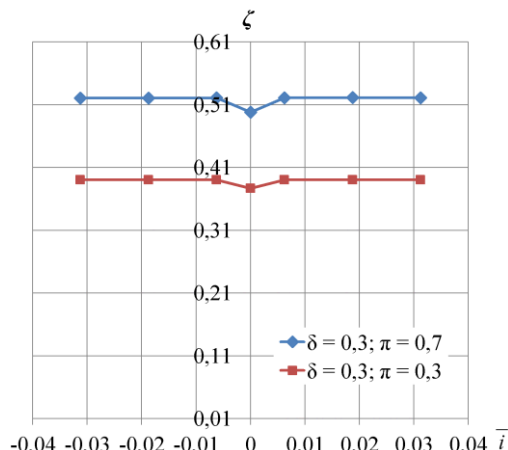


Рис. 9 – Залежність коефіцієнту втрат ζ від відносного кута атаки \bar{i} при $\pi = 0,7; 0,3$ і $\delta = 0,3$

– в діапазоні відносного кута атаки \bar{i} від $-0,0125$ до мінус $0,0312$, що відповідає кутам атаки $\alpha^* = (95^\circ - 102,5^\circ)$ коефіцієнт втрати кінетичної енергії збільшується, в середньому на $4,59\%$, щодо коефіцієнта при розрахунковому куті атаки $\alpha_0 = 90^\circ$;

– подальше зменшення кута атаки до $\alpha^* = 45^\circ$ або збільшення до $\alpha^* = 135^\circ$ не призводить до значного збільшення коефіцієнту втрат ζ .

Для ступеня відкриття поворотною діафрагмою $\delta = 1$ і перепаді тиску на решітці $\pi = 0,3$:

– в діапазоні відносного кута атаки $\bar{i} = (0,006 - 0,0312)$, що відповідає кутам атаки $\alpha^* = (85^\circ - 77,5^\circ)$ коефіцієнт втрати кінетичної енергії збільшується, в середньому на $3,57\%$, щодо коефіцієнта при куті атаки $\alpha_0 = 90^\circ$;

– в діапазоні відносного кута атаки \bar{i} від мінус $0,006$ до мінус $0,0312$, що відповідає кутам атаки $\alpha^* = (95^\circ - 102,5^\circ)$ коефіцієнт втрати кінетичної енергії збільшується, в середньому на $3,52\%$, щодо коефіцієнта при вугіллі атаки $\alpha_0 = 90^\circ$;

– подальше зменшення кута атаки до $\alpha^* = 45^\circ$ або збільшення до $\alpha^* = 135^\circ$ не призводить до значного збільшення коефіцієнту втрат ζ .

Найважливішою аеродинамічною характеристикою решітки є кут виходу потоку; кут виходу дозволяє побудувати трикутники швидкостей ступені і розрахувати втрати в подальшій решітці. На малих відстанях за вихідний кромкою потік має періодично нерівномірне поле швидкостей і кутів, яке в міру віддалення від решітки вирівнюється. Середній кут вирівняного потоку за решітками зазвичай визначається експериментально. Програмний комплекс *Fluent* має можливість будувати, за результатами розрахунків, лінії токів (див. рис. 10) за котрими можливо провести вимірювання кутів

виходу потоку з решітки профілів. Для розрахункової області вимірювання кутів виконувалось на відстані $0,1b$, де b хорда профілю С-9013П.

Вимірювання кутів виходу потоку з решітки профілів С-9013П при зміні кутів атаки показало, що:

– при $\pi = 0,7$ та $\delta = 1$ зміна кутів атаки в діапазоні $45^\circ - 135^\circ$ незначно впливає на кут виходу потоку з решітки. Кут виходу дорівнює $13^\circ - 13,3^\circ$;

– при $\pi = 0,3$ та $\delta = 1$ зміна кутів атаки в діапазоні $45^\circ - 135^\circ$ незначно впливає на кут виходу потоку з решітки. Кут виходу дорівнює $14^\circ - 14,4^\circ$;

– при $\pi = 0,7; 0,3$ та $\delta = 0,3$; зміна кутів атаки в діапазоні $45^\circ - 135^\circ$ незначно впливає на кут виходу потоку з решітки. Кут виходу дорівнює $10^\circ - 12^\circ$.



Рис. 10 – Лінії току на виході з решітки профілів С-9013П при $\pi = 0,3; \delta = 1$

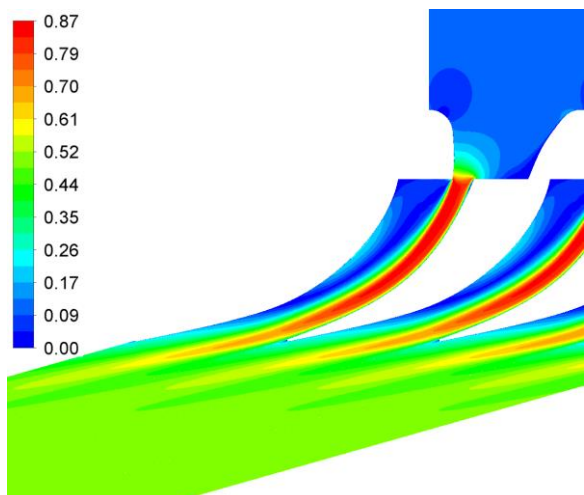


Рис. 11 – Ізолінії чисел Маху для решітки профілів С-9013Р для $\alpha^* = 45^\circ$ при $\pi = 0,7$ і $\delta = 0,3$

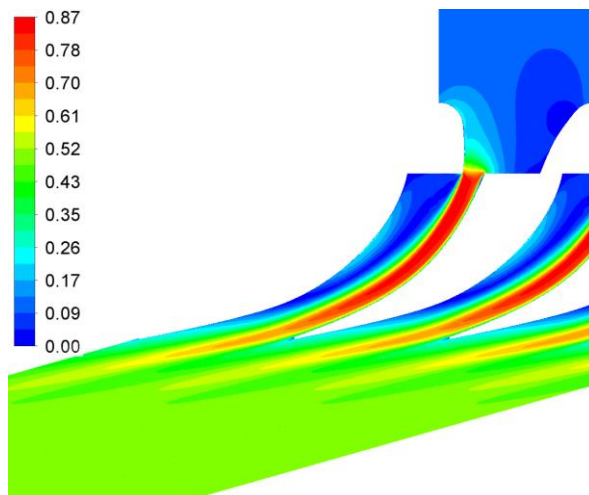


Рис. 12 – Ізолінії чисел Маху для решітки профілів С-9013Р для $\alpha^* = 135^\circ$ при $\pi = 0,7$ і $\delta = 0,3$

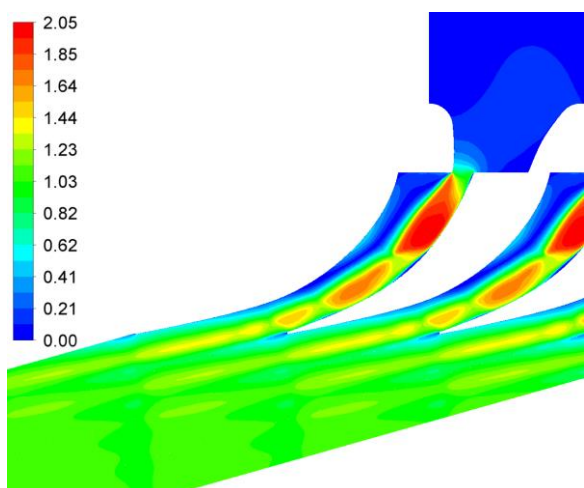


Рис. 13 – Ізолінії чисел Маху для решітки профілів С-9013Р для $\alpha^* = 45^\circ$ при $\pi = 0,3$ і $\delta = 0,3$

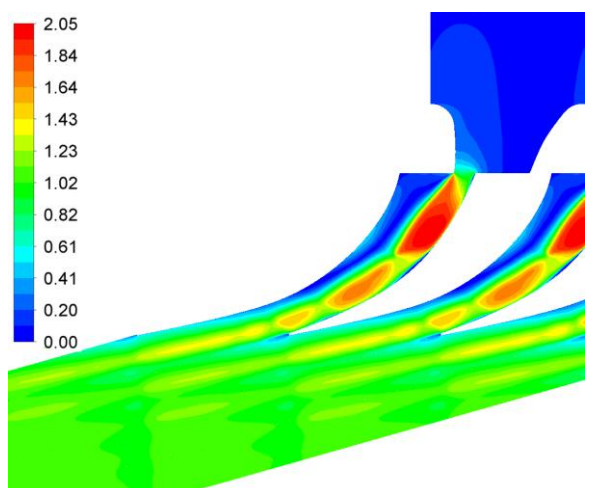


Рис. 14 – Ізолінії чисел Маху для решітки профілів С-9013Р для $\alpha^* = 45^\circ$ при $\pi = 0,3$ і $\delta = 0,3$

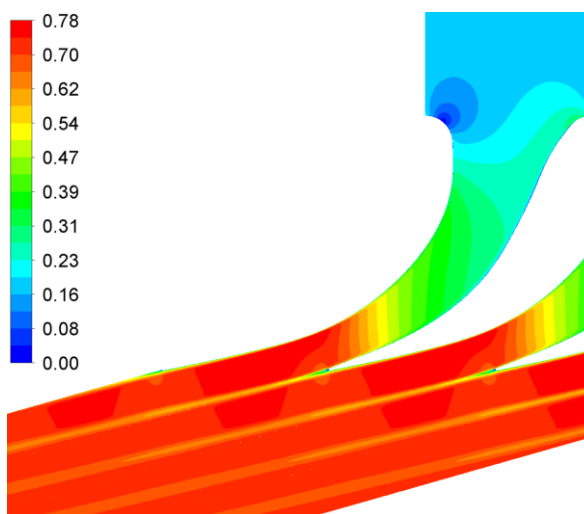


Рис. 15 – Ізолінії чисел Маху для решітки профілів С-9013Р для $\alpha^* = 45^\circ$ при $\pi = 0,7$ і $\delta = 1$

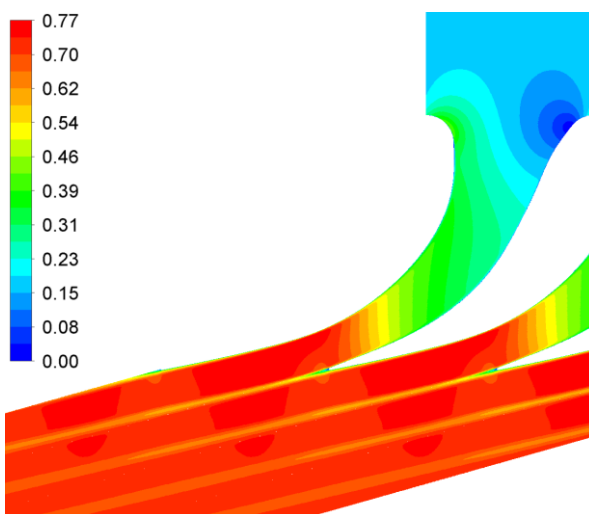


Рис. 16 – Ізолінії чисел Маху для решітки профілів С-9013Р для $\alpha^* = 135^\circ$ при $\pi = 0,7$ і $\delta = 1$

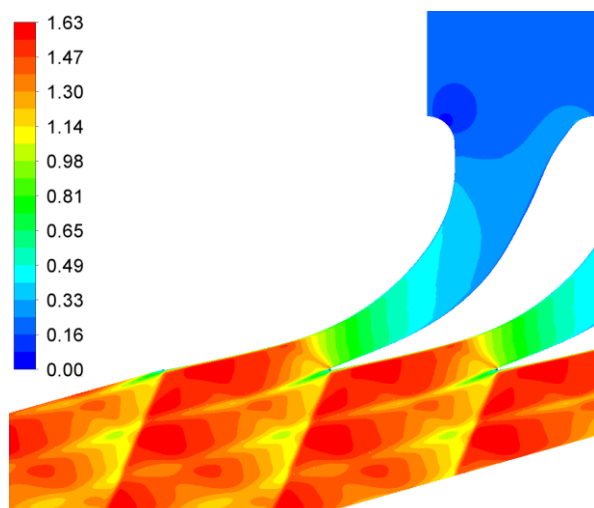


Рис. 17 – Ізолінії чисел Маху для решітки профілів С-9013Р для $\alpha^* = 45^\circ$ при $\pi = 0,3$ і $\delta = 1$

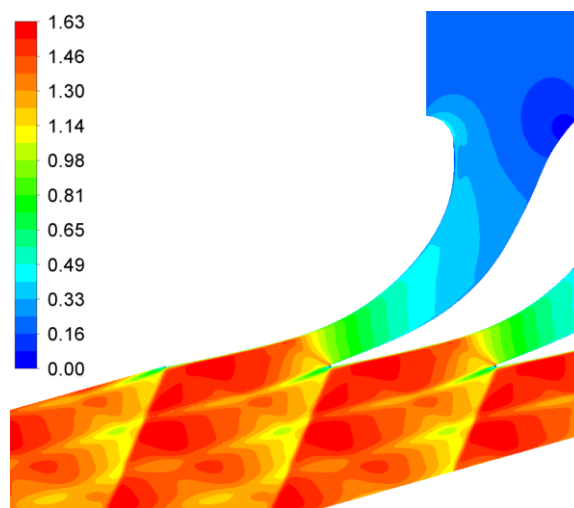


Рис. 18 – Ізолінії чисел Маху для решітки профілів С-9013Р для $\alpha^* = 45^\circ$ при $\pi = 0,3$ і $\delta = 1$

На рис. 11–14 представлені розрахункові ізолінії чисел Маху для решітки профілів С-9013Р для різних кутів атаки α^* при $\pi = 0,7$; $0,3$ і $\delta = 0,3$. Аналіз картини течії показує, що при зміні кутів атаки α^* у діапазоні ($45^\circ - 135^\circ$) течія змінюється лише у поворотній діафрагмі соплового апарату, за діафрагмою зміни розподілу чисел Маху не відбувається.

На рис. 15–18 представлені розрахункові ізолінії чисел Маху для решітки профілів С-9013Р для різних кутів атаки α^* при $\pi = 0,7$; $0,3$ і $\delta = 1$. Аналіз картини течії показує, що при зміні кутів атаки α^* у діапазоні ($45^\circ - 135^\circ$) течія змінюється лише у вхідній частині соплового апарату, на виході з соплового апарату зміни розподілу чисел Маху не відбувається.

Висновки

За результатами проведеної роботи можна зробити наступні висновки:

– при зміні кута атаки величини коефіцієнтів втрати кінетичної енергії значно (до 25 %) збільшуються лише для $\pi = 0,7$ і $\delta = 1$ відносно розрахунків при $\alpha_0 = 90^\circ$. При $\pi = 0,3$ і $\delta = 1$ та при $\pi = 0,7$; $0,3$ і $\delta = 0,3$ коефіцієнт збільшується незначно (до 5 %) відносно розрахунків при $\alpha_0 = 90^\circ$. При цьому коефіцієнт змінюється менше, щодо коефіцієнта при розрахунковому куті атаки $\alpha_0 = 90^\circ$, при менших перепадах тиску на решітці профілів (при збільшенні швидкості потоку на виході з соплової решітки);

– зміна кута атаки впливає на розподіл статичного тиску вздовж профілю лише на його передній частині, та не впливає на розподіл у вихідній частині;

– зміна кутів атаки незначно впливає на кути виходу з соплової решітки профілів С-9013Р;

– зменшення перепаду тиску на сопловій решітці призводить до зміни кутів виходу з соплової решітки при ступені відкриття поворотної діафрагми $\delta > 0,5$.

Результати, отримані в даній роботі, будуть використані для розробки методики чисельного дослідження просторового обтікання соплових решіток з поворотними діафрагмами.

Список літератури

- 3.2. Основні елементи сучасних парових турбін / С. Т. Базєєв, Б. Д. Білека, Є. П. Васильєв, Г. Б. Варламов, І. А. Вольчин, Ю. Г. Дашкієв ; Наук. ред. В. М. Клименко, Ю. О. Ландау, І. Я. Сігал // Книга 3. Розвиток теплоенергетики та гідроенергетики. – 2013. – 399 с. – ISBN 978-966-8163-15-9. – Назва з екрану. – URL: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-3/part-1/section-3/3-2> (дата звернення: 12.12.2023).
- Усатий А. П. Создание инженерной методики оценки эффективности сопловых решеток с поворотными диафрагмами / А. П. Усатый, Т. А. Фам // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків: НТУ «ХП», 2018. – № 12(1288). – С. 21–27. Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2018.12.04>.
- Дейч М. Є. Атлас профілів решіток осьових турбін / М. Є. Дейч, Г. А. Філіпов, Л. Я. Лазарєв. – 1965. – 96 с.
- Жирков О. Г. Чисельне дослідження обтікання соплових решіток з поворотними діафрагмами / О. Г. Жирков, О. П. Усатий, О. П. Авдєєва, Ю. І. Торба // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2020. – № 2(4). – С. 5–10. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2020.02.01>.
- Єршов С. В. Вплив ступеня подрібнення на результати розрахунку тривимірних течій у проточних частинах турбомашин при використанні RANS моделей / С. В. Єршов, В. А. Яковлев // Проблеми машинобудування. – 2015. – Т. 18, № 4/1. – С. 18–24. – ISSN 0131-2928.
- Халатов А. А. Основи теорії прижевового шару [Електронний ресурс] : навч. посіб. / А. А. Халатов, Є. В. Мочалін,

- Н. Ф. Дмитрієва. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2019. – 191 с. – URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/26035/1/OTPSH_Navch_Posib_Khalatov-Mochalin-Dymytriyeva_2019.pdf (дата звернення: 12.12.2023).
7. Menter F. R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows / F. R. Menter // AIAA. – 1993. – No. 93–2906. – P. 1–21. – DOI: <https://doi.org/10.2514/6.1993-2906>.

References (transliterated)

1. Bazeyev Ye. T., Bileka B. D., Vasylyev Ye. P., Varlamov G. B., Vol'chy'n I. A., Dashkiyev Yu. G. ; Ed.: V. M. Kly'menko, Yu. O. Landau, I. Ya. Sigal (2013), "3.2. Osnovni elementy suchasny'x parovy'x turbin [The main elements of modern steam turbines]", *Книга 3. Rozvytok teploenergetyky ta gidroenergetyky* [Book 3. Development of heat and hydropower.], ISBN 978-966-8163-15-9, Access mode: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-3/part-1/section-3/3-2> (accessed 12 December 2023).
2. Usaty A., Pham T. (2018), "Evaluation of the Efficiency of the Socket Latches by Turn-Link Diaphragms Using the CFD-Packet", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 12(1288), pp. 21–27, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2018.12.04>.
3. Dejch M. Je., Filipov G. A., Lazarjev L. Ja. (1965), *Atlas profiliv reshitok os'ovyh turbin* [Atlas of axial turbine lattice profiles], 96 p.
4. Zhyrkov O., Usaty O., Avdieieva O., Torba Y. (2020), "Numerical Investigation of the Streamlining of Nozzle Arrays Equipped with Grid Valves", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 2(4), pp. 5–10, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2020.02.01>.
5. Jershov S. V., Jakovljev V. A. (2015), "Vplyv stupenja podribnennja na rezultaty rozrahunku tryvymirnyh techij u protochnyh chastynah turbomashyn pry vykorystanni RANS modelej [The influence of the degree of grinding on the results of the calculation of three-dimensional flows in the flowing parts of turbomachines using RANS models], *Problemy mashynobuduvannja* [Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashinobuduvannja], vol. 18, no. 4/1. pp. 18–24, ISSN 0131-2928.
6. Xalатов A. A., Mochalin Ye. V., Dymytriyeva N. F. (2019), *Osnovy teorii pry mezhovogo sharu* [Basics of boundary layer theory], Kiev, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 191 p, Access mode: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/26035/1/OTPSH_Navch_Posib_Khalatov-Mochalin-Dymytriyeva_2019.pdf (accessed 12 December 2023).
7. Menter F. R. (1993), "Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows", *AIAA*, no. 93–2906, pp. 1–21, <https://doi.org/10.2514/6.1993-2906>.

Надійшло (received) 15.11.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Жирков Олександр Григорьевич (Zhyrkov Oleksandr) – провідний інженер-дослідник сектору газодинаміки експериментально-випробувального комплексу ДП «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна; e-mail: zhyrkov@i.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4003-6078>.

Усатий Олександр Павлович (Usaty Oleksandr) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри турбінобудування, м. Харків, Україна; e-mail: alpaus@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8568-5007>.

Авдєєва Олена Петрівна (Avdieieva Olena) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри турбінобудування, м. Харків, Україна; e-mail: Olena.Avdieieva@kpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9358-4265>.

Торба Юрій Іванович (Torba Yuri) – кандидат технічних наук, начальник експериментально-випробувального комплексу ДП «Івченко-Прогрес» м. Запоріжжя, Україна; e-mail: torba.yuriy@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8470-9049>.