

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

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБТІКАННЯ СОПЛОВИХ РЕШІТОК З ПОВОРОТНИМИ ДІАФРАГМАМИ

Представлені результати чисельного дослідження плоского обтікання соплової решітки з поворотною діафрагмою, виконано порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними. 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 входної частини каналів соплової решітки.

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

А. Г. ЖИРКОВ, А. П. УСАТЫЙ, Е. П. АВДЕЕВА, Ю. И. ТОРБА

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ СОПЛОВЫХ РЕШЕТОК С ПОВОРОТНЫМИ ДИАФРАГМАМИ

Представлены результаты численного исследования плоского обтекания сопловой решетки с поворотной диафрагмой, выполнено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными. Расчеты проводились с помощью программного комплекса *Fluent* (№ клиента 01067322). В результате выполненных расчетов были получены: картины течения в межлопаточном канале и за ним; распределение коэффициентов потери кинетической энергии по фронту решетки при различных степенях открытия входной части каналов сопловой решетки.

Ключевые слова: поворотная диафрагма, численное исследование, коэффициенты потерь энергии, теплофикационные турбины, модели турбулентности.

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

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE STREAMLINING OF NOZZLE ARRAYS EQUIPPED WITH GRID VALVES

The purpose of one of the stages of this research is to develop the technique for the numerical investigation of the flow of the nozzle array equipped with the grid valve for its further use for the solution of the problem relating to the optimal design of the flow passage in cogeneration turbines. The development of this technique was divided into two parts, in particular the simulation of the two-dimensional or flat flow and the simulation of the three-dimensional flow. This research paper gives some data obtained for the first part of the developed technique, i. e. the verification data obtained by the comparison of the results of numerical and experimental investigations of the two-dimensional flow of the nozzle array with the grid valve. The Fluent software package was used for the simulation and computation of the flow of operating fluid. Computational domains restricted by one interblade channel were constructed for a different degree of the opening of the nozzle closure diaphragm. The grids were constructed for computational domains. The computations were performed to define the effect of the used turbulence model on the computation results. The best coincidence with experimental data was obtained when using the $k-\omega$ SST model. The computations done allowed us to obtain the flow patterns in the interblade channel and behind it and the distribution of the coefficients of the loss of kinetic energy over the grid front for a different level of the opening of closure diaphragms at the inlet to the nozzle ring. The obtained research data allow us to draw the following conclusions: the selected computation parameters enable a qualitative reflection of physical phenomena in the flow both for subsonic and supersonic flows of the cascade; the computation coefficients of the loss of kinetic energy showed a satisfactory coincidence with experimental data and it is indicative of that the development of the technique for the numerical investigation of the flow of nozzle arrays with grid valves is possible in principle when using the Fluent software package. The data obtained through this research will be used for the development of the technique for the numerical investigation of the three-dimensional flow of nozzle arrays with grid valves.

Key words: the grid valve, numerical investigation, energy loss coefficients, cogeneration 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 робо-

ти 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]. При цьому до методики пред'являються вимоги високої точності і надійності розрахунків. У зв'язку зі складністю цього етапу роботи вона розділена на дві частини:

© О. Г. Жирков, О. П. Усатий, О. П. Авдеева, Ю. І. Торба, 2020

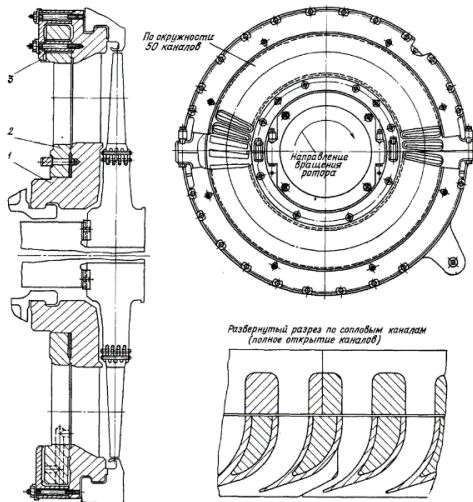


Рис. 1 – Регулююча діафрагма турбіни Т-175-130:
1 – діафрагма; 2 – поворотне кільце;
3 – розвантажувальне півкільце

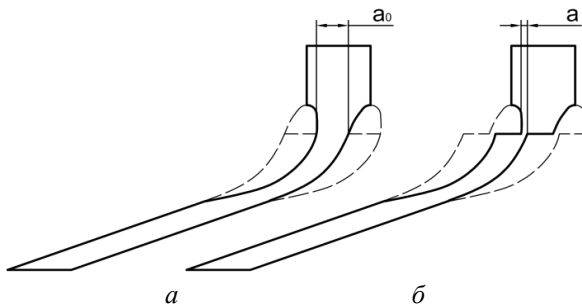


Рис. 2 – Розрахункова область для профілю С-9013Р: $a - \delta = 1$; $b - \delta = 0,15$

- моделювання плоскої течії;
- моделювання просторової течії.

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

Об'єкт дослідження

Для верифікації методики, що розробляється, порівнювалися дані розрахункових і експериментальних досліджень соплових решіток. Великий обсяг експериментальних даних з оцінки ефективності соплових решіток з поворотними діафрагмами отримано свого часу в МЕІ під керівництвом Дейча М.С. [3].

В якості об'єкта досліджень був обраний профіль С-9013Р [3]. Коефіцієнти втрат енергії ζ в плоскій решітці з профілів С-9013Р отримані випробуванням в спеціальній аеродинамічній трубці де робочим тілом було повітря в діапазоні чисел Маха $M = (0,5-1,6)$ при ступені відкриття діафрагми $\delta = (0,15-1,0)$.

На рис. 2, наведена розрахункова область каналу, утвореного профілями С-9013Р.

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

Сітка в розрахунковій області

Основна вимога до розрахункової сітки – якісний опис фізичних явищ, що мають місце в розрахунковій області. З одного боку сітка повинна забезпечувати моделювання явищ в приграничному шарі, в області близької до стінки. З іншого боку, явищ в проточній частині каналів решітки, і за її межами, що виникають при трансзвукових і надзвукових швидкостях течії потоку (стрибки ущільнення, відрив потоку, закромкові сліди та інше). Це вимагає ущільнення сітки в зазначених областях. З іншого – розмір елементів сітки і їх кількість повинні бути обмежені з точки зору часу, який буде витрачено на проведення обчислень.

Відомий той факт, що масштаби сітки повинні відповідати масштабам течії, що розраховується [4], тобто характерним розмірами областей потоку з істотними градієнтами параметрів течії. Так, для тривимірної течії в одному міжлопатковому каналі, при використанні різничевого методу другого порядку необхідно використовувати досить дрібні сітки з кількістю елементів порядку $10^7 \dots 10^8$.

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.

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 і інших аеродинамічних явищ невідоме, то сітка будувалася з умови забезпечення показника $y^+ \leq 1$ в області близької до стінки. Приблизна товщина найближчого елемента сітки (Δy) до стінки розраховувалася за формулою:

$$\Delta y = by^+ \sqrt{74} \operatorname{Re}^{-\frac{13}{14}}, \quad (1)$$

де b – хорда лопатки, м;
 Re – число Рейнольдса.

Товщина приграничного шару в першому наближенні оцінювалася за формулою:

$$\delta = 0,035b \operatorname{Re}^{-\frac{1}{7}} \quad (2)$$

Отримані величини округлювалися, Δu в меншу сторону, δ в більшу. Товщина приграничного шару розбивалася на 25 підшарів з товщиною найближчого елемента сітки до стінки Δu , з коефіцієнтом збільшення елементів 1,2. Розмір решти сітки встановлювався рівним розміру елемента в останньому підшарі.

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

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).

На першому етапі розробки методики для оцінки впливу моделі турбулентності, що використовувалася на результати розрахунків були виконані порівняльні розрахунки, при $\pi = 0,7; 0,5$ та $\delta = 1$, в яких моделювання турбулентних явищ

здійснювалося по черзі моделями турбулентності, які закладені в програмному комплексі *Fluent*:

- *Spalart-Allmaras* (Спаларта-Аллмараса) [5];
- *Realizable k-ε* [6];
- *k-ω SST* (модель Ментера) [7].

Розрахунки проводилися на однакових сітках. Результати порівняльних розрахунків представлені в табл. 1 та на рис. 3–5.

Таблиця 1 – Розрахункові величини втрати енергії

Модель турбулентності	<i>Spalart-Allmaras</i>	<i>Realizable k-ε</i>	<i>k-ω SST</i>	π
Втрати енергії, ζ , %	2,36	3,83	2,29	0,7
	2,39	–	2,24	0,5

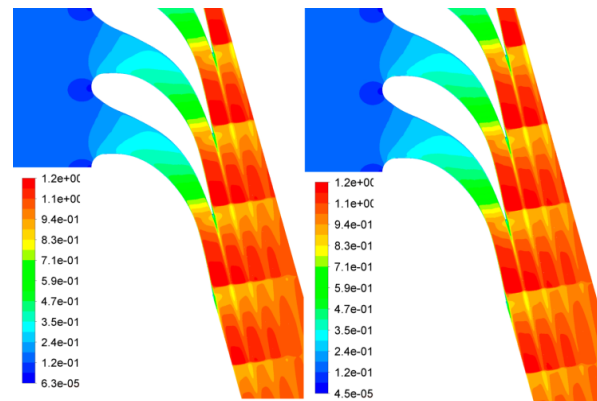


Рис. 3 – Ізолінії чисел Маху в розрахунковій області при різних моделях турбулентності при $\pi = 0,7$ і $\delta = 1$:
а – *Spalart-Allmaras*; б – *k-ω SST*

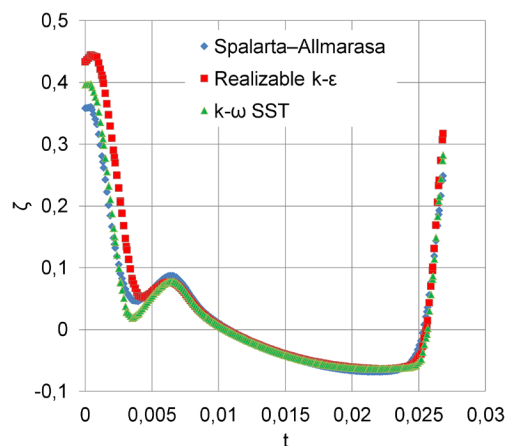


Рис. 4 – Розподіл коефіцієнта втрат уздовж фронту решітки для різних моделей турбулентності при $\pi = 0,7$ і $\delta = 1$

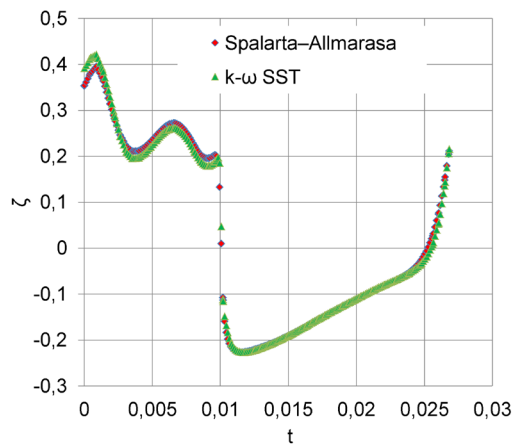


Рис. 5 – Розподіл коефіцієнта втрат уздовж фронту решітки для різних моделей турбулентності при $\pi = 0,5$ і $\delta = 1$

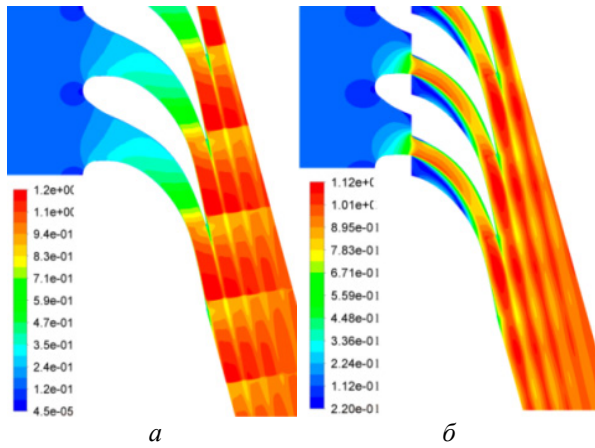


Рис. 6 – Характер течії в розрахунковій області. Ізолінії чисел Маху: $a - \pi = 0,5$ і $\delta = 1$; $b - \pi = 0,5$ і $\delta = 0,5$

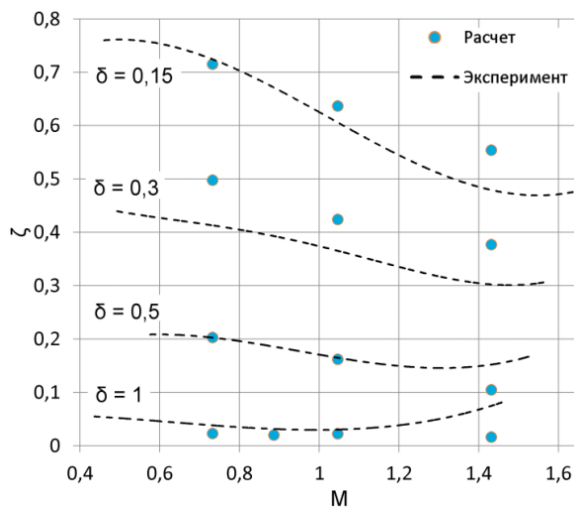


Рис. 7 – Розрахункові та експериментальні коефіцієнти втрат енергії решітки профілів С-9013Р

Розрахункові значення коефіцієнтів втрат енергії для моделей турбулентності Спаларта-Аллмараса і Ментера відрізняється на 2,9 % і 6,3 % для $\pi = 0,7$ і $\pi = 0,5$ відповідно. Модель турбулентності *Realizable k-ε* показала відміну від моделей Спаларта-Аллмараса і Ментера 38,4 % і 40,2 % відповідно при $\pi = 0,7$. Для подальших розрахунків була обрана модель турбулентності *k-ω SST*, яка найбільш часто використовується для розрахунків такого типу [7].

На другому етапі проводилися розрахунки течії при параметрах $\pi = 0,7; 0,5; 0,3$ і $\delta = 1; 0,5; 0,3; 0,15$. 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.

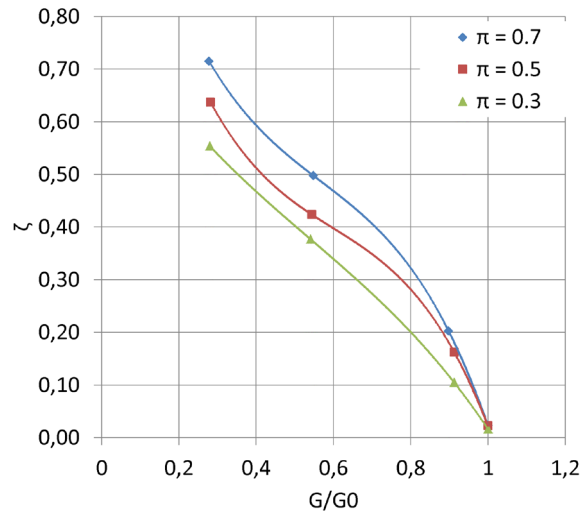


Рис. 8 – Залежність розрахункових коефіцієнтів втрат від відносної витрати через решітку профілів С-9013Р

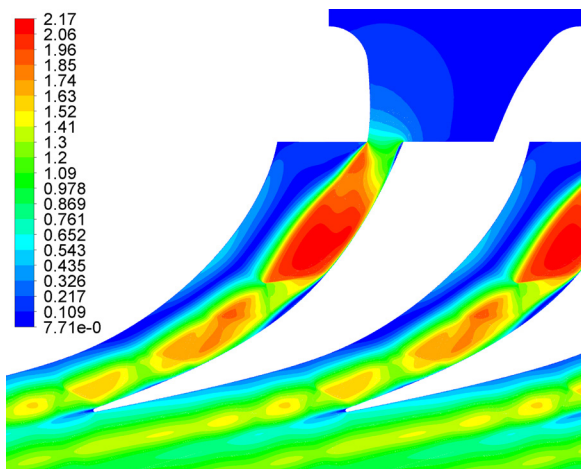


Рис. 9 – Течія в розрахунковій області. Ізолінії чисел Маху при $\pi = 0,3$ і $\delta = 0,3$

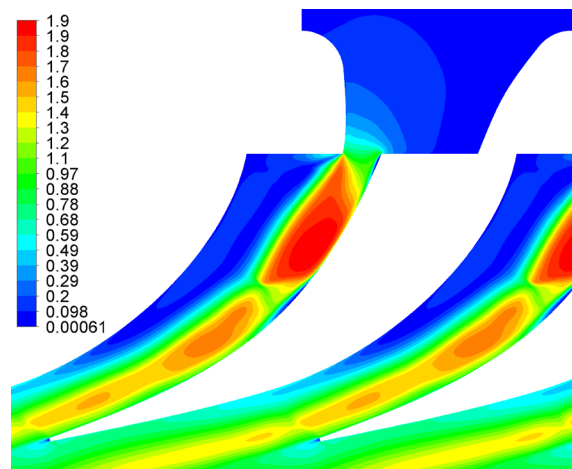


Рис. 10 – Течія в розрахунковій області. Ізолінії чисел Маху при $\pi = 0,3$ і $\delta = 0,3$

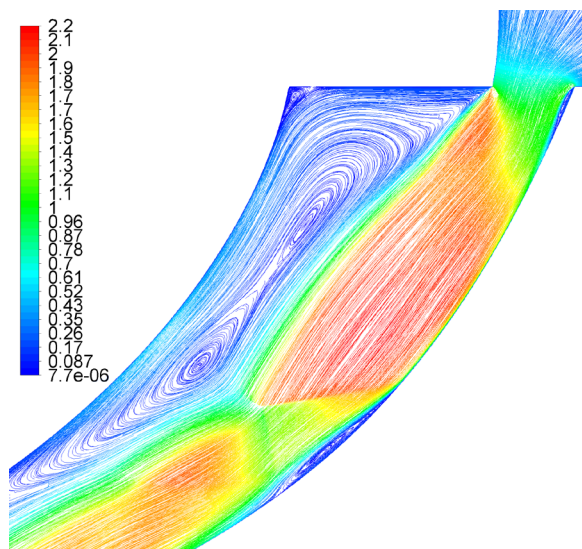


Рис. 11 – Зона течії в каналі решітки за поворотною діафрагмою. Ізолінії чисел Маху при $\pi = 0,3$ і $\delta = 0,3$

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 Маху M і ступеня відкриття входних 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 витрат кінетичної енергії.

Результати розрахунків

На рис. 6 представлені розрахункові ізолінії чисел Маху для решітки профілів С-9013Р при $\pi = 0,5$ і $\delta = 1; 0,5$. Аналіз картини течії показує, що застосована методика розрахунку адекватно описує фізичні явища в потоці: розташування стрибків ущільнення, наявність кромкового сліду і їх взаємодії.

Порівняння коефіцієнтів, отриманих розрахунковим і експериментальними шляхами для решітки профілів С-9013Р, представлено на рис. 7.

З рис. 7 випливає, що розрахункові значення коефіцієнтів витрат енергії задовільно узгоджуються при $\pi = 0,7; 0,5$ і $\delta = 1; 0,5$, що відповідає дозвуковому і трансзвуковому обтіканню профілів потоком повітря. При $\pi = 0,3$, що відповідає надзву-

ковому обтіканню, розрахункові коефіцієнти витрат трохи занижені щодо експериментальних при $\delta = 1; 0,5$, і завищені при $\delta = 0,3; 0,15$. При цьому характер зміни розрахункових коефіцієнтів витрати енергії від режиму π збігається з експериментальними даними.

На рис. 8 представлена залежність розрахункових коефіцієнтів витрат від відносної витрати через решітку.

На рисунках 9 і 10 показані ізолінії числа Маху в розрахунковій області при $\pi = 0,3$ і $\delta = 0,3$. На рис. 9 картина течії отримана розрахунком з використанням моделі турбулентності $k-\omega SST$, кількість елементів сітки 230000 шт. Як видно на зображенні, в області прилеглий до коритця лопатки, потік має складну структуру. Для перевірки отриманої картини течії були виконані додаткові дослідження, на новій сітці – кількість елементів 63000 шт. при умові $y^+ \leq 30$, з використанням моделі турбулентності *Reynolds Stress*. Отримана розрахункова картина течії близька до картини отриманої при розрахунку з використанням моделі турбулентності $k-\omega SST$ і представлена на рис. 10. Також подібна картина течії характерна для режиму при $\delta = 0,15$. В каналах решітки чітко видні вихрові та надзвукові зони. Наявність такого характеру течії безумовно потребує подальшого детального дослідження, як причин їх появи, так і можливих методів їх зменшення.

На рис. 11 показана вихрова та надзвукова зона течії в каналі решітки у збільшеному масштабі.

Висновки

За результатами проведеної роботи можна зробити наступні висновки:

- найбільш придатною моделлю турбулентності для чисельного дослідження плоского обтікання соплових решіток з поворотними діафрагмами в програмному комплексі *Fluent* є модель $k-\omega SST$;

- вибрані параметри розрахунку дозволяють якісно відображати фізичні явища в потоці, як при дозвуковому, так і при надзвуковому обтіканні решітки профілів;

- задовільне узгодження розрахункових коефіцієнтів витрати кінетичної енергії з експериментальними даними говорять про принципову можливість розробки методики чисельного дослідження обтікання соплових решіток з поворотними діафрагмами за допомогою програмного комплексу *Fluent*.

Для більш детального вивчення складної картини течії, отриманої при $\delta = 0,3; 0,15$ буде проведено додаткове чисельне дослідження.

Результати, отримані в даній роботі, будуть використані для розробки методики чисельного

дослідження просторового обтікання соплових решіток з поворотними діафрагмами.

Список літератури

1. Бененсон Є. І. *Теплофікаційні парові турбіни*. Москва: Вища школа, 1986. 270 с.
2. Усатий А. П., Фам Т. А. Создание инженерной методики оценки эффективности сопловых решеток с поворотными диафрагмами. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків: НТУ «ХП», 2018. № 12(1288). С. 21–27. Бібліогр.: 12 назв. ISSN 2078-774X (print). ISSN 2707-7543 (on-line). doi: 10.20998/2078-774X.2018.12.04.
3. Дейч М. С., Філіпов Г. А., Лазарев Л. Я. *Атлас профілів решіток осевих турбін*. Москва: Машинобудування, 1965. 96 с.
4. Сршов С. В., Яковлев В. А. Влияние степени подрібнення на результати розрахунку тривимірних течій у проточних частинах турбомашин при використанні RANS моделей. *Проблеми машинобудування*. 2015. Т. 18, № 4/1. С. 18–24.
5. Spalart P. R., Allmaras S. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *La Recherche Aerospaciale*. 1994. No 1. pp. 5–21.
6. Коркодинов Я. А. Обзор семейства k-ε моделей для моделирования турбулентности. *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*. 2013. № 2. С. 5–16.
7. Menter F. R. Zonal two equation k-ω turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA*. 1993. No. 93–2906. pp. 1–21.

References (transliterated)

1. Benenson Je. I. (1986), *Теплофизические паровые турбины* [Heating steam turbines], Vysshya shkola, Moscow.
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), doi: 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], Mashynobuduvannja, Moscow.
4. Jershov S. V., Jakovljev V. A. (2015), "Vplyv stupenja podribnennja na rezul'taty rozrahunku tryvymirnyh techij u protocnyh 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* [Mechanical Engineering Issues], vol. 18, no. 4/1. pp. 18–24.
5. Spalart P. R., Allmaras S. R. (1994), "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows", *La Recherche Aerospaciale*, no. 1, pp. 5–21.
6. Korkodinov Ja. A. (2013), "Ogljad simejstva k-ε modelej dlja mode-ljuvannja turbulentsnosti [Review of the family of k – ε models for turbulence modeling], *Perms'kyj derzhavnyj tehničnyj universytet* [Perm National Research Polytechnic University], no. 2, pp. 5–16.
7. Menter F. R. (1993), "Zonal two equation k-ω turbulence models for aerodynamic flows", *AIAA*, no. 93–2906, pp. 1–21.

Надійшла (received) 07.04.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

Усатий Олександр Павлович (Усатый Александр 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>.

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

Торба Юрій Іванович (Торба Юрий Иванович, 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>.