

УДК 629.7.035.(045):621.45.3

doi: 10.32620/aktt.2020.8.05

М. В. ХИЖНЯК<sup>1</sup>, К. В. ДОРОШЕНКО<sup>1</sup>, В. Ю. УСЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup> Національний авіаційний університет, Київ<sup>2</sup> ДП «Антонов», Київ

## ВИБІР І ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ГЕНЕРАЦІЇ СІТКИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ У ВЕНТИЛЯТОРІ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Дослідження течії в авіаційних газотурбінних двигунах – одна з головних складових для створення нових компресорів і вентиляторів з поліпшеними аеродинамічними, акустичними, міцнісними, габаритно-масовими та іншими характеристиками. У сучасних наукових дослідженнях методи фізичного натурного експерименту використовуються на завершальних стадіях досліджень течії в лопаткових машинах. На перших етапах використовується чисельний експеримент. Очевидною перевагою чисельного експерименту є можливість за короткий проміжок часу досліджувати безліч варіантів конструкції при різних вхідних і граничних умовах. Однак чисельний експеримент вимагає попереднього вибору і обґрунтування своїх параметрів і компонентів. Одним з таких важливих компонентів є тип розрахункової сітки. Метою даної роботи є порівняння гібридної і структурованої сітки для моделювання течії в осьовому вентиляторі двоконтурного двигуна з великим ступенем двоконтурності. У якості об'єкта дослідження обрано два робочих колеса вентилятора двоконтурного двигуна з великим ступенем двоконтурності. Моделювання течії у вентиляторах досліджувалося при частоті обертання ротора 2202 об./хв. в діапазоні значень газодинамічної витрати на вході  $q(\lambda)=0,4\dots0,65$ . Враховуючи, проведений літературний огляд, система рівнянь Нав'є-Стокса замикалася моделлю турбулентності SST. З метою вибору і обґрунтування методу генерації кінцево-елементної сітки було побудовано структуровану і гібридну сітку для двох варіантів вентиляторів. За результатами розрахунків було побудовано залежність ступеня підвищення тиску  $\pi$  від газодинамічної витрати на вході  $q(\lambda)$ . За результатами проведеного дослідження, можна стверджувати, що розбіжність розрахунків для робочих коліс в осьовому вентиляторі двоконтурного двигуна з великим ступенем двоконтурності зі структурованою і гібридною сітками буде складати до 2 %. При виборі методу генерації кінцево-елементної сітки важливим фактором також виступає час розрахунку. Проведені дослідження показали, що розрахунок зі структурованою кінцево-елементною сіткою проходив за час, менший на 50...70%, ніж при використанні гібридної сітки для одного варіанту геометрії.

**Ключові слова:** чисельне моделювання; метод генерації сітки; вентилятор; форма лопатки; газотурбінний двигун; структурована сітка; гібридна сітка.

### Вступ

Дослідження течії в авіаційних газотурбінних двигунах - одна з головних складових для створення нових компресорів і вентиляторів з поліпшеними аеродинамічними, акустичними, міцнісними, габаритно-масовими та іншими характеристиками. У сучасних наукових дослідженнях методи фізичного натурного експерименту використовуються на завершальних стадіях досліджень течії в лопаткових машинах. На перших етапах використовується чисельний експеримент. Очевидною перевагою чисельного експерименту є можливість за короткий проміжок часу досліджувати безліч варіантів конструкції при різних вхідних і граничних умовах.

Однак чисельний експеримент вимагає попереднього вибору і обґрунтування своїх параметрів і

компонентів. Одним з таких важливих компонентів є тип розрахункової сітки.

На сьогоднішній день налічується велика кількість досліджень, присвячених параметрам і компонентам чисельного експерименту. В роботі [1] представлений глибокий критичний аналіз методів чисельного експерименту для моделювання течії в лопаткових машинах. В роботі наводяться переваги і недоліки різних методів моделювання течії. Показано, що вибір параметрів чисельного експерименту грає важливу роль для отримання адекватного розрахунку течії в лопаткових машинах.

Мабуть, одним з визначальних параметрів моделювання течії в лопаткових машинах виступає вибір моделі турбулентності. Питання порівняння різних моделей турбулентності присвячені, зокрема статті [2 – 5]. Автори роботи [2] досліджують підхід

для моделювання турбулентності Zonal Detached Eddy Simulation (ZDES), порівняння з RANS моделями турбулентності показують, що ZDES більш точно описує структуру вихорового обтікання лопаткового вінця. Однак, варто зазначити, що використання методу ZDES вимагає великих обчислювальних ресурсів.

Для замикання системи рівнянь Нав'є-Стокса для розрахунку течії в компресорах і вентиляторах газотурбінних двигунів найчастіше використовують наступні моделі турбулентності:  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$ , SST,  $k-\omega$ -SST. В роботі [3] порівнюються сім моделей турбулентності. Показано, що при різних умовах роботи досліджувані моделі дають різні результати.

В роботі [4] автори аналізують застосовність двох моделей турбулентності  $k-\epsilon$  і  $k-\omega$ -SST для моделювання течії в ступені компресора. Зокрема, автори детально досліджують течію в радіальному зазорі. Показано, що модель  $k-\epsilon$  дає погані результати в порівнянні з моделлю  $k-\omega$ -SST. Щоб зрозуміти причини цієї невідповідності, авторами були детально досліджені параметри турбулентності, такі як турбулентна кінетична енергія, дисипація і вихорова в'язкість. Виявлено, що оцінка члена вихорової в'язкості занадто висока в  $k-\epsilon$  моделі через надмірне зростання турбулентної кінетичної енергії, масштабу часу і відсутності ефективного коефіцієнта демпфірування. Це призводить до розсіювання вихорової структури потоку і неправильної оцінки поля потоку в області радіального зазору. Проте, модель турбулентності  $k-\omega$ -SST дає результати, що відповідають дійсності. В роботі [5] оцінюються моделі турбулентності  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$ , SST. Автори роблять висновок, що для моделювання течії в лопаткових вінцях найбільш підходить модель турбулентності SST, яка більш точно описує течію як в ядрі потоку, так і в пограничному шарі. В роботі [6] при виборі моделі турбулентності для моделювання течії в осьовому компресорі автори зупиняють свій вибір також на моделі SST.

Ще одним, не менш значущим компонентом чисельного експерименту, є вибір методу генерування кінцево-елементної сітки. В роботі [7] запропоновано огляд різних методів генерування сіток: структурований, неструктурований, гібридний і мультизонний. На різних прикладах автор показує доцільність застосування того чи іншого методу генерування сітки. Крім того, в роботі представляється і пояснюється оригінальний алгоритм, розроблений автором, для роботи з гострими опуклими і увігнутими точками в структурованій сітці. В роботі [8] порівнюється адекватність розрахунку при використанні двох методів генерування сітки. Перший метод побудови сітки являє собою структуровану шестигранну сітку, розроблену ANSYS ICEM CFD

13.0, а другий – гібридну тетраедричну сітку, розроблену Pointwise 17.0 R1. Результати, отримані автором, показують, що для досліджуваного завдання розглянуті два методи побудови сітки дають еквівалентні результати. В роботі [9] представлені результати порівняння між гекса-структурованого і гібридно-неструктурованого методами побудови сітки для чисельного моделювання течії в морських гвинтах, що працюють в однорідному потоці (умови відкритої води). Моделювання проводилося за допомогою комерційного вирішувача RANS, з використанням рухомої системи відліку і з використанням моделі турбулентності SST. Загальні результати показали, що для прогнозування тягових характеристик морських гребних гвинтів в масштабі моделі не існує значних відмінностей з точки зору точності між структурованими і гібридними сітками. Однак, автори відзначають, що для детального вивчення течії в лопатковому вінці гвинта структурована сітка є більш прийнятною.

Проведений огляд показує, що не можна зробити однозначний висновок про вибір типу методу генерування кінцево-елементної сітки і моделі турбулентності. Цей вибір ґрунтується на геометрії об'єкта дослідження, умови розрахунку, комп'ютерних можливостей і кінцевих цілей чисельного експерименту. Тому для вирішення кожного класу задач існує необхідність вибору і обґрунтування основних параметрів чисельного експерименту.

*Метою даної роботи є порівняння гібридної і структурованої сітки для моделювання течії в осьовому вентиляторі двоконтурного двигуна з великим ступенем двоконтурності.*

## 1. Постановка задачі

Будь-який потік речовини може бути описаний системою диференційованих рівнянь. Більш ніж 50 років вченим та науковцям в розв'язанні таких рівнянь допомагає ЕОМ; допомагає апроксимувати диференційні рівняння системою алгебраїчних рівнянь для отримання наближеної цифрової форми потоку речовини. Але точність таких задач залежить від математичної моделі, методу дискретизації (метод кінцевих різниць, метод кінцевих об'ємів та метод кінцевих елементів та інші), системи координат (декартова, сферична, циліндрична, криволінійна, стаціонарна та інші) та розрахункової кінцево-елементної сітки (структурована, неструктурована, гібридна, мультизонна та інші).

Кінцево-елементна сітка (або кінцево-елементна модель) складається із вузлів та елементів, що формують модель дослідження. Сітка може бути побудована в автоматичному чи ручному режимі. У 2D моделях вона формується із трикутників

чи чотирикутників тоді як в 3D моделях елементи сітки можуть бути гексаедри, тетраедри, клиновидні/призми та пірамідальні (рис. 1).

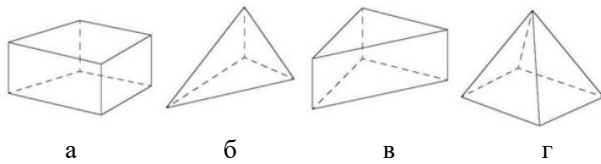


Рис. 1. Елементи: а – гексаедр, б – тетраедри, в – клиновидні/призми та г – пірамідальні

Передбачено чотири методи генерації сітки:

- довільна сітка (автоматично побудована сітка, зазвичай, використовується елемент гексаедр, може описати складну геометрію тіла, використовується в поодиноких розрахунках, економлячи час, але дає більший відсоток похибки);

- впорядкована (структурована) сітка (створена автоматично чи «вручну» використовує, зазвичай, елемент гексаедр, інколи призму чи пірамідальні елементи, що дає змогу зменшити кількість елементів та отримати більш якісний результат, інколи за короткий час розрахунку);

- гібридна (змішана) сітка (створюється виключно людиною, поєднуючи в собі будь-які елементи та методи генерації, що зазначені вище, використовується для поодиноких чи декількох тіл в області контакту кількох матеріалів);

- мультизонна сітка (поєднує в собі дві чи більше сіток вище перерахованих, використовують для масштабних проектів із кількома процесами одночасно).

Враховуючи те, що використання довільної сітки буде давати велику похибку, а мультизонна сітка використовується для класу задач з кількома процесами одночасно, в роботі досліджуються методи генерації структурованої і гібридної кінцево-елементної сітки.

## 2. Моделювання течії в робочому колесі вентилятора з різними методами генерації розрахункової сітки

У якості об'єкта дослідження обрано два робочих колеса вентилятора двоконтурного двигуна з великим ступенем двоконтурності. Периферійний радіус на вході – 1,185 м, радіус втулки – 0,326 м, кількість лопаток – 33. Робочі колеса вентилятора мають однакові конструкційні кути входу і виходу, а також однакові периферійні і втулкові радіуси на вході і на виході. Варіант робочого колеса №1 досліджувався в роботах [10, 11]. Варіант колеса №2 відрізняється формою лопатки в меридіональному перерізі. Форми

лопаток в меридіональному перерізі робочого колеса вентилятора №1 і №2 представлено на рис. 2.

Моделювання течії у вентиляторах досліджувалось при частоті обертання ротора 2 202 об./хв. в діапазоні значень газодинамічної витрати на вході  $q(\lambda)=0,4\dots0,65$ . Враховуючи, проведений літературний огляд, система рівнянь Нав'є-Стокса замикалася моделлю турбулентності SST.

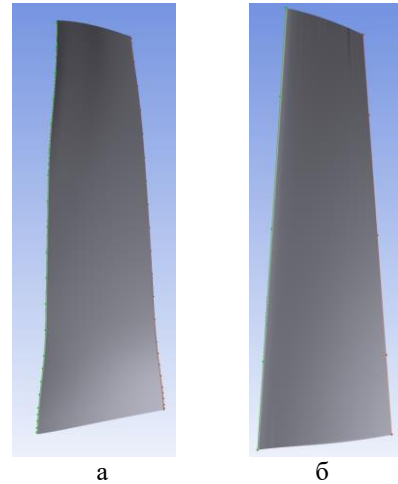


Рис. 2. Форми лопатки в меридіональному перерізі варіанта №1 (а) і №2 (б) робочого колеса вентилятора

З метою вибору і обґрунтування методу генерації кінцево-елементної сітки було побудовано структуровану і гібридну сітку для двох варіантів вентиляторів. Варіант №1 (рис. 3): сітка структурована, елемент гексаедр, кількість елементів становить 1 452 330, кількість вузлів – 1 501 136; сітка гібридна, поєднує в собі сітку із елементів тетраедр та структуровану сітку біля поверхні лопатки із елементів гексаедр, кількість елементів – 1 618 392, кількість вузлів – 615 211.

Варіант №2 (рис. 4): сітка структурована, елемент гексаедр, кількість елементів становить 1 471 590, кількість вузлів – 1 526 161; сітка гібридна, поєднує в собі сітку із елементів тетраедр та структуровану сітку біля поверхні лопатки із елементів гексаедр, кількість елементів – 1 458 065, кількість вузлів – 492 412.

За результатами розрахунків було побудовано залежність ступеня підвищення тиску  $\pi$  від газодинамічної витрати на вході  $q(\lambda)$  (рис. 5).

Аналіз графіку показує, що зміна форми лопатки не суттєво впливає на змінення значень ступеня підвищення тиску  $\pi$ . Максимальне значення ступеня підвищення тиску  $\pi$  практично не змінилося (структурована сітка: для варіанту №1 ступінь підвищення тиску  $\pi$  складає 1,199, для варіанту №2 – 1,195; гібридна сітка – для варіанту №1 – 1,183, для варіанту №2 – 1,205). Треба відзначити, що при зміні форми

лопаті зберігається характерна особливість форми характеристик. Для структурованої сітки максимальне значення ступеня підвищення тиску відповідає  $q(\lambda)=0,48$ . При цьому для гібридної сітки в обох досліджуваних варіантах максимальні значення ступеня підвищення тиску відповідають  $q(\lambda)=0,39$ .

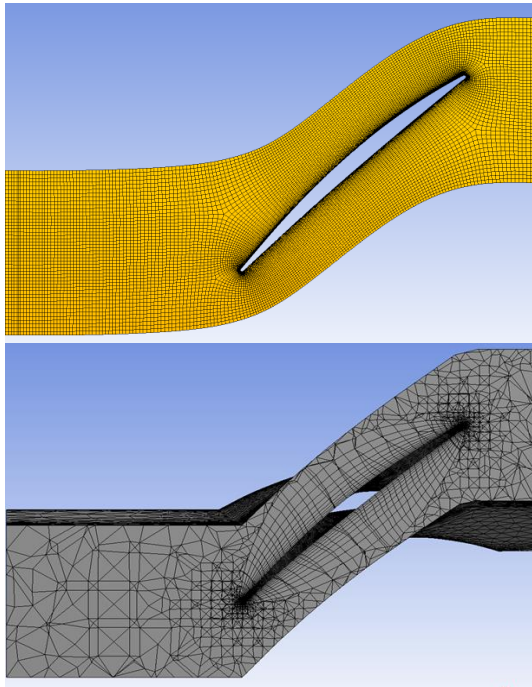


Рис. 3. Структурована і гібридна сітка для робочого колеса вентилятора варіанта №1

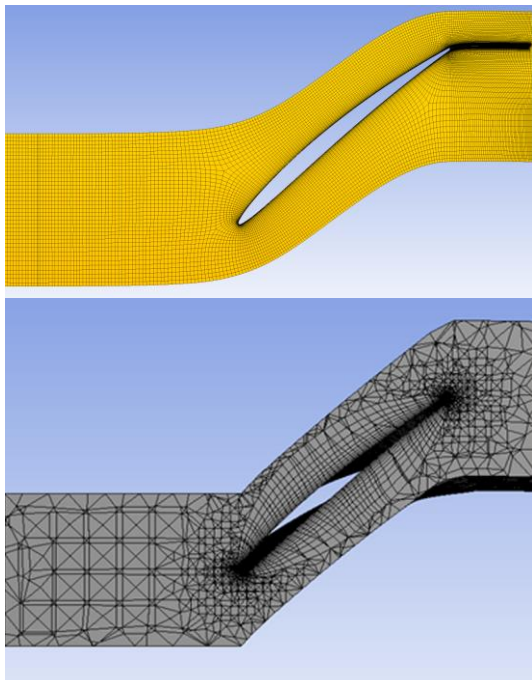


Рис. 4. Структурована і гібридна сітка для робочого колеса вентилятора варіанта №2

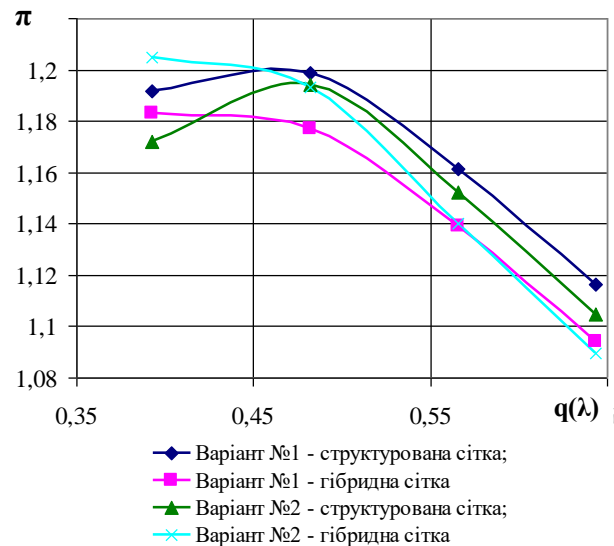


Рис. 5. Залежність ступеня підвищення тиску від газодинамічної функції  $q(\lambda)$

Загалом, можна сказати, що для форми лопаті №2 структурована і гібридна сітка дає значення, які не відрізняються більше ніж 1,5 %. Для форми лопаті варіанту №1 розбіжність значень складає не більше 2 %.

Таку відмінність результатів можна пояснити різною формою лопаті. Варіант лопаті №2 має пряму форму в меридіональному перерізі, що більш підходить для побудови структурованих кінцево-елементних сіток.

При виборі методу генерації сітки важливим фактором також виступає час розрахунку. Проведені дослідження показали, що розрахунок зі структурованою сіткою проходив за час, менший на 50...70 %, ніж при використанні гібридної сітки для одного варіанту геометрії.

## Висновок

За результатами проведеного дослідження, можна стверджувати, що розбіжність розрахунків для робочих коліс в осьовому вентиляторі двоконтурного двигуна з великим ступенем двоконтурності зі структурованою і гібридною сітками буде складати до 2 %.

При складних нелінійних формах лопаті доцільно використовувати гібридну сітку, але при цьому час розрахунку збільшиться на 50...70 %.

## Література

1. *Computational Fluid Dynamics in Turbomachinery: A Review of State of the Art [Text]* / R. N. Pinto, A. Afzal, L. V. D'Souza et al // *Archives of Computational Methods in Engineering*. – 2017.

– Vol. 24. – P. 467-479. DOI: 10.1007/s11831-016-9175-2.

2. Marty, J. Impact of underlying RANS turbulence models in Zonal Detached Eddy Simulation: application to a compressor rotor [Електронний ресурс] / J. Marty, C. Uribe // 13th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, Apr 2019, LAUSANNE, Switzerland. 13 p. HAL Id: hal-02178800. – Режим доступа: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02178800>. – 12.06.2020.

3. Numerical study of corner separation in a linear compressor cascade using various turbulence models [Text] / L. Yangwei, Y. Hao, L. Yingjie et al // Chinese Journal of Aeronautics. – 2016. – vol. 29 (3). – P. 639-652. DOI: 10.1016/j.cja.2016.04.013.

4. Abbasi, S. Effects of Different Turbulence Models in Simulation of Unsteady Tip Leakage Flow in Axial Compressor Rotor Blades Row [Text] / S. Abbasi, M. Zienali // Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 8(1). – P. 61-74.

5. Бойко, А. В. Применение вычислительной аэродинамики к оптимизации лопаток турбомашин [Текст] / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, М. В. Булака. – X : НТУ «ХПИ», 2012. – 192 с.

6. Tereshchenko, Yu. Numerical study of flow in the stage of axial compressor with different topology of computation grid [Text] / Yu. M. Tereshchenko, E. Doroshenko, I. Lastivka et al // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 3/7(7). – P. 28-33. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.101315.

7. Kardontchik, J. E. Hybrid Meshes [Електронний ресурс] / J. E. Kardontchik. – 2013. – 55 p. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/255721803\\_Hybrid\\_Meshes](https://www.researchgate.net/publication/255721803_Hybrid_Meshes). – 12.06.2020.

8. Rousseau, Ph. M. Comparison between structured hexahedral and hybrid tetrahedral meshes generated by commercial software for CFD hydraulic turbine analysis [Text] / Ph. M. Rousseau, A. Soulaïmani, M. Sabourin // Conference: 21st Annual Conference of the CFD Society of Canada, At Sherbrooke, Canada. – 9 p. DOI: 10.13140/2.1.2574.4960.

9. Morgut, M. Comparison of Hexa-Structured and Hybrid-Unstructured Meshing Approaches for Numerical Prediction of the Flow Around Marine Propellers [Text] / M. Morgut, E. Nobile // First International Symposium on Marine Propulsors'09, Trondheim, Norway, June 2009. – 7 p.

10. Кисляк, М. И. Исследование влияния параметров сетки на результаты CFD расчётов ступени вентилятора ТРДД [Текст] / М. И. Кисляк, В. В. Комаров, М. М. Митрахович // Технологические системы. – 2016. – № 3 (76). – С. 60 – 68.

11. Кисляк, М. И. Визначення раціональної моделі турбулентності для отримання характеристик ступені вентилятора осьового компресора газотурбінного двигуна з використанням програмного комплексу ANSYS [Текст] / М. И. Кисляк, В. В. Кома-

ров, М. М. Митрахович // Технологические системы. – 2015. – №3 (72). – С. 62 – 67.

## References

1. Pinto, R. N., Afzal, A., D'Souza, L. V., Ansari, Z., Samee, A. D. M. Computational Fluid Dynamics in Turbomachinery: A Review of State of the Art. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2017, vol. 24, pp. 467-479. DOI: 10.1007/s11831-016-9175-2.

2. Marty J., Uribe C. Impact of underlying RANS turbulence models in Zonal Detached Eddy Simulation: application to a compressor rotor. *13th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics*, Apr 2019, LAUSANNE, Switzerland. 13 p. HAL Id: hal-02178800. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02178800>. (accessed 12.06.2020).

3. Yangwei, L., Hao, Y., Yingjie, L., Lipeng, L., Qiushi, L. Numerical study of corner separation in a linear compressor cascade using various turbulence models. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, vol. 29 (3), pp. 639-652. DOI: 10.1016/j.cja.2016.04.013.

4. Abbasi, S., Zienali, M. Effects of Different Turbulence Models in Simulation of Unsteady Tip Leakage Flow in Axial Compressor Rotor Blades Row. *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 8 (1), pp. 61-74.

5. Bojko, A. V., Govorushhenko, Ju. N., Burlaka, M. V. *Primenenie vychislitel'noj aerodinamiki k optimizacii lopatok turbomashin* [Application of computational aerodynamics to the optimization of turbomachine blades], Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2012. 192 p.

6. Tereshchenko, Yu. M., Doroshenko, E., Lastivka, I., Tereshchenko, Yu. Yu. Numerical study of flow in the stage of axial compressor with different topology of computation grid. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, no. 3/7(7), pp. 28-33, DOI: 10.15587/1729-4061.2017.101315.

7. Kardontchik, J. E. *Hybrid Meshes*, 2013. 55 p. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/255721803\\_Hybrid\\_Meshes](https://www.researchgate.net/publication/255721803_Hybrid_Meshes) (accessed 12.06.2020).

8. Rousseau, Ph. M., Soulaïmani, A., Sabourin, M. Comparison between structured hexahedral and hybrid tetrahedral meshes generated by commercial software for CFD hydraulic turbine analysis. *Conference: 21st Annual Conference of the CFD Society of Canada*, At Sherbrooke, Canada. 9p. DOI: 10.13140/2.1.2574.4960.

9. Morgut, M., Nobile, E. Comparison of Hexa-Structured and Hybrid-Unstructured Meshing Approaches for Numerical Prediction of the Flow Around Marine Propellers. *First International Symposium on Marine Propulsors'09*, Trondheim, Norway, June 2009. 7 p.

10. Kisljak, M. I., Komarov, V. V., Mitrahovich, M. M. *Issledovanie vlijanija parametrov setki na*

rezul'taty CFD raschjotov stupeni ventiljatora TRDD [Investigation of the influence of grid parameters on the results of CFD calculations of the turbojet fan stage]. *Tehnologicheskie sistemy*, 2016, no. 3 (76), pp. 60-68.

11. Kisljak, M. I., Komarov, V. V., Mitrahovich, M. M. Viznachennja racional'noї modeli turbulentnosti dlja otrimannja harakteristik stupeni ventiljatora os'-

ovogo kompresora gazoturbinnogo dviguna z vikoristannjam programnogo kompleksu ANSYS [Determination of a rational model of turbulence to obtain the characteristics of the fan stage of the axial compressor of a gas turbine engine using the ANSYS software package]. *Tehnologicheskie sistemy*, 2015, no. 3 (72), pp. 62-67.

*Поступила в редакцию 20.06.2020, рассмотрена на редколлегии 15.08.2020*

## **ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ГЕНЕРАЦИИ СЕТКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ В ВЕНТИЛЯТОРАХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*М. В. Хижняк, Е. В. Дорошенко, В. Ю. Усенко*

Исследование течения в авиационных газотурбинных двигателях - одна из главных составляющих для создания новых компрессоров и вентиляторов с улучшенными аэродинамическими, акустическими, прочностными, габаритно-массовыми и другими характеристиками. В современных научных исследованиях методы физического натурного эксперимента используются на завершающих стадиях исследований течения в лопаточных машинах. На первых этапах используется численный эксперимент. Очевидным преимуществом численного эксперимента является возможность за короткий промежуток времени исследовать множество вариантов конструкций при различных входных и граничных условиях. Однако численный эксперимент требует предварительного выбора и обоснования своих параметров и компонентов. Одним из таких важных компонентов является тип расчетной сетки. Целью данной работы является сравнение гибридной и структурированной сетки для моделирования течения в осевом вентиляторе двухконтурного двигателя с большой степенью двухконтурности. В качестве объекта исследования выбрано два рабочих колеса вентилятора двухконтурного двигателя с большой степенью двухконтурности. Моделирование течения в вентиляторах исследовалось при частоте вращения ротора 2202 об./мин. в диапазоне значений газодинамической функции расхода на входе  $q(\lambda) = 0,4...0,65$ . На основе проведенного литературного обзора, система уравнений Навье-Стокса замыкалась моделью турбулентности SST. С целью выбора и обоснования метода генерации конечно-элементной сетки были построены структурированная и гибридная сетка для двух вариантов вентиляторов. По результатам расчетов была построена зависимость степени повышения давления  $\pi$  от газодинамической функции расхода на входе  $q(\lambda)$ . По результатам проведенного исследования, можно утверждать, что расхождение расчетов для рабочих колес в осевом вентиляторе двухконтурного двигателя с большой степенью двухконтурности со структурированной и гибридной сетками будет составлять до 2 %. При выборе метода генерации сетки важным фактором также выступает время проведения расчета. Проведенные исследования показали, что расчет со структурированной сеткой проходил за время, меньшее на 50 ... 70%, чем при использовании гибридной сетки для одного варианта геометрии.

**Ключевые слова:** численное моделирование; метод генерации сетки; вентилятор; форма лопатки; газотурбинный двигатель; структурированная сетка; гибридная сетка.

## **SELECTION AND JUSTIFICATION OF THE GRID GENERATION METHOD FOR FLOW SIMULATION IN A GAS TURBINE ENGINE FAN**

*M. Khyzhniak, E. Doroshenko, V. Usenko*

The study of flow in aircraft gas turbine engines is one of the main components for the creation of new compressors and fans with improved aerodynamic, acoustic, strength, overall weight, and other characteristics. In modern scientific research, the methods of the physical experiment are used at the final stages of flow studies in blade machines. a numerical experiment is used in the early stages. An obvious advantage of the numerical experiment is the ability to study many variants of constructions under different input and boundary conditions in a short period. However, a numerical experiment requires a preliminary selection and justification of its parameters and components. One such important component is the type of calculation mesh. The literature review shows that it is impossible to make an unambiguous conclusion about the choice of the type of method for generating the finite element mesh and the turbulence model. This work aims to compare a hybrid and structured mesh for flow modeling in an axial fan of a bypass engine with a high bypass ratio. Two impellers of a bypass engine with a high bypass ratio are selected as the object of study. Flow simulation in fans was studied at a rotor speed of 2202 rpm in the range of val-

ues of the gas-dynamic flow function at the inlet  $q(\lambda) = 0.4 \dots 0.65$ . Based on the literature review, the system of Navier-Stokes equations was closed by the SST turbulent model. To select and substantiate the method of finite-element grid generation, a structured and hybrid mesh for two fan variants were constructed. According to the results of the calculations, the dependence of the pressure ratio of fan  $\pi$  on the gas-dynamic flow function at the inlet  $q(\lambda)$  was constructed. According to the results of the study, it can be stated that the discrepancy of the calculations for the impellers in the axial fan of a bypass engine with a high bypass ratio with structured and hybrid meshes will be up to 2 %. When choosing the method of mesh generation, the time of calculation is also an important factor. Studies have shown that the calculation with a structured mesh took place in less time by 50 ... 70% than when using a hybrid mesh for one variant of the geometry.

**Keywords:** numerical simulation; mesh generation method; fan; blade shape; gas turbine engine; structured mesh; hybrid mesh.

**Хижняк Михайл Владимирович** – асп. каф. авиационных двигателей, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

**Дорошенко Екатерина Викторовна** – д-р техн. наук, доц., доц. каф. авиационных двигателей, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

**Усенко Вячеслав Юрьевич** – нач. отд. силовых установок, ГП «Антонов», Киев, Украина.

**Mykhailo Khyzhniak** – PhD student of Dept. of aviation engine, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: nessmike3@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-2919-370X.

**Kateryna Doroshenko** – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor of Dept. of aviation engine, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: Kiki\_ua@ukr.net, ORCID Author ID: 0000-0001-6495-3263, Scopus Author ID: 57190439468, <https://scholar.google.com/citations?user=D5hIt0wAAAAJ&hl=ru>.

**Viacheslav Usenko** – Head of power plant department, Antonov company, Kyiv, Ukraine, e-mail: uvy1758@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-4794-9294, <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=NiFo09gAAAAJ>.