



УДК 621.45.037

*Мітрахович М. М., Кисляк М. М., Комаров В. В.*

Національний авіаційний університет. Україна, м. Київ

**ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ДЛЯ ОТРИМАННЯ  
ХАРАКТЕРИСТИК СТУПЕНІ ВЕНТИЛЯТОРА ОСЬОВОГО КОМПРЕСОРА  
ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ  
ANSYS**

*Розглянуто основні математичні моделі турбулентності, що використовуються при моделюванні складних систем та проведено їх порівняння при вирішенні задачі отримання характеристик ступені вентилятора осьового компресора газотурбінного двигуна за допомогою програмного комплексу для чисельного тривимірного термогазодинамічного моделювання ANSYS Fluent.*

*Ключові слова:* осьовий компресор ГТД; характеристики компресора; лопатковий вінець, ступінь компресора, тривимірне моделювання, турбулентність.

### Вступ

Нині обчислювальна гідрогазодинаміка (в зарубіжній літературі Computational Fluid Dynamics – CFD) є популярним інженерним інструментом [1, 2]. Це обумовлено такими її якостями, як формальна простота постановки завдання і незалежність методики його рішення від робочого процесу досліджуваного вузла. Тобто, освоївши методику рішення простих завдань, інженер може переходити до більш

складних, реалістичних завдань, підвищивши кваліфікацію тільки в галузі нового способу завдання граничних умов або параметрів розрахунку.

Одним з ключових моментів в газодинамічному розрахунку є підбір та вибір найбільш раціональної з точки зору тривалості розрахунку та адекватності одержуваних результатів розрахункової сітки і моделі турбулентності. Кожній моделі турбулентності відповідає своє коло завдань, для яких вона добре себе зарекомендувала. Крім того, кожна

модель турбулентності вимагає розрахункову сітку певної якості.

В даній роботі послідовно розглянуті різні модифікації та комбінації моделей турбулентності: модель  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport [1]), сімейство моделей DES (Detached Eddy Simulation [2]), а також стандартна LES (Large Eddy Simulation [3-4]) з алгебраїчною моделлю Смагоринського. Наведено результати вирішення тестових завдань для отримання характеристик ступені вентилятора з використанням наведених моделей.

Для розрахунку багатоступеневих компресорів в програмному комплексі ANSYS потрібні значні обчислювальні потужності (для якісного рішення потрібна сітка з великою кількістю елементів). Тому для спрощення та пришвидшення виконання розрахунків в роботі моделювалась не всяступінь вентилятора осьового компресора, а тільки його частина — лопатковий вінець.

### Постановка завдання

Нажаль, на даний момент не існує універсальної моделі турбулентності, яка б дозволяла точно та надійно визначати відрив примежового шару, втрати енергії в потоці, ламінарно-турбулентний перехід і т.п. Тенденції останнього часу полягає у використанні для інженерних розрахунків моделей турбулентності, що надійно працюють для окремих класів течії.

Для отримання адекватного результату розрахунку потоку в міжлопатковому каналі на зривних режимах роботи ступені, необхідно визначити раціональну модель для опису вихрових зривів при розрахунку.

Як видно з рівняння (1), число Рейнольдса характеризує відношення між інерційними і в'язкими силами [5]:

$$Re = \frac{l_0 \cdot u_0}{\nu}, \quad (1)$$

де:  $l_0$  — характерна довжина,  $u_0$  — характерна швидкість,  $\nu$  — коефіцієнт кінематичної в'язкості.

При зростанні числа Рейнольдса  $Re \geq 200$ , обтікання профілю потоком набуває нестационарний характер та розпочинається зрив вихорів з профілю. В діапазоні чисел Рейнольдса  $200 < Re < 100000$  спостерігається закономірна циркуляційна течія в межах профілю, що забезпечує утворення нестационарних сил взаємодії профілю з середовищем. Дія цих сил проявляється у вигляді вихрового звуку.

Даний звук має характерний суцільний спектр з явним максимумом в області чисел Струхала  $\approx 0,2$  [5], що відповідає циклічній частоті зриву вихорів з профілю:

$$Sh = \frac{\omega_0 \cdot a}{\pi \cdot u_0} \approx 0,2 \quad (2)$$

де:  $\omega_0$  — циклічна частота,  $u_0$  — характерна швидкість,  $a$  — характерний розмір. При подальшому збільшенні числа Рейнольдса (швидкості), генерація вихрового звуку припиняється.

Таким чином турбулентна течія, що визначає генерацію вихрового звуку має масштаби когерентності вздовж профілю [6].

Так для профілю в потоці, точка відриву потоку може бути рухомою і змінювати своє положення в залежності від різних параметрів, таких як: шорсткість поверхні, кут встановлення та турбулентність течії. Оскільки кут встановлення та шорсткість в нашому випадку залишаються незмінними, то керуючим фактором точки відриву може бути лише зміна вихроутворення (турбулентності) течії. Тому для точного визначення джерел утворення звуку в лопатковому вінці виникає необхідність в визначенні раціональної моделі турбулентності.

Спектр турбулентної кінетичної енергії має три характерні зони: зону хвиль малої довжини, що містять в собі великі вихори, які несуть в собі більшу частину кінетичної енергії; інерційну зону, де під дією інерційних сил великі вихори розпадаються на менші, та на зону хвиль великої довжини, що утворюють дисипативну зону, де найменші вихори перетворюються в тепло під дією сил тертя. Опис турбулентності можливий за допомогою законів ймовірності, з використанням функції щільності ймовірностей, або в спрощеному вигляді з використанням осереднених параметрів течії [6].

Для вирішення задачі моделювання лопаткового вінця компресора, застосовано програмний продукт ANSYS Fluent, що дозволяє використовувати різні математичні моделі та засоби при створенні турбулентної течії [7].

### Моделі турбулентності

Detached Eddy Simulation (DES). ANSYS Fluent пропонує п'ять різних моделей для кожного типу вихроутворення: наприклад Spalart-Allmarasrealizable використовує відстань до найближчої стінки в якості параметру визначення масштабу довжини, що грає визначну роль в визначенні рівня турбулентної в'язкості, а в SST і Transition SST моделях. робота виконується переважно з примежовим шаром. Тобто можна сказати, що дані моделі розроблені для вирішення задач у примежовому шарі з великими числами Рейнольдса, де розрахунок за допомогою LES моделей не доцільний і приводитиме до значних похибок.

Large Eddy Simulation (LES) застосовують для моделювання великих вихорів. Ці вихори вирі-

шуються напряму за допомогою чисельної сітки і часу, а менші вихори моделюються. Як правило такий підхід використовують за умови, що великі нестационарні вихорутворення відіграють головну роль, а малі вихори несуть в собі малі величини рейнольдсових напружень, крім того дрібно масштабна турбулентність близька до ізотропної і має характеристики близькі до універсальних, що в більшій степені піддаються моделюванню стандартними функціями. Основним в LES моделюванні є розділення дрібно та великомасштабних структур за допомогою узагальненого фільтру [6].

Scale-Adaptive Simulation (SAS). Дана модель турбулентності підходить для моделювання нестационарних турбулентних потоків, а також може застосовуватися в поєднанні з більшістю базових URANS моделей турбулентності. SAS є однією з найбільш досконалих версій URANS моделі, що може виконувати не лише масштабну нестабільність, але й пристосовуватися до вже розрахованих масштабів в динаміці і дозволяє розвивати турбулентний спектр лише в окремих регіонах. Концепція даного методу базується на введенні довжини шкали фон Кармана в масштабне рівняння турбулентності. Дані отримані за цією шкалою дозволяють SAS моделі динамічно адаптуватися до вже розрахованих структур в симуляції URANS, що призводить до LES – подібної поведінки в зонах нестационарних течій, однак в цей же час модель забезпечує стандартні URANS можливості в місцях зі стабільною течією.

### Результати розрахунків

Моделювання виконувалось в декілька етапів: побудова геометричної моделі (див. рис. 1), створення сітки (див. рис. 2), визначення параметрів

течії (налаштування граничних умов) (див. рис. 3) та розрахунок (див. рис. 4)[7].

В середовищі обробки даних CFX Post, проведено порівняння отриманих результатів з основними характеристиками, що визначались на етапі параметризації течії (див. рис. 5) [8].

З порівняння отриманих миттєвих розподілів числа Рейнольдса за довжиною розрахункової області (див. рис. 5) можна зробити висновок, що з усіх досліджуваних моделей, створених для проведення розрахунків поблизу стінки, тільки DES-SST і SAS-SST проорокують схожі результати з проектвальними даними. Функція, використовувана в моделі DES Realizable для примусового «включення» RANS моделі поблизу стінки, затримує перемикання з RANS на LES при видаленні від стінки набагато довше, ніж в DES-SST. У даній постановці цього виявилось достатньо, щоб погасити високочастотні турбулентні пульсації, що пропускалися фільтром. В LES моделі турбулентності число Рейнольдса зростає, а характер течії різко відрізняється від усіх інших, оскільки при цьому моделюванні головним фактором є великі вихори (вихори, що утворені за рахунок зриву).

При моделюванні з використанням SAS-SST моделі помітно, що потік схожий з DES-SST і числа Рейнольдса майже однакові тому додатково порівнюється розподіл турбулентних течій на спинці лопатки (див. рис. 6).

На підставі отриманих результатів проведених численних досліджень можна зробити висновок про те, що найкращим чином проявила себе модель SAS-SST, що передбачила кількісний збіг числа Рейнольдса з проектвальними даними, а також кількісний і якісний розподіл модуля завихренності при течії в каналі у порівнянні з LES моделлю.

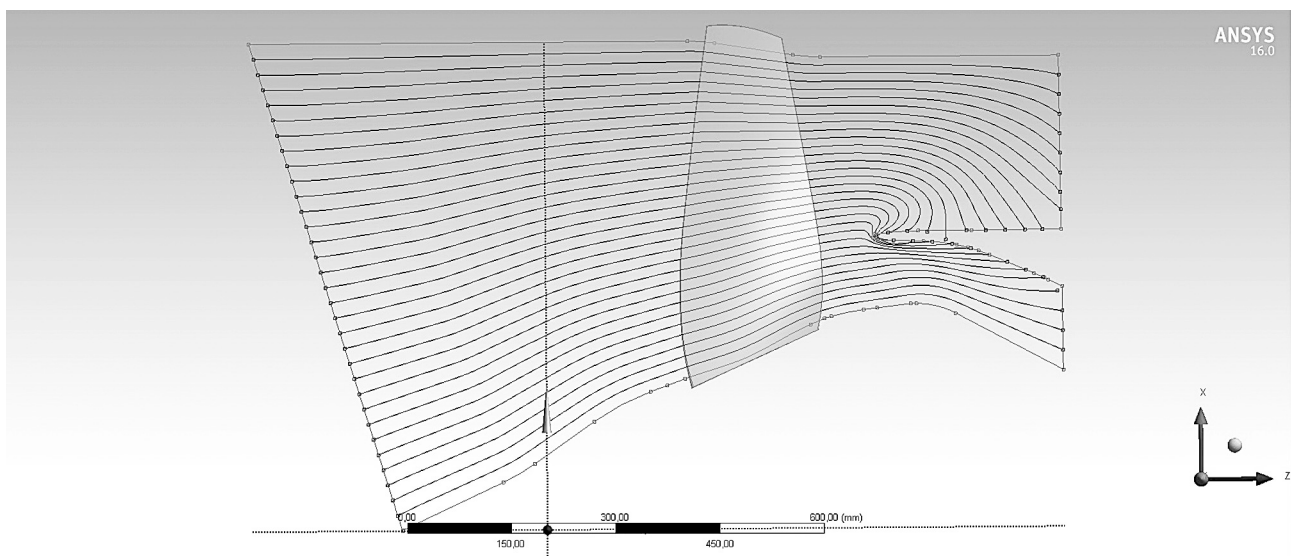


Рис. 1. Геометрична модель

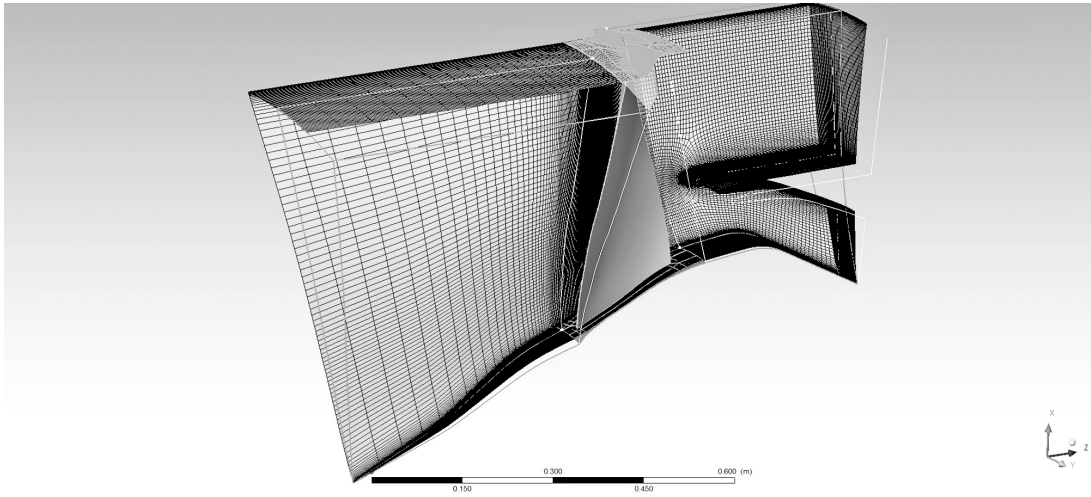


Рис. 2. Сітка кінцевих елементів розрахункової області

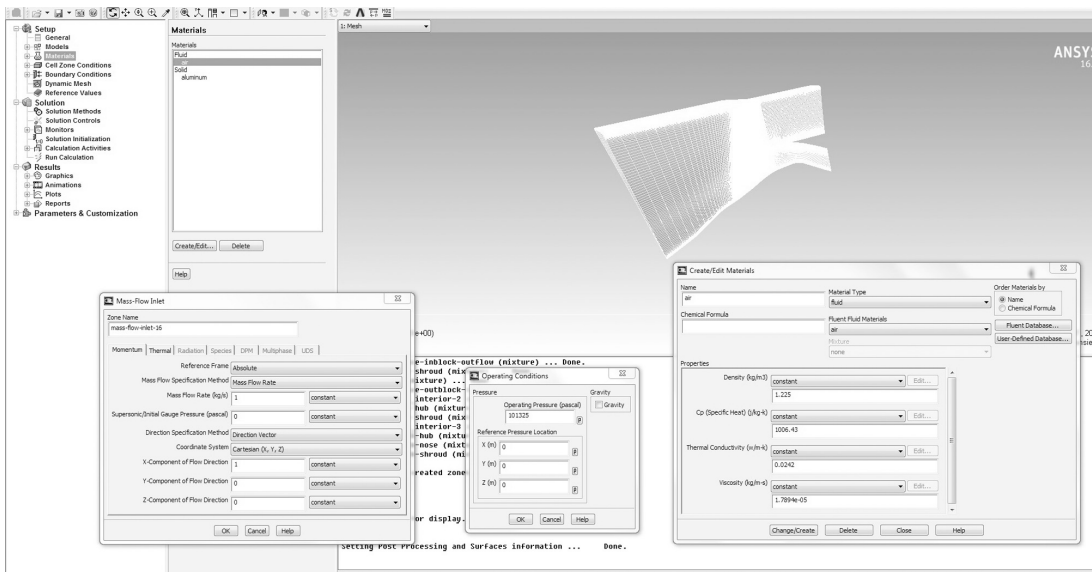


Рис. 3. Налаштування граничних умов розрахункової області в модулі ANSYS Fluent

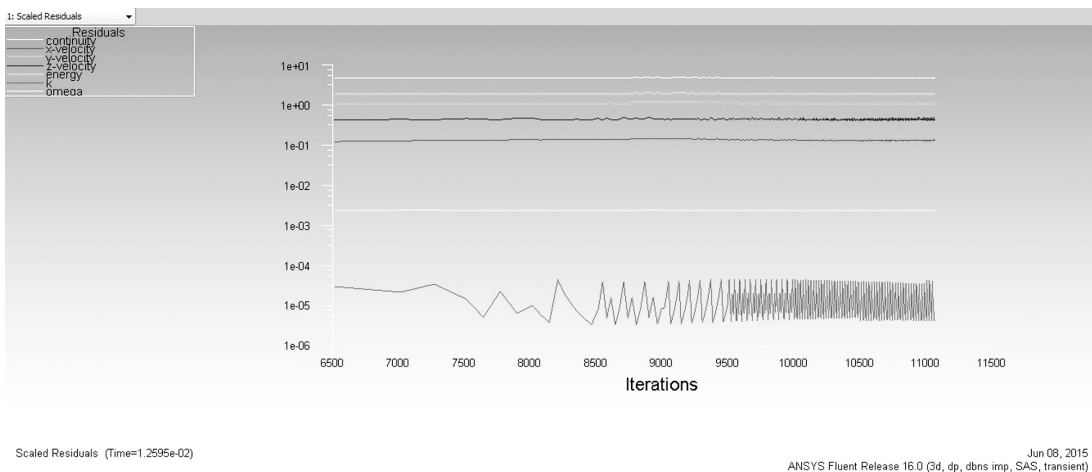
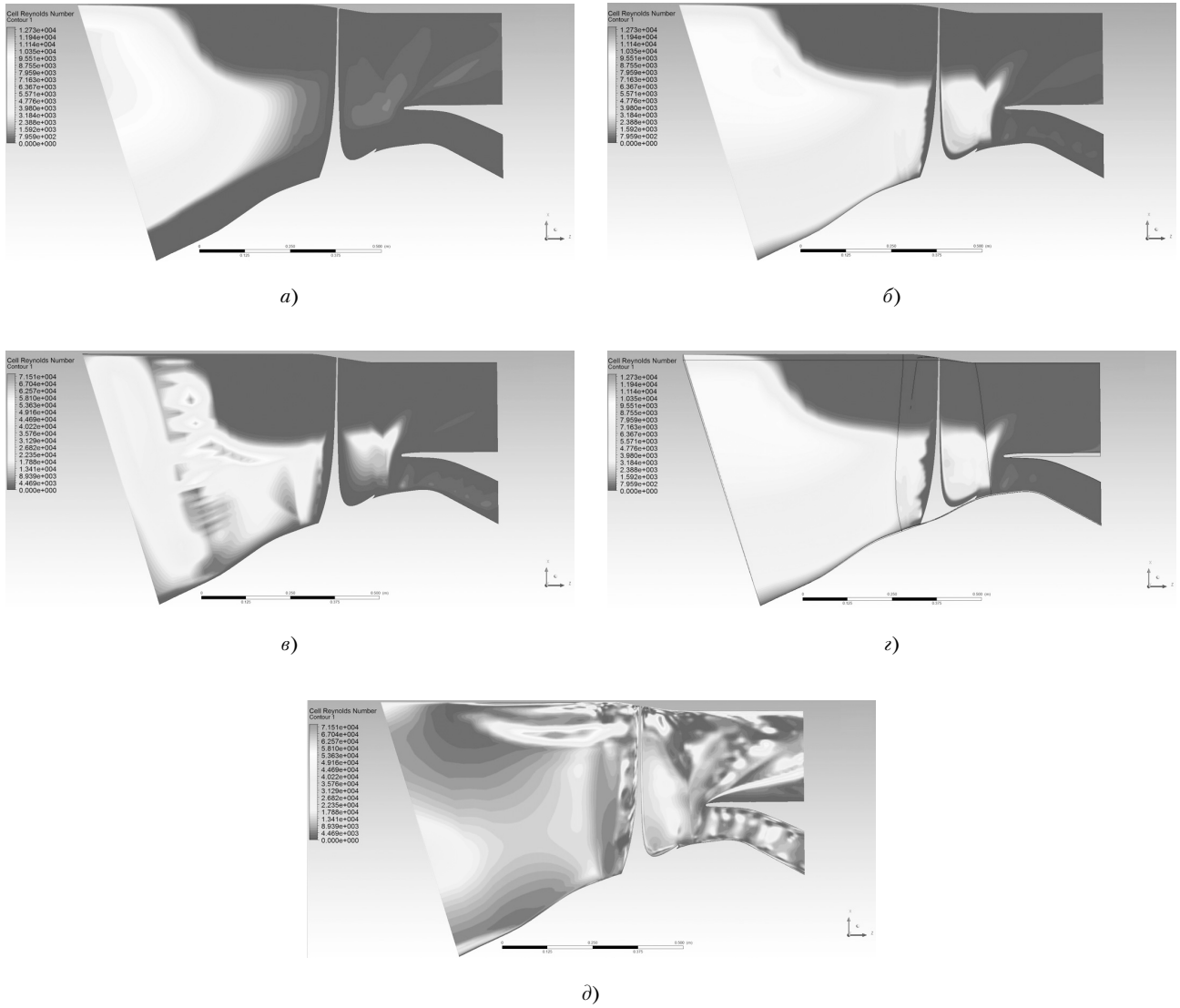
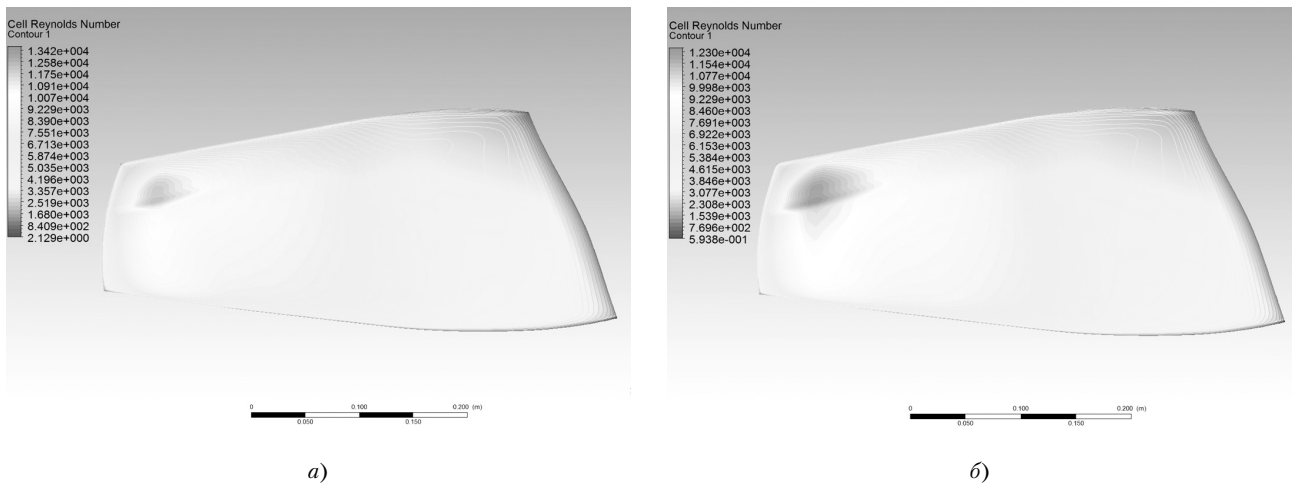


Рис. 4. Графік історії збіжності інтегральних параметрів при розрахунку



**Рис. 5.** Розподіл чисел Рейнольдса за довжиною розрахункової області в залежності від моделі турбулентності: а) DES Spalart-Allmaras; б) DES-SST; в) DES Realizable; г) SAS-SST; д) LES



**Рис 6.** Розподіл числа Рейнольдса на спинці лопатки: а) DES-SST б) SAS-SST

**Висновки**

На відміну від DES моделі турбулентності, SAS дозволяє адаптуватися до змін в потоці, що дозволяє використовувати дану модель при визначенні звукових коливань з більшою точністю. Тому дана модель є більш раціональною при використанні моделювання для розрахунків обтікання лопаткового вінця компресора ГТД та отримання характеристики течії.

**Література**

- [1] Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. Vol. 32. № 8. P. 1598–1605.
- [2] Strelets M. Detached-eddy simulation of massively separated flows // 39th AIAA Aerosp. Sci.: Proc. Meet. and Exhib. Reno, 2001. № AIAA 2001–0879. P. 1–18.
- [3] Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
- [4] Villiers E. The potential of large eddy simulation for the modelling of wall bounded flows: diss. Doctor of Philosophy / Imperial College. London, 2006. 351 p.
- [5] Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа. — Учеб. для вузов. Изд. 6-е, перераб. и доп. — М.: Наука, 1987. — 840 с.
- [6] Баженов, Л.А. О локализации источников вихревого звука при обтекании цилиндрического профиля [Текст] / Л.А. Баженов, А.Г. Семенов // Акустика неоднородных сред — Ежегодник РАО — М., 2011. Выпуск 12 — С. 13-35.
- [7] Юн, А.А. Теория и практика моделирования турбулентных течений. — М.: — Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009. — 272 с.
- [8] Басов, К.А. ANSYS: справочник пользователя. — М.: — ДМК Пресс, 2014 — 640 с.

*Mitrakhovych M.M., Kislyak M.I., Komarov V.V.*

National Aviation University. Ukraine, Kyiv

**DETERMINATION OF RATIONAL MODEL OF TURBULENCE  
FOR FAN CHARACTERIZE THE DEGREE OF AXIAL COMPRESSOR GAS TURBINE  
ENGINE USING ANSYS SOFTWARE COMPLEX**

*The basic mathematical turbulence model used in the simulation of complex systems and conducted comparing them with the task of receiving performance of parameters fan axial compressor gas turbine engine using numerical software for three-dimensional thermal gas-dynamic modeling ANSYS Fluent.*

*Keywords:* GTE axial compressor; compressor characteristics; blade crown; compressor degree; three-dimensional modeling; turbulence.

**References**

- [1] Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. Vol. 32. № 8. P. 1598–1605.
- [2] Strelets M. Detached-eddy simulation of massively separated flows // 39th AIAA Aerosp. Sci.: Proc. Meet. and Exhib. Reno, 2001. № AIAA 2001–0879. P. 1–18.
- [3] K.N. Volkov, V.N. Emelyanov, Modelirovanie krupnykh vihrey v raschetah turbulentnykh techeniy. M. Phizmatlib 2008. 368 p.
- [4] Villiers E. The potential of large eddy simulation for the modelling of wall bounded flows: diss. Doctor of Philosophy / Imperial College. London, 2006. 351 p.
- [5] Loitsiansky L.G. Mechanika Gudkoste i gaza. — Book for university Ed. 6th, revised. and add. -M.: Nauka., 1987. — 840 p.
- [6] Bazhenov L.A. O lokalizacii istochnikov vihrevogo zvuka pri obtekanii kulindricheskogo profilya [Text] / L.A. Bazhenov A.G. Semenov // Acoustics heterogeneous environments — Yearbook RAO-M., 2011. Issue 12 — pp 13-35.
- [7] Yun, A.A. Teoriya i praktika modelirovaniya turbulentnykh. — M.: — Book House "LIBROKOM", 2009. — 272 p.
- [8] Basov K.A. ANSYS: Spravochnik polzovatelya. — M.: — DMK Press, 2014 — 640 p.