

УДК 621.452.33:532.517.4

doi: 10.32620/aktt.2021.4.05

О. В. ЖОРНИК, І. Ф. КРАВЧЕНКО, М. М. МІТРАХОВИЧ, О. В. ДЕНИСЮК

Державне підприємство «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна

## ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕЛІ ТУРБУЛЕНТНОЇ В'ЯЗКОСТІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СПІВВІСНОГО ГВИНТОВЕНТИЛЯТОРА І ВХІДНОГО ПРИСТРОЮ ГТД

Розглянуто питання щодо обґрунтування найбільш раціональної за адекватністю моделі турбулентної в'язкості для проведення математичного моделювання течії біля гвинтовентиляторів та у вхідному пристрої турбогвинтовентиляторного двигуна. З'ясовано, що на даний час не існує універсальної моделі турбулентності для визначення параметрів примежового шару, втрати енергії в потоці та ламінарно-турбулентного переходу. Аналіз результатів попередніх досліджень показав, що існує необхідність вибору і обґрунтування моделі турбулентної в'язкості для кожного типу об'єктів дослідження. Задача моделювання течії біля гвинтовентилятора і у вхідному пристрої силової установки виконана з застосуванням програмного продукту ANSYS CFX, що дозволяє використовувати різні стандартні математичні моделі та засоби при моделюванні турбулентної течії. Об'єктом дослідження обрано кільцевий осьовий вхідний пристрій, перед яким розташований співвісний гвинтовентилятор, що має два ряди гвинтів: перший ряд налічує вісім лопатей, другий – шість. Досліджено 7 видів моделей турбулентної в'язкості, що найбільш повно описують явища при обтіканні гвинтовентилятора і вхідного пристрою: модель  $k-\omega$ ; SST (Shear Stress Transport); SST Transitional №1 Fully turbulence; SST Transitional №2 Specified Intermittency; SST Transitional №3 Gamma model; SST Transitional №4 Gamma theta model; SST Transitional №5 Intermittency. Результати математичного моделювання течії біля гвинтовентилятора і у вхідному пристрої на відповідному режимі роботи турбогвинтовентиляторного двигуна з використанням обраних моделей турбулентної в'язкості отримано значення повного тиску перед і за вхідним пристроєм, для визначення коефіцієнту відновлення повного тиску в ньому та значення тяги гвинтовентилятора. Значення коефіцієнта відновлення повного тиску у вхідному пристрої та тяги гвинтовентилятора порівнюються з даними льотних випробувань прототипу. Аналіз порівняння значень коефіцієнта відновлення повного тиску у вхідному пристрої показав і тяги гвинтовентилятора, що використання моделі SST Transitional №4 Gamma theta model дозволяє отримати найбільш наближене до результатів льотних випробувань значення коефіцієнту відновлення повного тиску у вхідному пристрої та тяги гвинтовентилятора.

**Ключові слова:** турбогвинтовентиляторний двигун; гвинтовентилятор; вхідний пристрій; силова установка; модель турбулентної в'язкості.

### Вступ

Сучасний стан розвитку і практичного використання методів обчислювальної гідрогазодинаміки (Computational Fluid Dynamics – CFD) дозволяє на початкових етапах дослідження отримувати експертні оцінки щодо удосконалення складних технічних систем, що обумовлено відносною простотою постановки завдання і незалежності методики рішення від робочого процесу, що досліджується.

Одним з ключових елементів газодинамічного розрахунку є обґрунтування та вибір найбільш раціональної, з точки зору тривалості розрахунку та адекватності одержуваних результатів, моделі турбулентної в'язкості і розрахункової сітки. Кожній моделі турбулентності відповідає своє коло завдань, для яких вона є найбільш прийнятною. Крім того, кожна модель турбулентності вимагає підбору параметрів і типу розрахункової сітки пев-

ної якості [1, 2].

Нажаль, поки що, не існує універсальної моделі турбулентності для визначення параметрів примежового шару, втрати енергії в потоці, ламінарно-турбулентного переходу і т.п.

Для отримання адекватного результату розрахунку потоку в лопатях рядів гвинтовентилятора або в проточній частині вхідного пристрою, чи в іншому елементі силової установки, необхідно визначити раціональну, найбільш прийнятну модель.

В статті проведені параметричні дослідження ряду моделей турбулентності пакета ANSYS CFX. Результати досліджень дозволяють обґрунтувати, найбільш раціональну за адекватністю залежно від зони застосування, модель турбулентної в'язкості.

Саме тому дослідження можливостей ряду визначених моделей турбулентної в'язкості при моделюванні обтікання співвісного гвинтовентилятора і вхідного пристрою силової установки

з гвинтовентиляторним двигуном є актуальною науковою задачею.

### Аналіз попередніх досліджень і публікацій

Турбулентність залишається одним з надскладних явищ механіки рідини і газу. Методи дослідження турбулентності спираються на ряд фундаментальних теорій. Теорія турбулентності на даний час не є завершеною, збільшується кількість нових моделей, що враховують різноманітні фактори і властивості.

У роботі [3] проведено порівняльне тестування моделей Спаларта-Аллмараса (SA) і Менгера (Menter) при трансзвуковому обтіканні профілю RAE 2822. Рішення такої задачі дозволяє порівнювати результати моделювання з багатьма експериментальними дослідженнями.

Найбільш повний аналіз моделей турбулентної в'язкості і особливостей їх застосування для математичного моделювання течії біля тіл складної форми проведено в роботах [1, 2]. В цих роботах розглянуто теоретичні основи математичного моделювання турбулентних течій та проведено аналіз існуючих моделей турбулентної в'язкості та особливостей їх застосування.

У роботі [4] наведено сучасну теорію турбулентних течій і викладені основні підходи до методів їх чисельного моделювання з використанням високопродуктивних комп'ютерів. Дається теоретичне обґрунтування методу на основі усереднення за Рейнольдсом, методу моделювання великих вихорів і гібридних методів (насамперед – методу від'єднаних вихорів). Вибір розглянутих моделей визначається їх реалізацією в поточних версіях обчислювальних гідродинамічних пакетів Ansys Fluent і Ansys CFX. Крім того, в роботі проведено коротке обговорення сучасних підходів до чисельного моделювання турбулентних течій (нове покоління моделей осереднення, неявне моделювання підсіточна дисипація в методі великих вихорів). Наведено приклад використання викладених методів в розрахунках турбулентного обтікання тіла з великим відривом потоку.

Аналіз результатів досліджень [1-4] показує, що існує необхідність вибору і обґрунтування моделі турбулентної в'язкості для кожного типу об'єктів дослідження.

*Мета роботи* – обґрунтування найбільш раціональної за адекватністю моделі турбулентної в'язкості для проведення математичного моделювання течії біля гвинтовентиляторів та у вхідному пристрої гвинтовентиляторного двигуна.

### Постановка завдання

Для вирішення задачі моделювання течії біля гвинтовентилятора і у вхідному пристрої силової установки застосовано програмний продукт ANSYS CFX, що дозволяє використовувати різні стандартні математичні моделі та засоби при моделюванні турбулентної течії [5].

Об'єктом дослідження є кільцевий осьовий вхідний пристрій, перед яким розташований співвісний гвинтовентилятор, що має два ряди гвинтів: перший ряд налічує вісім лопатей, другий – шість (рис. 1).

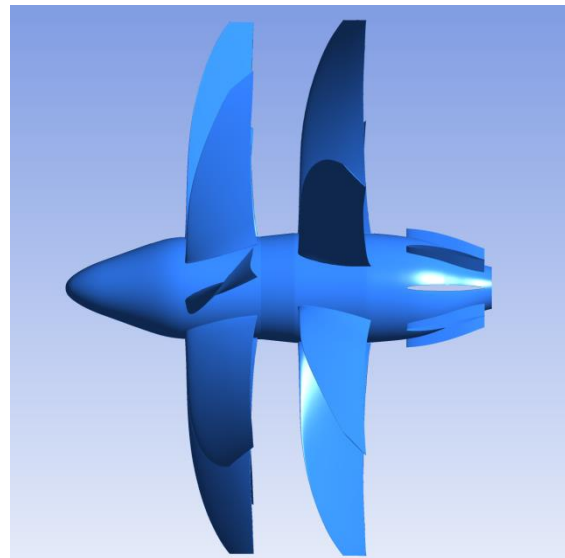


Рис. 1. Модель гвинтовентилятора з вхідним пристроєм

Досліджено сім видів моделей турбулентної в'язкості, що найбільш повно описують явища при обтіканні гвинтовентилятора і вхідного пристрою [5]:

1) модель  $k-\omega$ .

Моделювання відривних турбулентних течій біля тіл, що погано обтікаються, показав, що моделі на основі рівняння на основі швидкості дисипації є дозволяють визначити початок відриву потоку значно пізніше, ніж у експериментах. Для усунення цього недоліку Д. Вілкоксом [6] запропоновано модель, що враховує час життя великих вихорів, де використовують рівняння турбулентної частоти  $\omega$  з параметром, що є зворотним часу життя вихорів течії:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k}; \quad (1)$$

2) SST (Shear Stress Transport) – модель зсувних напружень, що створена Ф. Менгером [7] на основі моделей  $k-\varepsilon$  і  $k-\omega$ .

Дослідження [1, 2] показали, що модель турбулентної в'язкості типу  $k-\varepsilon$  більш доцільно використовувати для зсувних течій, а модель типу  $k-\omega$  - для

моделювання біля стінок. Для врахування цих обставини, Ф. Менгер [7] запропонував ввести в рівняння моделі вагову функцію  $F_1$  і  $(1 - F_1)$ , що дозволяє забезпечувати плавний перехід  $k-\omega$  біля стінки і  $k-\epsilon$  на віддаленні від стінки.

Моделі SST мають ряд модифікацій, що реалізовані в середовищі ANSYS CFX [8]:

- 3) SST Transitional №1 Fully turbulence;
- 4) SST Transitional №2 Specified Intermittency;
- 5) SST Transitional №3 Gamma model;
- 6) SST Transitional №4 Gamma theta model;
- 7) SST Transitional №5 Intermittency.

За результатами розрахунку на відповідному режимі з використанням обраних моделей турбулентної в'язкості отримано значення повного тиску перед і за вхідним пристроєм, для визначення коефіцієнту відновлення повного тиску в ньому та розрахунок тяги гвинтовентилятора.

Значення коефіцієнта відновлення повного тиску у вхідному пристрої та тяги гвинтовентилятора порівнюються з даними льотних випробувань [9].

### Результати досліджень

Порівняння значень коефіцієнта відновлення повного тиску у вхідному пристрої, що отримано при визначених моделях турбулентної в'язкості з даними льотних випробувань наведені на рисунку 2.

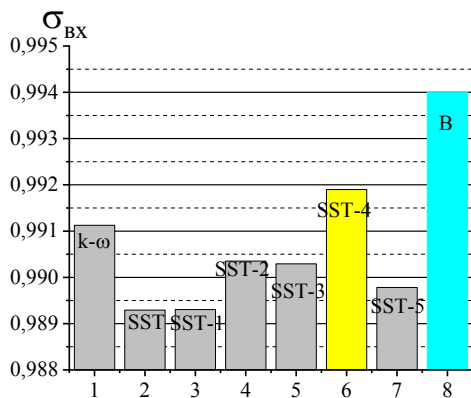


Рис. 2. Порівняння значень коефіцієнта відновлення повного тиску у вхідному пристрої, що отримано при визначених моделях турбулентної в'язкості з даними льотних випробувань

Аналіз порівняння значень коефіцієнта відновлення повного тиску у вхідному пристрої показав (див. рис. 2), що використання моделі SST Transitional №4 Gamma theta model дозволяє отримати найбільш наближене до результатів льотних випробувань значення коефіцієнту відновлення повного тиску у вхідному пристрої.

Порівняння значень тяги гвинтовентилятора, що отримано при визначених моделях турбулентної в'язкості з даними льотних випробувань наведені на рисунку 3.

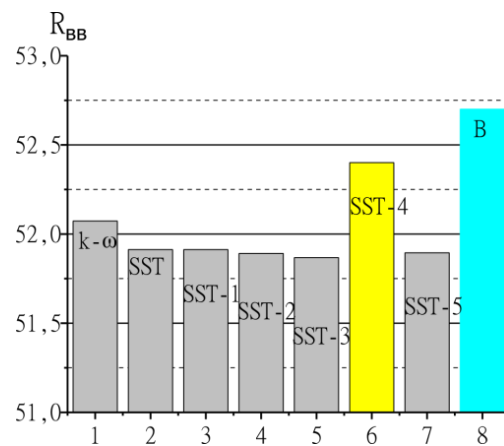


Рис. 3. Порівняння значень тяги гвинтовентилятора, що отримано при визначених моделях турбулентної в'язкості з даними льотних випробувань

Аналіз порівняння значень тяги гвинтовентилятора показав (див. рис. 3), що використання моделі SST Transitional №4 Gamma theta model також дозволяє отримати найбільш наближене до результатів льотних випробувань значення тяги гвинтовентилятора.

### Висновки

За результатами проведених досліджень можливо зробити висновок, що найбільш раціональним є використання моделі турбулентної в'язкості типу SST Transitional №4 Gamma theta model для математичного моделювання течії біля гвинтовентилятора і у осьовому кільцевому вхідному пристрої, що розташований за гвинтовентилятором.

### Література

1. Yun, A. *Development and Analysis of Advanced Explicit Algebraic Turbulence and Scalar Flux Models for Complex Engineering Configurations [Text]* / A. Yun. – Darmstadt, 2005. – 112 p.
2. Юн, А. А. *Теория и практика моделирования турбулентных течений [Текст]* / А. А. Юн. – М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009. – 272 с.
3. Кудинов, П. И. *Сравнительное тестирование моделей турбулентности Спаларта-Алмараса и Менгера на задаче о трансзвуковом обтекании одиночного профиля RAE2822 [Текст]* / П. И. Кудинов. – Днепропетровск: Днепропетровский национальный университет, 2004. – 9 с.

4. Снегирёв, А. Ю. *Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: [Текст] / А. Ю. Снегирёв. — СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2009. — 143 с.*

5. Басов, К. А. *ANSYS: справочник пользователя [Текст] / К. А. Басов. — М. : ДМК Пресс, 2014. — 640 с.*

6. Wilcox, D. C. *Turbulence Modeling for CFD [Text] / D. C. Wilcox. — La Canada, California : DCW Industries Inc., 1998. — 477 p.*

7. Menter, F. R. *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [Text] / F. R. Menter // AIAAJ. — 1994. — Vol. 32, № 8. — P. 1598–1605.*

8. *ANSYS CFX, Release 11.0. Ansys Inc. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.academia.edu/6123972/ANSYS\\_CFX\\_Solver\\_Theory\\_Guide\\_ANSYS\\_CFX\\_Release\\_11\\_0](https://www.academia.edu/6123972/ANSYS_CFX_Solver_Theory_Guide_ANSYS_CFX_Release_11_0). — 10.02.2021.*

9. *Самолет Ан-70 № 01-02. Оценка характеристик входного устройства маршевой двигательной установки с модернизированным винтовентилятором СВ-27 [Текст] // АНТК им. О. К. Антонова. тех. Отчет № 70.702.032.Д1-12. — 2012. — 100 с.*

## References

1. Yun, A. *Development and Analysis of Advanced Explicit Algebraic Turbulence and Scalar Flux Models for Complex Engineering Configurations*. Darmstadt, 2005. 112 p.

2. Yun, A. A. *Teoriya i praktika modelirovaniya turbulentnykh techeniy [Theory and practice of modeling turbulent flows]*. Moscow, Book house "LIBROKOM" Publ., 2009. 272 p.

3. Kudinov, P. I. *Sravnitel'noe testirovanie modeley turbulentsosti Spalarta-Almarasa i Mentera na zadache o transzvukovom obtekanii odinochnogo profilya RAE2822 [Comparative testing of the turbulence models of Spalart-Almaras and Menter on the problem of transonic flow around a single airfoil RAE2822]*. Dnipropetrovsk, Dnepropetrovsk nat. univ. Publ., 2004. 9 p.

4. Snegirev, A. Yu. *Vysokoproizvoditel'nye vychisleniya v tekhnicheskoy fizike. Chislennoe modelirovanie turbulentnykh techeniy [High performance computing in technical physics. Numerical modeling of turbulent flows]*. St. Petersburg, Politechn. univ. Publ., 2009. 143 p.

5. Basov, K. A. *ANSYS: spravochnik pol'zovatelya [ANSYS: user manual]*. Moscow, DМК Press Publ., 2014. 640 p.

6. Wilcox, D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. La Canada, California, DCW Industries Inc. Publ., 1998. 477 p.

7. Menter, F. R. *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*. AIAAJ, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.

8. *ANSYS CFX, Release 11.0. Ansys Inc.* Available at: [https://www.academia.edu/6123972/ANSYS\\_CFX\\_Solver\\_Theory\\_Guide\\_ANSYS\\_CFX\\_Release\\_11\\_0](https://www.academia.edu/6123972/ANSYS_CFX_Solver_Theory_Guide_ANSYS_CFX_Release_11_0). (accessed 10.02.2021).

9. *Samolet An-70 № 01-02. Ocenka harakteristik vkhodnogo ustrojstva marshevoj dvigatel'noj ustanovki s modernizirovannym vintoventilyatorom SV-27 [An-70 aircraft No. 01-02. Evaluation of the characteristics of the entrance device of the sustainer propulsion system with the upgraded SV-27 propfan]*. ANTK im. O.K. Antonova. Teh. otchet № 70.702.032.Д1-12, 2012. 100 p.

*Надійшла до редакції 21.06.2021, розглянута на редколегії 09.08.2021*

## ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОЙ ВЯЗКОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СООСНОГО ВИНТОВЕНТИЛЯТОРА И ВХОДНОГО УСТРОЙСТВА ГТД

*О. В. Жорник, И. Ф. Кравченко, М. М. Митрахович, О. В. Денисюк*

Рассмотрены вопросы обоснования наиболее рациональной, исходя из адекватности, модели турбулентной вязкости для проведения математического моделирования течения возле винтовентилятора и во входном устройстве турбовинтовентиляторного двигателя. Выяснено, что в настоящее время не существует универсальной модели турбулентности для определения параметров пограничного слоя, потери энергии в потоке и ламинарно-турбулентного перехода. Анализ результатов предыдущих исследований показал, что существует необходимость выбора и обоснование модели турбулентной вязкости для каждого типа объектов исследования. Задача моделирования течения возле винтовентилятора и во входном устройстве силовой установки выполнена с применением программного продукта ANSYS CFX, что позволяет использовать различные стандартные математические модели и средства при моделировании турбулентного течения. Объектом исследования является кольцевое осевое входное устройство, перед которым расположен соосный винтовентилятор, имеющий два ряда винтов: первый ряд насчитывает восемь лопастей, второй - шесть. Исследовано 7 видов моделей турбулентной вязкости, которые наиболее полно описывают явления при обтекании винтовентилятора и входного устройства: модель  $k-\omega$ ; SST (shear stress transport); SST Transitional №1 Fully turbulence; SST Transitional №2 Specified Intermittency; SST Transitional №3 Gamma model; SST Transitional №4 Gamma theta model; SST Transitional №5 Intermittency. Результаты математического моделирования течения возле винтовентилятора и во входном устройстве на соответствующем режиме работы

турбовинтовентиляторного двигателя с использованием выбранных моделей турбулентной вязкости получено значение полного давления перед и за входным устройством, для определения коэффициента восстановления полного давления в нем и значение тяги винтовентилятора. Значение коэффициента восстановления полного давления во входном устройстве и тяги винтовентилятора сравнивают с данным летных испытаний прототипа. Анализ сравнения значений коэффициента восстановления полного давления во входном устройстве и тяги винтовентилятора показал, что использование модели SST Transitional №4 Gamma theta model позволяет получить наиболее приближенное к результатам летных испытаний значение коэффициента восстановления полного давления во входном устройстве и тяги винтовентилятора.

**Ключевые слова:** турбовинтовентиляторный двигатель; винтовентилятор; входное устройство; силовая установка; модель турбулентной вязкости.

#### SUBSTANTIATION OF A TURBULENT VISCOSITY MODEL FOR STUDYING THE CHARACTERISTICS OF A COAXIAL PROPFAN AND INPUT DEVICE OF A GAS TURBINE ENGINE

*O. Zhornik, I. Kravchenko, M. Mitrakhovich, O. Denisyuk*

The issues of substantiation of the most rational, based on adequacy, model of turbulent viscosity for mathematical modeling of the flow near the propfan and in the inlet of the turbine-propeller engine are considered. It was found that at present there is no universal turbulence model for determining the parameters of the boundary layer, energy loss in the flow, and laminar-turbulent transition. Analysis of the results of previous studies showed that there is a need to select and justify a turbulent viscosity model for each type of research object. The task of modeling the flow near the propfan and in the inlet device of the power plant was performed using the ANSYS CFX software product, which allows using various standard mathematical models and tools for modeling turbulent flow. The object of research is an annular axial inlet device, in front of which there is a coaxial propfan with two rows of propellers: the first row has eight blades, the second - six. 7 types of models of turbulent viscosity, which most fully describe the phenomena in the flow around the propfan and the inlet device, have been investigated:  $k-\omega$  model; SST (shear stress transport) SST Transitional №1 Fully turbulence; SST Transitional №2 Specified Intermittency; SST Transitional №3 Gamma model; SST Transitional №4 Gamma theta model; SST Transitional №5 Intermittency. The results of mathematical modeling of the flow near the propfan and in the inlet device at the corresponding operating mode of the turbopropfan engine using the selected models of turbulent viscosity, the total pressure value in front of and behind the inlet device was obtained to determine the total pressure recovery coefficient in it and the value of the propfan thrust. The value of the recovery factor of the total pressure in the inlet device and the propfan thrust are compared with the flight test data of the prototype. An analysis of the comparison of the values of the total pressure recovery factor in the inlet device and the propfan thrust showed that the use of the SST Transitional №4 Gamma theta model allows obtaining the value of the total pressure recovery factor in the inlet device and the propfan thrust that is closest to the flight test results.

**Keywords:** turbopropfan engine; propfan; inlet device; power plant; turbulent viscosity model.

**Жорник Олег Володимирович** – головний конструктор ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Кравченко Ігор Федорович** – член-кореспондент НАН України, д-р техн. наук, генеральний конструктор, директор ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Мітрахович Михайло Михайлович** – д-р техн. наук, проф., заступник директора ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Денісюк Олеся Валеріїна** – інженер-конструктор 1 категорії, ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Oleg Zhornik** – Chief Designer, SE Ivchenko-Progress, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: zhornikov@ivchenko-progress.com, ORCID: 0000-0002-0609-6264.

**Ihor Kravchenko** – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Director of Enterprise, General Designer, SE Ivchenko-Progress, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: ivchenko-progress@ivchenko-progress.com, ORCID: 0000-0003-2304-3356.

**Mykhailo Mitrakhovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director, SE Ivchenko-Progress, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: mmm777@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7656-1371.

**Olesya Denisyuk** – engineer-designer of 1 category; SE Ivchenko-Progress, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: Denisyukolesya@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7516-7399.