

С. А. ЯКИМЧУК

ВАЛІДАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯТОРА З ЛОПАТКАМИ, ЗАГНУТИМИ НАЗАД

У статті представлено комплексне дослідження, присвячене валідації математичної моделі аеродинамічних процесів у відцентрових вентиляторах із назад загнутими лопатками. Актуальність роботи обумовлена потребою підвищення енергоефективності лопаткових машин і зменшення витрат на етапі проєктування за рахунок заміни дорогих експериментальних випробувань високоточними числовими методами. У дослідженні проведено детальне порівняння двох підходів традиційного фізичного експерименту та сучасного числового моделювання. Методологічною основою роботи є застосування методів обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD) у програмному середовищі ANSYS. Для підвищення достовірності результатів використано широкий підхід до моделювання. Виконано порівняльний аналіз ефективності різних напівемпіричних моделей турбулентності: *SST k- ω* (*Shear Stress Transport*) для точного опису пристінкових явищ; стандартна *k- ϵ* для аналізу загальної структури потоку; *LRR* (модель напружень Рейнольдса) для врахування анізотропії турбулентності; *SST Gamma-Theta* для прогнозування переходу від ламінарного до турбулентного режиму. Також увагу приділено аналізу сіткової збіжності. Розроблено та досліджено три варіанти топології розрахункової сітки з різним рівнем деталізації, що дозволило знизити похибку, пов'язану з дискретизацією геометрії. Наукова новизна полягає у кількісному визначенні розбіжностей між числовими та експериментальними аеродинамічними характеристиками. Встановлено, що застосування моделі турбулентності *SST k- ω* у поєднанні з гексаедричною сіткою забезпечує найвищу точність результатів із відхиленням у межах 3 % – 5 % від експериментальних даних. Отримані результати підтверджують адекватність розробленої моделі та обґрунтовують її використання для оптимізації геометрії лопаток і розширення робочого діапазону вентиляторів без зниження їхньої ефективності. Розв'язання поставлених задач дозволило підвищити достовірність числових методів, скоротити обсяг експериментальних досліджень. Сформульовані рекомендації щодо параметрів моделювання можуть бути використані для подальшого вдосконалення високонапірних вентиляційних систем.

Ключові слова: відцентровий вентилятор, аеродинамічні характеристики, CFD, ANSYS, моделювання турбулентності, *SST k- ω* , *k- ϵ* , *LRR*, *Gamma-Theta*, сітка, числове моделювання, валідація моделі, енергоефективність, оптимізація лопаток.

S. YAKYMCHUK

VALIDATION OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A FAN WITH BACKWARD-CURVED BLADE

The article presents a comprehensive study devoted to the validation of a mathematical model of aerodynamic processes in centrifugal fans with backward-curved blades. The relevance of the work is conditioned by the need to improve the energy efficiency of turbomachinery and to reduce design-stage costs by replacing expensive experimental testing with high-accuracy numerical methods. The study provides a detailed comparison of two approaches: traditional physical experiments and modern numerical simulation. The methodological basis of the work is the application of computational fluid dynamics (CFD) methods within the ANSYS environment. To improve the reliability of the results, a comprehensive modeling approach was employed. A comparative analysis of the effectiveness of various semi-empirical turbulence models was carried out: the *SST k- ω* (Shear Stress Transport) model for accurate prediction of near-wall phenomena; the standard *k- ϵ* model for analysis of the overall flow structure; the *LRR* (Reynolds Stress Model) for accounting for turbulence anisotropy; and the *SST Gamma-Theta* model for predicting laminar-to-turbulent transition. Special attention was also given to grid convergence analysis. Three variants of computational mesh topology with different levels of refinement were developed and investigated, which made it possible to reduce discretization error associated with geometric representation. The scientific novelty lies in the quantitative assessment of discrepancies between numerical and experimental aerodynamic characteristics. It was established that the *SST k- ω* turbulence model, combined with a hexahedral mesh, provides the highest accuracy, with deviations within 3 % – 5 % of the experimental data. The obtained results confirm the adequacy of the developed model and justify its application for optimizing blade geometry and expanding the operating range of fans without reducing their efficiency. Solving the stated problems made it possible to increase the reliability of numerical methods and reduce the scope of experimental research. The formulated recommendations regarding modeling parameters can be used for further improvement of high-pressure ventilation systems.

Key words: centrifugal fan, aerodynamic characteristics, CFD, ANSYS, turbulence modeling, *SST k- ω* , *k- ϵ* , *LRR*, *Gamma-Theta*, mesh, numerical simulation, model validation, energy efficiency, blade optimization.

Вступ

Відцентрові вентилятори із назад загнутими лопатками широко застосовуються у вентиляційних, енергетичних і промислових системах завдяки високому коефіцієнту корисної дії, надійності, компактності конструкції та стабільності роботи в широкому діапазоні режимів. До основних переваг такого вентиляційного обладнання належать здатність створювати більший тиск і забезпечувати стабільніші аеродинамічні характеристики порівняно з осьовими вентиляторами. Також відцентро-

ві вентилятори характеризуються надійністю, меншими експлуатаційними витратами, довговічністю та можливістю довготривалої безперервної роботи. Водночас, відцентрові вентилятори характеризуються меншою чутливістю до змін аеродинамічного опору системи, що забезпечує стабільність їх роботи в різних експлуатаційних режимах. Зростання вимог до енергоефективності вентиляційних систем, зниження експлуатаційних витрат та підвищення екологічності обладнання обумовлює необхідність удосконалення конструкцій вентиляторів і методів їх проєктування. Особливої



© С. А. Якимчук, 2026
Дослідницька стаття. Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією Creative Commons Attribution (CC BY 4.0)

актуальності набуває застосування робочих коліс із назад загнутими лопатками, які забезпечують високий ККД та стабільні аеродинамічні характеристики порівняно з робочими колесами із вперед загнутими лопатками [1] – [5].

Традиційні підходи до проектування вентиляторів із назад загнутими лопатками ґрунтуються на кореляційних залежностях, отриманих за результатами експериментальних досліджень. Такі підходи забезпечують високу точність результатів, проте є затратними та потребують значних витрат часу і матеріальних ресурсів. У зв'язку з цим у сучасних умовах дедалі більшого значення набувають методи чисельного моделювання течій, які дають змогу досліджувати складні турбулентні потоки, прогнозувати аеродинамічні характеристики та оптимізувати геометрію лопаткових машин ще на етапі проектування [6], [7].

Дослідження течії у таких вентиляторах здійснюється із застосуванням аналітичних методів, чисельного моделювання та фізичних експериментів. З урахуванням можливостей, переваг і обмежень кожного підходу їх використання при аналізі характеристик, а також у процесах проектування, оптимізації та вдосконалення, реалізується поетапно. Достовірність результатів чисельного моделювання значною мірою визначається правильністю вибору моделей турбулентності, параметрів обчислювальної сітки та граничних умов, що обумовлює необхідність обов'язкової валідації результатів шляхом їх порівняння з експериментальними даними. Поєднання зазначених підходів дозволяє підвищити точність досліджень і забезпечити ефективне проектування та вдосконалення лопаткових машин [8], [9].

Аналіз попередніх досліджень та публікацій

Характеристики відцентрового вентилятора із назад загнутими лопатками можуть визначатися як теоретичними, так і експериментальними методами. До таких методів належать аналітичні розрахунки відцентрових вентиляторів. У роботі [10], [11] запропоновано підхід до верифікації аналітичних розрахунків із використанням різних способів урахування кінцевих втрат. Отримані результати демонструють добру узгодженість з експериментальними даними.

Протягом останніх десятиліть одним із найбільш поширених підходів до дослідження характеристик робочих коліс стало числове моделювання течії, що обтікає досліджуваний об'єкт.

У низці наукових праць [10] – [13] для аналізу характеристик робочих коліс застосовується метод стаціонарного розв'язання за числом Рейнольдса рівнянь Нав'є-Стокса з використанням відповідних моделей турбулентної в'язкості. Для дослідження аеродинамічних характеристик відцентро-

вих вентиляторів застосовувались моделі турбулентності $k-\epsilon$ та $k-\omega$ SST. Автори відзначають, що використання моделі $k-\omega$ SST забезпечує найкращу відповідність експериментальним даним при прогнозуванні повного тиску та структури течії. Розбіжність між результатами чисельного моделювання та експериментальними даними у наведених дослідженнях становила від 3 % до 10 % залежно від режиму роботи вентилятора та параметрів розрахункової моделі.

Результати таких досліджень демонструють задовільну відповідність експериментальним даним.

Попри необхідність використання емпіричних коефіцієнтів і певні обмеження щодо врахування всіх фізичних процесів, що відбуваються під час роботи робочого колеса, аналітичні методи залишаються ефективним інструментом дослідження завдяки своїй простоті та швидкості застосування.

Для врахування більшої кількості чинників, а також отримання змін тиску з метою аналізу аероакустичних характеристик робочих коліс, у роботах [10] – [13] застосовуються нестационарні розв'язки осереднених за числом Рейнольдса рівнянь Нав'є-Стокса.

Числові методи потребують обґрунтованого вибору параметрів моделювання відповідно до конкретної задачі. Параметри чисельної моделі, як щільність розрахункової сітки, розміри розрахункової області та вибір моделі турбулентності, можуть значно впливати на точність визначення аеродинамічних характеристик вентилятора, зокрема повного тиску, витрати повітря, ККД та структури течії у проточній частині вентилятора [14] – [18].

Валідація розрахункової моделі для дослідження аеродинамічних характеристик робочого колеса є важливим етапом, який дозволяє підтвердити достовірність отриманих результатів і забезпечити надійність подальших досліджень.

Мета роботи

Метою роботи є валідація математичної моделі відцентрового вентилятора із назад загнутими лопатками шляхом порівняння результатів числового моделювання з експериментальними даними та визначення впливу параметрів розрахункової моделі на точність прогнозування аеродинамічних характеристик.

Для досягнення поставленої мети було:

Побудовано тривимірну геометричну модель відцентрового вентилятора на основі наявних експериментальних даних і натурної моделі (рис. 1 та рис. 2) із використанням програмного середовища *ANSYS SpaceClaim*. Для робочого колеса вентилятора генерацію структурованої розрахункової сітки виконано із застосуванням модуля *ANSYS*

TurboGrid. Досліджуваний відцентровий вентилятор має зовнішній діаметр робочого колеса 190 мм та висоту робочого колеса 60 мм.

Виконано числове моделювання течії з використанням різних моделей турбулентності *SST k- ω* , *k- ϵ* , *LRR*, *SST Gamma-Theta*. Зазначені моделі було обрано з огляду на їх широке застосування

при моделюванні течій у лопаткових машинах, а також здатність описувати різні особливості турбулентної течії, пристінкові ефекти, відриви потоку та процеси ламінарно-турбулентного переходу.

Досліджено вплив структурованої топології розрахункової сітки типу *O-grid* та кількості вузлів на точність результатів числового моделювання.



Рис. 1 – Дизайн цілого відцентрового вентилятора:

a – модель відцентрового вентилятора; *б* – тривимірна модель відцентрового вентилятора

Проведено порівняння результатів *CFD* розрахунків з даними фізичного експерименту;

Визначено найбільш адекватну модель турбулентності та параметри моделювання для подальших досліджень і оптимізації вентилятора.

Об'єкт дослідження є відцентровий вентилятор із назад загнутими лопатками, із заданими кутами встановлення профілю лопатей у контрольному перерізі.

Предметом дослідження є залежності статичного тиску від витрати повітря для досліджуваного вентилятора за визначених розмірів розрахункових доменів, кількості елементів розрахункової сітки та обраних моделей турбулентності.

Результати розрахунку роботи відцентрового вентилятора

У процесі валідації розрахункового методу було відтворено геометричні параметри вентилятора, частоту обертання робочого колеса, параметри навколишнього середовища та граничні умови, що відповідали умовам проведення експериментальних досліджень.

На початковому етапі вибору параметрів математичної моделі виконано дослідження впливу розмірів розрахункової області на результати числового моделювання з метою забезпечення мінімального впливу граничних умов на аеродинамічні характеристики вентилятора.

Числове моделювання течії проводилось у модулі *ANSYS CFX*. На вході до розрахункової області задавались граничні умови за відносним

статичним тиском, що відповідав атмосферному тиску, а на виході масова витрата повітря для кожної досліджуваної робочої точки вентилятора.

У зв'язку з цим було проведено дослідження впливу розмірності сітки на результати розрахунків вентилятора із назад загнутими лопатками.

У програмному комплексі *TurboGrid* сформовано розрахункову сітку, що містить близько 1, 3, 5 млн. вузлів, із забезпеченням параметра $Y^+ < 2$ (рис. 3 – 5).

З метою підтвердження достовірності результатів чисельного моделювання та мінімізації впливу дискретизації проведено дослідження сіткової незалежності із застосуванням трьох послідовно ущільнених обчислювальних сіток: грубої 1 млн. елементів (рис. 3) для попереднього аналізу потоку та налаштування збіжності, середньої базової 3 млн елементів (рис. 4) для отримання основних аеродинамічних характеристик вентилятора з оптимальним співвідношенням точності й обчислювальних витрат та дрібної контрольної 5 млн. елементів (рис. 5) для фінальної перевірки точності розрахунків.

Виконано чисельне дослідження обтікання відцентрового вентилятора з використанням різних моделей турбулентної в'язкості: *SST k- ω* , *k- ϵ* , *LRR*, *SST Gama-Theta*. Проведено моделювання обтікання відцентрового вентилятора з використанням трьох різних топологій розрахункової сітки. Здійснено оцінку отриманих результатів шляхом порівняння даних числового моделювання з результатами фізичного експерименту.

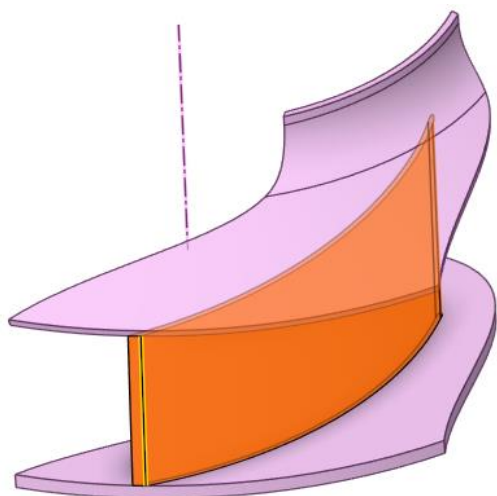


Рис. 2 – Дизайн сегменту відцентрового вентилятора у програмному середовищі *ANSYS SpaceClaim*

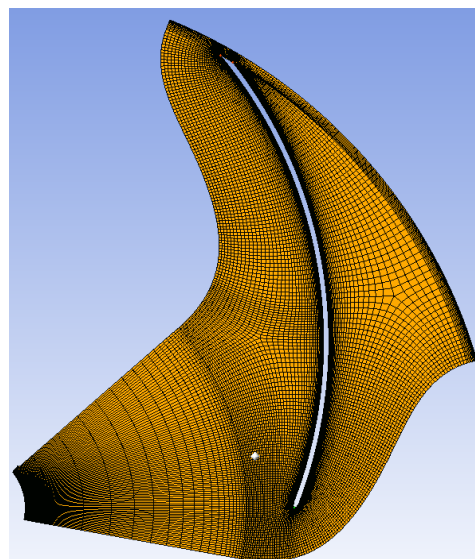


Рис. 3 – Розрахункова сітка лопаті відцентрового вентилятора 1 млн елементів

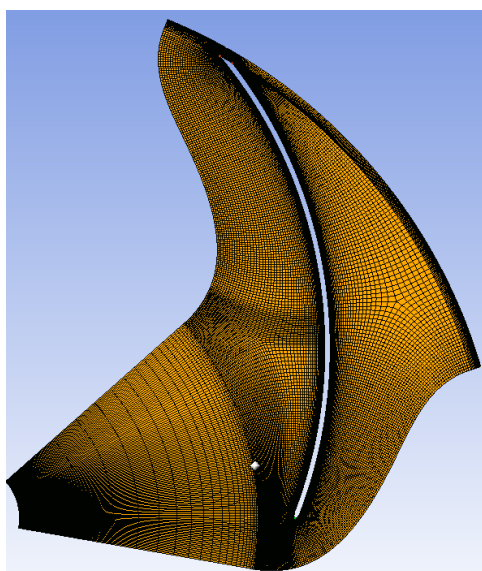


Рис. 4 – Розрахункова сітка лопаті відцентрового вентилятора 3 млн елементів

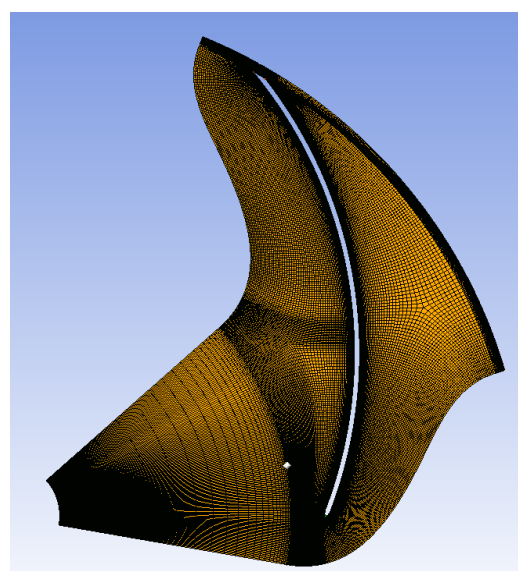


Рис. 5 – Розрахункова сітка лопаті відцентрового вентилятора 5 млн елементів

Обговорення результатів

За результатами проведеного дослідження встановлено, що використання сітки із 3 млн елементів забезпечує оптимальний баланс між точністю розрахунків і швидкістю обчислень для даної математичної моделі рис. 6.

Подальше згущення обчислювальної сітки не призводить до суттєвих змін розрахункових параметрів і не забезпечує покращення результатів.

Збіжність *CFD* розрахунків оцінювалася за нормованими залишками рівнянь нерозривності, трьох компонентів кількості руху (U , V , W) та рівнянь турбулентної моделі. Допустимим рівнем

збіжності вважалось зниження залишків до значення 10^{-5} . Додатково контролювалися стабілізація інтегральних параметрів потоку та дисбаланс масової витрати в розрахунковій області.

У результаті чисельного моделювання отримано залежність статичного тиску відцентрового вентилятора від витрати повітря при використанні різних моделей турбулентності рис. 7. Загальна тенденція збережена для всіх моделей: із зменшенням витрати статичний тиск зростає, що відповідає фізиці роботи відцентрового вентилятора. Водночас кількісні відмінності між моделями є суттєвими і зростають при відхиленні від номінального режиму.

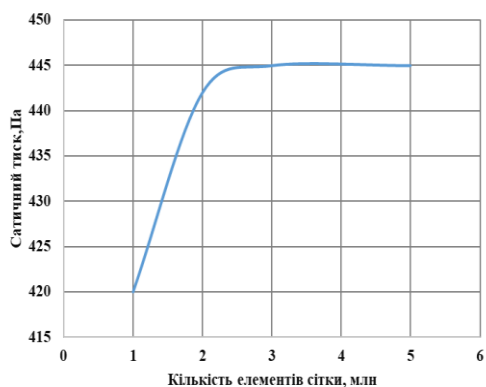


Рис. 6 – Аналіз сіткової незалежності результатів числового моделювання

Представлено результати порівняння, отримані за зведеними характеристиками та *CFD* розрахунками табл. 1.

Модель *k-ε*, незважаючи на свою поширеність, продемонструвала найбільші відхилення від експерименту в усьому діапазоні витрат. Відносна похибка δ сягала 14,7 % при $Q = 400 \text{ м}^3/\text{год}$ і 12,9 % при $Q = 125 \text{ м}^3/\text{год}$. Завищення розрахункового тиску пов'язане зі схильністю стандартної *k-ε* моделі до надмірного генерування турбулентної в'язкості в зонах значної кривизни ліній течії, що призводить до недооцінки втрат на тертя та перебільшення корисної роботи колеса.

Модель *SST k-ω* показала значно кращу узгодженість із дослідними даними: відносна похибка становила 3,4 % – 7,5 %. Перевага цієї моделі зумовлена автоматичним перемиканням між *k-ω* формулюванням поблизу стінки, де вона відтво-

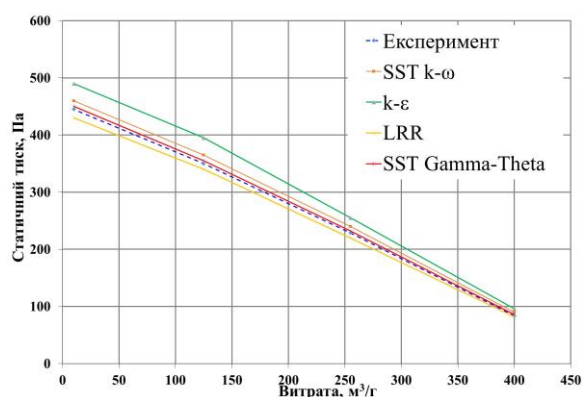


Рис. 7 – Залежність статичного тиску відцентрового вентилятора від витрати повітря, отримана із застосуванням різних моделей турбулентності

рює пристінкову турбулентність точніше і *k-ε* формулюванням у вільному потоці. Однак навіть ця модель дещо переоцінює тиск при малих витратах, де інтенсифікуються вторинні течії та відривні зони.

Модель *LRR (RSM)* враховує анізотропію напруг Рейнольдса, що є принципово важливим для потоків із сильною кривизною ліній течії та відцентровими ефектами, характерними для робочого колеса вентилятора. Відносна похибка цієї моделі становила 2,1 % – 3,9 % на більшості режимів, що підтверджує ефективність рейнольдсових напружень для опису складних тривимірних структур із закруткою. Дещо вища похибка при $Q = 10 \text{ м}^3/\text{год}$, 3,4 % пояснюється труднощами апроксимації відривних зон поблизу лопаток при глибокому дроселюванні.

Таблиця 1 – Результати порівняння зведених характеристик і *CFD*-розрахунків

Параметри	Модель турбулентності			
	<i>SST k-ω</i>	<i>k-ε</i>	<i>LRR (RSM)</i>	<i>SST Gamma-Theta</i>
$Q = 400 \text{ м}^3/\text{год}$	90	96	82	86
Ехр = 83,7 Па				
Δ				
$\delta, \%$	7,5	14,7	2,1	2,8
$Q = 255 \text{ м}^3/\text{год}$	240	255	220	232
Ехр = 229 Па				
Δ				
$\delta, \%$	4,9	11,4	3,9	1,4
$Q = 125 \text{ м}^3/\text{год}$	365	395	340	355
Ехр = 350 Па				
Δ				
$\delta, \%$	4,3	12,9	2,9	1,4
$Q = 10 \text{ м}^3/\text{год}$	460	490	430	450
Ехр = 445 Па				
Δ				
$\delta, \%$	3,4	10,1	3,4	1,1

Найвищу точність у всьому діапазоні витрат забезпечила перехідна модель *SST Gamma-Theta*. Максимальне значення відносної похибки не перевищувало 2,8 %, а на режимах із максимальним статичним тиском складало лише 1,1 % – 1,4 %. Ця модель враховує ламінарно-турбулентний перехід на поверхні лопаток, що суттєво для відцентрових вентиляторів із помірними числами Рейнольдса, де значна частина прикордонного шару залишається ламінарною.

Для кількісного порівняння точності розрахунків у табл. 1 наведено результати верифікації *CFD* моделювання відносно зведених експериментальних характеристик вентилятора.

Табл. 1 містить значення статичного тиску в Па, розраховані за кожною з чотирьох моделей турбулентності при чотирьох витратах $Q = 400, 255, 125, 10 \text{ м}^3/\text{год}$, а також відповідні експериментальні значення *Exp*. Для кожного варіанту наведено абсолютну похибку Δ різниці між розрахунковим і еталонним значеннями та відносну похибку δ у відсотках. Порівняння дозволяє систематично оцінити придатність кожної моделі для прогнозування аеродинамічних характеристик у різних режимах роботи вентилятора.

Абсолютну похибку між розрахунковими та експериментальними даними визначено за формулою:

$$\Delta = x_i^{CFD} - x_i^{ref},$$

де x_i^{CFD} – значення параметра, отримане в *ANSYS CFX*;

x_i^{ref} – еталонне значення зі зведених характеристик.

Відносну похибку розраховано за формулою:

$$\delta = \frac{|\Delta|}{x_i^{ref}} \cdot 100 \% .$$

Висновки

Встановлено, що структурована гексадральна сітка в проточній частині робочого колеса із дотриманням критерію пристінкового шару $Y^+ < 2$ забезпечує найкраще відтворення пристінкових течій і є обов'язковою умовою отримання достовірних результатів. Оптимальна кількість елементів сітки для досліджуваного вентилятора складає 3 млн. Подальше збільшення кількості елементів змінює вимірювані параметри менш ніж на 0,5 % при суттєвому зростанні обчислювальних витрат. Недостатня щільність сітки менше 1 млн елементів призводить до систематичного заниження витрат у відривних зонах і похибок понад 8 % навіть для точніших моделей турбулентності.

Точність *CFD* розрахунків суттєво залежить від обраної моделі турбулентності. Модель $k-\epsilon$ є обмеженою для точного прогнозування аеродинамічних характеристик відцентрових вентиляторів:

відносна похибка сягає 10,1 % – 14,7 % у всіх досліджуваних режимах внаслідок надмірного генерування турбулентної в'язкості в зонах з викривленими лініями течії. Модель *SST $k-\omega$* є прийнятним компромісом між точністю і обчислювальними витратами. Відносна похибка становить 3,4 % – 7,5 %. Модель *LRR (RSM)* забезпечує похибку 2,1 % – 3,9 % завдяки врахуванню анізотропії напруж Рейнольдса, але потребує на 30 % – 40 % більших обчислювальних ресурсів порівняно з дво-параметричними моделями. Перехідна модель *SST Gamma-Theta* забезпечила найкращу відповідність експериментальним даним у всьому діапазоні витрат, максимальна похибка не перевищила 2,8 %, а на режимах із максимальним тиском складала лише 1,1 % – 1,4 %.

Для подальших розрахунків і оптимізації конструкції рекомендується: застосовувати структуровану гексадральну сітку із $Y^+ < 2$ у проточній частині та сітку підвищеної щільності в зоні інтерфейсу; використовувати перехідну модель *SST Gamma-Theta* як основну розрахункову модель, оскільки вона коректно відтворює ламінарно-турбулентний перехід на лопатках; контролювати збіжність як за залишками рівнянь до рівня 10^{-5} , так і за стабілізацією вимірюваних параметрів (витрата, тиск); для експрес-оцінки допустимо використовувати *SST $k-\omega$* , а результати уточнювати за *SST Gamma-Theta* на фінальних варіантах.

Підтверджена в ході верифікації точність моделі *SST Gamma-Theta* дозволяє використовувати *CFD* моделювання як основний інструмент оцінки аеродинамічних характеристик на стадії проектування. Це дає змогу скоротити обсяг стендових випробувань при збереженні необхідної інженерної достовірності, а також прискорити цикл оптимізації геометрії лопаткового апарату: форми, кута установки та числа лопаток робочого колеса та інших геометричних параметрів робочого колеса.

Розв'язання поставлених задач дозволило обґрунтувати вибір параметрів сітки та моделей турбулентності для *CFD* моделювання відцентрових вентиляторів, підвищити точність прогнозування їх аеродинамічних характеристик, а також визначити мінімально необхідний обсяг фізичних випробувань для верифікації числової моделі. Отримані результати є практичною основою для проектування високоефективних відцентрових вентиляторів із заданими аеродинамічними характеристиками.

Інформація щодо наборів даних

Нові набори даних у рамках цього дослідження не створювалися.

Заява щодо фінансування та подяки

Це дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Заява щодо конфлікту інтересів

Для виконання числового моделювання та побудови геометричної моделі використовувалась ліцензійна студентська версія програмного забезпечення ANSYS, призначена для навчальних і науково-дослідних цілей.

Заява щодо використання інструментів штучного інтелекту

Інструменти штучного інтелекту не використовувалися.

Список літератури

- Кулик М. С. Нагнітачі природного газу : підручник / М. С. Кулик, К. І. Капітанчук, М. П. Андрієшин. – Київ : НАУ, 2022. – 224 с. – ISBN 978-966-932-173-2. – URL: <https://er.kai.edu.ua/server/api/core/bitstreams/3df2bbce-e53e-4794-b777-05499aac5d73/content> (дата звернення 10.04.2026).
- Греков П. І. Підвищення ефективності вентиляційних установок ежекторного типу / П. І. Греков, К. І. Капітанчук, Л. Г. Волянська, В. С. Алпатов // Промислова гідравліка і пневматика. – 2005. – № 4(10). – С. 45–49. – ISSN 1994-4691. – URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/39938> (дата звернення 10.04.2026).
- Капітанчук К. І. Методика розрахунку ізоентропної течії реального газу з використанням газодинамічних функцій / К. І. Капітанчук // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «ABIA-2017», 19–21 квітня, Київ. – 2017. – С. 20.62–20.65. – URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/39835> (дата звернення 10.04.2026).
- Pritz B. Identification of unsteady effects in the flow through a centrifugal fan using CFD/CAA methods / B. Pritz, M. Probst, P. Wiśniewski, S. Dykas, M. Majkut, K. Smolka // Archives of Thermodynamics. – 2021. – Vol. 42, No. 4. – PP. 169–181. – DOI: <https://doi.org/10.24425/ather.2021.139657>.
- Probst M. Quantitative Validation of CFD-Simulation against PIV Data for a Centrifugal Fan / M. Probst, N. Matthew, B. Pritz, R. Stieglitz, M. Gabi // Proceedings of the 14th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows (ISAI14), 8–11 July 2019, Gdansk, Poland. – 2019. – URL: https://www.researchgate.net/publication/350837371_Quantitative_Validation_of_CFD-Simulation_against_PIV_Data_for_a_Centrifugal_Fan (дата звернення 10.04.2026).
- Капітанчук К. І. Design and experimental research of a centrifugal fan with backward-curved blades / К. І. Капітанчук, М. Р. Андрієшин, С. А. Якимчук // Proceedings. The Eleventh World Congress “Aviation in the XXI-st Century”. Safety in Aviation and Space Technologies, 25–27 September, 2024, Kyiv, Ukraine. – 2024. – Vol. 1. – PP. 1.4.5–1.4.9. – URL: <http://congress.nau.edu.ua/2024/materialy-kongresu/> (дата звернення 10.04.2026).
- Андрієшин М. П. Вимірювальний стенд для визначення аеродинамічних характеристик вентиляторів відповідно до стандарту ANSI/AMCA 210-07 / М. П. Андрієшин, К. І. Капітанчук, С. А. Якимчук // XXIV Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика», 19–20 грудня, 2024 р., Київ, Україна. – Київ : ГЛОБУС-ПРЕС, 2024. – С. 57–60. – URL: <https://er.kai.edu.ua/server/api/core/bitstreams/3c04ea80-dc3b-4720-866d-e4437ce75ee4/content> (дата звернення 10.04.2026).
- Якимчук С. Чисельне моделювання аеродинаміки відцентрового вентилятора / С. Якимчук // Тези доповідей XXV Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «ПОЛІТ. Сучасні проблеми науки». Секція: Сучасні авіаційні технології, 1–4 квітня 2025 р., Київ, Україна. – С. 9–11. – URL: https://nau.edu.ua/site/variables/docs/docsmenu/studnauka/polit2025/Polit-2025_AKF.pdf (дата звернення 10.04.2026).
- Капітанчук К. І. Моделювання та дослідження ефективності

ті відцентрового вентилятора із загнутими назад лопатками / К. І. Капітанчук, С. А. Якимчук // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2025. – № 4sup2(206). – PP. 39–45. – DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2025.4sup2.03>.

- Moczko P. Enhancing Efficiency of Industrial Centrifugal Fans Using Blade Adjustment Mechanism / P. Moczko, P. Odyjas, D. Pietrusiak, J. Więckowski, P. Scholz, M. Dix, T. Osiecki, T. Timmel, L. Kroll // Energies. – 2022. – Vol. 15, Is. 3. – Paper No. 893. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en15030893>.
- Siwek T. Numerical and Experimental Study of Centrifugal Fan Flow Structures and Their Relationship with Machine Efficiency / T. Siwek, J. Górski, S. Fortuna // Polish Journal of Environmental Studies. – 2014. – Vol. 23, No. 6. – PP. 2359–2364. – URL: <https://www.pjoes.com/pdf-89420-23298?filename=Numerical+and.pdf> (дата звернення 10.04.2026).
- Pritz B., Walter J., Gabi M. (2018), A Centrifugal Fan Test Bench for Validation Data at Off-Design Conditions / B. Pritz, J. Walter, M. Gabi // International Conference on Fan Noise, Aerodynamics, Applications and Systems, 18–20 April 2018, Darmstadt, Germany. – 2018. – С. 6.1–6.5. – URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000124453/89737554?utm> (дата звернення 10.04.2026).
- Капітанчук К. І. CFD-аналіз чисельного моделювання аеродинамічних процесів відцентрового вентилятора / К. І. Капітанчук, М. П. Андрієшин, С. А. Якимчук // Матеріали XVII Міжнародної науково-технічної конференції «ABIA-2025», 22–24 квітня 2025 року, Київ, Україна. – PP. 6.1–6.5. – URL: https://avia.nau.edu.ua/avia2025/info/AVIA_2025.pdf (дата звернення 10.04.2026).
- SST k-omega model / CFD Online. – Назва з екрану. – URL: https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model (дата звернення 10.04.2026).
- Anjomrouz A. Aerodynamic optimization of the combined axial-centrifugal compressor: a deep learning assisted two-step optimization approach / A. Anjomrouz, M. S. Karimi, S. K. Hannani // Energy Conversion and Management: X. – 2026. – Vol. 30. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101911>.
- Hwang M., Cheong C., Cho S., Choi J. (2026), Optimization of centrifugal fan for clothes dryer using transfer learning-based multi-fidelity modeling / M. Hwang, C. Cheong, S. Cho, J. Choi // The Journal of the Acoustical Society of Korea. – 2026. – Vol. 45, No. 1. – PP. 1–12. – URL: <https://cdn.apub.kr/journalsite/sites/ask/2026-045-01/N0660450101/N0660450101.pdf> (дата звернення 10.04.2026).
- Zhang A. Machine learning based design optimization of centrifugal impellers / A. Zhang, Y. Liu, J. Yang, Z. Li, C. Zhang, Y. Li // Journal of the Global Power and Propulsion Society. – 2022. – Vol. 6. – PP. 124–134. – DOI: <https://doi.org/10.33737/jgpps/150663>.
- Bamberger K. Aerodynamic Optimization of Centrifugal Fans Using CFD-Trained Meta-Models / K. Bamberger, J. Belz, T. Carolus, O. Nelles // International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery Hawaii, Honolulu, 10–15 April 2016 (ISROMAC 2016). – URL: https://www.mb.uni-siegen.de/iftsm/forschung/veroeffentlichungen_pdf/160_2016.pdf (дата звернення 10.04.2026).

References (transliterated)

- Kulyk M. S., Kapitanchuk K. I., Andriyishyn M. P. (2022), *Nagniatchi pryrodnogo gazu* [Natural gas compressors], NAU, Kiev, 228 p., ISBN 978-966-932-173-2, Ukraine, Access mode: <https://er.kai.edu.ua/server/api/core/bitstreams/3df2bbce-e53e-4794-b777-05499aac5d73/content> (accessed 10 April 2026).
- Grekov P. I., Kapitanchuk K. I., Voljans'ka L. G., Alpatov V. Je. (2005), “Pidvyshhennja efektyvnosti ventyljacijnyh ustanovok ezhektorного типу [Improving the efficiency of ejector-type ventilation systems]”, *Industrial Hydraulics and Pneumatics*, no. 4(10), pp. 45–49, Access mode: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/39938> (accessed 10 April

- 2026).
- Kapitanchuk K. I. (2017), "Metodyka rozrahunku izoentropnoi' tehnii' real'nogo gazu z vykorystannjam gazodynamichnykh funkciij [Method for calculating isentropic flow of a real gas using gas-dynamic functions]", *13th International Scientific and Technical Conference "AVIA-2017", 19–21 April, Kiev*, pp. 20.62–20.65, Access mode: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/39835> (accessed 10 April 2026).
 - Pritz B., Probst M., Wiśniewski P., Dykas S., Majkut M., Smolka K. (2021), "Identification of unsteady effects in the flow through a centrifugal fan using CFD/CAA methods", *Archives of Thermodynamics*, vol. 42, no. 4, pp. 169–181, <https://doi.org/10.24425/ather.2021.139657>.
 - Probst M., Matthew N., Pritz B., Stieglitz R., Gabi M. (2019), "Quantitative Validation of CFD-Simulation against PIV Data for a Centrifugal Fan", *Proceedings of the 14th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows (ISAIF14), 8-11 July 2019, Gdansk, Poland*, Access mode: https://www.researchgate.net/publication/350837371_Quantitative_Validation_of_CFD-Simulation_against_PIV_Data_for_a_Centrifugal_Fan (accessed 10 April 2026).
 - Kapitanchuk K. I., Andriyishyn M. R., Yakymchuk S. A. (2024), "Design and experimental research of a centrifugal fan with backward-curved blades", *Proceedings. The Eleventh World Congress "Aviation in the XXI-st Century". Safety in Aviation and Space Technologies, 25–27 September, 2024, Kyiv, Ukraine*, vol. 1, pp. 1.4.5–1.4.9, Access mode: <http://congress.nau.edu.ua/2024/materialy-kongresu/> (accessed 10 April 2026).
 - Andriyishyn M. R., Kapitanchuk K. I., Yakymchuk S. A. (2024), "Vymirjuval'nyj stend dlja vyznachennja aerodynamichnykh charakterystyk ventyljatoriv vidpovidno do standartu ANSI/AMCA 210-07 [Measuring test bench for determining aerodynamic characteristics of fans in accordance with the ANSI/AMCA 210-07 standard]", *XXIV Mizhnarodna naukovotekhnichna konferencija AS PGP «Promyslova gidravlika i pnevmatyka», 19–20 grudnja, 2024 r., Kyi'v, Ukraïna* [Proceedings of the 24th International Scientific and Technical Conference "Industrial Hydraulics and Pneumatics Conference", 19–20 December, Kyiv, Ukraine], GLOBUS-PRES, Kyiv, Access mode: <https://er.kai.edu.ua/server/api/core/bitstreams/3c04ea80-dc3b-4720-866d-e4437ce75ee4/content>
 - Yakymchuk S. A. (2025), "Chysel'ne modeljuvannja aerodynamiky vidcentrovogo ventyljatora [Numerical simulation of the aerodynamics of a centrifugal fan]", *Tezy dopovidej XXV Mizhnarodnoi' naukovopraktychnoi' konferencii' z dobuvachiv vyshhoi' osvity i molodyh uchenyh «POLIT. Suchasni problemy nauky». Sekcija: Suchasni aviacijni tehnologii', 1–4 kvitnja 2025 r., Kyi'v, Ukraïna* [Abstracts of XXV International conference of higher education students and young scientists. "POLIT. Challenges of Science Today". Modern Aviation Technologies, 1–4 April 2025, Kiev, Ukraine], pp. 9–11, Access mode: https://nau.edu.ua/site/variables/docs/docsmenu/studnauka/polit2025/Polit-2025_AKF.pdf (accessed 10 April 2026).
 - Kapitanchuk K., Yakymchuk S. (2025), "Modeljuvannja ta doslidzhennja efektyvnosti vidcentrovogo ventyljatora iz zagnutymy nazad lopatkamy [Modeling AND Investigation of the Efficiency of a Centrifugal Fan with Backward-Curved]", *Aerospace Technic and Technology*, no. 4sup2(2026), pp. 39–45, <https://doi.org/10.32620/aktt.2025.4sup2.03>.
 - Moczko P., Odyjas P., Pietrusiak D., Więckowski J., Scholz P., Dix M., Osiecki T., Timmel T., Kroll L. (2022), "Enhancing Efficiency of Industrial Centrifugal Fans Using Blade Adjustment Mechanism", *Energies*, vol. 15, is. 3, paper no. 893, <https://doi.org/10.3390/en15030893>.
 - Siwek T., Górski J., Fortuna S. (2014), "Numerical and Experimental Study of Centrifugal Fan Flow Structures and Their Relationship with Machine Efficiency", *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 23, no. 6, pp. 2359–2364, Access mode: <https://www.pjoes.com/pdf-89420-23298?filename=Numerical+and.pdf&utm> (accessed 10 April 2026).
 - Pritz B., Walter J., Gabi M. (2018), "A Centrifugal Fan Test Bench for Validation Data at Off-Design Conditions", *International Conference on Fan Noise, Aerodynamics, Applications and Systems, 18–20 April 2018, Darmstadt, Germany*, Access mode: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000124453/89737554?utm> (accessed 10 April 2026).
 - Kapitanchuk K. I., Andriyishyn M. R., Yakymchuk S. A. (2025), "CFD-analiz chysel'nogo modeljuvannja aerodynamichnykh procesiv vidcentrovogo ventyljatora [CFD analysis of numerical modeling of aerodynamic processes in a centrifugal fan]", *Materialy XVII Mizhnarodnoi' naukovotekhnichnoi' konferencii' "AVIA-2025", 22–24 kvitnja 2025 roku, Kyi'v, Ukraïna* [Proceedings of the 17th International Scientific and Technical Conference "AVIA-2025", 22–24 April 2025, Kiev, Ukraine], pp. 6.1–6.5, Access mode: https://avia.nau.edu.ua/avia2025/info/AVIA_2025.pdf (accessed 10 April 2026).
 - CFD Online (2026), *SST k-omega model*, Access mode: https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model (accessed 10 April 2026).
 - Anjomrouz A., Karimi M. S., Hannani S. K. (2026), "Aerodynamic optimization of the combined axial-centrifugal compressor: a deep learning assisted two-step optimization approach", *Energy Conversion and Management*: X, vol. 30, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101911>.
 - Hwang M., Cheong C., Cho S., Choi J. (2026), "Optimization of centrifugal fan for clothes dryer using transfer learning-based multi-fidelity modeling", *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, vol. 45, no. 1, pp. 1–12, Access mode: <https://cdn.apub.kr/journalsite/sites/ask/2026-045-01/N0660450101/N0660450101.pdf> (accessed 10 April 2026).
 - Zhang A., Liu Y., Yang J., Li Z., Zhang C., Li Y. (2022), "Machine learning based design optimization of centrifugal impellers", *Journal of the Global Power and Propulsion Society*, vol. 6, pp. 124–134, <https://doi.org/10.33737/jgpps/150663>.
 - Bamberger K., Belz J., Carolus T., Nelles O. (2016), "Aerodynamic Optimization of Centrifugal Fans Using CFD-Trained Meta-Models", *International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery Hawaii, Honolulu, 10–15 April 2016 (ISROMAC 2016)*, Access mode: https://www.mb.uni-sieg-en.de/iftsm/forschung/veroeffentlichungen_pdf/160_2016.pdf (accessed 10 April 2026).

Надійшла (received) 21.04.2026
 Прийнята (accepted) 16.05.2026
 Публікація (published) 29.05.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Якимчук Сергій Анатолійович (Yakymchuk Serhii) – аспірант кафедри електричної інженерії та енергомашинобудування; Національний університет «Київський авіаційний інститут»; м. Київ, Україна; e-mail: 2471977@stud.kai.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0815-2490>.