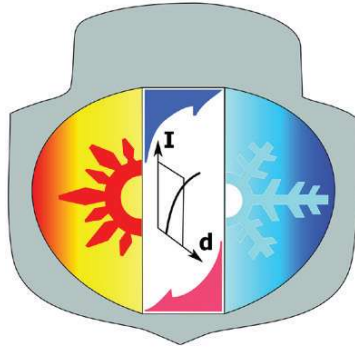


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Кафедра кондиціювання і рефрижерації



ХОЛОД В ЕНЕРГЕТИЦІ І НА ТРАСПОРТІ

МАТЕРІАЛИ

VI Міжнародної науково-технічної конференції
(*наукові статті, доповіді, тези*)

16–17 жовтня 2025 року



ВИДАВНИЦТВО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМ. АДМІРАЛА МАКАРОВА

2025

УДК 621.5(062.552)

X-73

Партнери конференції:

- Міністерство освіти і науки України;
- Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК);
- Одеський національний технологічний університет (ОНТУ);
- ПАТ «Завод «Екватор»;
- ТОВ «Хладотехника»

Матеріали публікуються за оригіналами, поданими авторами.

Претензії до організаторів не приймаються.

X-73 **Холод** в енергетиці і на транспорті : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Миколаїв, 16–17 жовтня 2025 року / Є. І. Трушляков (відп. ред.) та ін. – Миколаїв : НУК, 2025. – 486 с.

ISBN 978-966-321-492-4

У збірнику наведені матеріали (наукові статті, доповіді, тези) VI Міжнародної науково-технічної конференції «Холод в енергетиці і на транспорті», яка відбулась у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв) 16-17 жовтня 2025 року.

Розглянуто питання, пов'язані з дослідженням, проектуванням, виготовленням та експлуатацією холодильного обладнання, дослідженням робочих процесів у системах рефрижерації та кондиціонування, когенераційними та тригенераційними технологіями, використанням холоду в енергетичних установках транспортних засобів та з охороною навколишнього середовища.

Для науковців, викладачів, студентів та аспірантів.

УДК 621.5(062.552)

ISBN 978-966-321-492-4

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2025

СЕКЦІЯ № 4
ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ
МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТІ
ПРИ ЧИСЛОВОМУ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСІВ
У КАМЕРАХ ЗГОРЯННЯ
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Козловський А. В., канд. техн. наук,
доцент кафедри турбін
artem.kozlovskiy@nuos.edu.ua

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв, Україна

Анотація. У роботі розглянуто питання вибору моделей турбулентності для числового моделювання нестационарних процесів у низькоемісійних камерах згоряння газотурбінних двигунів. Порівняно результати використання підходів LES та SAS для аналізу характеристик пульсацій тиску, швидкості та температури у робочому об'ємі камери. Встановлено особливості прояву нестійкості горіння та визначено ділянки з максимальною амплітудою пульсацій. Показано, що LES-модель забезпечує точніше відображення внутрішньокамерних процесів, тоді як SAS-підхід характеризується нижчими обчислювальними витратами, але меншою достовірністю результатів.

Ключові слова: газотурбінний двигун, камера згоряння, турбулентність, числове моделювання, пульсаційні процеси.

Вступ. Одним із пріоритетних напрямів розвитку газотурбінних двигунів (ГТД) є зниження рівня викидів шкідливих речовин та підвищення їхньої паливної ефективності. Камера згоряння ГТД є ключовим елементом, де відбуваються складні нестационарні процеси, включно з турбулентною взаємодією потоків, тепло- та масообміном і хімічними реакціями [1, 2]. Однією з основних проблем є виникнення режиму пульсаційного горіння, що може призвести до вібраційних навантажень, пошкоджень або руйнування елементів двигуна [3–5].

Стабілізація процесів у низькоемісійних камерах згоряння потребує глибокого аналізу нестационарних режимів та вибору адекватних моделей турбулентності [6]. Попри значну кількість наукових робіт, питання достовірності прогнозу пульсаційних процесів залишається відкритим. Тому актуальним є проведення порівняльного дослідження різних підходів до числового моделювання турбулентності.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є порівняння моделей турбулентності при моделюванні процесів у камері згоряння ГТД та визначення їхньої придатності для відображення нестационарних характеристик.

Для досягнення мети вирішувалися такі завдання:

- здійснити моделювання процесів у камері згоряння із застосуванням LES та SAS;
- визначити поля тиску, температури та швидкості;
- проаналізувати зони формування найбільших пульсацій;
- оцінити достовірність і доцільність використання кожної моделі.

Методика. Дослідження виконано з використанням інструментів обчислювальної гідродинаміки (CFD). Для моделювання обрано геометричну модель 1/16 частини низькоемісійної камери згоряння. У розрахунках застосовано LES (Large Eddy Simulation) та SAS (Scale-Adaptive Simulation), що дозволило дослідити вплив вибору моделі турбулентності на результати прогнозування параметрів робочого процесу.

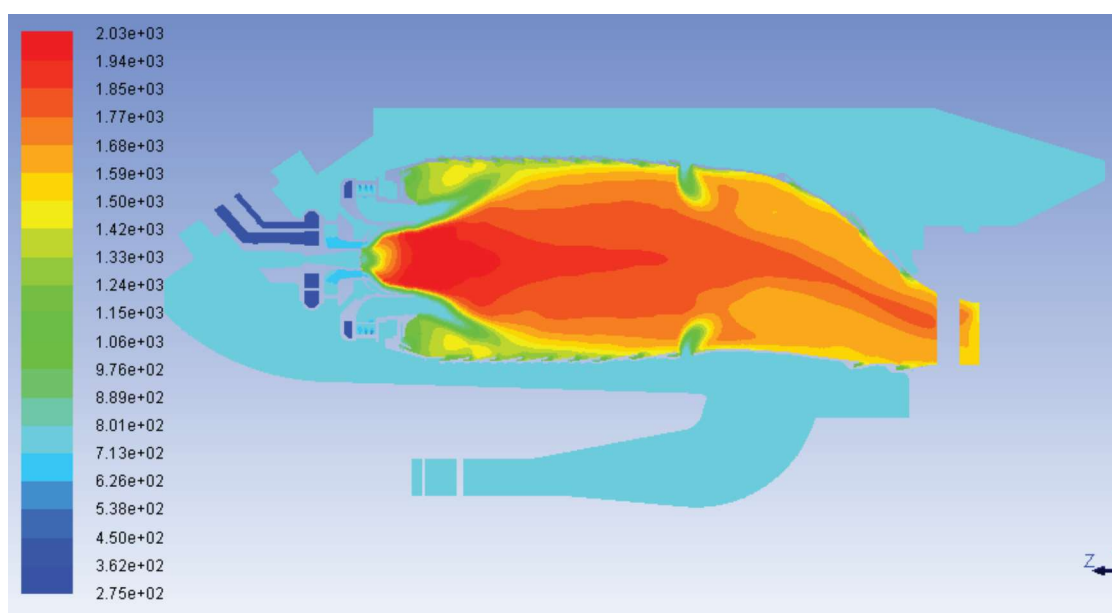
Основні результати. Числове моделювання процесів у низькоемісійній камері згоряння із застосуванням підходів LES та SAS показало суттєву залежність результатів від обраної моделі турбулентності. При використанні LES вдалось відтворити деталізовану структуру потоку з чітким формуванням зон рециркуляції, особливо у центральному вихорі жарової труби. У цій області спостерігалася значна турбулентна активність, що визначає стабільність процесів горіння. SAS-модель, у свою чергу, демонструвала більш протяжну зону зворотних потоків, однак рівень пульсацій у ній був значно меншим, ніж у випадку LES, що свідчить про часткове згладжування реальної картини.

Розрахунки пульсацій швидкості підтвердили, що LES точніше описує їх розвиток у критичних зонах — на виході з завихрювачів та в отворах підведення вторинного повітря. SAS показала зменшені амплітуди відхилень, що знижує достовірність моделі у прогнозі турбулентних характеристик. Аналогічна ситуація спостерігалася і для пульсацій тиску: за LES амплітуда коливань досягала 15 кПа, тоді як SAS прогнозувала лише близько 10 кПа. Обидві моделі вказали на концентрацію максимальних пульсацій у другій половині жарової труби, але LES дала значно більш реалістичні оцінки їх величини.

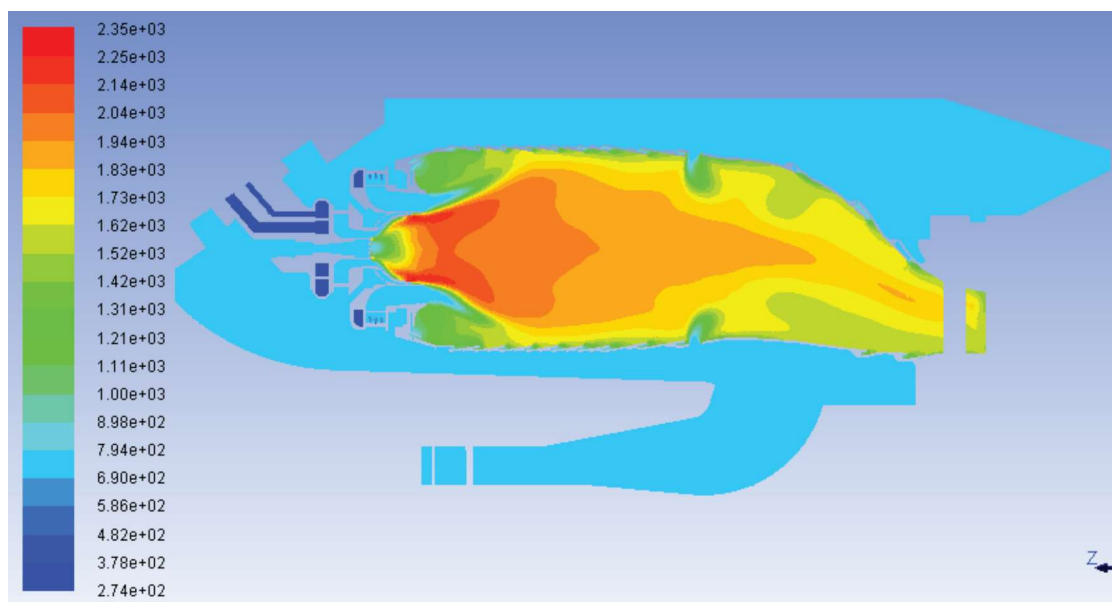
При аналізі температурних полів (рис. 1) встановлено, що SAS-модель прогнозувала максимальні температури в центральному завихрювачі приблизно на 300 °C вищі за результати LES. Це свідчить про певні похибки SAS у відтворенні теплових процесів. Натомість LES забезпечила більш збалансоване відображення теплового стану робочої області.

Додатковий спектральний аналіз підтвердив переваги LES-моделювання: для цього підходу було виявлено виражений пік пульсацій статичного тиску з частотою 189 Гц та амплітудою понад 2,6 кПа, а також другорядні піки на частотах 151, 353 та 580 Гц. SAS показала основний пік на частоті

227 Гц із суттєво нижчою амплітудою (~ 1 кПа) та декілька другорядних коливань у діапазоні 30–140 Гц, що не відображають повною мірою характерних коливальних процесів у камері згоряння.



a



б

Рис. 1. Поле середньої за часом температури в камері згоряння з використанням різних моделей турбулентності:
a – LES; *б* – SAS

Таким чином, результати числового аналізу свідчать, що LES-модель значно точніше передає динаміку нестационарних процесів, забезпечує коректне прогнозування зон виникнення критичних пульсацій та дозволяє ідентифікувати характерні частоти, небезпечні з точки зору резонансних явищ. SAS-модель може бути використана для попередніх розрахунків завдяки меншій обчислювальній складності, проте вона суттєво занижує амплітуди пульсацій і завищує температурні параметри, що робить її менш придатною для точного інженерного аналізу. Отримані дані підтверджують доцільність використання LES-підходу під час проєктування та вдосконалення низькоемісійних камер згоряння газотурбінних двигунів.

Висновки:

1. Вибір моделі турбулентності суттєво впливає на результати числового аналізу процесів у камерах згоряння ГТД.
2. LES-підхід є більш точним для дослідження нестационарних режимів, проте потребує значних обчислювальних ресурсів.
3. SAS-модель економічніша з точки зору розрахунків, але показує занижені значення амплітуд пульсацій, що знижує її надійність.
4. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні та модернізації низькоемісійних камер згоряння з метою підвищення їхньої стабільності та ефективності.

Література

1. Сербін, С.І., & Козловський А.В., Вілкул С.В., & Діасамідзе Б.Т. (2025). Експериментальні дослідження енергетичних характеристик плазмохімічного інтенсифікатора. *Збірник наукових праць НУК імені адмірала Макарова*, 1(499), 76–82. [https://doi.org/10.15589/znp2025.1\(499\).11](https://doi.org/10.15589/znp2025.1(499).11).
2. Сербін, С.І., & Козловський А.В., Вілкул С.В., & Діасамідзе Б.Т. (2025). Експериментальні дослідження плазмового

інтенсифікатора для двопаливної камери згоряння газотурбінного двигуна. *Авіаційно-космічна техніка і технологія. Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»*, 3(203), 40–48. <https://doi.org/10.32620/aktt.2025.3.04>.

3. Serbin, S., Kozlovskyi, A., & Burunsuz, K. (2023). Influence of plasma-chemical products on process stability in a low-emission gas turbine combustion chamber. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 40(2), 203–213. <https://doi.org/10.1515/tjj-2020-0046>.

4. Serbin, S.I., Kozlovskyi, A.V., & Burunsuz, K.S. (2016). Investigations of nonstationary processes in low emissive gas turbine combustor with plasma assistance. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44(12), 2960–2964. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2620983>.

5. Сербін, С.І., & Козловський А.В. (2021). Підвищення стійкості низькоемісійної камери згоряння газотурбінного двигуна. *Збірник наукових праць НУК імені адмірала Макарова*, 4(487), 7–13. [https://doi.org/10.15589/znp2021.4\(487\).2](https://doi.org/10.15589/znp2021.4(487).2).

6. Сербін, С.І., & Козловський А.В. (2025). Вибір моделі турбулентності для числового аналізу нестационарних процесів в газотурбінних камерах згоряння. *Збірник наукових праць НУК імені адмірала Макарова*, 2(500), 111–118. [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).16](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).16).