УДК 629.735

Дикий О.П., к.т.н., доцент Пахолюк О.А.,
Луцький національний технічний університет

МОДЕЛІ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ПОТОКІВ

Розкрито зміст поняття турбулентності повітряних потоків та досліджено їх існуючі моделі.

Ключові слова: *турбулентність, повітряний потік, модель.*

Постановка проблеми. Динамічні процеси, що відбуваються в атмосфері, носять синергетичний характер і залежать від величезної кількості факторів. Основні з цих факторів – це географічне розташування місцевості польоту, тип підстилаючої поверхні, висота польоту, пора року і навіть час доби. Повітряне середовище – надзвичайно складний об’єкт для моделювання, хоча описані явища мають певні відповідні математичні моделі. З цих моделей найбільший інтерес для цілей синтезу управління і моделювання просторового руху представляють моделі турбулентності атмосфери, особливо повітряних потоків біля земної поверхні. Саме тому тематика нашого дослідження є актуальною.

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідженню сутності турбулентності повітряних потоків та їх моделей присвячені численні наукові праці провідних вчених, таких як П. Бердшоу, Т. Карман, І. Хінце, О. Машков, О. Щукін, А. Баранов, Р. Рибалко та ін. Однак дана тематика досліджень є актуальною і нині.

Мета дослідження. Основними цілями статті є розкрити зміст поняття турбулентності повітряних потоків та дослідити їх існуючі моделі.

Виклад основного матеріалу.

Всі відомі визначення турбулентності відображають лише частину властивостей цього виключно складного фізичного явища. Так, Бредшоу П. визначає турбулентність як тривимірний нестаціонарний рух рідини, в якому внаслідок розтягування вихорів створюється безперервний розподіл хаотичних пульсацій параметрів потоку (швидкості, тиску і т.д.) в інтервалі довжин хвиль від мінімальних, визначених грузлими силами, до максимальних, що визначаються граничними умовами течії. Карман Т. тлумачить поняття турбулентності як “невпорядкований рух, який в загальному випадку виникає в рідинах, газоподібних або крапельних середовищах, коли вони обтікають непроникні поверхні або ж коли сусідні один з одним потоки однієї і тієї ж рідини слідують поруч або проникають один в інший”. Згідно досліджень Хінце І. турбулентний рух рідини припускає наявність неврегульованої течії, в якій різні величини зазнають хаотичних змін в часі і у просторових

координатах і при цьому можуть бути виділені статистично точні їх середні значення.

Ознаками турбулентних течій виступають:

– нерегулярність (турбулентність – процес нерегулярний, випадковий і хаотичний);

– дифузійність (у турбулентному плині дифузія вища ніж в ламінарному);

– високе число Рейнольдса (турбулентність зустрічається при високих числах Рейнольдса);

– тривимірність (турбулентність завжди тривимірна);

– дисипативність (енергія найбільш дрібних вихорів переходить у тепло);

– нерозривність (розмір найбільш дрібних вихорів набагато більший за довжину вільного пробігу. Ці вихори можуть бути розглянуті в рамках механіки суцільного середовища).

Існує велика кількість різноманітних моделей для розрахунку турбулентних течій. Вони відрізняються один від одної складністю рішення і точністю опису течії.

Нижче перераховані моделі за зростанням складності. Основна ідея моделей зводиться до припущення про існування середньої швидкості потоку і середнього відхилення від нього: u =u + u '. Після спрощення рівнянь Нав'є - Стокса, в них, крім невідомих середніх швидкостей, з'являються твори середніх відхилень ui' uj'. Різні моделі по-різному їх моделюють. Перераховані нижче моделі застосовуються в різних інженерних розрахунках залежно від необхідної точності. Практично всі вони реалізовані в сучасних програмах розрахунку гідродинамічних течій, таких як Autodesk Simulation CFD, Fluent, CFX або OpenFOAM.

Модель Буссінеска (Boussinesq). Рівняння Нав'є - Стокса перетвориться до виду, в якому додано вплив турбулентної в'язкості.

Модель Спаларта-Альмарас. У даній моделі вирішується одне додаткове рівняння переносу коефіцієнта турбулентної в'язкості

k-epsilon модель. Рівняння руху перетвориться до виду, в якому додано вплив флуктуації середньої швидкості (у вигляді турбулентної кінетичної енергії) і процесу зменшення цієї флуктуації за рахунок в'язкості (дисипації). У даній моделі вирішується 2 додаткових рівняння для транспорту кінетичної енергії турбулентності і транспорту дисипації турбулентності. Найбільш часто використовувана модель при вирішенні реальних інженерних задач.

k-omega модель. Схожа на попередню, замість рівняння дисипації вирішується рівняння для швидкості дисипації турбулентної енергії.

Модель напружень Рейнольдса. В рамках усереднених по Рейнольдсу рівнянь (RANS) вирішується 7 додаткових рівнянь для транспорту напруг Рейнольдса.

Рівняння Рейнольдса виходять з рівнянь Нав'є-Стокса за допомогою осереднення. Осереднення може проводитися різними способами:

- за ансамблем
- за часом
- за простором

Незалежно від типу осереднення для отримання рівнянь Рейнольдса необхідно, щоб осереднення задовольняло умовам Рейнольдса.

Для задоволення умовам Рейнольдса період осереднення повинен бути набагато більшим від максимального періоду турбулентних пульсацій - часу автокореляції.

При розгляді стаціонарних (в середньому) течій час осереднення може бути як завгодно великим ($T = \infty$).

У нестаціонарному випадку період осереднення повинен бути набагато меншим від характерних часів зміни нестаціонарних величин.

Не завжди можливо підібрати період T таким, щоб виконувалися умови Рейнольдса.

Переваги RANS

- дозволять використовувати як спрощені двовимірні, так і стаціонарні рівняння;
- RANS набагато економічніший, ніж LES і, тим більше, DNS;
- є найбільш широко застосовуваним методом при практичних розрахунках турбулентних течій.

Недоліки RANS

- не існує «універсальної моделі турбулентності», кожна модель має свою «область застосування»;
- навіть при ретельному виборі моделі неможливо гарантувати високу точність розрахунку.

Метод великих вихорів (LES, large eddy simulation). Займає проміжне положення між моделями, що використовують осереднене рівняння Рейнольдса і DNS. Вирішується для великих утворень в рідині. Вплив вихорів є меншим, ніж розміри комірки розрахункової сітки, замінюється емпіричними моделями.

Пряме чисельне моделювання (DNS, direct numerical simulation). Додаткових рівнянь немає. Вирішуються нестаціонарні рівняння Нав'є - Стокса з дуже дрібним кроком за часом, на дрібній просторової сітці. По суті не є моделлю. Через величезний обсяг інформації, отриманої при чисельному

моделюванні, цінність являють середні значення потоку, отримані при вирішенні задачі з якими можуть порівнюватися інші моделі.

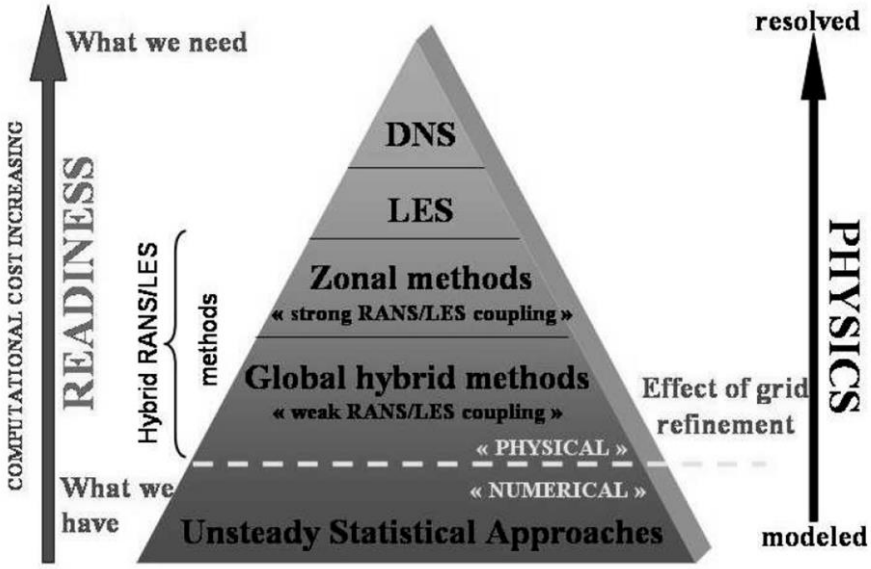

Рис. 1. Порівняння різних методів розрахунку турбулентних течій (за Sébastien DECK)

На сьогоднішній день накопичено величезний досвід застосування моделей турбулентності. Кращі моделі турбулентності забезпечують досить високу точність розрахунку деяких класів течій, зокрема, прикордонних шарів.

Досить точні результати для складних (в першу чергу відривних) течій при прийнятних витратах дозволяють отримувати гібридні методи. Вони об'єднують переваги RANS (висока точність розрахунку пристінних течій при скромних вимогах до сітки) і LES (висока точність розрахунку відривних течій).

При розрахунку конкретних течій необхідно не тільки вибрати найбільш підходящу модель турбулентності, але й оцінити ступінь достовірності отриманих з її допомогою результатів.

Проводяться численні роботи з тестування моделей турбулентності:

- Стенфордські конференції;
- міжнародні проекти;
- workshop;
- академічні дослідження.

Існує безліч методів розрахунку турбулентних течій. Як правило, чим точнішим є метод, тим більше обчислювальних ресурсів потрібно для його використання. У прямому чисельному моделюванні (DNS) дозволяються всі масштаби турбулентності, тому застосовувати його можливо тільки при низьких числах Рейнольдса. Метод моделювання крупних вихорів (LES) теж досить точний, але витрати поки неприйнятні для вирішення прикладних завдань. У даний час активно розвіваються гібридні методи - пошук компромісу

між точністю і економічністю. На практиці найчастіше використовується метод розв'язання рівнянь Рейнольдса. Рівняння Рейнольдса замикаються за допомогою напівемпіричних моделей турбулентності. Зазвичай використовується гіпотеза Буссінеска - лінійний зв'язок між напруженнями Рейнольдса і тензором швидкостей деформацій.

Загальні висновки. Отже, турбулентність – це невпорядкований рух, який в загальному випадку виникає в рідинах, газоподібних або крапельних середовищах, коли вони обтікають непроникні поверхні або ж коли сусідні один з одним потоки однієї і тієї ж рідини слідують поруч або проникають один в інший. Ознаками турбулентності є їх нерегулярність, дифузійність, високе число Рейнольдса, тривимірність, дисипативність та нерозривність.

Деякі течії носять турбулентний характер - в них присутні різномасштабні турбулентні “вихори”. Ці вихори призводять до додаткового переносу імпульсу та енергії, який зазвичай набагато інтенсивніше молекулярного переносу • Турбулентний перенос значно змінює властивості течії, тому його необхідно враховувати при рішенні задач. Більшість практичних завдань є турбулентними, для досягнення високої точності при їх розрахунку потрібно висока точність моделювання турбулентності.

Список використаних джерел

1. Машков О.А., Щукін О.М. Оцінка ефективності застосування функціонально стійких систем дистанційно пілотованих літальних апаратів при моніторингу навколишнього природного середовища в умовах турбулентності атмосфери. – К., 2013. – 186 с.

2. Баранов А.М., Рибалко Р.І. Вплив структури повітряного потоку та конструкційних особливостей сепараторів на ефективність розділення: 2011. – К.: “LAT & K”, 2011. – 218 с.

3. Курс лекцій «Модели турбулентности». - Режим доступу: URL: http://agarbaruk.professorjournal.ru/lecture/turb_models.

АННОТАЦИЯ

Аннотация. В статье раскрыто содержание понятия турбулентности воздушных потоков и исследованы их существующие модели.

Ключевые слова: турбулентность, воздушный поток, модель.

ANNOTATION

In the article the meaning of the turbulence of air flow and investigated their existing models.

Keywords: turbulence, air flow, model.