

ДОДАТОК 7.G

(довідковий)

ПРОБЛЕМИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГІДРОДИНАМІКИ

7.G.1 Загальні положення

ОГД є складним предметом, і цей додаток описує аспекти, які визнано важливими при застосуванні процедури ОГД для попереднього дослідження умов потоку в повітроводах. Це не є процедурною настановою.

Перед початком моделювання варто ретельно обдумати, що саме необхідно прогнозувати і які фізичні явища можуть впливати на результати. Попереднє дослідження за допомогою ОГД є прогнозом того, що може бути встановлено у реальних умовах. Будь-які фактори, які можуть вплинути на інженерне рішення або на точність вимірювань, мають бути враховані у розрахунковій моделі.

Інженер повинен врахувати, прийняти рішення та задокументувати конкретні ОГД пункти, наведені у 7.G.2 - 7.G.6.

7.G.2 Числові аспекти

Слід використовувати принаймні схему другого порядку точності для змінних потоку. Деякі коди вимагають застосування схеми першого порядку точності для турбулентності з метою забезпечення належної збіжності. Це може бути прийнятним лише для турбулентних змінних, проте схема другого порядку є більш бажаною.

7.G.3 Критерії збіжності

Визначити, коли рішення є збіжним, не завжди просто. Для цього потрібен попередній досвід роботи з ОГД кодом та його застосуванням, щоб оцінити збіжність моделювання. Для звичайних моделювань потоку без детально врахованих стінок, тобто із використанням стінових функцій або інвісцидних рівнянь Ейлера, збіжність найчастіше можна оцінити шляхом аналізу залишків. Необхідне значення залишків залежить від обчислювальних характеристик ОГД коду та способу масштабування залишків. Настанови наведені у керівництві до

коду, і залишки за кількома глобальними параметрами мають бути побудовані у вигляді графіків для прийняття рішення щодо збіжності. Однак слід зазначити, що ОГД коди загального призначення часто містять надто консервативні критерії збіжності. Для моделювання з детально врахованими стінками також важливо перевіряти збіжність відповідних глобальних величин, таких як загальні втрати тиску від входу до виходу. За умови дуже детально врахованих стінок, збіжність теплового поля може іноді займати у 10 разів більше часу, оскільки рішення є неізотермічним.

7.G.4 Джерела помилок та невизначеностей

ОГД вимагає від користувача ґрунтовного розуміння невизначеностей та помилок, які можуть призвести до недійсності результатів ОГД моделювання. Тому результати ОГД моделювання повинні інтерпретуватися досвідченим користувачем для отримання достовірного рішення. Помилки можуть виникати на різних етапах процесу:

- визначення проблеми – що саме потрібно проаналізувати?
- вибір стратегії рішення – які фізичні моделі та числові інструменти слід використовувати?
- розробка обчислювальної моделі – як слід налаштувати геометрію та чисельні інструменти?
- аналіз і інтерпретація результатів – як необхідно аналізувати модель та інтерпретувати результати?
- вибір стратегії рішення – які фізичні моделі та числові інструменти слід використовувати?

Існує багато різних визначень помилок. У цьому керівництві помилки класифікуються за чотирма типами джерел:

- визначення задачі;
- модель;
- числові;
- користувач та код.

Ці помилки та настанови щодо мінімізації їхнього впливу, наведено у 7.G.5.

7.G.5 Помилки

7.G.5.1 Помилки у визначенні проблеми

7.G.5.1.1 Загальні положення

Помилки у визначенні проблеми є найпоширенішим типом помилки. Для отримання корисних результатів, ОГД моделювання потребує аналізу правильної проблеми, мати відповідні граничні умови та ґрунтуватися на правильній геометрії.

7.G.5.1.2 Моделювання (невірний тип моделювання)

Важливо мати загальне уявлення про фізичні процеси, які беруть в цьому участь, і про те, як найкраще проаналізувати задачу. Виконання 2D-моделювання для розуміння вторинних потоків або виконання стаціонарного моделювання з метою аналізу нестационарної поведінки є, очевидно, некоректним. При оцінці ОГД моделювання, перш за все слід врахувати, які фізичні явища є важливими, і чи обраний тип моделювання підходить для їх коректного відтворення.

7.G.5.1.3 Граничні умови (неправильні або невизначені граничні умови)

Поширеним джерелом похибок є використання неправильних граничних умов. Граничні умови повинні бути визначені достатньо детально, щоб врахувати всі важливі фізичні характеристики.

7.G.5.1.4 Геометричні помилки

7.G.5.1.4.1 Загальні положення

Зазвичай необхідно певним чином спрощувати геометрію. При оцінюванні ОГД моделювання потрібно враховувати, яким чином геометричні спрощення впливають на основні фізичні явища. Типові геометричні помилки наведено в 7.G.5.1.4.2-7.G.5.1.4.4.

7.G.5.1.4.2 Спрощення

Невеликі геометричні елементи, наприклад, фаски, невеликі сходинки або зазори, часто можуть не враховуватися. При ігноруванні такого типу елементів, необхідно враховувати, яким чином вони можуть впливати на важливі фізичні процеси (наприклад, формування потоку або змішування індикаторного газу).

7.G.5.1.4.3 Допуски та виробничі відхилення

Якщо геометрія має дуже великі допуски або виготовлена таким чином, що може спричинити неідеальну форму чи положення, може виникнути необхідність виконати додаткові ОГД моделювання, щоб охопити весь діапазон можливих реальних геометрій.

7.G.5.1.4.4 Умови поверхні: шорсткість, зварні шви, уступи, зазори тощо
Часто під час ОГД моделювання припускається, що поверхня є ідеально гладкою. Негладка поверхня, яка може мати зварні шви, сходинки чи навіть зазори, дає інші результати. Якщо фізичні явища, що становлять інтерес, можуть залежати від стану поверхні, це необхідно враховувати. Типові явища, які можуть залежати від такого типу помилки, включають прогноз переходу (режим потоку), проникнення та змішування підтікань потоків.

7.G.5.2 Помилки обчислювальної моделі

7.G.5.2.1 Неправильні фізичні моделі

Після того, як тип моделювання було обрано, наступним кроком є визначення фізичних моделей, які слід використовувати у моделюванні. Необхідно розглянути такі аспекти:

- дані про газ (не стиснений/стиснений, ідеальний газ/реальний газ тощо);
- моделювання турбулентності (тип моделі, тип обробки поблизу стінки тощо);
- інші моделі (горіння, розпилення тощо).

При оцінюванні помилок, пов'язаних із моделлю, важливо знати характеристики обраної моделі та ретельно обміркувати, як ці характеристики та можливі обмеження можуть вплинути на прогнозовану фізичну поведінку. Використання неправильної турбулентної моделі може повністю зробити недійсними результати ОГД моделювання.

7.G.5.2.2 Числові помилки

Помилки, пов'язані з числовим розв'язанням розробленої моделі. Типовими прикладами числових помилок є помилки дискретизації, збіжності та округлення.

7.G.5.2.3 Помилки дискретизації

Помилки дискретизації можуть бути просторовими або часовими.

Просторові помилки дискретизації – те, що зазвичай мають на увазі під помилками дискретизації. Ці помилки обумовлені різницею між точним рішенням та чисельним представленням рішення в просторі. Описати різні схеми дискретизації, що використовуються різними кодами, та пов'язані з ними помилки, в даному випадку не можливо. Натомість нижче наведено деякі загальні правила для уникнення цих похибок. Натомість нижче наведено деякі загальні правила, що дозволяють уникнути цих помилок.

— Використовуйте принаймні схему другого порядку точності, а краще схему третього порядку точності. Деякі коди загального призначення мають за замовчуванням схему першого порядку, яка є дуже дифузійною та часто надмірно згладжує результати.

— Для нових застосувань, завжди виконуйте моделювання з більш дрібною сіткою, щоб оцінити залежність рішення від сітки.

— Будьте уважні до шахових помилок. Шахові похибки виникають поблизу великих розривів і проявляються у вигляді хвилястого візерунку із довжиною хвилі у дві комірки. Деякі схеми, особливо ті, що працюють за принципом центрального диференціювання, більш схильні до ефектів шахової дошки. Схеми проти вітру є дещо кращими, але схеми на основі зменшення загальної варіації ще більш ефективнішими.

Якість сітки може суттєво впливати на точність результатів. Повинна бути достатня кількість комірок через граничні шари та в будь-яких інших зонах з великими градієнтами потоку, а сітка повинна бути адаптована до типу використовуваної моделі турбулентності в зоні стінки.

Помилки дискретизації за часом в основному впливають на нестационарні моделювання. Проте деякі коди застосовують метод покрокового інтегрування за часом також для стаціонарних моделювань, і тоді помилка дискретизації за часом може дещо вплинути на кінцеве стаціонарне рішення. Дискретизацію за часом можна виконувати за допомогою схем першого або другого порядку чи методу

Рунге-Кутти, який є точнішим і заощаджує пам'ять. Деякі коди можуть адаптувати часовий крок, але часто необхідно задавати його наперед. Часовий крок слід розглядати як часову сітку та забезпечити, щоб роздільна здатність сітки за часом була достатньо високою для відтворення найвищих частот потоку. Для уникнення проблем, пов'язаних із помилками дискретизації за часом, слід враховувати наступне.

— Використовуйте щонайменше схему другого порядку точності за часом.

— Оцініть типові значення частот важливих явищ потоку та виберіть крок за часом, який є достатньо точним для правильного визначення цих значень. Також перевірте частоти, зафіксовані в ході моделювання, і переконайтеся, що вони добре відтворені за допомогою обраного кроку за часом.

— Для нових застосувань, спробуйте використати менший крок за часом, щоб переконаватися, що рішення у часі є досить незалежним від сітки у часі.

7.G.5.2.4 Помилки збіжності

Визначити, коли ОГД моделювання досягло збіжності, не завжди просто. Різні коди та різні програми реагують дуже по-різному. Окрім оцінювання залишків, у міру просування рішення мають аналізуватися глобальні параметри, такі як розподіл статичного тиску, загальні втрати тиску, тертя поверхні та теплопередача.

7.G.5.2.5 Помилки округлення

При використанні одинарної точності необхідно бути обережним, щоб уникнути помилок округлення. Моделювання за допомогою методу Інівсцида Ейлера та моделювання з використанням сіток з функцією стінки найчастіше можна виконувати з одинарною точністю. Для добре розділених граничних шарів ($Y^+ \sim 1$) часто необхідно використовувати подвійну точність. Якщо використовується подвійна точність для розв'язувача з дуже дрібним розміром сітки, необхідно переконаватися, що сітка також створена з подвійною точністю. Іноді розв'язувач з одинарною точністю збігається повільніше, ніж розв'язувач із подвійною точністю, через числові помилки, спричинені округленням. При використанні складних фізичних моделей, таких як моделювання вільних

поверхонь, розпилення та нестационарні моделювання зі швидким переміщенням сітки, також часто необхідно застосовувати подвійну точність.

7.G.5.3 Помилки користувача та коду

Такі помилки пов'язані з дефектами в коді або помилками, допущеними інженером з ОГД.

7.G.6 Що варто вважати достовірним, а що – ні

Хоча ОГД загалом досить добре передбачає багато поширених характеристик потоку, проте прогнозування відриву та повторного приєднання потоку, наприклад, є складним завданням, і результати слід інтерпретувати з обережністю.

Теплопередачу часто дуже складно точно спрогнозувати, і нерідко отримують коефіцієнти теплопередачі, які є помилковими на 100 % або навіть більше. Дані валідації є критично важливими для того, щоб можна було довіряти результатам моделювання теплопередачі.