

В спеціалізовану вчену раду Д26.196.01
при Інституті гідромеханіки
Національної академії наук України

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Малюги Володимира Сергійовича

«Нестационарні задачі обтікання з урахуванням ефектів випромінювання звуку»

яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора фізико-
математичних наук за спеціальністю
01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

Актуальність теми

Останнім часом, як наслідок інноваційного розвитку, стає поширеним застосування раніш невідомих фізичних ефектів та явищ при створенні зразків нових технічних пристроїв та систем. Але виявлення цих явищ, ефектів та закономірностей вимагає поглиблення наукових досліджень. А найбільш потужним засобом для проведення досліджень а галузі аерогідродинаміки на сьогодні є обчислювальний експеримент та комп'ютерне моделювання. Впродовж останніх десятиліть обчислювальна гідромеханіка (CFD) розвивається особливо активно. З появою і розвитком кластерних суперкомп'ютерів і технологій паралельного програмування CFD методи починають грати все більш важливу роль в прикладних задачах, що мають конкретні застосування в індустрії. Проте, далеко не всі методи CFD можуть бути корисні в класі задач, який розглядається. Виникає необхідність створення та застосовування більш складних, комплексних математичних методів та комп'ютерних технологій, що дозволяють отримувати інформацію не лише про окреме фізичне явище, а і про еволюцію складних зв'язних процесів таких як динаміка акустичних полів, що виникають під аерогідродинамічним впливом. Саме створення гібридних методів та алгоритмів, поєднання яких віддзеркалює взаємодію різних фізичних явищ, призводить до ефективного розв'язання прикладних задач. Розробка технології розрахунку звукових полів, що базується на сучасних підходах комп'ютерної механіки рідини і надає можливість проводити обчислювальний експеримент та моделювання на кластерних суперкомп'ютерах. Таким чином, актуальність теми даної роботи наочно підтверджується тим, що і в наші дні триває розробка нових і модернізація вже існуючих методів розрахунку задач про генерацію звуку потоками.

Дисертаційну роботу Малюги Володимира Сергійовича «Нестационарні задачі обтікання з урахуванням ефектів випромінювання звуку» присвячено виявленню кількісних закономірностей звукових полів, що генеруються при

автоколивальному режимі взаємодії гідродинамічної течії з твердими тілами різної геометрії.

Дисертацією є рукопис, що складається з вступу, восьми основних розділів, висновків, списку використаних джерел із 310 найменувань. Основний текст містить 93 рисунки і 20 таблиць. Загальний обсяг дисертації складає 323 сторінок машинописного тексту.

Метою дисертаційної роботи є дослідження процесів виникнення стійких автоколивань при взаємодії потоку з твердими тілами і випромінювання звуку, що вимагає розробки теоретичних методів опису та комп'ютерних методів моделювання вихрових джерел звуку в зовнішніх потоках та у внутрішніх потоках, таких як канали складної геометрії (канали зі стенозами); застосування побудованої теорії та розроблених методів до ряду задач про генерацію звукового поля при обтіканні твердих тіл потоком; виявлення домінуючих закономірностей виникнення автоколивальних процесів при взаємодії потоку з твердими тілами та випромінювання звуку.

Об'єктом дослідження є процес виникнення автоколивань рідини і звукового поля при натіканні потоку на жорстке тіло.

Предметом дослідження є закономірності виникнення автоколивань в потоці, гідродинамічних каналів зворотних зв'язків і звукових полів при натіканні потоку на тверде тіло.

Найбільш важливі наукові результати

- Побудовано алгоритм розв'язання задач про генерацію звуку потоками, що набігають на тверді тіла. Алгоритм належить до числа гібридних методів, які дозволяють розкласти задачу про генерацію звуку потоком на два етапи. На першому етапі розраховується гідродинаміка потоку середовища, на другому етапі -- характеристики акустичного поля, генерованого потоком. Для дослідження динаміки двовимірних течій рідини використовувалася техніка прямого чисельного моделювання. Необхідна точність розрахунків в розглянутому діапазоні чисел Рейнольдса досягалась шляхом поліпшення розрахункової сітки. У випадку тривимірних течій методи DNS використовувалися тільки для ламінарних режимів течії. При турбулентних режимах викорисрвуався метод великих вихорів (LES). Обчислення проводилися на кластерному суперкомп'ютері Скіт Інституту кібернетики НАН України. Для розпаралелювання обчислень використовувалась технологія MPI. Розпаралелювання проводилось за принципом геометричного паралелізму. При проведенні чисельних розрахунків використовувалися обчислювальні процедури тулбокса з відкритим кодом OpenFOAM. На другому етапі гібридного алгоритму розв'язувались акустичні задачі. При розв'язанні акустичних задач будувались аналітичні розв'язки для відповідних граничних задач для хвильового рівняння.

- Методом математичного моделювання досліджено процес генерації еолових тонів, що виникають при обтіканні циліндра потоком. Змодельовано процес періодичної зміни у часі основних гідродинамічних характеристик та розподіл тиску на поверхні циліндра. Показано, що повна акустична потужність еолового тону на вісім порядків менше потужності потоку, що набігає на циліндр. Виявлені просторові розподіли звукового поля (діаграми спрямованості) при різних значеннях числа Рейнольдса.
- Досліджено процес генерації звуку (клинових тонів) затопленим струменем, що натікає на гострий клин. На першому етапі, на основі нестационарної системи рівнянь Нав'є-Стокса розв'язано задачу гідродинаміки про натікання затопленого струменя, сформованого вузьким каналом (соплом), на гострий жорсткий клин. Описано основні гідродинамічні характеристики даної течії. Встановлено, що впродовж перехідного процесу роль гідродинамічного каналу зворотного зв'язку виконують вихрові утворення, що виникають у момент первинного натікання струменя на клин, рухаються проти течії і притискаються до граней клину. Коли ж процес автоколивань встановився, гідродинамічний канал зворотного зв'язку формується за рахунок різниці тисків на гранях клину і періодичної зміни їх знаку, що викликає періодичний (знакозмінний) потік середовища з однієї грані клину на іншу грань і, як наслідок, періодичні поперечні коливання струменя. На другому етапі, використовуючи дані про розподіл тиску на поверхні клину в якості граничної умови, розв'язано акустичну задачу про випромінювання звуку затопленим струменем, що набігає на клин. Зокрема, показано, що повна акустична потужність клинового тону на вісім порядків менше потужності струменя, що набігає на клин. Отримано просторові розподіли звукового поля (діаграми спрямованості) при різних значеннях числа Рейнольдса. Порівняльний аналіз результатів підтвердив правильність зроблених припущень.
- Чисельно змодельовано процес обтікання кругового циліндра з плоским спліттером, приєднаним з тильного боку циліндра. Описано зміни полів завихреності і картин ліній струму протягом перехідного процесу формування і початку відриву вихорів за циліндром. Виявлено закономірності процесу усталених автоколивань потоку, викликаний періодичним зривом вихорів. Виявлено, що гідродинамічний канал зворотного зв'язку формується за рахунок різниці тисків на верхній і нижній поверхнях циліндра і спліттера і періодичної зміни її знаку, що і викликає періодичний процес утворення і зриву вихорів. Показано, що періодична зміна тиску на сторонах циліндра і спліттера є джерелом звукових коливань дипольного типу, який неодноразово експериментально спостерігався багатьма дослідниками.

- Розглянуто задачу обтікання сфери в широкому діапазоні значень числа Рейнольдса від ламінарного безвідривного режиму течії до турбулентних режимів. Побудований в роботі чисельний алгоритм дозволив адекватно описати течію в усіх відомих докритичних режимах. Було показано хорошу відповідність отриманих нами результатів з результатами інших авторів. Також був визначений діапазон чисел Рейнольдса, в якому в потоці виникають автоколивання і, отже, такий потік може породжувати звук. Були описані як одночастотні, так і багаточастотні коливальні режими. Також було встановлено, що в ламінарному режимі течії амплітуда коливань бічної сили, прикладеної до сфери, приблизно в п'ять разів перевершує амплітуду коливань сили опору. Цей факт дозволяє припустити, що, як і у випадку обтікання кругового циліндра, основна частина акустичної енергії, генерованої потоком при обтіканні сфери, випромінюватиметься у бічному напрямку. При турбулентних режимах течії вихори, що зриваються, по формі близькі до вихрових кілець і, отже, можна очікувати, що основна частина акустичної енергії, генерованої потоком при обтіканні сфери, випромінюватиметься у напрямку потоку. Отримано діаграми спрямованості звукового поля. Знайдено діапазон чисел Рейнольдса, у якому сфера, що обтікається, випромінює як диполь. Показано, що вісь діаграми спрямованості розташована не перпендикулярно напрямку потоку, як у випадку обтікання кругового циліндра, а під деяким кутом нахилу. Цей ефект має місце через те, що вихрові петлі, які зриваються з поверхні сфери, не будуть антисиметричні, як у випадку обтікання циліндра. Показано, що для окремих гармоніки діаграма спрямованості має складніший вигляд, ніж в задачі про обтікання циліндра. Акустична енергія випромінюється як у бічному напрямку, так і у напрямку потоку.
- Проведено пряме чисельне моделювання течії в'язкої нестисливої рідини в плоскому каналі за наявності розташованих один за одним двох стенозів. Отримано картини ліній течії і полів завихреності. Проаналізовано особливості руху середовища в таких каналах залежно від швидкості потоку. Встановлено, що при відносно малих числах Рейнольдса $Re \leq 2088$ течія рідини в області між стенозами стаціонарна і характеризується наявністю в міжстенозній області швидкісного струменя, що витікає з вхідного отвору першого стенозу і втікає в отвір другого стенозу. При цьому на поверхнях струменя з'являються стійкі зсувні шари, утворені примежовими шарами, що сходять з передньої кромки отвору першого стенозу. Зсувні шари розщеплюються передніми кромками другого стенозу, внаслідок чого в нішах (вище і нижче струменя) утворюються циркуляційні рухи середовища, які переносять частину кінетичної енергії струменя назад до кореня струменя. Таке перенесення енергії можна інтерпретувати як гідродинамічний канал зворотного зв'язку, що дозволяє викликати

автоколивання в даній системі. Показано вплив числа Рейнольдса на автоколивальні процеси в каналі. Показано, при яких умовах автоколивання профілю швидкості в отворі другого стенозу можуть служити джерелом звукових коливань в каналі.

- Проведено розрахунок характеристик звукового поля, що породжується течією в каналі з двома послідовно розташованими стенозами. На основі результатів розв'язання відповідної гідродинамічної задачі змодельовано джерело акустичних коливань, що виникають у такій системі. Таким джерелом коливань буде періодичне збурення рідкого об'єму, поміщеного в отвір другого стенозу, вихорами, генерованими в міжстенозній області. Отримано розв'язки акустичних задач для двох областей: для однорідного плоского каналу, що знаходиться вниз за течією від другого стенозу (задача 1), а також для області з геометричними неоднорідностями, що знаходиться вгору по потоку від другого стенозу (задача 2). Визначено впливи гідродинамічних та геометричних параметрів задач на характеристики дальнього акустичного поля.
- Розглянуто методи управління потоком і випромінюваною їм звуковою енергією в нерегулярному каналі, що містить два звуження. Показано, що одним з ефективних методів є раціональний вибір геометрії області між звуженнями і розташуванням отворів звужень. Зокрема встановлено, що для зниження випромінюваної потоком звукової енергії необхідно збільшувати об'єм області між звуженнями і зміщувати отвори звужень відносно осі симетрії каналу. І, навпаки, для збільшення випромінюваної потоком звукової енергії необхідно зменшувати об'єм області між звуженнями. Проведений якісний аналіз дає важливу інформацію для організації обчислювальних процедур, що забезпечують отримання кількісних оцінок характеристик звукового поля.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що

1. Розроблено та обґрунтовано алгоритм чисельного моделювання випромінювання звуку течією, що дозволяє проводити паралельні розрахунки на кластерних суперкомп'ютерах. Алгоритм належить до класу гібридних методів, де для опису гідродинаміки течії застосовується техніка DNS або LES.
2. Досліджено механізми перехідних процесів, що запускають автоколивання в потоці, які і породжують звук. Досліджено гідродинамічні канали зворотних зв'язків, що виникають в потоці і є необхідними для виникнення автоколивань. Виявлено закономірності виникнення автоколивань в потоках, які взаємодіють із твердими перешкодами.

3. Методом математичного моделювання побудовано акустичні поля, що виникають при натіканні потоку на тверде тіло. Виявлено характеристики та ряд нових закономірностей генерації акустичних полів для зовнішніх та внутрішніх гідродинамічних процесів. Зокрема, розраховані звукові хвилі, що виникають і розповсюджуються в хвилеводі за наявності стенозів.

Всі основні результати роботи представлено у **висновках** дисертації. Текст дисертації викладено грамотно, послідовно та логічно, що демонструє послідовність досліджень виконаних дисертантом. Автореферат відображає всі основні положення дисертації.

Ступінь обґрунтування наукових положень, висновків та рекомендацій

Достовірність результатів дисертації забезпечується використанням загальноприйнятих моделей рідини; коректною постановкою граничних задач; застосуванням надійних аналітичних методів для розв'язку задач; контрольованою точністю чисельних обчислень; узгодженістю отриманих в роботі чисельних результатів з експериментальними та розрахунковими результатами, опублікованими іншими авторами.

Вважаю, що результатам дисертаційної роботи буде знайдено ефективне практичне застосування в наукових та проектних установах: Інституті гідромеханіки НАН України, в Інституті проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАН України, в наукових та проектних установах із розробки гідроакустичних систем, а також в проектних та науково-дослідних установах енергетичного, машинобудівного спрямування.

Представлені в дисертації результати повністю відображені в 31 наукових працях. З них 28 опубліковано у фахових відчизняних та зарубіжних виданнях, 13 з яких входять в наукометричну базу даних SCOPUS. Результати дисертаційних досліджень представлено на 13 наукових конференціях, 6 з яких мають міжнародний статус. Всі теоретичні та практичні результати отримані здобувачем особисто.

Критичні зауваження відносно змісту і оформлення роботи:

1. В дисертаційній роботі відсутній розділ «Перелік умовних позначень», що ускладнює аналіз роботи.
2. У роботі присутній не зовсім коректний переклад термінів українською мовою. Так, для термінів “линия тока”, “функция тока” (російською мовою) в україномовній науковій літературі гідродинамічного профілю традиційним вважається застосування термінів “лінії течії”, “функція течії” а не “лінії струму” та “функція струму”, як це визначено в дисертації.

3. Не наведено умови стійкості чисельних методів які були застосовані для розв'язання задачі динаміки в'язкої рідини на основі рівнянь Нав'є-Стоксу.
4. Традиційно у роботах фізико–математичного спрямування характеристики, результати (закономірності) представляються у безрозмірному вигляді. Але, при розгляді акустичної частини задач автор застосовує розмірне представлення. Вважаю, що тим самим автор звужує загальне сприйняття читачами результатів (закономірностей), які виявлені у дослідженнях.
5. Не наведено перелік усіх програмних засобів та бібліотек, які застосовані при проведенні комп'ютерних досліджень.

Висновки відносно дисертаційної роботи

Наведені зауваження не зменшують цінність результатів роботи та ні в якому разі не змінюють позитивне ставлення до дисертаційної роботи. Тема роботи є актуальною, результати, що одержані в роботі є новими, відповідають поставленим цілям і задачам та мають безсумнівне наукове та велике практичне значення.

Вважаю, що дисертацію «Нестационарні задачі обтікання з урахуванням ефектів випромінювання звуку», слід кваліфікувати як закінчену наукову роботу, яка відповідає паспорту спеціальності 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми, та повністю задовольняє вимогам п.п. 9, 10 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013р., а її автор - Малюга Володимир Сергійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук,
професор, член-кореспондент НАН України,
завідувач відділу фізичного і математичного моделювання
Інституту телекомунікацій і глобального
інформаційного простору НАН України

 С.О.Довгий

Підпис С.О.Довгого засвідчую 

