

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Редчиця Дмитра Олександровича

“ Нестационарні зв’язані задачі динаміки рідини, газу та низькотемпературної плазми ”,

яку представлено на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми

Бурхливий розвиток комп’ютерної техніки і методів чисельного моделювання, який спостерігається протягом останніх десятиліть, обумовив формування і стрімкий розвиток окремого наукового розділу гідромеханіки, який отримав назву обчислювальна гідродинаміка. Інтенсивна розробка і впровадження сучасних інноваційних технологій чисельного моделювання, що пов’язані зі стрімким розвитком обчислювальної техніки, дає можливість розв’язувати не лише модельні задачі, а і практичні задачі, що мають безпосереднє практичне застосування і пов’язані зі складною геометрією і зв’язаними фізичними полями різної природи. Обчислювальна гідродинаміка відіграє все більш важливу роль в процесі проектування нової техніки, що обумовлено меншою вартістю чисельних експериментів у порівнянні з натурними. Зв’язані задачі, в яких залучені поля різної фізичної природи і різних математичних і фізичних масштабів, представляють собою найбільш складний рівень математичного моделювання аеродинамічних процесів. Крім процесів динаміки рідини, часто необхідно враховувати динаміку твердого тіла, властивості багатофазних середовищ, електродинамічні сили, хімічні властивості та інше. Однак саме результати розв’язання зв’язаних задач представляють найбільший інтерес з точки зору практичного застосування в промисловості. Слід зазначити, що технології DNS, активно розвиваючись, стають все складнішими і вимагають не тільки все більших обчислювальних ресурсів, але і значної інтелектуальної роботи для того, щоб розрахунки були стійкими і забезпечували надійні та адекватні результати з контрольованою точністю. Нерідко з метою фізичної достовірності отриманих результатів доводиться модифікувати відомі алгоритми розв’язання систем нелінійних

диференціальних рівнянь, що описують задачу, а також вдосконалювати моделі турбулентності.

Дану дисертаційну роботу присвячено дослідженню нестационарних ламінарних, перехідних і турбулентних потоків повітря при їх взаємодії з низькотемпературною плазмою діелектричного бар'єрного розряду. Мета дисертації полягає у побудові зв'язаної математичної моделі, що включає аеродинаміку, електродинаміку, динаміку плазми та хімічну кінетику, та визначенні параметрів, необхідних для чисельного моделювання такого явища. Наступним кроком було проведено модифікацію скінченно-об'ємних алгоритмів для розв'язання відповідної дискретної моделі, які дозволяють адекватно описувати нестационарні процеси в зв'язаних задачах аеродинаміки та динаміки плазми. На основі розроблених алгоритмів створено спеціалізований пакет для розв'язання зв'язаних задач аеродинаміки, динаміки твердого тіла, електродинаміки та динаміки частинок плазми. Після розробки необхідного апарату для розв'язання зв'язаних задач розглянуто ряд конкретних задач, що мають теоретичний і практичний інтерес. Зокрема проведено дослідження відривних течій поблизу симетричних та несиметричних профілів, багатоелементного профілю в різних конфігураціях, наземного транспортного засобу, а також вертикально-осьової вітроенергетичної установки з роторами Дар'є та Савоніуса. Описано механізми формування окремого мікророзряду. Досліджено стадії зародження, розвитку і гасіння катодоспрямованого стримера при роботі плазмового актуатора. Досліджено нестационарні процеси низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду при гармонічних коливаннях зовнішнього електричного поля. Встановлено вплив окремих типів заряджених частинок плазми на формування сили Лоренца в частково іонізованому повітрі. Описано вплив фізичних і геометричних характеристик плазмових актуаторів на динаміку потоків повітря. Доведено можливість зменшення сили опору тіла, що обтікається, шляхом керування структурою потоку за допомогою плазмових актуаторів.

З цих позицій, розв'язання сформульованих задач з урахуванням різних механізмів взаємодії аеродинамічної течії з твердими поверхнями і низькотемпературною плазмою відкриває не тільки нові можливості і перспективи розуміння фундаментальної проблеми керування потоком при обтіканні твердих тіл за допомогою плазмових актуаторів, а й представляє певний практичний інтерес.

Актуальність теми досліджень обумовлена тим фактом, що відривне обтікання тіл потоком зустрічається повсюди в природі і практично в усіх галузях техніки: в авіації, ракетній техніці, наземному і водному транспорті, двигуно- і турбінобудуванні, в вітроенергетиці. Відрив потоку є явищем небажаним, що призводить до втрати енергії та виникнення нестійкості потоку, і є однією з найважливіших проблем аеродинаміки. Тому розробка і розвиток ефективних і малозатратних методів керування структурою течії при обтіканні твердих тіл є однією з найактуальніших проблем аеродинаміки. Такий підхід може дати можливість уникнути відриву або уповільнити початок відриву, ліквідувати або зменшити розміри відривної зони. Також методи керування відривом потоку не повинні бути енергозатратними та вимагати суттєвих змін у конструкції обтічного тіла. Отже, розробка ефективних і малозатратних методів протидії відриву потоку є одним з пріоритетних напрямків сучасної аеродинаміки. Крім того, розв'язання цієї проблеми надасть безсумнівну стимулюючу дію при формуванні більш глибокого розуміння особливостей протікання фізичних процесів в складних гідродинамічних системах різного призначення.

Метою роботи є побудова математичної моделі, яка описує нестационарні ламінарні, перехідні та турбулентні потоки повітря та низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду і приводить до чисельного розв'язання зв'язаних задач. **Об'єктом дослідження** є динаміка нестационарних ламінарних, перехідних і турбулентних потоків повітря та низькотемпературної плазми при обтіканні тіл довільної геометрії. **Предметом дослідження** є властивості нестационарних процесів в

ламінарних, перехідних і турбулентних потоках повітря та в низькотемпературній плазмі діелектричного бар'єрного розряду та описання цих процесів відповідними математичними моделями та чисельними методами.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використовувались загальноприйняті моделі суцільного середовища, надійні і коректні методи математичного моделювання, чисельні і аналітичні методи розв'язання задач математичної фізики.

Наукова новизна отриманих результатів визначається:

- Побудовою нової математичної моделі низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду в повітрі, яка адекватно описує нестационарні процеси, що виникають при частковій іонізації повітря плазмовими актуаторами.

- Розробкою неявного чисельного алгоритму розв'язання рівнянь Навьє-Стокса на основі адаптації і модифікації відомих схем дискретизації конвективних членів рівняння.

- Чисельними розрахунками конкретних практичних задач. Зокрема, дослідженням впливу ступеня замкнутості J-профілю на структуру потоку і сили, що діють на профіль; дослідженням аеродинаміки вертикально-осьових вітроенергетичних установок з роторами Дар'є і Савоніуса; дослідженням впливу властивостей плазми та структури заряджених частинок на часові залежності сили Лоренца, яка і змінює структуру профілю примежового шару і дає можливість контролювати відрив потоку.

- Практичною ілюстрацією можливості генерації рушійної сили, зменшення опору і придушення вихрового сліду при обтіканні тіла потоком за допомогою плазмових актуаторів.

Практичне значення отриманих результатів:

- В результаті виконання дисертаційної роботи було розроблено спеціалізований пакет прикладних комп'ютерних програм, що включає елементи аеродинаміки, електродинаміки та кінетики хімічних реакцій, який

може використовуватись для подальших досліджень і математичного моделювання взаємодії плазми і аеродинамічних течій при нестационарному ламінарно-турбулентному обтіканні тіл складної геометрії.

- Чисельно досліджено структуру відривних течій для різноманітних аеродинамічних течій. Показано можливість придушення вихрового сліду за допомогою плазмових актуаторів. Розроблено рекомендації щодо підвищення енергетичної ефективності вітроенергетичних установок з роторами Дар'є і Савоніуса.

- Розроблені математична модель та технологія чисельного моделювання дає можливість розраховувати аеродинамічні характеристики при обтіканні реальних тіл довільної форми з урахуванням взаємодії потоку з низькотемпературною плазмою.

Основні наукові результати:

1. Побудовано нову математичну модель взаємодії суцільного в'язкого середовища з плазмою діелектричного бар'єрного розряду. В рамках цієї моделі рівняння Нав'є-Стокса замикаються диференціальною моделлю турбулентності, а також моделлю ламінарно-турбулентного переходу і рівнянь, що описують низькотемпературну плазму діелектричного бар'єрного розряду, включаючи нестационарні електродинамічні процеси, кінетичні явища та плазмохімічні реакції. Таким чином, побудована математична модель приводить до розв'язання зв'язаних задач динаміки рідини, газу та низькотемпературної плазми. Модель включає наступні рівняння:

- нестационарні осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса для в'язкого нестисливого потоку з використанням моделі Буссінеска для представлення тензора турбулентних напружень;

- для моделювання турбулентності в роботі використано два підходи: перший – диференціальна модель турбулентності Spalart-Allmaras та її модифікації SARC, SALSA і другий – гібридний підхід, що полягає в моделюванні від'єднаних вихорів із затримкою (DDES);

- моделювання ламінарно-турбулентного переходу здійснювалось за допомогою диференціальної $\gamma-Re_\theta$ моделі, яку було адаптовано для використання разом з моделями турбулентності SA, SARC і SALSA;

- кінетична схема плазми діелектричного бар'єрного розряду. Діелектричний бар'єрний розряд в повітрі генерує низькотемпературну нерівноважну плазму. У роботі розглядаються електронно-збуджені та метастабільні стани молекул азоту і кисню, нейтральні атоми кисню, електрони, а також позитивні і негативні іони, у цілому 14 частинок і 97 плазмохімічних реакцій, включаючи поверхневі процеси;

- рівняння електричного потенціалу. Електродинаміка плазми описувалась відповідним рівнянням Пуассона для електричного поля;

- рівняння динаміки частинок плазми (рівняння Больцмана, рівняння динаміки частинок плазми в дифузійно-дрейфовому наближенні). В роботі розглядаються 14 видів частинок. Рівняння динаміки складаються для кожного сорту частинок;

- рівняння балансу поверхневої густини позитивного та негативного заряду на діелектрику;

- моделювання фотоіонізації. Побудована математична модель враховує явище фотоіонізації молекул кисню, яке відбувається під впливом ультрафіолетового випромінювання збуджених молекул азоту.

В розробленій моделі враховується 14 видів заряджених частинок плазми, що забезпечує високу точність математичного моделювання основних плазмохімічних реакцій, включаючи як поверхневі так і просторові процеси.

2. Розроблено алгоритми дискретизації для чисельного розв'язання рівнянь побудованої математичної моделі. На основі розроблених схем створено спеціалізований програмний пакет для розв'язання зв'язаних задач аеродинаміки, динаміки твердого тіла, електродинаміки та динаміки частинок плазми.

3. Розв'язано ряд конкретних практичних задач. Описано фізичні особливості обтікання плоскої пластини, кругового циліндра та аеродинамічного профілю.

4. Описано вплив ступеня замкнутості J-профілю на коефіцієнти сил, що діють на нього, а також на структуру обтікання в цілому. Виявлено умови, при яких розміри відривної зони на внутрішній поверхні передкрилка багатоелементного профілю 30P30N зменшуються. Також показано можливість застосування розробленого програмного пакету до задач аеродинаміки наземного транспорту.

5. Проведено серію чисельних розрахунків нестационарного обтікання вертикально-осьової вітроенергетичної установки з роторами Дар'є та Савоніуса турбулентним потоком вітру. Результати проведених чисельних експериментів дають можливість оптимізації таких пристроїв.

6. Проведено серію обчислювальних експериментів з моделювання нестационарних процесів низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду при роботі плазмового актуатора. Показано, що таким шляхом можна керувати структурою потоку повітря при обтіканні тіл. Зокрема використання плазмових актуаторів дає можливість зменшувати коефіцієнт опору обтічного тіла за рахунок придушення вихрового сліду за тілом.

До дисертаційної роботи є наступні зауваження:

1. Нажаль в дисертаційній роботі чисельні розрахунки проводяться лише для двовимірних задач. На мою думку в розглянутих задачах вплив тривимірних або кінцевих ефектів може бути суттєвим. Особливо це стосується розрахунків обтікання потоком лопатей вітрогенераторів, профілю крила літака та автомобілів.
2. Чисельні розрахунки, представлені в роботі, проводились на персональному комп'ютері без застосування технологій розпаралелювання обчислень. На даному етапі розвитку комп'ютерної техніки такий підхід дозволяє розв'язувати лише двовимірні задачі.

3. На стор. 229 сказано: «Розроблений алгоритм має можливість розпаралелювання на багатоядерних системах». Хотілося б отримати більш детальну інформацію. Яку технологію розпаралелювання обчислень допускає розроблений алгоритм? Чи допускає він розпаралелювання за принципом геометричного паралелізму?
4. На стор. 94 використовується вислів «напруги Рейнольдса». Слід використовувати «напруження Рейнольдса».
5. В роботі використовувалися два підходи для моделювання турбулентності. Перший – підхід RANS, тобто осереднення за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, з використанням диференціальних моделей турбулентності. Але підхід RANS до моделювання турбулентності не дає можливості адекватного моделювання масивного відриву потоку. Тому застосовувався другий підхід – DDES, тобто моделювання від'єднаних вихорів із затримкою. На мій погляд в роботі не дано досить обґрунтованого пояснення чому не можна просто використовувати підхід LES.

Висловлені зауваження істотно не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи і не зменшують цінності отриманих в ній результатів. Автор розв'язав складну і актуальну наукову проблему, що має теоретичне і прикладне значення, отримав нові фундаментальні наукові результати. Ці результати суттєво збагачують наші знання і уявлення в області керування відривом потоку при обтіканні тіл за допомогою плазмових актуаторів. Основні результати дисертаційної роботи повністю відображені в 69 роботах автора. Зокрема, опубліковано 37 наукових статей у фахових вітчизняних та зарубіжних виданнях, 32 роботи – у збірниках наукових праць і тезах міжнародних конференцій. З цих робіт 31 стаття опублікована у виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз, у тому числі 4 – до Scopus та Web of Science. Результати досліджень доповідались дисертантом на багатьох наукових конференціях.

Вважаю, що дисертаційна робота Редчиця Дмитра Олександровича «Нестационарні зв'язані задачі динаміки рідини, газу та низькотемпературної плазми» є закінченою науковою роботою, яка в повній мірі задовольняє усім вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 року. Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми, має незаперечне наукове і прикладне значення, оскільки містить нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності роблять суттєвий внесок у розв'язання важливої науково-прикладної проблеми управління відривом потоку при обтіканні твердих тіл складної геометрії. Вважаю, що автор дисертації, Редчиць Дмитро Олександрович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,
старший науковий співробітник
відділу гідродинамічної акустики
Інституту гідромеханіки
Національної академії наук України

В.С. Малюга

30 квітня 2020 р.
Київ, Україна

Підпис Малюги В.С. підтверджую
Учений секретар
Інституту гідромеханіки НАН України



Н.С. Городецька