

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Редчиця Дмитра Олександровича «Нестаціонарні зв'язані задачі динаміки рідини, газу та низькотемпературної плазми», поданої на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми

1. Актуальність обраної теми

Дисертаційну роботу присвячено формулюванню математичної моделі та визначенню параметрів нестационарних ламінарних, перехідних і турбулентних потоків повітря в наближенні в'язкої нестисливої рідини та низькотемпературної плазми стосовно діелектричного бар'єрного розряду при розв'язку зв'язаних задач. Зв'язані задачі являють собою найбільш складний рівень математичного моделювання обчислювальної аеродинаміки. Даний клас задач вимагає спільного математичного опису динаміки рідини та газу, фізико-хімічних реакцій, електромагнітного впливу на суцільне середовище, динаміки іонів і електронів, врахування взаємодії між частинками плазми та несучого середовища, а також з обтічною поверхнею.

В роботі проведено модифікацію відомих скінченно-об'ємних алгоритмів для побудови чисельно-аналітичної моделі, яка дозволила якісно та кількісно відтворювати нестационарні процеси в зв'язаних задачах аеродинаміки та динаміки плазми. Виконано верифікацію цих алгоритмів та методик в рамках розробленого спеціалізованого пакету обчислювальної аеродинаміки та електродинаміки, обґрунтування вибору моделі турбулентності та ламінарно-турбулентного переходу. Вивчено структуру та фізичні особливості широкого класу відривних течій, досліджено нестационарні процеси плазми діелектричного бар'єрного розряду, а також її вплив на структуру повітряних течій з метою керування відривом потоку.

Коло питань розглянутих в дисертації відноситься до розвитку сучасної обчислювальної механіки рідини, газу та плазми, тому не виникає сумнівів щодо їх актуальності. Актуальним є і предмет дослідження – властивості нестационарних процесів в ламінарних, перехідних і турбулентних потоках повітря та в низькотемпературній плазмі діелектричного бар'єрного розряду та відтворюваність цих процесів відповідними математичними моделями та чисельними методами. Актуальність, наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень сформульовано у дисертації й авторефераті достатньо чітко.

2. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, результатів і висновків

У роботі проведено аналіз відомих теоретичних та експериментальних досліджень течій повітря при наявності низькотемпературної плазми. Розглянуто моделі та методи чисельного моделювання діелектричного бар'єрного розряду при

роботі плазмових актуаторів. Проведено аналіз методів чисельного розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса нестисливої рідини, підходів до моделювання турбулентності, а також моделей і методів моделювання ламінарно-турбулентного переходу. Сформульовано основні проблеми, які виникають при моделюванні процесів обтікання роторів вітроенергетичних установок, динаміки багатоелементного профілю, а також задач плазмової аеродинаміки. За результатами проведеного аналізу визначено мету роботи і завдання дослідження.

На базі аналізу існуючих методів дослідження нестисливих потоків при наявності плазмових актуаторів автором сформульовано постановки задач, розроблено чисельні методики та програмно-методичне забезпечення. Здобувач достатньо грамотно і послідовно використав сучасні алгоритми чисельного розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса стосовно до турбулентних течій. Одним з виграшних моментів роботи є вдалий підхід до пошуку та вибору методик дослідження нестационарних відривних течій. Завдяки цьому у дисертації наведено докладний аналіз результатів широкого кола обчислювальних експериментів.

Достовірність отриманих у дисертаційній роботі наукових результатів забезпечується використанням фундаментальних моделей механіки рідини, газу та низькотемпературної плазми. Так для опису динаміки в'язкого середовища застосовувалися повні рівняння Нав'є-Стокса, які замкнені диференціальною моделлю турбулентності. Проведено детальне співставлення отриманих здобувачем результатів з результатами багатьох авторів і тим самим наведена досить переконлива аргументація в підтвердженні працездатності реалізованих здобувачем алгоритмів чисельного моделювання зв'язаних задач динаміки рідини, газу та низькотемпературної плазми.

Обґрунтованість вибору та коректність використання моделей турбулентності та ламінарно-турбулентного переходу підтверджується широким тестуванням на задачах нестационарного обтікання циліндру й аеродинамічних профілів, задовільним співпаданням отриманих результатів з відомими експериментальними та розрахунковими даними.

Текст дисертації написаний досить грамотно і акуратно, цілком логічно. Автореферат написаний докладно, добре проілюстрований і повністю відображає зміст дисертації. У даній роботі результати кандидатської дисертації не використано. Висновки, які наведені в дисертації й авторефераті, відображають головні результати досліджень. Всі основні положення і висновки дисертаційної роботи викладені в авторефераті. На літературні джерела і результати інших авторів зроблені коректні посилання. Бібліографічний опис цитувань в дисертаційній роботі складено у відповідному вигляді.

Дослідження за темою дисертації були виконані згідно науково-дослідним роботам Інституту транспортних систем і технологій НАН України, які виконувались в 2007-2020 роках, а також у рамках грантів Національної академії наук України для молодих учених і гранту Президента України для обдарованої молоді в 2007-2014 роках.

3. Наукова новизна результатів дослідження

У дисертаційній роботі на підставі проведених теоретичних та розрахункових досліджень наведено розв'язок актуальної наукової проблеми, пов'язаної зі встановленням закономірностей розвитку нестационарних ламінарних, перехідних і турбулентних потоків повітря та динаміки діелектричного бар'єрного розряду у зв'язаних задачах рідини, газу та низькотемпературної плазми. Розроблено спеціалізований пакет програм обчислювальної аеродинаміки та електродинаміки. З виростанням цього пакету вивчено особливості широкого класу відривних течій, досліджено нестационарні процеси низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду при роботі плазмового актуатора, а також її вплив на структуру повітряних течій з метою керування відривом потоку.

Методичні та фізичні аспекти основних наукових результатів дисертації зводяться до наступних положень.

Методичні аспекти:

– сформульовано фізично обґрунтовану математичну модель низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду в повітрі для опису її просторово-часової структури, котра якісно і кількісно відтворює нестационарні аеродинамічні, електродинамічні, плазмохімічні процеси та кінетичні явища при частковій іонізації повітря плазмовими актуаторами;

– повну $\gamma-Re_\theta$ модель ламінарно-турбулентного переходу адаптовано для використання спільно з однопараметричними диференційними моделями турбулентності Spalart-Allmaras, SARC і SALSA, а також сформульовано рекомендації щодо можливості їх застосування для визначення параметрів обтікання тіл довільної геометрії;

– проведено модифікацію схеми Rogers-Kwak для конвективних членів на основі якої побудовано неявний чисельний алгоритм розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса;

Фізичні аспекти:

– з'ясовані особливості турбулентного обтікання елементів енергетичних і транспортних систем у широкому діапазоні чисел Рейнольдса та кутів атаки, а саме обтікання багатоелементних профілів, транспортного засобу поблизу екрану, а також з'ясовано вплив ступеня замкнутості J-профілю на його аеродинамічні коефіцієнти;

– на основі чисельних розрахунків нестационарного обтікання вертикально-осьових вітроенергетичних установок виявлені принципові закономірності впливу розвитку нестационарних течій при обтіканні вертикально-осьової вітроенергетичної установки, що складається з роторів Дар'є та Савоніуса;

– за результатами чисельного моделювання нестационарних процесів низькотемпературної нерівноважної плазми діелектричного бар'єрного розряду при роботі плазмового актуатора встановлено вплив структури частинок плазми та густини заряджених частинок на зміну сили Лоренца в часі, також показано, що основний внесок у формування сили Лоренца на позитивному півперіоді коливання прикладеної напруги надають позитивні іони кисню O_4^+ , а на негативному – негативно

заряджені іони кисню, зокрема O^+ ; показано можливість створення за допомогою плазмових актуаторів рушійної сили циліндра та зменшення коефіцієнта опору циліндра внаслідок придушення вихрової доріжки Кармана.

4. Значення отриманих результатів для науки і практики

Розроблений спеціалізований методичний і програмний пакет обчислювальної аеродинаміки, електродинаміки та хімічної кінетики на основі рівнянь Нав'є-Стокса, Гельмгольца, електричного потенціалу, сучасних диференціальних моделей турбулентності і ламінарно-турбулентного переходу дозволяє ефективно моделювати стаціонарне і нестаціонарне ламінарне чи турбулентне обтікання тіл складної геометрії за наявності плазмових джерел. Отримано нові дані щодо зміни структури відривних течій, характеристик аеродинамічних профілів, нові результати з аеродинаміки вертикально-осьових вітроенергетичних установок з роторами Дар'є і Савоніуса, вироблено рекомендації щодо підвищення енергетичної ефективності ВЕУ. Розроблені підходи та методики дозволяють відтворювати реальні аеродинамічні процеси обтікання тіл довільної форми і розраховувати їх аеродинамічні характеристики з урахуванням впливу низькотемпературної плазми.

5. Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях

Основні результати дисертаційної роботи відображено у 69 роботах: 37 статтях, у тому числі в фахових вітчизняних та зарубіжних виданнях 25 (із них 9 без співавторів), 32 роботи в збірниках наукових праць і тезах міжнародних конференцій. З опублікованих по дисертації робіт налічується 31 стаття у виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз, у тому числі 4 – до Scopus та Web of Science.

6. Зауваження щодо змісту й оформлення роботи

1. В дисертаційній роботі вихідні рівняння динаміки в'язкої рідини записані в наближенні незмінної густини, але діелектричний бар'єрний розряд при роботі плазмового актуатора може змінювати густину повітря внаслідок його нагрівання. У роботі цьому питанню не приділено належної уваги.

2. Всі дослідження проведені для двовимірних течій. Урахування просторових ефектів в окремих випадках може привести до суттєвої зміни особливості течій.

3. Не достатньо виділена специфіка розробленого програмно-методичного забезпечення. Зокрема не зазначено в якій мірі існуючі пакети, у тому числі й комерційні, не придатні при розв'язку зв'язаних задач для дослідження структури та визначення основних параметрів динаміки ламінарних, перехідних і турбулентних потоків повітря та низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду.

4. В роботі не наведені дані, які характеризують енергетичний внесок від плазмових актуаторів в потік повітря.

5. У тексті дисертації допущено низку похибок і опісок, зокрема:

- в назві роботи, та в окремих її розділах використано термін «динаміка рідини, газу та низькотемпературної плазми», тоді як фактично розглянуто тільки рідина та низькотемпературна плазма: густина не змінна.

- використання різних термінів «замкнутого і розімкнутому контурів» та «замкненого і розімкненого контуру»;

- позначення одним символом різних змінних;

Вважаю за необхідне відмітити, що зазначені зауваження суттєво не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи і не зменшують цінності отриманих в ній результатів.

7. Висновки щодо дисертаційної роботи

Представлена дисертація «Нестаціонарні зв'язані задачі динаміки рідини, газу та низькотемпературної плазми» є завершеною роботою, містить наукові положення та науково обґрунтовані результати, які у сукупності роблять суттєвий внесок у вирішення важливої науково-прикладної проблеми динаміки ламінарних, перехідних і турбулентних потоків повітря та низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду при розв'язку зв'язаних задач. Зміст дисертаційної роботи і автореферат відповідають паспорту спеціальності 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми, а висновки відображають головні результати досліджень. Автореферат відповідає змісту дисертації.

Враховуючи все вище сказане, вважаю, що представлена дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9, 10, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 656 від 19.08.2015, № 1159 від 30.12.2015, № 567 від 27.07.2016 та № 943 від 20.11.2019), а її автор Редчиць Дмитро Олександрович заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук.

Заступник директора з наукової роботи
Інституту технічної механіки НАН і ДКА України,
завідуючий відділом аэрогазодинаміки
та динаміки технічних систем
член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор



В. І. Тимошенко

28 квітня 2020 року