### НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ ІНСТИТУТ ГІДРОМЕХАНІКИ

РЕДЧИЦЬ ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

Atterceed

УДК 532.516; 533.9

### НЕСТАЦІОНАРНІ ЗВ'ЯЗАНІ ЗАДАЧІ ДИНАМІКИ РІДИНИ, ГАЗУ ТА НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПЛАЗМИ

01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис. Робота виконана в Інституті транспортних систем і технологій НАН України

Науковий консультант:	доктор фізико-математичних наук, професор, академік НАН України	
	Довгии Станіслав Олексійович, завідувач відділу фізичного і математичного моделювання Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України	
Офіційні опоненти:	доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України	
	Тимошенко Валерій Іванович,	
	заступник директора з наукової роботи	
	Інституту технічної механіки НАН і ДКА України	
	доктор фізико-математичних наук,	
	старший науковий співробітник	
	Малюга Володимир Сергійович,	
	старший науковий співробітник	
	Інституту гідромеханіки НАН України	
	доктор фізико-математичних наук	
	Терлецька Катерина Валеріївна,	
	старший науковий співробітник	
	Інституту проблем математичних машин	
	і систем НАН України	
	*	

Захист відбудеться 14 травня 2020 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.196.01 в Інституті гідромеханіки НАН України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Марії Капніст, 8/4.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці та на офіційному сайті Інституту гідромеханіки НАН України http://hydromech.org.ua

Автореферат розісланий 20 березня 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.196.01 доктор технічних наук, професор

Rmu .С. І. Криль

#### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

#### Обґрунтування вибору теми дослідження.

гідродинаміка Обчислювальна використовується В багатьох галузях промисловості як невід'ємна частина процесу проектування нової техніки, що обумовлено меншою вартістю чисельних експериментів у порівнянні з натурними. залачі являють собою найбільш складний рівень Зв'язані математичного моделювання обчислювальної аеродинаміки. Крім механіки рідини та газу тут багатофазних динаміку необхілно враховувати твердого тіла, середовиш. електродинаміку, хімічну кінетику та інше. Разом з тим, саме результати розв'язку зв'язаних задач є найбільш затребуваними у промисловості.

Слід зазначити, що на сьогоднішній день відсутній єдиний науковообґрунтований методологічний підхід до створення математичних моделей зв'язаних задач динаміки рідини, газу та плазми. Питання створення адекватних і ефективних математичних моделей зв'язаних задач рідини, газу та плазми до теперішнього часу є відкритим.

Спільне дослідження динаміки та аеродинаміки рухомих тіл являє собою класичний напрям досліджень, які знаходять застосування в вітроенергетиці, авіації, наземному транспорті.

Вимоги щодо фізичної достовірності отриманих чисельних результатів в широкому діапазоні параметрів течій призводять до необхідності модифікації відомих алгоритмів розв'язку систем нелінійних диференціальних рівнянь, а також до вдосконалення моделей турбулентності, включаючи ламінарно-турбулентний перехід.

Керування структурою потоку відноситься до зв'язаних задач і є актуальною проблемою при проектуванні нової авіаційної та ракетно-космічної техніки, двигуно- і турбінобудування, вітроенергетики. Існуючі методи керування відривом потоку, як правило, є енергозатратними та вимагають змін у конструкції обтічного тіла (охолодження поверхні, перфорування поверхні, встановлення інтерцепторів або додаткових рухливих елементів). У зв'язку з цим, розробка ефективних і малозатратних методів запобігання відриву потоку належить до найсучасніших напрямків фундаментальної та прикладної аеродинаміки.

До перспективних методів керування структурою течії належить створення частково іонізованого потоку із застосуванням плазмових актуаторів (ПА). Фізичні основи керування потоком повітря за допомогою плазми є маловивченими. Види плазми, що генеруються, різноманітні. Дослідження в цій наукової галузі ведуться у США, Великобританії, Франції, Японії, Китаї, РФ, Україні. Низький рівень споживання електроенергії, відсутність рухливих елементів є безумовною перевагою плазмових актуаторів. Застосування слабо іонізованої плазми для керування відривом потоку є новим розділом в аеродинаміці і відноситься до перспективних технологій.

Інтерес до плазмових актуаторів обумовлений, з одного боку, простотою використання пристроїв для створення діелектричного бар'єрного розряду (ДБР), з іншого боку – можливістю генерування високої напруги на борту літака або іншого транспортного засобу компактними і високоефективними генераторами.

Незважаючи на численні експериментальні дослідження впливу плазми на навколишнє повітря, відсутня загальна теорія взаємодії, яка ґрунтувалася б на

плазмових та аеродинамічних процесах. Даний факт пояснюється відсутністю достовірних результатів багатьох хімічних реакцій, що виникають в результаті впливу ДБР на середовище, а також швидкості їх протікання. Основні методи вимірювання плазми забезпечують непряму інформацію про ДБР. Експериментальні підходи не дозволяють отримувати детальну інформацію про розподіли електричного поля та густини частинок плазми.

У зв'язку зі складністю фізичних процесів, основні проблеми в теоретичному аналізі та чисельному моделюванні ДБР при роботі ПА та його впливі на навколишнє середовище є відсутність адекватної фізичної та математичної моделі розвитку ДБР у повітрі. Цей факт не дозволяє правильно оцінити імпульс, індукований ДБР, що входить у рівняння Нав'є-Стокса як джерельний член для моделювання аеродинамічного впливу ПА на навколишнє повітря.

Проблема розуміння та моделювання ДБР при роботі ПА пов'язана в першу чергу з неможливістю повного опису фізики розряду у зв'язку зі складністю і різноманіттям фізико-хімічних процесів. Спрощені моделі ДБР не дозволяють правильно оцінити керуючий імпульс від електромагнітного поля в потоці повітря. Ці моделі опираються на емпіричні константи динаміки частково іонізованого потоку і придатні тільки для обмеженого класу явищ.

Повна чисельна реконструкція всього поля нестаціонарної течії спільно з електродинамічними, електрохімічними процесами дозволяє отримати унікальну інформацію про досліджувані процеси. Але максимально точне врахування всіх факторів, включаючи другорядні, призводить до такої постановки задачі, що потребує розв'язку декількох сотень диференціальних та інтегральних рівнянь. Незважаючи на істотний прогрес у чисельному моделюванні, математичні моделі такого рівня фактично непридатні для реалізації в рамках комп'ютерних технологій і є основою суто теоретичного аналізу.

Розробка працездатної моделі для опису процесів, досліджуваних у широкому діапазоні визначальних параметрів, є актуальною і поки що не вирішеною проблемою в даній галузі знань. Математична модель, що розробляється, з одного боку, повинна враховувати основні фізико-хімічні процеси, що відбуваються, а з іншого боку, бути достатньо компактною для реалізації на сучасній комп'ютерній техніці.

Аналіз наукової проблеми показав, що для коректного моделювання ДБР необхідно враховувати наступні ключові аспекти: повний цикл коливання прикладеної до електродів напруги; врахування стримерної та таунсендовської фаз; фотоіонізацію повітря ультрафіолетовим випромінюванням в області розряду; хімічну кінетику розряду; осадження іонів та електронів на діелектричну поверхню, а також емісію електронів з відкритого електрода; залежність коефіцієнтів хімічних реакцій (іонізації, прилипання та ін.), дифузії та рухливості від локальних значень напруженості електричного поля.

Окрему проблему становить створення ефективного, надійного та ретельно верифікованого програмного забезпечення для розв'язку зв'язаних задач динаміки рідини, газу та низькотемпературної плазми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дисертація виконувалася в рамках плану науково-дослідних робіт Інституту транспортних систем і технологій НАН України: № 1.3.6.13 «Розробка теорії і систем

левітуючого транспорту та новітніх автономних інтегрованих систем енергопостачання з використанням сонячних і вітроенергоустановок і енергонакопичувачів» (№ ДР 0105U007964, 2006-2010 pp.); № 1.3.6.14 «Розвиток методів досліджень механіки транспортних засобів і енергетичних систем» (№ ДР 0107U001166, 2007–2011 рр.); № 1.3.6.15 «Розробка математичних моделей і дослідження наземних високошвидкісних магнітолевітуючих транспортних засобів і перспективних систем енергозабезпечення» 2011-2015 pp.); № 1.3.6.16 «Розвиток методів 0110U006964, (№ ДР механіки. аеродинаміки та дослідження систем керування транспортними й енергетичними об'єктами» (№ ДР 0112U000097, 2012–2016 pp.); № 1.3.6.17 «Розробка нових і вдосконалювання існуючих методів дослідження магнітолевітуючого транспорту та систем генерування і накопичення енергії» (№ ДР 0116U001281, 2016–2020 рр.); № 1.3.6.18 «Розробка нових і розвиток відомих методів досліджень механіки транспортних і енергетичних систем» (№ ДР 0116U008318, 2017–2021 рр.); а також у рамках грантів Національної академії наук України для молодих учених і гранту Президента України для обдарованої молоді: «Дослідження процесів динаміки та аеродинаміки роторів вертикально-осьових вітроенергетичних установок» (№ ДР моделювання 0107U005999, 2007-2008 pp.); «Чисельне обтікання роторів вітроенергетичних установок» (№ ДР 0109U005808, 2009–2010 рр.); «Моделювання діелектричного бар'єрного розряду при роботі плазмового актуатора в суцільному середовищі» (№ ДР 0111U008197, 2011–2012 рр.); «Керування відривом потоку повітря актуаторів» (№ ДР 0113U005457, 3a допомогою плазмових 2013-2014 pp.): «Дослідження аеродинаміки перспективних для України вітроенергетичних установок із плазмовими актуаторами» (згідно з розпорядженням Президента України № 349 від 27.11.2013 г., 2014 р.).

### Мета і завдання дослідження.

*Мета роботи* – побудова математичної моделі для опису параметрів нестаціонарних ламінарних, перехідних і турбулентних потоків повітря в наближенні в'язкої нестисливої рідини та низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду при розв'язку зв'язаних задач.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

– Побудувати зв'язану математичну модель аеродинаміки, електродинаміки, динаміки плазми та хімічної кінетики для дослідження взаємодії потоків повітря з низькотемпературною плазмою діелектричного бар'єрного розряду.

– Провести модифікацію відомих скінченно-об'ємних алгоритмів для побудови чисельно-аналітичної моделі, яка б дозволила якісно та кількісно відтворювати нестаціонарні процеси в зв'язаних задачах аеродинаміки та динаміки плазми.

– Розробити підхід для чисельного моделювання ламінарно-турбулентного переходу на основі повної  $\gamma$ - $Re_{\theta}$  моделі та однопараметричних диференціальних рівнянь переносу турбулентних характеристик.

– Створити спеціалізований пакет для розв'язку зв'язаних задач аеродинаміки, динаміки твердого тіла, електродинаміки та динаміки частинок плазми.

– Провести параметричні дослідження структури відривних течій поблизу симетричних та несиметричних профілів замкнутого і розімкнутому контурів, багатоелементного профілю в крейсерській та злітно-посадковій конфігурації, наземного транспортного засобу, а також вертикально-осьової вітроенергетичної

установки з роторами Дар'є та Савоніуса.

– Розглянути механізми формування окремого мікророзряду та детально вивчити стадії зародження, розвитку і гасіння катодоспрямованого стримера при роботі плазмового актуатора в повітрі при атмосферному тиску.

– Провести дослідження нестаціонарних процесів низькотемпературної нерівноважної плазми діелектричного бар'єрного розряду при повному циклі гармонічних коливань зовнішнього електричного поля.

– Встановити вплив окремих типів заряджених частинок плазми на нестаціонарне формування сили Лоренца в частково іонізованому повітрі.

– Провести параметричні дослідження фізичних і геометричних характеристик плазмових актуаторів та їх вплив на генерацію потоків повітря.

– Показати можливість виникнення рушійної сили та зменшення сили лобового опору циліндра за рахунок керування структурою потоку за допомогою плазмових актуаторів.

Об'єкт дослідження – динаміка нестаціонарних ламінарних, перехідних і турбулентних потоків повітря та низькотемпературної плазми при обтіканні тіл довільної геометрії.

Предмет дослідження – властивості нестаціонарних 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.

**Методи дослідження.** В роботі для дослідження нестаціонарних ламінарних, перехідних і турбулентних потоків повітря та низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду в зв'язаних задачах використовується математичне моделювання та чисельні методи розв'язку задач математичної фізики.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

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

– Вперше повну  $\gamma$ - $Re_{\theta}$  модель ламінарно-турбулентного переходу адаптовано для використання спільно з моделями турбулентності Spalart-Allmaras, SARC i SALSA.

– Розроблено модифікацію схеми Rogers-Kwak першого і третього порядку точності для конвективних членів на основі якої побудовано неявний чисельний алгоритм розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса.

– Вперше виявлено вплив ступеня замкнутості Ј-профілю на його коефіцієнти сили лобового опору і підйомної сили, а також на структуру обтікання профілю в цілому.

– Встановлено, що наявність ротора Савоніуса в центральній частині вертикально-осьової вітроенергетичної установки призводить до зниження крутного моменту, що генерується ротором Дар'є.

– Вперше встановлено вплив структури частинок плазми та густини заряджених частинок на зміну сили Лоренца в часі. Показано, що основний внесок у формування сили Лоренца на позитивному напівперіоді коливання прикладеної напруги надають іони кисню  $O_4^+$ . На негативному напівперіоді основний внесок здійснюється за рахунок негативно заряджених іонів кисню, зокрема  $O^-$ .

– Вперше на основі чисельного моделювання показано можливість за допомогою плазмових актуаторів виникнення рушійної сили циліндра та зменшення коефіцієнта опору циліндра внаслідок придушення вихрової доріжки Кармана.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

– Розроблено спеціалізований пакет обчислювальної аеродинаміки, електродинаміки та хімічної кінетики на основі рівнянь Нав'є-Стокса, Гельмгольца, електричного потенціалу, сучасних диференціальних моделей турбулентності і ламінарно-турбулентного переходу, котрий 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 (ВО) вітроенергетичних установок (ВЕУ) 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.

отриманих результатів забезпечується Достовірність використанням фундаментальних моделей механіки рідини, газу та низькотемпературної плазми; коректністю математичної постановки задач дослідження та застосуванням надійних чисельних методів для їх розв'язку; контрольованою точністю обчислень; якісним узгодженням результатів чисельних розрахунків експериментальними 3 та розрахунковими даними інших авторів, опублікованими у світовій науковій літературі.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, формулювання постановок задач виконано спільно. Розробка алгоритмів і програм, чисельні розрахунки, порівняння отриманих результатів з експериментальними та розрахунковими даними виконані здобувачем.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: Міжнародній науково-практичній конференції «Людина і космос» (м. Дніпропетровськ, 2007 р.); Міжнародній конференції «Передові космічні технології на благо людства» (м. Дніпропетровськ, 2007 р.); Міжнародній конференції «Dynamical System Modelling and Stability Investigation» (м. Київ, 2007, 2009, 2011 pp.); Міжнародних симпозіумах «Методи дискретних особливостей у задачах математичної фізики» (м. Херсон, 2007, 2009, 2011, 2013 рр.); Міжнародній школі-семінарі «Моделі й методи аеродинаміки» (м. Москва-Євпаторія, 2007 p.); International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM07) (м. Цюріх, Швейцарія, 2007 р.); Науково-технічних конференціях пам'яті академіка НАНУ В.І. Моссаковського «Актуальні проблеми механіки суцільного середовища та міцності конструкцій» (м. Дніпропетровськ, 2007, м. Дніпро, 2019 рр.); Міжнародних наукових конференціях «Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу» (м. Дніпропетровськ, 2008, 2010, 2012, 2014 pp.); Міжнародних конгресах двигунобудівників (м. Рибаче, 2007, 2008, 2009 рр.); Міжнародних науково-практичних конференціях «Комп'ютерна гідромеханіка» (м. Київ, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 рр.); V міжнародній науково-практичній конференції «Нетрадиційні й поновлювані

джерела енергії як альтернатива первинних джерел енергії в регіоні» (м. Львов, 2009 р.); Міжнародних конференціях з математичного моделювання (м. Херсон, 2009–2019 рр.); Х міжнародній науковій конференції «Математичні проблеми технічної механіки» (м. Дніпродзержинськ, 2010 р.); Міжнародній конференції «Математичні проблеми технічної механіки» (м. Дніпропетровськ, 2011 р.); Міжнародній конференції «Сучасні проблеми математики і її застосування в природничих науках і інформаційних технологіях» (м. Харків, 2011 р.); Міжнародних конференціях «Pontus Euxinus» (м. Севастополь, 2011, 2012, 2013 рр.); Наукових конференціях «Інформаційні технології в керуванні складними системами (м. Дніпропетровськ, 2011, 2013 рр.); Міжнародній науковій конференції «Імпульсні процеси в механіці суцільних середовищ» (м. Миколаїв, 2011 р.); XXIII Науково-технічній конференції з аеродинаміки (м. Москва, 2012 р.); Науково-практичній конференції з міжнародною участю «Комп'ютерне моделювання в наукомістких технологіях» (м. Харків, 2012 р.); Міжнародній «Тараповські читання» (м. Харків, 2012 р.); Науково-технічних конференції конференціях «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (м. Дніпро, 2013, 2015-2019 pp.); Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (м. Херсон, 2013-2019 рр.); Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Сучасні енергетичні установки на транспорті та технології і устаткування для їхнього обслуговування» (м. Херсон, 2013-2019 рр.); Семінарі Херсонської державної морської академії (м. Херсон, 2013 р.); Щорічній науково-технічній конференції молодих учених і фахівців (м. Київ, 2014 р.); XV міжнародній науковій конференції ім. акад. М. Кравчука (м. Київ, 2014 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасний проблеми стан i двигунобудування» (м. Миколаїв, 2014 р.); Науково-практичній молодіжній конференції «Екологічні проблеми Азово-Чорноморського регіону та комплексне керування прибережною зоною» (м. Севастополь, 2014 р.); Всеукраїнській науковій конференції «Диференціальні рівняння та проблеми аерогідромеханіки й тепломасопереносу» (м. Дніпропетровськ, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Безпека життєдіяльності на транспорті й виробництві – освіта, наука, практика» (м. Херсон, 2017 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Прикладна геометрія та інформаційні технології в моделюванні об'єктів, явищ і процесів» (м. Миколаїв, 2018 р.); Науково-технічній конференції «Космічні технології: сьогодення й майбутнє» (м. Дніпро, 2019 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Удосконалювання енергоустановок методами математичного й фізичного моделювання» (м. Харків, 2019 р.); Семінарі Інституту транспортних систем і технологій НАН України (м. Дніпро, 2019 р.); Семінарі Херсонського національного технічного університету (м. Херсон, 2019 р.); Семінарах Інституту гідромеханіки НАН України (м. Київ, 2019 р.); Семінарі Інституту технічної механіки НАН і ДКА України (м. Дніпро, 2020 р.); Семінарі Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара (м. Дніпро, 2020 р.); Семінарі Інституту проблем математичних машин і систем НАН України (м. Київ, 2020 р.); Окремі матеріали роботи доповідалися на засіданні Президії НАН України в 2010 р.

За результатами роботи автор був відзначений: стипендією НАН України для молодих учених (2008–2010, 2012–2013 рр.); стипендією Президента України для молодих учених (2010–2011 рр.); премією Верховної Ради України для молодих учених в області фундаментальних і прикладних досліджень і науково-технічних розробок

(диплом № 871-VI, 2008 р.); премією Президента України для молодих учених (свідоцтво № 499, 2011 р.); премією Кабінету Міністрів України за особливі досягнення молоді в розвитку України (диплом № 420-р, 2013 р.); премією ім. М. К. Янгеля Національної академії наук України (2019 р.).

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 69 роботах: 37 статтях, у тому числі в фахових вітчизняних та зарубіжних виданнях 25 [2, 3, 5–7, 9, 10, 12, 14–19, 21, 22, 24, 25, 27, 29, 30, 34–37] (із них 9 [2, 3, 5, 7, 15, 17, 19, 24, 25] без співавторів), 32 роботи в збірниках наукових праць і тезах міжнародних конференцій [38–69]. З опублікованих по дисертації робіт налічується 31 [1, 2, 4–7, 9–16, 18–20, 22–26, 28–34, 36, 37] стаття у виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз, у тому числі 4 [10, 34, 36, 37] – до Scopus та Web of Science.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел, двох додатків. Робота включає 312 сторінок основного тексту, 157 рисунків, 16 таблиць, 327 використаних джерел, усього 489 сторінок.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ.** Розкрито стан і суть наукової проблеми, обґрунтовано важливість і актуальність теми дисертації, викладено мету роботи та завдання дослідження, а також сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

#### Розділ 1. Огляд сучасного стану питання

Розглянуто методи керування відривом потоку, основні типи плазми, типи плазмових актуаторов і механізми керування потоком, а також ієрархію часу протікання плазмових та аеродинамічних процесів. Виконано огляд математичних моделей для опису розвитку плазми при роботі плазмового актуатора та її взаємодії з навколишнім середовищем. Крім того, наведено огляд методів розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса нестисливої рідини, методів створення дискретного простору, підходів до моделювання турбулентності, а також моделей і методів моделювання ламінарно-турбулентного переходу. Дається огляд в історичній ретроспективі вкладу світових вчених в розвиток питань, що обговорюються в дисертації.

# Розділ 2. Математична модель для розв'язку зв'язаних задач динаміки рідини, газу та низькотемпературної плазми

Рівняння динаміки в'язкого нестисливого потоку. Найбільш популярними рівняннями, що описують рух суцільного в'язкого середовища у широкому діапазоні практично актуальних умов, є нестаціонарні осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса для в'язкого нестисливого потоку з використанням запропонованого Буссінеском модельного представлення компонент тензора турбулентних напружень та урахуванням масових сил

$$\nabla \mathbf{u} = \mathbf{0},\tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \left[ (\mathbf{v} + \mathbf{v}_t) \nabla \mathbf{u} \right] + \frac{1}{\rho} \mathbf{f}_b, \qquad (2)$$

де  $\nabla$  – оператор Гамільтона, t – час, **u** – вектор швидкості, p – тиск,  $\rho$  – густина, v і  $v_t$  – молекулярний і турбулентний кінематичні коефіцієнти в'язкості,  $\mathbf{f}_b$  – вектор масової сили (зокрема, сили Лоренца), віднесений до одиниці об'єму.

У якості початкових умов задавалися параметри незбуреного потоку у всій розрахунковій області. На зовнішній межі застосовувалися невідбиваючі граничні умови, для розрахунку яких використовувався метод характеристик. На поверхні твердого тіла ставилася умова прилипання.

Моделювання турбулентності. У роботі використовувалися два підходи для моделювання турбулентності. Перший підхід, заснований на моделюванні потоку в'язкої нестисливої рідини на базі нестаціонарних осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса з використанням диференціальних моделей турбулентності Spalart-Allmaras (SA) та її модифікацій SARC, SALSA, і другий – гібридний підхід, заснований на моделюванні від'єднаних вихорів із затримкою (DDES).

Стандартна модель турбулентності Spalart-Allmaras призначена для визначення розмірного кінематичного коефіцієнта турбулентної в'язкості за формулою

$$v_t = \tilde{v}_t \cdot f_{v1}, \tag{3}$$

де  $f_{v1} = \chi^3 / (\chi^3 + c_{v1}^3)$  – демпфуюча функція кінематичних в'язкостей  $\chi = \tilde{v}_t / v$ ,  $\tilde{v}_t$  – робоча змінна. Рівняння для визначення  $\tilde{v}_t$  в моделі Spalart-Allmaras має вигляд

$$\frac{D\tilde{v}_t}{Dt} = c_{b1}\tilde{S}\tilde{v}_t + \frac{1}{\sigma}\nabla\left[\left(v + \tilde{v}_t\right)\nabla\tilde{v}_t\right] + \frac{c_{b2}}{\sigma}\nabla^2\tilde{v}_t - f_w\left(\frac{c_{b1}}{k^2} + \frac{1 + c_{b2}}{\sigma}\right)\left(\frac{\tilde{v}_t}{d}\right)^2.$$
(4)

Моделі SARC і SALSA мають схожий вигляд і дозволяють враховувати кривизну ліній течії, обертання твердої обтічної поверхні та нестаціонарні ефекти.

У якості початкових умов у моделях турбулентності задається значення турбулентної в'язкості в потоці, що набігає, яке розраховується виходячи з інтенсивності турбулентності потоку.

Значення турбулентної в'язкості на тілі покладалося рівним нулю, а на вихідній межі ставилася умова Неймана. Граничні умови для значення турбулентної в'язкості в потоці, що набігає (на вхідній межі) задавалися наступним чином

$$v_{t\infty} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \text{Re} \cdot \left( T u_{\infty} / 0.08165 \right)^{0.5}.$$
 (5)

Моделювання ламінарно-турбулентного переходу. Моделювання ламінарнотурбулентного переходу описувалось за допомогою диференціальної  $\gamma$ - $Re_{\theta}$  моделі. Вперше повну  $\gamma$ - $Re_{\theta}$  модель адаптовано для використання разом з моделями турбулентності SA, SARC і SALSA. Запропоновано нові співвідношення для визначення значень питомої швидкості дисипації та турбулентної в'язкості в незбуреному потоці.

Диференціальна  $\gamma$ - $Re_{\theta}$  модель ламінарно-турбулентного переходу містить у собі рівняння переносу коефіцієнта переміжності  $\gamma$  та рівняння переносу критичного числа Рейнольдса втрати імпульсу  $Re_{\theta}$ . Крім того, у даній моделі присутня велика кількість кореляційних функцій, що узагальнюють емпіричні залежності.

Рівняння переносу для коефіцієнта переміжності та критичного числа Рейнольдса втрати імпульсу записуються у вигляді

$$\partial(\rho\gamma)/\partial t + \nabla(\rho\mathbf{u}\gamma) = P_{\gamma} - E_{\gamma} + \nabla\left[\left(\mu + \mu_t/\sigma_f\right)\nabla\gamma\right],\tag{6}$$

$$\partial \left( \rho \tilde{R} e_{\theta t} \right) / \partial t + \nabla \left( \rho \mathbf{u} \tilde{R} e_{\theta t} \right) = P_{\theta t} + \nabla \left[ \sigma_{\theta t} \left( \mu + \mu_{t} \right) \nabla \tilde{R} e_{\theta t} \right], \tag{7}$$

де  $\mu$  і  $\mu_t$  – молекулярний та турбулентний коефіцієнти динамічної в'язкості.

У якості початкових умов значення коефіцієнта переміжності в розрахунковій області дорівнювало одиниці, а  $\tilde{R}e_{\theta t}$  задавалась, виходячи з емпіричної кореляції. Потік коефіцієнта переміжності по нормалі до поверхні твердого тіла дорівнює нулю, на вхідній межі коефіцієнт переміжності дорівнює одиниці, а на вихідній межі ставилась умова Неймана. На поверхні твердого тіла значення  $\tilde{R}e_{\theta t}$  покладалося рівним нулю, на вхідній межі воно задавалося, виходячи з емпіричної кореляції на основі значень інтенсивності турбулентності, а на вихідній межі ставилась умова Неймана.

Кінетична схема плазми діелектричного бар'єрного розряду. У якості робочого газу в роботі виступає повітря з фіксованою часткою азоту та кисню при сталих значеннях атмосферного тиску, густини та температури. Діелектричний бар'єрний розряд в повітрі при атмосферному тиску генерує низькотемпературну нерівноважну плазму [Capitelli et al. (1990), Kossyi et al. (1992) та ін.].

У роботі розглядаються електронно-збуджені та метастабільні (\*) стани молекул азоту  $N_2^*(A^3 \Sigma_u^+)$ ,  $N_2(B^3 \Pi_g)$ ,  $N_2^*(a^{11} \Sigma_u^-)$ ,  $N_2(C^3 \Pi_u)$  і молекул кисню  $O_2^*(a^1 \Delta_g)$ ,  $O_2^*(b^1 \Sigma_g^+)$ , нейтральні атоми кисню O, електрони e, а також позитивні  $N_2^+$ ,  $N_4^+$ ,  $O_2^+$ ,  $O_4^+$  і негативні іони  $O^-$ ,  $O_2^-$ , у цілому 14 частинок і 97 плазмохімічних реакцій, включаючи поверхневі процеси [Capitelli et al. (1990), Kossyi et al. (1992) та ін.].

Хімічні реакції включають: процеси дисоціації, іонізації молекул електронним ударом з основного стану; ступінчасту, асоціативну іонізацію та фотоіонізацію; збудження молекул; іонізацію збуджених (метастабільних) молекул; прилипання і відлипання електронів; рекомбінацію електронів і позитивних іонів; хімічні перетворення нейтральних атомів, молекул та іонів, а також процеси вторинної емісії електронів з відкритого електрода і діелектричної поверхні. Приймалось, що температура іонів дорівнює температурі повітря. Температура електронів залежить від напруженості електричного поля та визначалась із розв'язку рівняння Больцмана.

*Рівняння електричного потенціалу.* У загальному випадку електродинаміка плазми може бути описана чотирма рівняннями Максвелла. Замість рівнянь Максвелла для опису електродинаміки плазми може бути використано рівняння Пуассона для електричного поля [Райзер (1992), Enloe et al. (2008) та ін.] при виконанні наступних двох умов [Castellanos (1998) et al.].

Першою є умова  $\omega \ll (c/L)$ , яка гарантує, що магнітне поле, створюване струмом зміщення, порядку  $B \simeq \mu \varepsilon L \omega E$ , задовольняє умові  $cB \ll E$ , де B – модуль магнітної індукції, E – модуль напруженості електричного поля,  $\omega$  – частота електромагнітного поля, L – характерний розмір, c – швидкість світла,  $\mu \sim 10^{-6}$  Гн·м,  $\varepsilon \sim 10^{-11}$  Ф/м. Для типових параметрів плазмових актуаторів на основі ДБР  $L \sim 10^{-2}$  м,  $\omega \sim 10^{4}$  Гц.

Друга умова, полягає в тому, що магнітне поле, що генерується струмом провідності, також має задовольняти умові  $cB \ll E$ . Оскільки з четвертого рівняння Максвелла (теорема про циркуляцію магнітного поля) масштаб для модуля магнітної індукції дорівнює  $B = \mu LJ$ , тоді  $J \ll E/L \cdot \sqrt{\varepsilon/\mu}$ , де J – густина електричного струму. В результаті маємо  $J \ll 3E$ . Густина електричного струму в плазмі ДБР  $J \sim 10^{-2}$  A/m<sup>2</sup>, модуль напруженості електричного поля  $E \sim 10^{7}$  B/м, що повністю задовольняє другій умові.

Крім того, швидкості руху заряджених частинок у плазмі ДБР набагато менші

$$\nabla(\varepsilon_r \nabla \varphi) = -\rho_c / \varepsilon_o - \sigma \delta(h) / \varepsilon_o , \qquad (8)$$

де  $\varphi$  – електричний потенціал,  $\delta(h)$  – дельта-функція Дірака, h – відстань по нормалі до поверхні діелектрика,  $\rho_c$  – густина результуючого заряду,  $\sigma$  – сумарна поверхнева густина електричного заряду,  $\varepsilon_r$  – відносна діелектрична проникність середовища,  $\varepsilon_o$  – електрична стала. Густина результуючого заряду в будь-якій точці плазми визначається як різниця між густиною позитивного та негативного заряду. Тоді можна записати

$$\nabla \cdot (\varepsilon_r \nabla \varphi) = -e \Big( n_{N_4^+} + n_{N_2^+} + n_{O_4^+} + n_{O_2^+} - n_{O_2^-} - n_{O_2^-} - n_e \Big) \Big/ \varepsilon_0 - (\sigma_+ - \sigma_-) \delta(h) / \varepsilon_0, \qquad (9)$$

де  $n_{N_4^+}$ ,  $n_{N_2^+}$ ,  $n_{O_4^+}$ ,  $n_{O_2^-}$ ,  $n_{O_2^-}$ ,  $n_e^-$  об'ємна густина електронів, а також позитивних і негативних іонів азоту та кисню,  $\sigma_+$ ,  $\sigma_-$  поверхнева густина позитивного та негативного зарядів.

Дане рівняння дозволяє описувати нестаціонарні процеси через нестаціонарні граничні умови для потенціалу  $\varphi$  та змінний за часом джерельний доданок.

Рівняння динаміки частинок плазми в дифузійно-дрейфовому наближенні. Виходячи з кінетичної схеми діелектричного бар'єрного розряду, можна скласти рівняння динаміки для кожного сорту частинок. Система рівнянь динаміки частинок плазми в дифузійно-дрейфовому формулюванні з урахуванням того, що  $\mathbf{E} = -\nabla \varphi$ , у декартовій двовимірній формі запису має вигляд

$$\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial t} - \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \mathbf{n}\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \mathbf{n}\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)\right] - \left[\frac{\partial}{\partial x}\mathbf{D}\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{D}\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial y}\right] = \mathbf{S}, \qquad (10)$$

де n – вектор шуканих змінних для об'ємної густини частинок,  $\mu$  і D – векторні коефіцієнти рухливості та дифузії частинок, S – вектор джерельних членів,

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_{N_{4}^{+}}, n_{N_{2}^{+}}, n_{N_{2}(A^{3}\Sigma_{u}^{+})}, n_{N_{2}(B^{3}\Pi_{g})}, n_{N_{2}(a^{1}\Sigma_{u}^{-})}, n_{N_{2}(C^{3}\Pi_{u})}, n_{O_{4}^{+}}, n_{O_{2}^{+}}, n_{O_{2}^{-}}, n_{O_{2}^{-}}, n_{O_{2}^{-}}, n_{O_{2}(a^{1}\Delta_{g})}, n_{O_{2}(b^{1}\Sigma_{g}^{+})}, n_{e} \end{bmatrix} , (11)$$

$$\boldsymbol{\mu} = \left[ \mu_{N_4^+}, \mu_{N_2^+}, 0, 0, 0, 0, \mu_{O_4^+}, \mu_{O_2^+}, -\mu_{O_2^-}, -\mu_{O_1^-}, 0, 0, 0, -\mu_e \right] , \qquad (12)$$

$$\mathbf{D} = \left[ D_{\mathbf{N}_{4}^{+}}, D_{\mathbf{N}_{2}^{+}}, 0, 0, 0, 0, 0, D_{\mathbf{O}_{4}^{+}}, D_{\mathbf{O}_{2}^{+}}, D_{\mathbf{O}_{2}^{-}}, D_{\mathbf{O}_{2}^{-}}, 0, 0, 0, 0, D_{e} \right]^{T},$$
(13)

 $\neg T$ 

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{N_{4}^{+}}, S_{N_{2}^{+}}, S_{N_{2}(A^{3}\Sigma_{u}^{+})}, S_{N_{2}(B^{3}\Pi_{g})}, S_{N_{2}(a^{1}\Sigma_{u}^{-})}, S_{N_{2}(C^{3}\Pi_{u})}, S_{O_{4}^{+}}, S_{O_{2}^{+}}, S_{O_{2}^{-}}, S_{O}^{-}, S_{O}^{-}, S_{O}^{-}, S_{O_{2}(a^{1}\Delta_{g})}, S_{O_{2}(b^{1}\Sigma_{g}^{+})}, S_{e} \end{bmatrix}^{T} (14)$$
  
Тут під добутком вигляду **µп** мається на увазі вектор  $[\mu_{1}n_{1}, \mu_{2}n_{2}, \dots, \mu_{\ell}n_{\ell}]^{T}$ .

Рівняння балансу поверхневої густини позитивного та негативного зарядів. Процеси на поверхні діелектрика відіграють істотну роль у роботі плазмового актуатора. Рівняння балансу поверхневої густини позитивного та негативного заряду визначається за такими виразами

 $\partial \sigma_{+}/\partial t = -e(1+\gamma_{diel})\Gamma_{i+} - \alpha_{rw}\sigma_{+}\sigma_{-}/e, \quad \partial \sigma_{-}/\partial t = -e\Gamma_{i-} - e\Gamma_{e} - \alpha_{rw}\sigma_{+}\sigma_{-}/e,$  (15) де  $\Gamma_{i+}, \Gamma_{i-}, \Gamma_{e}$  – потік позитивних і негативних іонів та електронів по нормалі до поверхні,  $\alpha_{rw}$  – коефіцієнт поверхневої рекомбінації,  $\gamma_{diel} = 0,005$  – коефіцієнт іонно-електронної емісії з діелектрика. Початкові та граничні умови для вихідної системи рівнянь динаміки плазми та електричного потенціалу. Рівняння (8) для електричного потенціалу розв'язувалось, використовуючи прикладену напругу до електродів як граничну умову, а також відповідні значення відносної діелектричної проникності для повітря та діелектрика. Змінна напруга, яку прикладено до відкритого електрода, задавалась як синусоїда. До ізольованого електрода прикладався нульовий потенціал. На зовнішніх межах ставилась умова Неймана.

У якості початкових умов для рівняння динаміки заряджених частинок плазми задавалася фонова концентрація іонів і електронів у повітрі. Граничні умови для рівнянь динаміки заряджених частинок на твердій поверхні наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Граничні умови для рівнянь динаміки заряджених частинок

$E_{\ell_n} > 0$	$\Gamma_{i+} = -1/4  n_{i+} V_{i+}^{th}  ,$	$\Gamma_{i-} = -\mu_{i-}E_n n_{i-} - 1/4 n_{i-}V_{i-}^{th},$	$\Gamma_e = -\mu_e E_n n_e - 1/4 n_e V_e^{th}$
$E_{\ell_n} \leq 0$	$\Gamma_{i+} = \mu_{i+} E_n n_{i+} - \frac{1}{4} n_{i+} V_{i+}^{th},$	, $\Gamma_{i-} = -1/4 n_{i-} V_{i-}^{th}$ ,	$\Gamma_e = -\gamma_{Cu,diel} \Gamma_{i+}$

де  $V_{i,e}^{th}$  – теплова швидкість руху частинок,  $\gamma_{Cu}$  – коефіцієнт іонно-електронної емісії з мідного анода, що залежить від напруженості електричного поля. На зовнішніх межах ставилась умова Неймана  $\partial n / \partial \ell_n = 0$ . Теплова швидкість руху частинок визначалась за формулою

$$V_{i,e}^{th} = \sqrt{8k_b T_{i,e} / \pi m_{i,e}} , \qquad (16)$$

де  $m_{i,e}$ ,  $T_{i,e}$  – маса та температура іонів чи електронів.

Моделювання фотоіонізації. При моделюванні діелектричного бар'єрного розряду в повітрі необхідно враховувати явище фотоіонізації для правильного опису поширення катодоспрямованого (позитивного) стримера. Для моделювання фотоіонізації використовується SP3 модель Ларсена, яка заснована на розв'язку диференціальних рівнянь Гельмгольца.

## Розділ 3. Чисельні методи для розв'язку зв'язаних задач динаміки рідини, газу та низькотемпературної плазми

Рівняння Нав'є-Стокса в'язкого нестисливого потоку в криволінійній системі координат на рухомих сітках. У довільних рухомих координатах  $\xi = \xi(x, y, t)$ ,  $\eta = \eta(x, y, t)$  система нестаціонарних рівнянь Нав'є-Стокса (1)–(2) нестисливої рідини, з урахуванням методу штучної стисливості, записувалась у консервативній формі

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \tau} = -\frac{\partial}{\partial \xi} \left( \hat{\mathbf{E}} - \hat{\mathbf{E}}_{\mathbf{v}} \right) - \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \hat{\mathbf{F}} - \hat{\mathbf{F}}_{\mathbf{v}} \right) + \hat{\mathbf{S}} = -\hat{\mathbf{R}}, \qquad (17)$$
$$\hat{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} p/J\\ \hat{\mathbf{u}} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} \beta U/J\\ \hat{\mathbf{e}} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} \beta V/J\\ \hat{\mathbf{f}} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{E}}_{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} 0\\ \hat{\mathbf{e}}_{\mathbf{v}} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{F}}_{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} 0\\ \hat{\mathbf{f}}_{\mathbf{v}} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} 0\\ \hat{\mathbf{s}} \end{bmatrix}, \qquad (17)$$

де  $\hat{\mathbf{R}}$  – вектор нев'язки цих рівнянь, J – якобіан перетворення координат,  $\hat{\mathbf{u}} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{e}} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \xi_x p + uU + \xi_t u \\ \xi_y p + vU + \xi_t v \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{f}} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \eta_x p + uV + \eta_t u \\ \eta_y p + vV + \eta_t v \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{s}} = \frac{D_c}{\rho} \frac{\rho_c}{J} \begin{bmatrix} \xi_x E_{\xi} + \eta_x E_{\eta} \\ \xi_y E_{\xi} + \eta_y E_{\eta} \end{bmatrix}, (18)$ де u, v – декартові складові вектора швидкості,  $U = \xi_x u + \xi_y v, \quad V = \eta_x u + \eta_y v$  – контраваріантні компоненти швидкості,  $\xi_t = -x_\tau \xi_x - y_\tau \xi_y, \quad \eta_t = -x_\tau \eta_x - y_\tau \eta_y, \quad \xi_x = Jy_\eta,$  $\xi_y = -Jx_\eta, \quad \eta_x = -Jy_{\xi}, \quad \eta_y = Jx_{\xi}$  – метричні коефіцієнти,  $\hat{\mathbf{s}}$  – джерельний член (сила Лоренца). Густина входить у доданок для тиску,  $E_{\xi}$ ,  $E_{\eta}$  – компоненти напруженості електричного поля в довільній системі координат,  $\rho_c$  – густина результуючого заряду. Re – число Рейнольдса,  $D_c$  – безрозмірний параметр, що характеризує відношення електричних сил до сил інерції.

В'язкі члени в неортогональній системі координат набувають вигляду

$$\hat{\mathbf{e}}_{\mathbf{v}} = \frac{v + v_t}{\text{Re}J} \begin{bmatrix} \left(\xi_x^2 + \xi_y^2\right) u_{\xi} + \left(\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y\right) u_{\eta} \\ \left(\xi_x^2 + \xi_y^2\right) v_{\xi} + \left(\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y\right) v_{\eta} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{f}}_{\mathbf{v}} = \frac{v + v_t}{\text{Re}J} \begin{bmatrix} \left(\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y\right) u_{\xi} + \left(\eta_x^2 + \eta_y^2\right) u_{\eta} \\ \left(\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y\right) v_{\xi} + \left(\eta_x^2 + \eta_y^2\right) v_{\eta} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Дискретний аналог вихідних рівнянь гідродинаміки. Алгоритм розв'язку вихідних рівнянь гідродинаміки базується на тришаровій неявній схемі з підітераціями за псевдочасом  $\tau$  другого порядку точності за фізичним часом t

$$\left[\mathbf{I}_{t\tau} + \left(\frac{\partial \hat{\mathbf{R}}}{\partial \hat{\mathbf{D}}}\right)^{n+1,m}\right] \left(\hat{\mathbf{D}}^{n+1,m+1} - \hat{\mathbf{D}}^{n+1,m}\right) = -\hat{\mathbf{R}}^{n+1,m} - \frac{\mathbf{I}_{m}}{\Delta t} \left(1.5\hat{\mathbf{D}}^{n+1,m} - 2\hat{\mathbf{D}}^{n} + 0.5\hat{\mathbf{D}}^{n-1}\right).$$
(20)

$$\mathbf{I}_{t\tau} = diag \left[ \frac{1}{\Delta \tau}, \frac{1}{\Delta \tau} + \frac{1.5}{\Delta t}, \frac{1}{\Delta \tau} + \frac{1.5}{\Delta t} \right], \quad \mathbf{I}_{m} = diag \left[ 0, 1, 1 \right], \tag{21}$$

де верхній індекс *n* позначає момент часу  $t = n\Delta t$ . Для розв'язку рівнянь і узгодженню з рівнянням нерозривності на кроці n + 1 вводиться псевдочасовий крок *m*. Рівняння розв'язуються ітераційно так, щоб  $\hat{u}^{n+1,m+1}$  та  $\hat{v}^{n+1,m+1}$  наближалися до значення швидкості  $\hat{u}^{n+1}$ ,  $\hat{v}^{n+1}$  на новому кроці за часом, а дивергенція швидкості наближалася до нуля.

Апроксимація конвективних похідних у рівняннях Нав'є-Стокса. Протипоточну схему було описано Р. Roe для апроксимації розв'язку задачі Рімана для стисливого газу, і модифіковано S. Rogers і D. Kwak для нестисливих течій.

У класичній схемі Rogers-Kwak вектор потоку визначається співвідношенням

$$\mathbf{E}_{i+1/2} = 0.5 \left[ \mathbf{E} \left( \mathbf{D}_{i+1} \right) + \mathbf{E} \left( \mathbf{D}_{i} \right) - \mathbf{\Phi}_{i+1/2} \right].$$
(22)

Вектор потоку у модифікованій схемі Rogers-Kwak визначається співвідношенням

$$\mathbf{E}_{i+1/2} = 0.5 \left\lfloor \mathbf{E}_{i+1/2} \left( \mathbf{D}_{i+1} \right) + \mathbf{E}_{i+1/2} \left( \mathbf{D}_{i} \right) - \mathbf{\Phi}_{i+1/2} \right\rfloor,$$
(23)

де  $\Phi_{_{i+1/2}}$  – дисипативний член певного порядку точності.

Потоки  $\mathbf{E}_{i+1/2}(\mathbf{D}_{i+1})$  та  $\mathbf{E}_{i+1/2}(\mathbf{D}_i)$  розраховуються з використанням метричних коефіцієнтів, віднесених на якобіан перетворення координат, на грані *i*+1/2 за значеннями гідродинамічних параметрів у точках *i*+1 та *i*, відповідно.

Блочно-матрична система лінійних алгебраїчних рівнянь неявної схеми розв'язувалася методом мінімізації узагальненої нев'язки (GMRES) з неповним LU-розкладанням (ILU(k)) загальної матриці системи у якості передзумовлювання.

Система рівнянь динаміки частинок плазми та електричного потенціалу в криволінійній системі координат. Для моделювання діелектричного бар'єрного розряду необхідно спільно розв'язувати систему рівнянь динаміки частинок плазми з рівнянням Пуассона для електричного поля та рівнянням балансу поверхневої густини заряду. У криволінійній системі координат ці рівняння мають вигляд

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{n}}}{\partial t} - \frac{\partial \hat{\mathbf{H}}_{\xi}}{\partial \xi} - \frac{\partial \hat{\mathbf{H}}_{\eta}}{\partial \eta} - \frac{\partial \hat{\mathbf{D}}_{\xi}}{\partial \xi} - \frac{\partial \hat{\mathbf{D}}_{\eta}}{\partial \eta} = \hat{\mathbf{S}}, \qquad (24)$$

$$\frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial \tau_{\varphi}} + \frac{\partial \hat{\varphi}_{\xi}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{\varphi}_{\eta}}{\partial \eta} = -\frac{e}{\varepsilon_0} (\hat{n}_+ - \hat{n}_-) - \frac{\delta}{\varepsilon_0} (\hat{\sigma}_+ - \hat{\sigma}_-), \qquad (25)$$

$$\frac{\partial \sigma_{+}}{\partial t} = -e(1+\gamma_{diel})\Gamma_{i+} - \alpha_{rw}\sigma_{+}\sigma_{-}/e, \qquad \frac{\partial \sigma_{-}}{\partial t} = -e\Gamma_{i-} - e\Gamma_{e} - \alpha_{rw}\sigma_{+}\sigma_{-}/e, \qquad (26)$$

де  $\tau_{\varphi}$  – псевдочас,  $n_{\pm} = n_{N_{4}^{\pm}} + n_{N_{2}^{\pm}} + n_{O_{4}^{\pm}} + n_{O_{2}^{\pm}}$ ,  $n_{-} = n_{O_{2}^{-}} + n_{O^{-}} + n_{e}$  – об'ємна густина позитивних і негативних частинок,  $\hat{\mathbf{n}} = \mathbf{n}/J$ ,  $\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{S}/J$ ,  $\hat{\varphi} = \varphi/J$ ,  $\hat{\sigma}_{\pm} = \sigma_{\pm}/J$ ,

$$\hat{\mathbf{H}}_{\xi} = \frac{\mu\mathbf{n}}{J} \bigg( \left( \xi_{x}^{2} + \xi_{y}^{2} \right) \frac{\partial\varphi}{\partial\xi} + \left( \xi_{x}\eta_{x} + \xi_{y}\eta_{y} \right) \frac{\partial\varphi}{\partial\eta} \bigg), \quad \hat{\mathbf{H}}_{\eta} = \frac{\mu\mathbf{n}}{J} \bigg( \left( \xi_{x}\eta_{x} + \xi_{y}\eta_{y} \right) \frac{\partial\varphi}{\partial\xi} + \left( \eta_{x}^{2} + \eta_{y}^{2} \right) \frac{\partial\varphi}{\partial\eta} \bigg), \\ \hat{\mathbf{D}}_{\xi} = \frac{\mathbf{D}}{J} \bigg( \left( \xi_{x}^{2} + \xi_{y}^{2} \right) \frac{\partial\mathbf{n}}{\partial\xi} + \left( \xi_{x}\eta_{x} + \xi_{y}\eta_{y} \right) \frac{\partial\mathbf{n}}{\partial\eta} \bigg), \quad \hat{\mathbf{D}}_{\eta} = \frac{\mathbf{D}}{J} \bigg( \left( \xi_{x}\eta_{x} + \xi_{y}\eta_{y} \right) \frac{\partial\mathbf{n}}{\partial\xi} + \left( \eta_{x}^{2} + \eta_{y}^{2} \right) \frac{\partial\mathbf{n}}{\partial\eta} \bigg), \\ \hat{\varphi}_{\xi} = \frac{\varepsilon_{r}}{J} \bigg[ \bigg( \xi_{x}^{2} + \xi_{y}^{2} \bigg) \frac{\partial\varphi}{\partial\xi} + \bigg( \xi_{x}\eta_{x} + \xi_{y}\eta_{y} \bigg) \frac{\partial\varphi}{\partial\eta} \bigg], \quad \hat{\varphi}_{\eta} = \frac{\varepsilon_{r}}{J} \bigg[ \bigg( \xi_{x}\eta_{x} + \xi_{y}\eta_{y} \bigg) \frac{\partial\varphi}{\partial\xi} + \bigg( \eta_{x}^{2} + \eta_{y}^{2} \bigg) \frac{\partial\varphi}{\partial\eta} \bigg].$$

Неявний метод для рівнянь динаміки частинок плазми та електричного потенціалу. Рівняння динаміки частинок плазми в дельта-формі має вигляд

$$\begin{bmatrix} \frac{1.5}{J\Delta t} \mathbf{E}_{14\times 14} - \left(\frac{\partial \hat{\mathbf{R}}}{\partial \mathbf{n}}\right)^{n+1,m} - \left(\frac{\partial \hat{\mathbf{S}}}{\partial \mathbf{n}}\right)^{n+1,m} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{n}^{n+1,m} = \hat{\mathbf{R}}^{n+1,m} + \hat{\mathbf{S}}^{n+1,m} - \frac{1}{\Delta t} \left(1.5 \hat{\mathbf{n}}^{n+1,m} - 2 \hat{\mathbf{n}}^{n} + 0.5 \hat{\mathbf{n}}^{n-1}\right), (27)$$

$$\text{де } \Delta \mathbf{n}^{n+1,m} = \mathbf{n}^{n+1,m+1} - \mathbf{n}^{n+1,m}, \quad \mathbf{E}_{14\times 14} - \text{одинична матрица } 14 \times 14,$$

$$\hat{\mathbf{R}}^{n+1,m} = \partial \hat{\mathbf{H}}_{\xi}^{n+1,m} / \partial \xi + \partial \hat{\mathbf{H}}_{\eta}^{n+1,m} / \partial \eta + \partial \hat{\mathbf{D}}_{\xi}^{n+1,m} / \partial \xi + \partial \hat{\mathbf{D}}_{\eta}^{n+1,m} / \partial \eta. \quad (28)$$

Використаний алгоритм базується на тришаровій неявній схемі з підітераціями другого порядку точності за фізичним часом *t*.

Доданки  $\partial \hat{\mathbf{H}}_{\xi} / \partial \xi$ ,  $\partial \hat{\mathbf{H}}_{\eta} / \partial \eta$  відповідають за адвекцію (дрейф) заряджених частинок. Формальна математична апроксимація виразів за допомогою симетричних скінченно-різницевих співвідношень (як для дифузійних доданків) призводить до втрати фізичного змісту даного оператора як адвекції заряджених частинок. Для збереження фізичного змісту адвекції вводиться несиметрична скінчено-об'ємна апроксимація для  $\varphi$  з урахуванням адвекції **n**.

На грані контрольного об'єму в напрямку  $\xi$  відфільтровані густини заряджених частинок розраховуються за схемою TVD з обмежувачем потоків MinMod

$$\langle \mathbf{n} \rangle_{i+1/2} = \begin{cases} \mathbf{n}_{i} + \Psi_{i+1/2} \left( \mathbf{n}_{i+1} - \mathbf{n}_{i}, \mathbf{n}_{i} - \mathbf{n}_{i-1} \right), & -\left( \mu \nabla \varphi \right)_{i+1/2} \ge 0 \\ \mathbf{n}_{i+1} - \Psi_{i+1/2} \left( \mathbf{n}_{i+2} - \mathbf{n}_{i+1}, \mathbf{n}_{i+1} - \mathbf{n}_{i} \right), & -\left( \mu \nabla \varphi \right)_{i+1/2} < 0 \end{cases}$$
(29)

де  $\Psi_{i+1/2}$  – обмежувач потоків MinMod другого порядку точності.

При розв'язку рівняння Пуассона для електричного потенціалу разом з рівняннями динаміки частинок плазми важливу роль відіграє крок інтегрування за часом. Явне узгодження цих рівнянь накладає обмеження на крок за часом вигляду  $\Delta t \leq \Delta t_{Maxwell}$ , де  $\Delta t_{Maxwell} = \varepsilon_0 / \sum e \mu_k n_k - максвеллівський час <math>(k = i_+, i_-, e)$ .

Максвеллівський час (час релаксації об'ємного заряду) являє собою характерний час, що необхідний зарядженим частинкам для встановлення рівноважного стану під дією змінного електричного поля, яке вони ж і змінюють.

Взаємозв'язок рівняння Пуассона з рівняннями динаміки заряджених частинок полягає в розрахунку переносу частинок у сумарному електричному полі, яке складається з електричного поля, породженого цими ж зарядженими частинками, і зовнішнього електричного поля.

Структурний опис розробленого спеціалізованого пакета обчислювальної аеродинаміки, електродинаміки, динаміки та хімічної кінетики плазми. У даній роботі розроблено спеціалізований пакет обчислювальної аеродинаміки та електродинаміки (CFD пакет), який складається з трьох основних елементів: препроцесора, обчислювального ядра (солвера) і постпроцесора. Препроцесор відповідає за формування вихідної геометрії, створення дискретного простору та руху окремих блоків розрахункової сітки. В обчислювальному ядрі відбувається інтегрування рівнянь динаміки нестисливого середовища в'язкого та низькотемпературної електродинаміки плазми, параметрів розрахунки турбулентності та виконання граничних умов. Постпроцесор відповідає за вбудовану візуалізацію результатів (скалярні та векторні величини), обробку інтегральних характеристик за часом (розрахунки аеродинамічних характеристик) і підготовку даних для зовнішніх візуалізаторів.

# Розділ 4. Моделювання ламінарно-турбулентного переходу в задачах зовнішньої аеродинаміки

Розглянуто ряд тестових задач зовнішнього обтікання, які дозволяють турбулентності дослідити верифікувати моделі та щодо ïχ можливостей властивості переходу ламінарної відтворювати течії у турбулентну для найрозповсюдженіших типових геометричних конфігурацій обтічних поверхонь.

Чисельне моделювання ламінарно-турбулентного переходу на плоскій пластині. Дослідження ламінарно-турбулентного переходу на плоскій пластині при різних параметрах потоку, що набігає, проведено фірмою Rolls-Royce і відомі за назвою ТЗ серія експериментів. У роботі розглядаються три режими обтікання пластини ТЗА-, ТЗА, ТЗВ при різному рівні інтенсивності турбулентності в потоці, що набігає. Представлено розподіли коефіцієнтів тертя по поверхні плоскої пластини для різних режимів обтікання (рис. 1), які отримано за допомогою моделей турбулентності SA і SALSA і порівнюються з експериментальними даними та результатами чисельного моделювання з використанням моделі турбулентності SST Menter. Зі збільшенням рівня турбулентності в потоці, що набігає, положення точки переходу зміщується до менших значень числа Рейнольдса. Порівняння результатів показало, ШО розташування точки початку ламінарно-турбулентного переходу, яке отримано з використанням різних моделей турбулентності, відрізняються між собою. Так, для а), який відповідає вимушеному переходу, режиму ТЗА (рис. 1 модель турбулентності SST показує більш якісні результати при моделюванні ламінарнострибкоподібний турбулентного переходу. Майже ламінарнохарактер турбулентного переходу, який отримано при використанні моделей турбулентності SA і SALSA, частково пов'язаний з неточністю формул для визначення кінетичної

енергії турбулентності та питомої швидкості дисипації, а також з структурними особливостями та обмеженнями цих моделей. Модель турбулентності SST більш якісно відтворює характер ламінарно-турбулентного переходу для даного режиму. Для режиму T3B (рис. 1 б) модель турбулентності SST призводить до більш раннього переходу поблизу передньої крайки плоскої пластини. У той самий час модель турбулентності SA показує більш якісні результати моделювання ламінарно-турбулентного переходу, ніж моделі SST і SALSA.



Рисунок 1 – Розподіл коефіцієнтів тертя по поверхні пластини для режиму обтікання T3A (а) та T3B (б): exp [Savill (1993)], SST [Langtry (2009)], SA, SALSA, Laminar, Turbulent

Чисельне моделювання ламінарно-турбулентного переходу при обтіканні кругового циліндра. У даній роботі перевагу спільного використання моделі турбулентності SARC з моделлю  $\gamma$ - $Re_{\theta}$  ламінарно-турбулентного переходу було продемонстровано на задачі обтікання кругового циліндра в широкому діапазоні чисел Рейнольдса. Турбулентне обтікання циліндра потоком нестисливої рідини проводилося для різних чисел Рейнольдса (рис. 2). Проведено порівняння результатів розрахунків обтікання циліндра з використанням моделі  $\gamma$ - $Re_{\theta}$  ламінарно-турбулентного переходу та без неї.

Рейнольдса  $Re = 10^3$ Обтікання циліндра при числі характеризується ламінарним режимом з наступною турбулізацією сліду. При відсутності моделі переходу примежовий шар спочатку є турбулентним. При числі Рейнольдса  $Re = 10^4$ зона переміжності зміщується ближче до поверхні циліндра. Відрив ламінарного примежового шару відбувається при куті 85°÷90°. У той самий час при моделюванні обтікання циліндра без моделі ламінарно-турбулентного переходу турбулентний примежовий шар відривається набагато пізніше. Ламінарний примежовий шар при числі Рейнольдса 10<sup>5</sup> відривається при куті приблизно 90° з подальшою його турбулізацією. У цих трьох випадках при числах Рейнольдса 10<sup>3</sup>, 10<sup>4</sup>, 10<sup>5</sup> має місце відривний перехід. При числі Рейнольдса Re = 10<sup>6</sup> ламінарно-турбулентний перехід відбувається біля поверхні циліндра. Відривається вже турбулентний примежовий шар. У широкому діапазоні чисел Рейнольдса слід за циліндром характеризується періодичним і асиметричним зривом великомасштабних вихорів, які зносяться вниз за потоком через рівні інтервали часу. Ширина сліду та розміри окремих вихорів мають порядок діаметра циліндра.

На рис. 3 представлено зміну зони переміжності та характеру ламінарнотурбулентного переходу від числа Рейнольдса. Зі збільшенням числа Рейнольдса зона ламінарно-турбулентного переходу зміщується вверх по потоку та змінюється характер переходу від відривного до природнього. Встановлено залежності осереднених коефіцієнтів сили лобового опору та підйомної сили, а також чисел Струхаля від числа Рейнольдса, що отримано за допомогою моделей SA і SARC+TR, які порівнюються з експериментальними даними. Застосування моделі ламінарно-турбулентного переходу якісно та кількісно поліпшує результати чисельного моделювання. Показано, що при низьких числах Рейнольдса, коли обтікання циліндра носить ламінарний характер, а слід є турбулентним, використання моделі турбулентності SA призводить до розвитку турбулентного примежового шару на циліндрі та, як наслідок, до зміни положення точки відриву.



Рисунок 2 – Контури завихрення при обтіканні циліндра для різних чисел Рейнольдса:  $a - Re = 10^4$ ,  $6 - Re = 10^5$ ,  $B - Re = 10^6$ ,  $r - Re = 10^7$ 



 $\delta - Re = 10^5$ ,  $B - Re = 10^6$ ,  $\Gamma - Re = 10^7$ 

Чисельне моделювання ламінарно-турбулентного переходу при обтіканні профілю NACA 4412. Ще однієї задачею, на якій проводилося тестування  $\gamma$ - $Re_{\theta}$  моделі ламінарно-турбулентного переходу спільно з моделями турбулентності SA і SARC, було докритичне та закритичне обтікання аеродинамічного профілю NACA 4412 турбулентним потоком.

Ізобари при обтіканні профілю NACA 4412 для кутів атаки 12° і 18° наведено на рис. 4. Результати отримано за допомогою моделей турбулентності SA і SARC з використанням  $\gamma$ - $Re_{\theta}$  моделі ламінарно-турбулентного переходу і позначено як SA+TR і SARC+TR, відповідно. При закритичному режимі обтікання профілю NACA 4412 основну роль відіграє вже не ламінарно-турбулентний перехід, а врахування кривизни ліній течії. Модель турбулентності SARC зменшує генерацію турбулентності в областях великої кривизни ліній течії. Таким чином, досягається реалістична картина обтікання та більш якісне відновлення тиску в області відриву. Розподіл коефіцієнта тиску та тертя для моделі SARC+TR отримано шляхом осереднення за часом нестаціонарних коефіцієнтів. Положення точки відриву відповідає координаті x/c = 0.15. У той же час моделі SA i SA+TR дають зміщені значення положення точки відриву x/c = 0.58 і x/c = 0.6, відповідно.



Рисунок 4 – Ізобари при обтіканні профілю NACA 4412 для кута атаки 12° (а, в, д) та 18° (б, г, е): а, б – SA; в, г – SA+TR; д, е – SARC+TR



Рисунок 5 – Розподіл коефіцієнта тиску по поверхні профілю NACA 4412 при куті атаки 12°(а) та 18°(б) (□ – експеримент [Wadcock (1987)])

#### Розділ 5. Аеродинаміка елементів енергетичних і транспортних систем

Чисельне моделювання турбулентного обтікання Ј-профілю. Турбулентне обтікання Ј-профілю в широкому діапазоні кутів атаки носить нестаціонарний характер. На якість відтворення масивних вихорів і течії в цілому ключову роль відіграє вибір підходу до моделювання турбулентності.

Істотні нестаціонарні явища спостерігаються при великих кутах атаки профілю, хоча застосовувані підходи дають дещо різну чисельну реконструкцію структури потоку (рис. 6). Використання моделі SALSA призводить до масивного відриву з формуванням у верхній частині профілю одного великого вихору, сумірного за розмірами з хордою профілю. Наявність масивних вихорів у підвітряній області профілю пов'язана зі слабким відновленням тиску в цій області, що дає завищені значення осередненого коефіцієнта лобового опору (рис. 7 а). У той самий час, застосування DDES підходу призводить до формування дещо меншої зони відриву із серією дрібних вихорів більшої інтенсивності (рис. 6). Така картина обтікання є

17

більш реалістичною та забезпечує краще узгодження з експериментальними даними (рис. 7). Загальна тенденція така: чим масивніший відрив, тим більша розбіжність між розрахунковими даними, отриманими за допомогою моделі SALSA і експериментальними даними, особливо для осередненого за часом коефіцієнта лобового опору (рис. 7 а).



Рисунок 6 – Розвиток течії при обтіканні Ј-профілю (кут атаки 90°) за моделями турбулентності SALSA (а) і DDES (б)



Рисунок 7 – Залежність коефіцієнтів лобового опору (а) і підйомної сили (б) Ј-профілю від кута атаки (о – експеримент [Тарасов та ін. (2017)])

аеродинаміки профілів Математичне моделювання симетричної та несиметричної форми. Проведено математичне моделювання аеродинаміки профілів замкнутого (JC) та розімкнутих контурів (J0, J1, J2) для діапазону кутів атаки -15°...15°. Основною метою даних досліджень було визначення впливу ступеня замкнутості несиметричного Ј-профілю на його аеродинамічні характеристики та порівняння їх зі значеннями для симетричного профілю NACA 0025, а також з Турбулентне обтікання профілів замкненого і експериментальними даними. розімкненого контурів з симетричною та несиметричною формами при куті атаки -15° носить стаціонарний відривний характер, в той час як для кута 15° спостерігався яскраво виражений нестаціонарний характер обтікання. Збільшення кута атаки призводить до зростання коефіцієнта лобового опору профілів. У той же час несиметричні профілі з розімкненим контуром мають набагато більші значення (за модулем) коефіцієнтів підйомної сили, ніж симетричний профіль NACA 0025.



Рисунок 8 – Турбулентне обтікання профілів замкненого і розімкненого контуру симетричної і несиметричної форми при кутах атаки –15°(а) та 15°(б)



Рисунок 9 – Залежність коефіцієнтів лобового опору (а) і підйомної сили (б) профілів різної форми від кута атаки (-+- – експеримент [Тарасов та ін. (2017)], ■ – експеримент [Sheldahl et al. (1981)])

Динаміка та аеродинаміка трьохелементного профілю. Трьохелементний профіль 30Р30N складається з передкрилка, основного профілю та закрилка. Розглядається дві конфігурації: крейсерська (конфігурація *A*) і злітно-посадкова (конфігурація *B*).

Трьохелементний профіль 30Р30N у крейсерській конфігурації поводиться так як і одноелементний профіль. При малих кутах атаки обтікання профілю носить приєднаний характер (рис. 10 а, в), а при кутах 16° і вище (закритичний режим), відрив потоку відбувається поблизу передньої кромки передкрилка (рис. 10 д).

Для кута атаки 0° картина течії характеризується безвідривним режимом за винятком областей, де відрив потоку відбувається з гострих крайок (внутрішня частина передкрилка та область у хвостовій частині основного профілю). У середині цих областей виникають рециркуляційні зони. Про це свідчать ізолінії модуля швидкості (рис. 10), які побудовано біля трьохелементного профілю 30Р30N. Зі збільшенням кута атаки розміри відривної зони на внутрішній поверхні передкрилка зменшуються (рис. 10), а в хвостовій частині основного профілю залишаються

19

майже незмінними. При куті атаки 8.109° відрив потоку спостерігається поблизу задньої кромки закрилка. Відновлення тиску за точкою відриву при чисельному моделюванні відбувається досить слабко. Для кута атаки 23.393° наочно видно потік повітря, що утворюється на верхній поверхні основного профілю. Формування цієї течії обумовлено прискоренням потоку між передкрилком і передньою кромкою основного профілю. Наявність зазору між основним профілем і закрилком призводить до інтерференції струменевих течій на верхній поверхні закрилка.

Розподіл коефіцієнта тиску по поверхні профілю для кута атаки  $\alpha = 23.393^{\circ}$ Отримані задовільно співпадають рис. 11. результати наведено на 3 експериментальними даними. Отримано залежності коефіцієнтів підйомної сили та сили лобового опору передкрилка, основного профілю, закрилка та профілю в цілому для двох конфігурацій (рис. 12). Для демонстрації можливостей розробленої математичної моделі та спеціалізованого пакета обчислювальної аеродинаміки з розв'язку зв'язаних задач на рис. 13 показано динаміку та аеродинаміку трьохелементного профілю 30Р30N для різних моментів часу. Візуалізацію картини обтікання виконано за допомогою ізобар.



Рисунок 10 – Ізолінії модуля швидкості для конфігурацій A (а, в, д) та B (б, г, е) при різних кутах атаки: а, б –  $\alpha = 0^{\circ}$ ; в, г –  $\alpha = 8.109^{\circ}$ ; д, е –  $\alpha = 23.393^{\circ}$ 



Рисунок 11 – Розподіл коефіцієнта тиску по поверхні профілю (конфігурація В) при куті атаки 23.393° (о – експеримент [Valarezo et al. (1992)], — – дана робота)



Рисунок 12 – Залежність коефіцієнтів підйомної сили (а) і сили лобового опору (б) від кута атаки 30Р30N ( $\circ$ ,  $\Box$ ,  $\diamond$ ,  $\Delta$  – експеримент [Valarezo et al. (1992)], — – дана робота)

Отримані результати якісно узгоджуються з наявними фізичними уявленнями про ефект Коанда, коли потік, що набігає на криволінійну поверхню, відсмоктує повітря в її околі створюючи розрідження, яке притискає потік до поверхні профілю. Завдяки цьому обтікання багатоелементного профілю відбувається без зриву потоку з несучих поверхонь, за винятком невеликих кутових вихорів в областях конструктивного зчленування передкрилка та закрилка з основним профілем.



Рисунок 13 – Динаміка та аеродинаміка трьохелементного профілю 30Р30N при його розкритті із крейсерської конфігурації та переході у злітно-посадкову

Математичне моделювання обтікання профілю транспортного засобу поблизу екрана турбулентним потоком. Для комп'ютерного моделювання обтікання транспортного засобу поблизу екрану турбулентним потоком було обрано компонування наземної транспортної системи (Ground Transportation System – GTS), яка відображає загальну геометрію автотягача з причепом. Виділено фізичні особливості структури течії навколо транспортного засобу (рис. 14 б) та виконано порівняльний аналіз інтегральних і розподілених аеродинамічних характеристик з експериментальними даними (рис. 15).

При обтіканні автотягача із причепом відбувається прискорення потоку в районі кабіни та в зазорі між екраном. Над кабіною водія спостерігається падіння

21

тиску, що обумовлено різким прискоренням потоку в даній області. Надалі тиск відновлюється і стає майже сталим до краю причепа.

У зазорі реалізується рівномірна течія, аналогічна течії в каналі, за винятком невеликої області поблизу кабіни. Відрив потоку виникає у донній частині причепа з гострих кромок, а також у нижній частині кабіни поблизу поверхні.



Отримано розподіл коефіцієнта тиску по поверхні моделі (рис. 15 а). Помітна відмінність коефіцієнта тиску за експериментальними та розрахунковими даними на верхній поверхні, що пов'язано з двовимірною постановкою задачі, у якій напрямок розтікання потоку обмежено на відміну від тривимірної постановки. Це ж проявляється і в розподілі коефіцієнта тертя в передній частині моделі (рис. 15 б). У той самий час загальний розподіл коефіцієнта тертя задовільно узгоджується з експериментальними даними. Розрахункове значення коефіцієнта сили лобового опору складає 0.37, а отримане експериментальним шляхом – 0.27.



Рисунок 15 – Розподіл коефіцієнтів тиску (а) 1 тертя (б) по поверхні автотягача з причепом ( $\circ$  – експеримент (верхня поверхня) [Storms et al. (2001)], — – дана робота)

#### Розділ 6. Динаміка та аеродинаміка роторів вертикально-осьових вітроенергетичних установок

Обтікання вертикально-осьової вітроенергетичної установки з різними геометричними характеристиками роторів Дар'є та Савоніуса. Проведено серію чисельних розрахунків нестаціонарного обтікання вертикально-осьової (ВО) вітроенергетичної установки (ВЕУ) з ортогональними роторами Дар'є та Савоніуса турбулентним потоком вітру для визначення їх характеристик у залежності від зміни діаметра ротора Савоніуса та при різних кутах установки лопаті ротора Дар'є.

У результаті математичного моделювання аеродинаміки ВО ВЕУ виконано реконструкцію структури течії навколо роторів Савоніуса та Дар'є з урахуванням

взаємовпливу, виділено основні стадії формування вихрової структури при обтіканні роторів (рис. 16). Проведено якісні та кількісні оцінки впливу ротора Савоніуса на сумарні аеродинамічні та енергетичні характеристики вертикальноосьової вітроенергетичної установки з роторами Дар'є та Савоніуса. У результаті проведених досліджень розраховано неосереднені коефіцієнти крутного моменту окремих лопатей ротора, а також ВО ВЕУ в цілому від кутового положення (рис. 17). Показано, що основний внесок у крутний момент ВО ВЕУ здійснюється за рахунок ротора Дар'є в основному на навітряній ділянці траєкторії, на частку ротора Савоніуса припадає лише декілька відсотків від загального обсягу виробленого установкою моменту. Встановлено, що наявність ротора Савоніуса в центральній частині ВО ВЕУ призводить до істотного затінення підвітряної ділянки траєкторії лопаті ротора Дар'є, і, отже, до зниження крутного моменту, що генерується. Зменшення діаметру ротора Савоніуса призводить до збільшення аеродинамічних характеристик всієї ВО ВЕУ.

Порівняння аеродинамічних характеристик двох ВО ВЕУ показало, що коефіцієнт крутного моменту більше у ВЕУ з одним тільки ротором Дар'є. Приріст становить 14%. У результаті проведених досліджень встановлено вплив кута установки профілю лопаті ротора Дар'є на аеродинамічну та енергетичну ефективність вертикально-осьової вітроенергетичної установки. Неосереднений коефіцієнт крутного моменту ВО ВЕУ із дволопатевим ротором Дар'є при додатних кутах установки завжди додатний і обтікання лопаті відбувається без динамічного зриву потоку.

Обтікання турбулентним потоком трилопатевого ротора Дар'є. Виконано чисельне моделювання нестаціонарного обтікання вітровим потоком трилопатевого ротора Дар'є. Виділено етапи зародження, розвитку, зриву та дисипації вихорів на різних ділянках траєкторії лопаті. Динамічний зрив потоку з лопаті ротора Дар'є спостерігається на більшій частині траєкторії. Він характеризується відривом потоку з передньої крайки лопаті та формуванням великих вихрових структур, які зносяться вздовж хорди.

Наведено реконструкцію структури течії при роботі трилопатевого ротору Дар'є в умовах динамічного зриву потоку для коефіцієнта швидкохідності  $\lambda = 3$  на основі натурного та обчислювального експериментів (рис. 18). Миттєва картина течії характеризується наявністю системи великих вихорів, які обертаються протилежно один до одного. Спостерігається асиметрія між різними ділянками траєкторії лопаті.

Вихори, що зійшли з лопатей, які рухаються назустріч потоку, в більшості мають більшу інтенсивність, ніж вихори, що зійшли з лопатей, які рухаються за потоком. Це пояснюється тим, що відносна швидкість потоку на цій ділянці траєкторії лопаті вища, ніж на протилежній. Нижче за потоком видно сліди згущень вихорів з лопатей, що рухаються за потоком, після деякої їх дифузії.

Система вихорів, що утворюється, впливає на структуру течії поблизу лопаті ротора Дар'є. Вихори, що зірвалися з лопаті, яка йде попереду, турбулізують потік для лопаті, розташованої за нею. Отримані результати задовільно узгоджуються з наявними експериментальними даними.



Рисунок 16 – Ізобари і контури завихрення при обтіканні ВО ВЕУ: а – з роторами Дар'є та Савоніуса; б – з ротором Дар'є



Рисунок 17 – Зміна коефіцієнтів крутного моменту кожної лопаті ротора Савоніуса (S1, S2), Дар'є (D1, D2) і роторів в цілому (S, D), а також ВО ВЕУ від кута повороту



Рисунок 18 – Візуалізація течії при роботі трилопатевого ротора Дар'є на основі натурного (а) [Яскевич та ін. (1989)] і обчислювального (б) експериментів

#### Розділ 7. Зв'язані задачі плазмової аеродинаміки

Моделювання одиночного мікророзряду. Катодоспрямований стример. Розглянуто механізм формування та розвитку окремого мікророзряду. Проведено детальне вивчення стадій зародження, розвитку та гасіння катодоспрямованого стримера під час роботи плазмового актуатора в нерухомому повітрі в умовах атмосферного тиску. Для адекватного опису зародження, розвитку та проходження стримера використовується змінний крок інтегрування за часом. При цьому виконано аналіз і розглянуто миттєві картини розподілу густини різних хімічних елементів плазми діелектричного бар'єрного розряду, густини об'ємного заряду, компоненти сили Лоренца, сумарного і прикладеного електричного потенціалів, потенціалу від об'ємного та поверхневого зарядів, а також модуля напруженості електричного поля в просторі та в часі. Отримані результати задовільно узгоджуються з експериментальними даними.

На рисунку 19 показано зміну густини різних хімічних елементів плазми діелектричного бар'єрного розряду у просторі та у часі при амплітуді прикладеної напруги 7 кВ і частоті 5 кГц, а також густина результуючого об'ємного заряду та компоненти сили Лоренца, які віднесено до одиниці об'єму. Тут же наведено розподіли сумарного і прикладеного електричного потенціалів, розподіл потенціалу від об'ємного та поверхневого зарядів, а також модуля напруженості електричного поля.

Механізм формування та розвитку окремого мікророзряду складається із трьох послідовних стадій. На першій стадії зі збільшенням прикладеної напруги відбувається зростання напруженості електричного поля поблизу правого краю відкритого електрода. Це призводить до часткової іонізації повітря в області за рахунок формування електронних лавин. На цій стадії концентрація заряджених частинок настільки мала, що результуючий об'ємний заряд практично не впливає на від електродів. Електрони, прискорюючись електричне поле зовнішнє електричному полі, іонізують молекули азоту та кисню поблизу правого краю відкритого електрода, формуючи електронні лавини, а при попаданні на поверхню електрода поглинаються анодом. Коли напруженість електричного поля досягає величини порядку 10<sup>7</sup> В/м, у прианодному шарі відбувається значне зростання густини результуючого заряду, що утворюється позитивними іонами азоту та кисню. На другій стадії процесу відбувається лавино-стримерний перехід, при якому електричне поле просторового заряду головки лавини досягає зовнішнього поля. У цьому випадку потенціал від об'ємного заряду досягає величини прикладеної напруги, що призводить до формування катодоспрямованого стримера.

Надалі повітря іонізується завдяки сильному власному полю стримерної голівки (рис. 19), що призводить до розвитку стримера. Стример починає поширюватися від анода та рухається над поверхнею діелектрика. Усередині каналу стримера густина результуючого заряду близька до нуля та істотна лише на поверхні, особливо у голівці стримера. У результаті напруженість усередині стримерного каналу значно нижча, ніж поза стримером, що якісно узгоджується з наявними фізичними уявленнями. За результатами чисельного моделювання розрахований радіус стримерного каналу  $10^{-4}$  м, густина частинок у ньому  $10^{19}$  ...  $10^{20}$  м<sup>-3</sup>. Швидкість зростання стримера порядку  $10^6$  м/с, що задовільно узгоджується з експериментальними даними. При розвитку стримера поверхня діелектрика

заряджається, оскільки об'ємний заряд, що утворюється, при русі в електричному полі зустрічає перешкоду у вигляді поверхні діелектрика й осідає на ній. Адсорбований заряд спотворює поле розрядного проміжку. У результаті чого напруженість електричного поля у повітрі поблизу електродів слабшає, що призводить до загасання розряду. Позитивний заряд на поверхні діелектрика забезпечують в основному іони азоту  $N_4^+$  та кисню  $O_4^+$ . Розподіл поверхневого заряду на діелектрику (рис. 20 а) наведено для різних моментів часу. На третій стадії основну роль відіграють процеси дифузії та дрейфу заряджених частинок до діелектричної поверхні та відкритого електрода.

Отримано розподіл електричного потенціалу по поверхні діелектрика при максимальній напрузі, яку прикладено до електродів, 7 і 12 кВ (рис. 20 б). Суцільною лінією (—) позначено результати даної роботи, а  $\circ$ ,  $\Box$  – експериментальні дані. Різке падіння напруги на діелектрику обумовлено довжиною поширення стримера і, як наслідок, падінням густини поверхневого заряду. Так, при максимальних значеннях прикладеної напруги 7 і 12 кВ довжина поширення стримера становить L = 0,01 м і L = 0,015 м відповідно. Результати чисельного моделювання показують задовільний збіг з експериментальними даними.



Рисунок 19 – Розподіл густини хімічних елементів плазми (а), об'ємного заряду (б), компонент сили Лоренца (в), сумарного (г) та прикладеного (д) електричного потенціалів, потенціалу від об'ємного і поверхневого зарядів (е), а також модуля напруженості електричного поля (ж)



Рисунок 20 – Розподіл поверхневого заряду на діелектрику для різних моментів часу (а)  $(1 - 2.500772 \cdot 10^{-5} \text{ c}, 2 - 2.500850 \cdot 10^{-5} \text{ c}, 3 - 2.501045 \cdot 10^{-5} \text{ c}, 4 - 2.502314 \cdot 10^{-5} \text{ c}, 5 - 2.504733 \cdot 10^{-5} \text{ c}, 6 - 5.0 \cdot 10^{-5} \text{ c})$  та електричного потенціалу по поверхні діелектрика при максимальному значенні прикладеної напруги (б) ( $\circ$  – експеримент [Enloe et al. (2008)],  $\Box$  – експеримент [Font et al. (2010)], — – дана робота)

Моделювання низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду. У даному пункті розглядається поведінка нерівноважної низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду, яка виникає при роботі плазмового актуатора на плоскій пластині. Однією з основних задач є дослідження внеску заряджених частинок плазми в компоненти сили Лоренца залежно від часу.

Діелектричний бар'єрний розряд має складну просторово-часову структуру і розвивається як розряд дифузійного (таунсендовського) або іскрового (стримерного) типу в залежності від полярності прикладеної напруги.

Коли відкритий електрод стає позитивним (виступає в ролі анода), то такий напівперіод має назву «зворотний хід». У цьому випадку електронна лавина починається з діелектричної поверхні над ізольованим електродом і рухається в напрямку до відкритого електрода. Це призводить до зародження катодоспрямованого стримера поблизу правого краю відкритого електрода.

На стадії формування та розвитку катодоспрямованого стримера відбувається сильна іонізація повітря з формуванням високої густини заряджених частинок порядку  $10^{20}$  1/м<sup>3</sup> у стримерном каналі. При цьому сила Лоренца, що виникає, зосереджена в примежовому шарі товщиною менше 1 мм. Заряджені частинки плазми створюють власний електричний потенціал, який можна порівняти за значенням з прикладеною напругою. Осадження позитивних іонів на поверхню діелектрика призводить до накопичення поверхневого заряду.

Перерозподіл позитивних іонів плазми в області відбувається на стадії гасіння стримера. Позитивні іони азоту та негативні іони практично повністю рекомбінують. Залишаються лише в значній мірі позитивні іони кисню, які й вносять основний внесок у силу Лоренца. При цьому позитивні значення х-компоненти сили Лоренца спостерігаються в значно більшій області, ніж на стадії формування та розвитку катодоспрямованого стримера. У цьому випадку товщина активної зони становить порядку 3 мм.

Коли напруга, яку прикладено до відкритого електрода, має негативне значення (відкритий електрод виступає в ролі катода), такий напівперіод називають «прямий хід». У цьому випадку, коли різниця потенціалів досить велика, відкритий електрод під дією іон-електронної емісії випускає електрони і виникаюча електронна лавина рухається в напрямку до ізольованого електрода.

У результаті її проходження та прилипання електронів до атомів та молекул кисню формуються негативні іони кисню. Вони надають основний внесок у формування позитивно спрямованої х-компоненти сили Лоренца. Позитивні іони групуються в прикатодній області відкритого електрода. Їх взаємодія з відкритим електродом призводить до рекомбінації. У результаті негативна складова х-компоненти сили Лоренца має невелике значення та зосереджена в області біля правого краю відкритого електрода. Встановлено вплив заряджених частинок плазми на формування сили Лоренца від часу (рис. 21). Показано, що основний внесок у її формування на позитивному напівперіоді коливання прикладеної напруги надають іони кисню  $O_4^+$ . Для негативного напівперіоду основний внесок



здійснюється за рахунок негативних іонів кисню, зокрема  $O^{-}$ .

Рисунок 21 – Внесок заряджених частинок плазми в х-компоненту сили Лоренца в залежності від часу

Плазмовий актуатор на пластині. В результаті проведеного чисельного моделювання впливу плазмового актуатора на нерухоме повітря виконано аналіз поля течії, розподілу потенціалу, густини результуючого заряду, а також компонент вектора швидкості в обчислювальній області.

Максимальна зміна електричного потенціалу спостерігається в області між двома електродами. Густина заряду досягає максимальної величини в області над лівим кутом ізольованого електрода. Тонкий шар плазми, що сформувався на поверхні вище ізольованого електрода, захоплює невелику ділянку в околиці правого краю відкритого електрода. Такий розподіл густини заряду відповідає плазмовому профілю, що спостерігається в експериментах.

Отримано розподіл ліній течії та х-компоненти вектора швидкості U в обчислювальній області (рис. 22). У результаті впливу плазмового актуатора утворюється потік повітря, який починається поблизу правого краю відкритого електрода. Взаємодія індукованого розрядом потоку з навколишнім в'язким газом (повітрям) призводить до народження поступово згасаючого із часом вихору.

Повітря всмоктується в область над ізольованим електродом, отримує імпульс за рахунок сили Лоренца, в основному, у поздовжньому напрямку, прискорюється та викидається із цієї області, поступово вповільнюючись і розширюючись.



Рисунок 22 – Розподіл ліній течії та х-компоненти вектора швидкості в обчислювальній області в цілому (а) та поблизу плазмового актуатора (б)

За густиною ліній течії можна судити про інтенсивність течії в пристінній області. Кут розкриття течії за результатами розрахунків становить 11,3°, що якісно узгоджується з експериментальними даними.

У результаті обчислювального експерименту побудовано профілі компонент вектора швидкості U у різних перетинах розрахункової області (рис. 23). Видно, що в перетині  $\bar{x} = 0$  компоненти вектора швидкості близькі до нуля, а в перетині,  $\bar{x} = 0,5$ , який відповідає правому краю відкритого електрода, спостерігається різке збільшення (за модулем) поперечної швидкості.

Це пояснюється тим фактом, що в даній зоні за рахунок прискорення електричним полем частинок плазми починає формуватися реактивна течія повітря. При  $\bar{x} = 0,7$  потік має максимальну швидкість U = 4,5 м/с ( $\bar{U} = 1,5$ ). Надалі течія

починає сповільнюватися та товщати. Так, при  $\bar{x} = 1,0$  значення х-компоненти вектора швидкості вже 4,2 м/с, а при  $\bar{x} = 1,5 - 3,0$  м/с. Результати чисельного моделювання показують задовільний збіг за профілями швидкості в різних перетинах потоку повітря з експериментальними даними.



Рисунок 23 – Профілі х – (а) і у – компонент вектора швидкості U (б) в перетинах  $\overline{x} = 0(1)$ ,  $\overline{x} = 0.5(2)$ ,  $\overline{x} = 1.0(3)$ ,  $\overline{x} = 1.5(4, 7)$ ,  $\overline{x} = 2.0(5, 8)$ ,  $\overline{x} = 2.5(6)$  (1–6 – розрахунок; 7, 8 – експеримент [Durscher et al. (2011)])

Параметричні дослідження плазмового актуатора на пластині. Проведено параметричні дослідження геометричних параметрів плазмових актуаторів та їх вплив на швидкість повітря,

генерується (рис. 24). ШО Результати показали, що зі збільшенням амплітуди напруги прикладеної відбувається зростання швидкості повітря, ЩО генерусться, яка носить асимптотичний характер. Зменшення товщини діелектрика призводить ДО збільшення швидкості повітря, ЩО генерується. Результати чисельного моделювання порівнювалися з експериментальними даними.

 $U_{\rm max}$ , м/с Δ ♦ а = 1 мм (експеримент) а = 2 мм (експеримент) Λ 3 мм (експеримент) 0 = 1 мм (дана робота) 2 мм (дана робота) Δ а = 3 мм (дана робота)  $\varphi_{\rm max}, \kappa B$ 5 10 15 20

Спостерігається задовільне узгодження Рисунок 24 розрахункових та експериментальних швидкості даних [Forte et al. (2006)]. напруги для т

Рисунок 24 – Залежність максимальної швидкості від амплітуди прикладеної напруги для трьох різних товщин діелектрика Плазмовий актуатор на циліндрі. Для розв'язку задачі про керування відривом потоку розглядалися плазмові актуатори, розташовані на циліндрі. Модель являла собою циліндр, зроблений із кварцу (D = 100 мм), із чотирма плазмовими актуаторами згідно з експериментом [Thomas et al. (2008)]. До плазмових актуаторів прикладалась змінна напруга амплітудою 11.5 кВ та частотою 10 кГц. Стінки циліндру були зроблені у формі діелектричного бар'єра товщиною 2.5 мм. Відкритий електрод було виготовлено з мідної фольги шириною 5.6 мм і товщиною 0.04 мм. Ширина ізольованого електрода була 25.4 мм, а товщина – 0.04 мм. Внутрішній діелектрик являв собою 5 шарів каптона товщиною 0.125 мм.

Отримано розподіл електричного потенціалу та густини заряджених частинок поблизу електродів і в області у цілому (рис. 25). Максимальні значення густини результуючого просторового заряду спостерігались в областях з максимальною напруженістю електричного поля.

У результаті впливу чотирьох плазмових актуаторів на нерухоме повітря утворюється течія на тильній стороні циліндру (рис. 26 а). Рух повітря призводить до падіння тиску в даній області, і потік притискається до поверхні циліндра. Виникає щось подібне ефекту Коанда. У сліді формується реактивний потік, який призводить до виникнення рушійної сили (рис. 26 б). Осереднений за часом коефіцієнт рушійної сили дорівнює –0.04.



Рисунок 25 – Розподіл електричного потенціалу (а) і густини заряджених частинок (б) в області



Рисунок 26 – Індукований плазмовим актуатором потік повітря на циліндрі (а) та зміна в часі коефіцієнта рушійної сили циліндра (б)

Керування відривом потоку на циліндрі за допомогою чотирьох плазмових актуаторів. У даній роботі проведено чисельне моделювання впливу діелектричного бар'єрного розряду при роботі чотирьох плазмових актуаторів на потік повітря, що обтікає циліндр, при числі Рейнольдса Re = 30000 (рис. 27). Для візуалізації структури течії в експерименті [Thomas et al. (2008)] застосовувалася димова візуалізація потоку, а в даній роботі використовувалися ізолінії модуля завихрення.

Турбулентне обтікання циліндра характеризується наявністю в сліді вихрової доріжки Кармана. Внаслідок дії сил в'язкості поблизу поверхні частки рідини втрачають частину кінетичної енергії, якої вже недостатньо, щоб подолати підвищення тиску в кормовій частині циліндру. Біля точки відриву формується зворотна течія, з якої розбудовується великий вихор. Через деякий час цей вихор відривається від тіла та спливає вниз за течією. У завихреній зоні за кормовою частиною циліндра, тиск сильно знижений в порівнянні з тиском у незбуреному потоці. На деякій відстані за циліндром формується послідовність вихорів, що обертаються по черзі в різних напрямках.



Рисунок 27 – Турбулентне обтікання циліндра з вимкненими (а, б, в, г) та увімкненими (д, е, ж, з) плазмовими актуаторами (а, в, д, ж – експеримент [Thomas et al. (2008)], б, г, е, з – дана робота)

Увімкнення чотирьох плазмових актуаторів ( $\varphi_{max} = 11.5 \text{ kB}$ ), розташованих на поверхні циліндра ±90°, ±135°, призводить до придушення вихрової доріжки Кармана, і обтікання циліндра носить приєднаний характер (рис. 27).

На рис. 28 наведено розподіли коефіцієнта тиску для різних режимів обтікання кругового циліндру. Суцільна лінія відповідає потенційному безциркуляційному обтіканню  $C_p = 1 - 4\sin^2\theta$ . Тут відбувається повне відновлення донного тиску, що за

умови нехтування силами тертя моделлю ідеальної рідини призводить до парадокса Даламбера – нульовій силі опору. У в'язких течіях тертя вносить порівняно невеликий безпосередній внесок у лобовий опір, однак наявність тертя веде до відриву потоку та істотного перерозподілу тиску на поверхні циліндра. Для

розвиненої доріжки Кармана значення коефіцієнта тиску знаходяться у зоні, позначеній штриховими лініями на рис. 28.

Придушення вихрової Кармана доріжки за допомогою плазмових актуаторів призводить ДО практично повного відновлення донного тиску відповідно, та, суттєвого зниження лобового опору (••• лінія на рис. 28).

Залежність коефіцієнта сили лобового опору кругового циліндра від часу наведено на рис. 29. Видно, що увімкнення плазмових актуаторів призводить до



Рисунок 28 – Розподіл коефіцієнта тиску для різних режимів обтікання кругового циліндра

різкого падіння коефіцієнта сили лобового опору. Залежно від числа Рейнольдса, режиму обтікання (ламінарне, перехідне, турбулентне) та інтенсивності роботи плазмових актуаторів значення коефіцієнта сили лобового опору циліндра  $C_D$  може зменшуватися від 2 до 10 разів.

Отримані результати обтікання циліндра для випадку з вимкненими та увімкненими плазмовими актуаторами задовільно збігаються з експериментальними даними.



Рисунок 29 – Залежність коефіцієнта сили лобового опору кругового циліндра від часу

Додатки. Наведено матрицю лінеаризації джерельних доданків та список публікацій здобувача за темою дисертації.

#### ВИСНОВКИ

У дисертації наведено розв'язок актуальної наукової проблеми, пов'язаної з взаємодією різних фізичних полів у зв'язаних задачах динаміки рідини, газу та низькотемпературної плазми. Вивчено фізичні особливості широкого класу відривних течій за допомогою розробленого спеціалізованого пакету обчислювальної аеродинаміки та електродинаміки. Досліджено нестаціонарні процеси низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду при роботі плазмового актуатора, а також її вплив на структуру повітряних течій з метою керування відривом потоку.

Основні наукові та практичні результати проведених досліджень полягають у наступному:

1. Побудовано нову фізично обґрунтовану математичну модель для дослідження аеродинаміки, електродинаміки, динаміки плазми та хімічної кінетики при моделюванні взаємодії суцільного в'язкого середовища з плазмою діелектричного бар'єрного розряду. Постановка задачі базується на розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса, замкнутих диференціальною моделлю турбулентності, а також моделлю ламінарно-турбулентного переходу і рівнянь, що описують просторово-часову структуру низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду, включаючи нестаціонарні електродинамічні процеси, кінетичні явища та плазмохімічні реакції. Вперше повну  $\gamma$ - $Re_{\theta}$  модель ламінарно-турбулентного переходу адаптовано для використання разом з моделями турбулентності Spalart-Allmaras, SARC i SALSA.

2. Розроблено модифікацію схеми Rogers-Kwak першого і третього порядку точності для конвективних членів. Основна відмінність модифікованої схеми Rogers-Kwak від класичної полягає в тому, що потоки розраховуються з використанням метричних коефіцієнтів на грані контрольного об'єму за значеннями гідродинамічних параметрів в точках. Описано неявний алгоритм для модифікованої схеми Rogers-Kwak першого і третього порядку точності.

3. Побудовано нову взаємно узгоджену систему вихідних рівнянь, що складається з рівняння для електричного потенціалу і рівнянь динаміки частинок плазми. Основною особливістю розробленої чисельно-аналітичної моделі є використання раціональної кількості рівнянь для опису всіх основних нестаціонарних параметрів діелектричного бар'єрного розряду в повітрі. Обрані 14 видів частинок забезпечують високу точність математичного моделювання основних плазмохімічних реакцій, включаючи як поверхневі процеси, так і швидкоплинні явища в просторі (розвиток стримера і електронних лавин).

Вперше введено несиметричну скінченно-об'ємну апроксимацію других похідних для електричного потенціалу в рівняннях для динаміки заряджених частинок плазми з метою збереження фізичного змісту адвекції. Розроблено модифікований чисельно-аналітичний дискретний аналог рівняння Пуассона електричного поля для безпосереднього виділення операторів електричного потенціалу, замість опосередкованого впливу через значення густини заряджених частинок у джерельному доданку, з використанням протипотокової апроксимації густини заряджених частинок у других похідних.

4. Створено спеціалізований програмний пакет для розв'язку зв'язаних задач аеродинаміки, динаміки твердого тіла, електродинаміки та динаміки частинок плазми.

5. Виявлено фізичні особливості обтікання плоскої пластини, кругового циліндру та аеродинамічного профілю на основі чисельного розв'язку нестаціонарних рівнянь Нав'є-Стокса нестисливої рідини з використанням різних моделей турбулентності (SA, SARC і SALSA) і  $\gamma$ - $Re_{\theta}$  моделі ламінарно-турбулентного переходу. Показано, що застосування диференціальної  $\gamma$ - $Re_{\theta}$  моделі ламінарно-турбулентного переходу дозволяє врахувати складні фізичні явища та кількісно поліпшити результати чисельного моделювання.

6. Вперше виявлено вплив ступеня замкнутості Ј-профілю на коефіцієнти сили лобового опору та підйомної сили, а також на структуру обтікання в цілому. Встановлено, що зі збільшенням кута атаки розміри відривної зони на внутрішній поверхні передкрилка багатоелементного профілю 30Р30N зменшуються, а у хвостовій частині основного профілю залишаються практично сталими. Чисельними розрахунками відтворено факт того, що злітно-посадкова конфігурація має більш високі значення коефіцієнта підйомної сили, ніж крейсерська, особливо на великих кутах атаки. Виділено фізичні особливості структури течії навколо наземного транспортного засобу та виконано аналіз коефіцієнтів тиску, тертя, підйомної сили та можливість застосування лобового опору. Показано розробленого сили спеціалізованого CFD пакета до задач аеродинаміки наземного транспорту.

7. Проведено серію чисельних розрахунків нестаціонарного обтікання вертикально-осьової вітроенергетичної установки з роторами Дар'є та Савоніуса турбулентним потоком вітру. Вперше встановлено, що наявність ротора Савоніуса в центральній частині вертикально-осьової вітроенергетичної установки призводить до істотного затінення підвітряної ділянки траєкторії лопаті ротора Дар'є, а, отже, до зниження крутного моменту, що генерується. Показано, що основний внесок у крутний момент вертикально-осьової вітроенергетичної установки здійснюється за рахунок ротора Дар'є в основному на навітряній ділянці траєкторії.

8. Проведено обчислювальних експериментів серію 3 моделювання нестаціонарних процесів низькотемпературної плазми діелектричного бар'єрного розряду при роботі плазмового актуатора, а також її вплив на керування структурою потоку повітря. Вперше встановлено вплив структури частинок плазми та густини заряджених частинок на зміну сили Лоренца від часу. Показано, що основний внесок в формування сили Лоренца на позитивному напівперіоді коливання прикладеної напруги надають іони кисню  $O_{A}^{+}$ . Для негативного напівперіоду основний внесок здійснюється за рахунок негативно заряджених іонів кисню, зокрема  $O^-$ . Проведено параметричні дослідження фізичних і геометричних характеристик плазмових актуаторів та їх вплив на генерацію потоків повітря. Показано, що зі збільшенням амплітуди прикладеної напруги відбувається зростання швидкості повітря, яка носить асимптотичний характер. Зменшення товщини діелектрика призводить до збільшення швидкості повітря, що генерується.

9. Вперше продемонстровано виникнення рушійної сили циліндра в результаті впливу чотирьох плазмових актуаторів на основі діелектричного бар'єрного розряду на повітря, що знаходиться в стані покою. Показано можливість зменшення коефіцієнта опору циліндра за допомогою плазмових актуаторів за рахунок придушення вихрової доріжки Кармана.

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Редчиц Д. А., Приходько А. А. Аэродинамика роторов Дарье и Савониуса. Авиационно-космическая техника и технология. 2007. № 5. С. 26–31 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

2. Редчиц Д. А. Аэродинамика вращающейся лопасти ротора Дарье. Вісник Дніпропетровського університету. 2007. Вип. 11, Т. 2. С. 205–220.

3. Редчиц Д. А. Численное моделирование закритического обтекания профиля турбулентным несжимаемым потоком. Вісник Дніпропетровського університету. 2007. Вип. 11, Т. 1. С. 12–24.

4. Редчиц Д. А. Численное моделирование нестационарных турбулентных отрывных течений при обтекании ротора Савониуса. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 5. С. 53–58.

5. Редчиц Д. А. Численное моделирование обтекания ротора Дарье вертикальноосевой ветроэнергетической установки. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності* конструкцій. 2008. Вип. 12. С. 157–172.

6. Дзензерский В. А. Приходько А. А., Хачапуридзе Н. М., Редчиц Д. А. Моделирование нестационарных турбулентных течений при обтекании подвижных тел сложной геометрии на основе уравнений Навье-Стокса. Вісник Харківського національного університету. 2009. Вип. 11, № 847. С. 283–286 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

7. Редчиц Д. А. Аэродинамика ротора Савониуса. Вісник Дніпропетровського університету. 2009. Вип. 13, Т. 1. С. 27–41.

8. Редчиц Д. А. Математическое моделирование аэродинамических процессов при обтекании вертикально-осевых ветроэнергетических установок. *Вестник Херсонского национального технического университета*. 2009. Вип. 2 (35). С. 374–378.

9. Редчиц Д. А. Математическое моделирование отрывных течений на основе нестационарных уравнений Навье-Стокса. *Научные ведомости Белгородского государственного университета.* 2009. №13 (68). С. 118–146.

10. Prikhod'ko A. A., Redtchits D. A. Numerical modeling of a viscous incompressible unsteady separated flow past a rotating cylinder. *Fluid Dynamics*. 2009. Vol. 44, No. 6. P. 823–829 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

11. Редчиц Д. А. Математическое моделирование физических особенностей турбулентного обтекания многоэлементного профиля. Вестник Херсонского национального технического университета. 2010. Вип. 3 (39). С. 398–403.

12. Тарасов С. В., Яскевич Э. П., Редчиц Д. А., Костюков И. Ю. Математическое моделирование поля течения вокруг одиночной лопасти. Вісник Дніпропетровського університету. 2010. Вип. 14, № 5, Т. 1. С. 152–164 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

13. Редчиц Д. А. Математическое моделирование диэлектрического барьерного разряда при работе плазменного актуатора. Вестник Херсонского национального технического университета. 2011. Вып. 3 (42). С. 359–365.

14. Редчиц Д. А., Гуржий А. А. Численное моделирование эффекта Магнуса при обтекании кругового цилиндра невозмущенным потоком вязкой жидкости. Прикладная гидромеханика. 2012. Т. 14, № 1. С. 63–71 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

15. Редчиц Д. А. Разработка автоматизированного препроцессора для вычислительной гидродинамики. Вісник Дніпропетровського университета. 2012. Т. 20, № 5, Вип. 16, Т. 1. С. 32–43.

16. Тарасов С. В., Редчиц Д. А., Костюков И. Ю. Воспроизведение обтекания трехлопастного ротора Дарье. *Техническая механика*. 2012. № 4. С. 67–75 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

17. Редчиц Д. А. Моделирование воздействия диэлектрического барьерного разряда на находящийся в покое воздух. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. 2012. Вип. 18. С. 161–174.

18. Дзензерский В. А., Тарасов С. В., Редчиц Д. А., Хачапуридзе Н. М. Математическое моделирование аэродинамики вертикально-осевой ветроэнергетической установки с роторами Дарье и Савониуса. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. 2012. Вип. 19. С. 96–111 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

19. Редчиц Д. А Управление отрывом потока воздуха на цилиндре с помощью диэлектрического барьерного разряда. Вісник Харківського національного університету. 2013. №1063. С. 144–159.

20. Редчиц Д. А. Управление отрывом потока воздуха на цилиндре с помощью четырех плазменных актуаторов. Вестник Херсонского национального технического университета. 2013. Вип. 3 (42). С. 286–291.

21. Дзензерский В. А., Редчиц Д. А., Хачапуридзе Н. М., Моисеенко С. В. Аэродинамика трехэлементного профиля 30Р30N в крейсерской и взлетно-посадочной конфигурации. Вісник Дніпропетровського университету. 2013. Т. 21. № 5, Вип. 17. Т. 2. С. 59–68 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

22. Редчиц Д. А., Польовий О. Б., Моисеенко С. В. Управление вихревой дорожкой Кармана с помощью плазменных актуаторов. Вісник Дніпропетровського университету. 2013. Т.21, № 5, Вип. 17, Т. 1. С. 63–80.

23. Редчиц Д. А. Математическая модель диэлектрического барьерного разряда в воздухе *Вестник Херсонского национального технического университета.* 2014. Вып. 3 (50). С. 429–436.

24. Редчиц Д. А. Управление отрывом потока воздуха на цилиндре с помощью плазменных актуаторов. *Техническая механика*. 2014, № 2. С.106–119.

25. Редчиц Д. А. Численное моделирование диэлектрического барьерного разряда в воздухе. *Техническая механика*. 2014, № 4. С. 102–117.

26. Редчиц Д. А. Математическое моделирование плазмы диэлектрического барьерного разряда в воздухе *Вестник Херсонского национального технического университета.* 2015. Вып. 3 (54). С. 452–458.

27. Тарасов С.В., Редчиц Д. А., Полевой О. Б., Чашина И. Б., Моисеенко С. В.

Вычислительная гидродинамика на службе ветроэнергетики. Вісник Дніпропетровського університету. 2016. Т.24, № 5, Вип. 20, Т. 1.С. 38–48 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

28. Редчиц Д. А., Моисеенко С. В. Численное моделирование обтекания турбулентным потоком транспортного средства вблизи экрана. Вестник Херсонского национального технического университета. 2016. Вып. 3 (58). С. 398–402 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

29. Тарасов С. В., Редчиц Д. А., Моисеенко С. В., Тарасов А. С. Численное моделирование процессов аэродинамики вертикально-осевой ветроэнергетической установки. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. 2017. Т. 24, № 5. Вип. 26. С. 153–167 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

30. Тарасов С. В., Редчиц Д. А., Абрамовский Е. Р., Гладенко В. П., Моисеенко С. В., Тарасов А. С. Экспериментальное и численное изучение физических особенностей турбулентного обтекания Ј-лопасти ротора Дарье. Вісник Дніпропетровського університету. 2017. Т. 25, № 5, Вип. 21, Т. 1. С. 12–26 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

31. Тарасов С. В., Редчиц Д. А., Моисеенко С. В., Тарасов А. С. Аэродинамика Јпрофиля в турбулентном потоке воздуха при круговой продувке. Вестник Херсонского национального технического университета. 2017. Вып. 3 (62), Т. 2.С. 208–214 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

32. Редчиц Д. А., Белоусова Т. П., Выгоднер И. В., Ляхович Т. П., Моисеенко С. В. Автоматизированный препроцессор для задач вычислительной аэродинамики. *Региональный межвузовский сборник научных работ.* 2018. Вып. 4 (117). С. 61–71.

33. Тарасов С. В., Редчиц Д. А, Тарасов А. С., Моисеенко С. В. Математическое моделирование турбулентного обтекания симметричных и несимметричных профилей. Вестник Херсонского национального технического университета. 2018. Вып. 3 (66), Т. 1. С. 171–177 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

34. Redchyts D. O., Gourjii A. A., Moiseienko S. V., Bilousova T. P. Aerodynamics of the turbulent flow around a multi-element airfoil in cruse configuration and in takeoff and landing configuration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 5, No 7 (101). P. 36–41 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

35. Редчиц Д. А., Моисеенко С. В., Чашина И. Б., Выгоднер И. В. Обтекание цилиндра и аэродинамического профиля с учетом ламинарно-турбулентного перехода Вестник Днепровского национального университета. 2019. Вып. 23, Т. 27. С. 77–84 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

36. Redchyts D. O., Shkvar E. A. Moiseienko S. V. Control of Karman Vortex Street by using Plasma Actuators. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. 2019. Vol. 15, No 5. P. 509–525 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

37. Redchyts D. O., Shkvar E. A. Moiseienko S. V. Computational Simulation of Turbulent Flow Around Tractor-Trailers. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. 2020. Vol. 16, No 1. P. 91–103 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних та чисельних розрахунків).

#### Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

38. Redchyts D., Zinchenko A., Prykhodko O. Numerical simulation of Darrieus and Savonius wind turbine aerodynamics. *International Congress on Industrial and Applied Mathematics*: proc. of 6th international congress (Zurich, Switzerland, 16-20 July 2007). Zurich. 2007. C. 134–138.

39. Redchyts D. Numerical simulation of wind turbine rotors aerodynamics. PAMM. 2008. Vol. 7, No 1. P. 2100049–2100050.

40. Редчиц Д. А. Численное моделирование нестационарных турбулентных отрывных течений при обтекании роторов Дарье и Савониуса. *Комп'ютерна гідромеханіка:* тези науково-практичної конференції (м. Київ, 30 вересня-1 жовтня 2008 р.). Київ. 2008. С. 43.

41. Редчиц Д. А. Математическое моделирование обтекания трехэлементного профиля 30Р30N. *Комп'ютерна гідромеханіка:* тези науково-практичної конференції (м. Київ, 29-30 вересня 2010 р.). Київ. 2010. С. 34–35.

42. Дзензерский В. А., Хачапуридзе Н. М., Редчиц Д. А., Моисеенко С. В. Численное моделирование турбулентного обтекания многоэлементного профиля. *Методы дискретных особенностей в задачах матфизики:* зб. тез XV международного симпозиума (м. Херсон, 13-18 червня 2011 р.). Херсон. 2011. С. 167–170.

43. Редчиц Д. А., Моисеенко С. В., Пахомова Ю. А. Численное моделирование управления отрывом потока при обтекании цилиндра с помощью плазменных актуаторов. *Тараповские чтения:* зб. тез міжнародної конференції (м. Харків, 30-31 травня 2012 р.). Харків. 2012. С. 92.

44. Редчиц Д. А. Управление отрывом потока воздуха с помощью плазменных актуаторов. *Комп'ютерна гідромеханіка:* тези науково-практичної конференції (м. Київ, 1-2 жовтня 2012 р.). Київ. 2012. С. 22–23.

45. Редчиц Д. А. Математическое моделирование диэлектрического барьерного разряда в воздухе. *Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу:* матеріали IV міжнародної наукової конференції (м. Дніпропетровськ, 1-3 листопада 2012 р.). Дніпропетровськ. 2012. С. 80–83.

46. Дзензерский В. А., Моисеенко С. В., Редчиц Д. А., Хачапуридзе Н. М. Моделирование диэлектрического барьерного разряда при работе плазменного актуатора в подвижной сплошной среде. *Методы дискретных особенностей в задачах математической физики:* труды XVI международного симпозиума (м. Херсон, 8-16 червня 2013 р.). Херсон. 2013. С. 151–154.

47. Редчиц Д. А., Щеглов Г. А, Марчевский И. К. Математическое моделирование аэродинамики ротора вертикально-осевой ветроэнергетической установки. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування:* матеріали IV всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Херсон, 9-11 жовтня 2013 р.). Херсон. 2013. С. 307–311.

48. Редчиц Д. А., Полевой О. Б. Применение уравнений Навье-Стокса для решения прикладных задач аэрогидродинамики. П'ятнадцята міжнародна наукова

конференція імені ак. Кравчука: зб. тез доповідей (м. Київ, 15-17 травня 2014 р.). Київ. 2014. С. 262.

49. Редчиц Д. А., Моисеенко С. В., Пахомова Ю. А. Математическое моделирование турбулентного обтекания трехэлементного профиля 30P30N. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті:* зб. тез доповідей шостої міжнародної науковопрактичної конференції (м. Херсон, 27-29 травня 2014 р.). Херсон. 2014. С. 208–211.

50. Редчиц Д. А. Компьютерное моделирование гидромеханики слабоионизированной плазмы. *Комп'ютерна гідромеханіка:* зб. тез доповідей науковопрактичної конференції (м. Київ, 30 вересня-1 жовтня 2014 р.). Київ. 2014. С. 31–32.

51. Редчиц Д. А. Численно-аналитическая модель диэлектрического барьерного разряда. *Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу:* матеріали V міжнародної наукової конференції (м. Дніпропетровськ, 6-8 листопада 2014 р.). Дніпропетровськ. 2014. С. 77–80.

52. Редчиц Д. А. Численное моделирование плазмы диэлектрического барьерного разряда в воздухе. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: матеріали V всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Херсон, 1-3 жовтня 2014 р.). Херсон. 2014. С. 107–111.

53. Редчиц Д. А. Математическое моделирование слабоионизированной плазмы диэлектрического барьерного разряда в воздухе. *Сучасний стан та проблеми двигунобудування:* матеріали міжнародної науково-технічної конференції (м. Миколаїв, 19-21 листопада 2014 р.). Миколаїв. 2014. С. 247–250.

54. Редчиц Д. А., Полевой О. Б. Математическое моделирование сопряженных задач вычислительной аэродинамики. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті:* міжнародна науково-практична конференція (м. Херсон, 26–28 травня 2015 р.). Херсон. 2015. С. 217–220.

55. Редчиц Д. А. Компьютерное моделирование обтекания профиля транспортного средства вблизи экрана турбулентным потоком. *Информационные технологии в металлургии и машиностроении:* зб. тез научно-технической конференции (м. Дніпро, 29-31 березня 2016 р.). Дніпро. 2016. С. 37.

56. Редчиц Д. А. Математическое моделирование обтекания транспортного средства вблизи экрана. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті:* зб. тез міжнародної науково-практичної конференції (м. Херсон, 24-26 травня 2016 р.). Херсон. 2016. С. 270–273.

57. Редчиц Д. А. Численное моделирование физических процессов при турбулентном обтекании транспортного средства. *Диференціальні рівняння та проблеми аерогідромеханіки й тепломасопереносу:* зб. тез доповідей всеукраїнської наукової конференції (м. Дніпро, 28-30 вересня 2016 р.). Дніпро. 2016. С. 86–87.

58. Редчиц Д. А. Компьютерное моделирование обтекания турбулентным потоком транспортного средства вблизи экрана. *Комп'ютерна гідромеханіка:* тези науковопрактичної конференції (м. Київ, 29-30 вересня 2016 р.). Київ. 2016. С. 52–53.

59. Тарасов С. В., Редчиц Д. А., Моисеенко С. В., Тарасов А. С. Численное моделирование процессов аэродинамики Ј-лопасти ротора Дарье. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті:* зб. тез доповідей міжнародної науковопрактичної конференції (м. Херсон, 23-25 травня 2017 р.). Херсон. 2017. С. 241–243.

60. Редчиц Д. А., Моисеенко С. В. Аэродинамика роторов вертикально-осевых

ветроэнергетических установок. *Безпека життєдіяльності на транспорті і виробництві – освіта, наука, практика:* зб. тез доповідей міжнародної науковопрактичної конференції (м. Херсон, 14-16 вересня 2017 р.). Херсон. 2017. С. 368–373.

61. Тарасов С. В., Редчиц Д. А., Моисеенко С. В., Тарасов А. С. Численное моделирование аэродинамики профилей симметричной и несимметричной формы. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті:* зб. тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (м. Херсон, 29-31 травня 2018 р.). Херсон. 2018. С. 258–260.

62. Тарасов С. В., Редчиц Д. А., Тарасов А. С., Моисеенко С. В. Математическое моделирование аэродинамики симметричных и несимметричных профилей. *Міжнародна конференція з математичного моделювання:* матеріали XIX міжнародної конференції (м. Херсон, 17-21 вересня 2018 р.). Херсон. 2018. С. 31.

63. Редчиц Д. А. Применение методов математического моделирования динамики и аэродинамики к проектированию ветроэнергетических установок. *Сучасні* енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Херсон, 13-14 вересня 2018 р.). Херсон. 2018. С. 233–238.

64. Редчиц Д. А., Тарасов С. В. Компьютерное моделирование аэродинамики симметричных и несимметричных профилей. *Комп'ютерна гідромеханіка:* зб. тез науково-практичної конференції (м. Київ, 26-27 вересня 2018 р.). Київ. 2018. С. 48–49.

65. Редчиц Д. А., Тучина У. Н., Моисеенко С. В. Численное моделирование нестационарных потоков холодной плазмы. *Космические технологии: настоящее и будущее:* зб. тезисов 7-й международной конференции (м. Дніпро, 21-24 травня 2019 р.). Дніпро. 2019. С. 66.

66. Тарасов С. В., Редчиц Д. А., Моисеенко С. В., Тарасов А. С. Математическое моделирование процессов ламинарно-турбулентного перехода в задачах внешней аэродинамики. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті.* зб. тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (м. Херсон, 28-30 травня 2019 р.). Херсон. 2019. С. 258–260.

67. Тарасов С. В., Редчиц Д. А, Тарасов А. С., Моисеенко С. В. Аэродинамика ветроэнергетической установки с роторами Дарье и Савониуса. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування:* матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Херсон, 12-13 вересня 2019 р.). Херсон. 2019. С. 141.

68. Тарасов С. В., Редчиц Д. А., Тарасов А. С., Моисеенко С. В. Численное моделирование ламинарно-турбулентного перехода в задачах аэрогидромеханики. *Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій:* тези міжнародної науково-технічної конференції пам'яті академіка В. І. Моссаковського (м. Дніпро, 10-12 жовтня 2019 р.). Дніпро. 2019. С. 276–277.

69. Тарасов С. В., Редчиц Д. А., Тарасов А. С., Моисеенко С. В. Математическое моделирование турбулентного обтекания цилиндра и аэродинамического профиля с учетом ламинарно-турбулентного перехода. *Міжнародна конференція з математичного моделювання:* матеріали XX міжнародної конференції (м. Херсон, 16-20 вересня 2019 р.). Херсон. 2019. С. 98.

#### АНОТАЦІЯ

*Редчиць Д. О.* Нестаціонарні зв'язані задачі динаміки рідини, газу та низькотемпературної плазми. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.05 «Механіка рідини, газу та плазми». – Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, 2020.

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню нестаціонарних процесів динаміки рідини, газу та низькотемпературної плазми при розв'язанні зв'язаних задач. Вивчено фізичні особливості широкого класу відривних течій за допомогою розробленого спеціалізованого пакету обчислювальної аеродинаміки й електродинаміки.

Розроблено нову фізично обґрунтовану математичну модель розвитку в часі процесів аеродинаміки, електродинаміки, динаміки частинок і хімічної кінетики для моделювання особливостей взаємодії суцільного в'язкого середовища з плазмою діелектричного бар'єрного розряду. У моделі враховуються електронно-збуджені та метастабільні стани молекул азоту та кисню, атоми кисню, електрони, а також позитивні та негативні іони, у цілому 14 частинок і 97 плазмохімічних реакцій, включаючи поверхневі процеси.

Запропоновано модифікацію схеми Rogers-Kwak для конвективних членів першого та третього порядку точності. Основна відмінність модифікованої схеми Rogers-Kwak від класичної полягає в тому, що потоки розраховуються з використанням метричних коефіцієнтів на гранях контрольного об'єму за значеннями гідродинамічних параметрів у точках. Побудовано неявний алгоритм для модифікованої схеми Rogers-Kwak першого й третього порядку точності.

В роботі проведено чисельне вивчення фізичних особливостей турбулентного обтікання Ј-профілю для довільного кута атаки. Вперше виявлено вплив ступеня замкнутості Ј-профілю на коефіцієнти сили лобового опору і підйомної сили, а також на структуру обтікання в цілому.

Показано динаміку та аеродинаміку трьохелементного профілю 30Р30N при його розкритті з крейсерської конфігурації та переході у злітно-посадкову. Проведено розрахунки турбулентного обтікання контуру транспортного засобу поблизу екрану.

Встановлено, що наявність ротора Савоніуса в центральній частині вертикально-осьової ВЕУ призводить до істотного затінення підвітряної ділянки траєкторії лопаті ротора Дар'є, і до зниження крутного моменту, що генерується.

Проведено серію обчислювальних експериментів моделювання 3 нестаціонарних низькотемпературної процесів нерівноважної плазми діелектричного бар'єрного розряду, а також її вплив на керування структурою потоку повітря. Проведено параметричні дослідження геометричних параметрів плазмових актуаторов та їх вплив на швидкість повітря, що генерується. Показано можливість зменшення коефіцієнта опору циліндра за допомогою плазмових актуаторов за рахунок придушення вихрової доріжки Кармана.

*Ключові слова:* керування структурою потоку, діелектричний бар'єрний розряд, низькотемпературна нерівноважна плазма, рівняння Нав'є-Стокса, моделювання турбулентності

#### АННОТАЦИЯ

*Редчиц Д. А.* Нестационарные связанные задачи динамики жидкости, газа и низкотемпературной плазмы. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы». – Институт гидромеханики НАН Украины, Киев, 2020.

Диссертационная работа посвящена исследованию нестационарных процессов динамики жидкости, газа и низкотемпературной плазмы при решении сопряженных задач. Изучены физические особенности широкого класса отрывных течений с помощью разработанного специализированного пакета вычислительной аэродинамики и электродинамики.

Разработана новая физически обоснованная математическая модель развития во аэродинамики, электродинамики, процессов динамики времени частиц И химической кинетики для моделирования особенностей взаимодействия сплошной вязкой среды с плазмой диэлектрического барьерного разряда. В модели учитываются электронно-возбуждённые и метастабильные состояния молекул азота и кислорода, атомы кислорода, электроны, а также положительные и отрицательные ионы, в общей сложности 14 частиц и 97 плазмохимических реакций, включая поверхностные процессы. Предложена модификация схемы Rogers-Kwak для конвективных членов первого и третьего порядка точности. Основное отличие модифицированной схемы Rogers-Kwak от классической состоит в том, что потоки рассчитываются с использованием метрических коэффициентов на гранях контрольного объема по значениям гидродинамических параметров в точках. Построен неявный алгоритм для модифицированной схемы Rogers-Kwak первого и третьего порядка точности.

В работе проведено численное изучение физических особенностей турбулентного обтекания J-профиля для произвольного угла атаки. Впервые выявлено влияние степени замкнутости J-профиля на коэффициенты силы лобового сопротивления и подъемной силы, а также на структуру обтекания в целом.

Показана динамика и аэродинамика трехэлементного профиля 30Р30N при его раскрытии из крейсерской конфигурации и переходе во взлетно-посадочную. Проведены расчеты турбулентного обтекания контура транспортного средства вблизи экрана. Установлено, что наличие ротора Савониуса в центральной части вертикальноосевой ВЭУ приводит к существенному затенению подветренного участка траектории лопасти ротора Дарье, и к снижению генерируемого крутящего момента.

Проведена серия вычислительных экспериментов моделированию по нестационарных низкотемпературной процессов неравновесной плазмы диэлектрического барьерного разряда, а также ее влияние на управление структурой Проведены параметрические исследования геометрических воздуха. потока параметров плазменных актуаторов и их влияние на генерируемую скорость воздуха. Показана возможность уменьшения коэффициента сопротивления цилиндра с помощью плазменных актуаторов за счет подавления вихревой дорожки Кармана.

*Ключевые слова:* управление структурой потока, диэлектрический барьерный разряд, низкотемпературная неравновесная плазма, уравнения Навье-Стокса, моделирование турбулентности

#### **SUMMARY**

# *Redchyts D. O.* Unsteady coupled problems of the dynamics of a liquid, gas, and low-temperature plasma. – Manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of physical-mathematical sciences, specialty 01.02.05 "Mechanics of a liquid, gas and plasma". – Institute of Hydromechanics NAS of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the study of unsteady processes of the dynamics of a liquid, gas, and low-temperature plasma in solving the coupled problems. The physical features of a wide class of separated flows were studied using the developed specialized package of computational aerodynamics and electrodynamics.

New physically based mathematical model of the development of aerodynamics, electrodynamics, particle dynamics and chemical kinetics processes over time was developed to model the interaction features of a continuous viscous medium with plasma of a dielectric barrier discharge. The model takes into account electronically excited and metastable states of nitrogen and oxygen molecules, oxygen atoms, electrons, as well as positive and negative ions, a total of 14 particles and 97 plasma-chemical reactions, including surface processes. Modification of the Rogers-Kwak scheme for convective terms of the first and third order of accuracy is proposed. An implicit algorithm for the modified first- and third-order Rogers-Kwak scheme is constructed.

The numerical study of the physical features of the turbulent flow around the J-airfoil for an arbitrary angle of attack is carried out. For the first time, the influence of the closure degree of the J-airfoil on the coefficients of drag and lift force, as well as on the flow structure around as a whole, was revealed.

The dynamics and aerodynamics of the three-element airfoil 30P30N are shown when it is opened from a cruising configuration and transferred to a landing. The turbulent flow around the vehicle contour near the screen is calculated. It was established that the presence of a Savonius rotor in the central part of the vertical-axis wind turbine leads to a significant shading of the leeward portion of the trajectory of the Darrieus rotor blade and to a decrease in the generated torque.

A series of computational experiments were conducted to simulate the unsteady processes of a low-temperature nonequilibrium plasma of a dielectric barrier discharge, as well as its influence on the control of the air flow structure. Parametric studies of the geometric parameters of plasma actuators and their influence on the generated air velocity are carried out. The possibility of decreasing the cylinder drag coefficient using plasma actuators by suppressing the Karman vortex street is shown.

*Keywords:* flow structure control, dielectric barrier discharge, low-temperature nonequilibrium plasma, Navier-Stokes equations, turbulence simulation

Редчиць Дмитро Олександрович

# Нестаціонарні зв'язані задачі динаміки рідини, газу та низькотемпературної плазми

(Автореферат)

Підписано до друку 18.03.2020. Формат 60х90/16. Папір офсетний. Друк плоский. Гарнітура Times New Roman. Обл.- вид. арк. 0,84. Ум. друк. арк. 1,16. Наклад 100 прим. Зам. № 971.

Надруковано в «Поліграфцентрі» ФОП Кучугурний Ю.М., Свідоцтво про державну реєстрацію №2224000000073863 м. Дніпро, вул. Воскресенська, 11, 49000, 096 423 60 71