

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГІДРОМЕХАНІКИ**

ЗАГУМЕННИЙ Ярослав Вікторович

УДК 532.517: 532.526.3

**ЗАДАЧІ КЕРУВАННЯ СТРУКТУРОЮ НЕСТАЦІОНАРНИХ ТЕЧІЙ
ТА ІНТЕГРАЛЬНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОБТІЧНИХ ТІЛ**

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 гідромеханіки НАН України, м. Київ.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Воропаєв Генадій Олександрович,
заступник директора з наукової роботи Інституту
гідромеханіки 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 України і Державного
космічного агентства України

доктор фізико-математичних наук, професор
Мадерич Володимир Станіславович,
завідувач відділу моделювання морських та річкових
систем Інституту проблем математичних машин і
систем НАН України

доктор технічних наук, професор
Лимарченко Олег Степанович,
завідувач кафедри механіки суцільних середовищ
механіко-математичного факультету Київського
національного університету імені Тараса Шевченка

Захист відбудеться «15» жовтня 2020 р. о 14.00 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 розіслано «28» серпня 2020 р.

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



С.І. Кріль

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У зв'язку з потребою економії енергетичних ресурсів гостро актуальною залишається проблема керування течіями з метою зниження опору та рівня пульсацій тиску при русі транспортних засобів у водних і повітряних середовищах, а також при транспортуванні рідких та газоподібних речовин через магістральні газо-, нафто- та водопроводи. За середніми оцінками до 70 % споживаного палива транспортного засобу витрачається на подолання в'язкого та індуктивного опору його конструктивних елементів, тому розробка ефективних методів керування примежовим шаром і відривними течіями на обтічних тілах залишається важливою задачею прикладної аерогідродинаміки, що знаходить своє практичне застосування в авіа- і суднобудуванні.

Для керування течіями було розроблено різноманітні методи впливу, що дозволяють ефективно керувати обтіканням, а також вібраційні методи придушення збурень за рахунок штучної генерації протифазної хвилі до власних збурень потоку, серед яких найбільш розповсюдженими є методи LEBU, MEMS, вдув-всмоктування, ріблети, податливі та коливні поверхні тощо. Зокрема, в Інституті гідромеханіки НАН України й по сьогоднішній день тривають теоретичні роботи з розробки методів керування примежовим шаром та відривними течіями на добре і погано обтічних тілах. Було теоретично та експериментально досліджено вплив шкіри гідробіонтів на структуру і динаміку потоку, дано практичні рекомендації щодо параметрів обтічних в'язкопружних покриттів, що забезпечують зниження опору тертя та інтенсивності пульсацій у турбулентному примежовому шарі, а також проведено комплексне вивчення особливостей руху тіла гідробіонтів і умов виникнення пропульсивної сили на коливному обтічному тілі з метою розробки транспортних засобів з деформівною поверхнею або/і коливним крилом в якості робочих елементів.

Проте, організм гідробіонта є надскладною системою зі сформованими протягом довготривалої біологічної еволюції пристосовницькими функціями, що дозволили розвинути найбільш ефективні способи пересування у водному середовищі. Тому теоретичні (чисельні) дослідження умов виникнення інтенсивної пропульсивної сили на обтічному тілі гідробіонта, що відповідає його здатності досягати великих швидкостей плавання, мають носити комплексний характер із врахуванням взаємного впливу потоку, нестационарності руху тіла та податливості шкіряного покриву гідробіонта. У зв'язку з цим виникає необхідність якомога точніше оцінити вплив коливних рухів обтічної поверхні на набігаючий потік рідини, а також дослідити особливості взаємодії пасивно деформівного тіла зі збуреннями потоку, що можливо реалізувати чисельним розв'язанням задач обтікання нестационарно рухомих тіл, зокрема, зв'язаних задач механіки рідини і деформівного твердого (в'язкопружного) тіла з використанням методів динамічних розрахункових сіток.

Дослідження умов виникнення і розвитку вихрових утворень у примежових шарах на добре обтічних поверхнях та у супутньому сліді за погано обтічними тілами є важливими не тільки з практичної точки зору для розробки методів керування течіями та оцінки їх ефективності, а й з позиції фундаментальних досліджень нестационарних процесів виникнення й розвитку турбулентності –

гостро актуальної проблеми, що й досі залишається невирішеною. Тому на сьогоднішній день активно використовуються методи чисельного моделювання і засоби лабораторної візуалізації та експериментального вимірювання характеристик течій з метою проведення фундаментальних досліджень нестационарної вихрової структури примежових шарів на добре обтічних поверхнях в режимі ламінарно-турбулентного переходу, а також процесів формування і розвитку відривних течій на погано обтічних тілах, зокрема, на перешкодах найпростішої форми – циліндрі, похилій пластині, клині тощо.

Один із нових напрямків фундаментальних досліджень течій навколо перешкод пов'язаний із вивченням ефектів стратифікації та дифузії, які є невід'ємною властивістю реальних рідин у навколишньому середовищі і промислових пристроях, густина яких не є постійною внаслідок неоднорідності розподілів концентрації розчинених речовин, зважених часток, температури тощо. Хоча варіації густини, як правило, невеликі, але вони можуть істотно змінювати характер течій рідини, структури вихорів, розподілу сил і моментів за рахунок прояву ряду ефектів, відсутніх в однорідній рідині, зокрема специфічних видів хвиль і тонкої структури середовища. З практичної точки зору наявність малих варіацій густини у стратифікованих рідинах дозволяє візуалізовувати тонку структуру течій навколо перешкод за допомогою тінювих приладів, які реєструють варіації освітленості, лінійно пропорційні горизонтальній компоненті градієнту густини для водного розчину кухонної солі, що зазвичай використовується для створення стійкої неперервної стратифікації.

Більшість практично цінних задач неможливо розв'язувати у повній постановці на основі аналітичних підходів, а лише з використанням різноманітних методів чисельного моделювання, які з появою і розвитком технологій паралельного програмування починають грати все більш важливу роль не тільки у прикладних, а й у фундаментальних дослідженнях. Для розрахунку течій рідин у перехідному ламінарно-турбулентному режимі найбільш доцільним підходом є використання методів прямого чисельного моделювання, які за умов застосування високоточних чисельних схем і високої дискретизації розрахункової області дозволяють найбільш адекватно описувати нестационарні тонкоструктурні процеси формування і розвитку власних збурень у примежових шарах і відривних течіях без використання різноманітних моделей турбулентності. Додаткові засоби прискорення та оптимізації обчислень, зокрема, використання паралельних алгоритмів розрахунку, ефективних ітераційних чисельних процедур, адаптивних динамічних сіток тощо, дають змогу суттєво прискорювати час проведення обчислень у випадку використання високого рівня дискретизації розрахункової області, що відкриває велику перспективу подальшого розвитку методів прямого чисельного моделювання із можливістю їх застосування до розв'язання широкого кола практично цінних задач аерогідродинаміки. Особливої популярності набуває чисельне моделювання нестационарних зв'язаних задач механіки рідини і деформівного твердого тіла, які мають велику практичну цінність і перспективу розвитку в умовах зростаючої швидкості високопродуктивних обчислень.

Актуальність роботи полягає у необхідності досліджень процесів розвитку власних збурень у примежових шарах та вихроутворення в сліді за обтічними

тілами, а також розробки нових та модернізації вже існуючих методів керування течіями, зокрема, на основі чисельного моделювання зв'язаних задач механіки рідини і деформівного твердого тіла.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт Інституту гідромеханіки НАН України, а також в рамках наукових програм, бюджетних тем і фундаментальних досліджень: бюджетна тема відділу гідробіоніки та керування примежовим шаром «Керування характеристиками примежового шару та відривом системою розподілених генераторів вихорів» (номер державної реєстрації 0115U002829); спільний науковий проект НАН України – РФФД «Нелінійні поверхневі хвилі у в'язкій неоднорідній рідині» (проект № 18-01-12); науково-дослідна робота «Моделювання керування динамічною структурою хвильових та вихрових полів у пристінних турбулентних течіях при їх взаємодії з обтічною поверхнею, що деформується, шляхом зміни динамічних і геометричних характеристик цієї поверхні» (номер державної реєстрації 0112U000292); бюджетна комплексна тема «Гідродинаміка та тепло-масообмін багатофазних пристінних течій» (номер державної реєстрації 0117U000498).

Мета дослідження – вивчення умов виникнення і розвитку вихрових утворень у примежовому шарі та супутньому сліді за обтічними тілами, взаємодії різномасштабних структур і їх вплив на локальні та інтегральні гідродинамічні характеристики обтічних тіл в залежності від чисел Рейнольдса і Фруда. Розробка методів керування цими процесами для зменшення опору тертя і тиску. Поставлена мета передбачає такі основні задачі, що підлягають вирішенню в рамках дисертаційної роботи:

- Побудова алгоритмів чисельного розв'язання задач обтікання тіл довільної форми, що здійснюють нестационарний рух за заданим законом у потоці однорідної і стратифікованої рідин, з використанням методів скінченного об'єму та скінчених різниць.
- Розробка чисельного моделювання зв'язаних задач механіки рідини і деформівного в'язкопружного тіла та проведення розрахунків задачі обтікання твердого тіла із жорстко приєднаним до нього хвостовим елементом з в'язкопружного матеріалу.
- Проведення детального параметричного аналізу задач обтікання деформівної поверхні, що коливається за законом біжучої хвилі фіксованої довжини, фазової швидкості та амплітуди, з метою виявлення взаємозв'язку параметрів генерованої хвилі із структурою примежового шару, що формується на обтічній поверхні при перехідних числах Рейнольдса.
- Дослідження структури течії та гідродинамічних характеристик крилового профілю, що здійснює обертово-коливальні рухи у потоці в'язкої нестисливої рідини, в залежності від амплітуди і частоти вимушених коливань, а також характеру руху додаткового хвостового елемента, який може бути як абсолютно жорстким тілом, здійснюючим активні коливання з певною фазовою затримкою відносно загального закону вимушеного руху, так і деформівним тілом, здатним пасивно деформуватися під дією збурень потоку.

- Дослідження розповсюдження збурень течій неперервно стратифікованих та однорідних рідин навколо перешкод в залежності від їх форми, розмірів та положення у широкому діапазоні чисел Рейнольдса і Фруда.
- Класифікація режимів і структурних компонентів стратифікованих течій навколо обтічних перешкод, порівняння результатів розрахунків з даними тіньової лабораторної візуалізації та аналіз впливу ефектів стратифікації на структуру і динаміку течій.

Об'єктом дослідження є течії в'язкої нестисливої рідини в примежових шарах та супутніх слідах за нестаціонарно рухомими тілами.

Предмет дослідження – взаємозв'язок хвильової та вихрової структури течій з інтегральними характеристиками обтічних тіл, процеси хвиле- та вихроутворення навколо нестаціонарно рухомих тіл.

Методами досліджень дисертаційної роботи є чисельні методи механіки рідини і деформівних в'язко-пружних тіл, які реалізовано в C++-програмах власної розробки розрахункового пакету OpenFOAM на основі методу скінченних об'ємів, а також у власних Fortran-програмах з використанням методу скінченних різниць. Розрахунки задач проведено у паралельному режимі з використанням методів декомпозиції розрахункової області та технології MPI на багатоядерних персональних комп'ютерах та кластерних системах.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розроблено методику керування нестаціонарною структурою течій та інтегральними характеристиками обтічних тіл на основі нових алгоритмів прямого чисельного розв'язання задач обтікання тіл, що здійснюють нестаціонарні рухи за заданим законом у потоці рідини.
2. Вперше побудовано алгоритм чисельного розв'язання зв'язаних задач механіки в'язкої нестисливої рідини і в'язкопружного твердого тіла на основі жорстко зв'язаного послідовного ітераційного алгоритму з використанням метода скінченного об'єму на базі оригінальних програмних кодів власної розробки відкритого пакету OpenFOAM, коли для моделювання в'язкопружного матеріалу використовується повна нелінійна Лагранжева постановка і гіпотеза залежності миттєвого значення тензора напружень від усієї передісторії зміни компонент тензора деформацій.
3. На основі розробленого алгоритму чисельного моделювання течій неперервно стратифікованої рідини вперше виконано високороздільні та високоточні розрахунки стратифікованих течій навколо перешкод різної форми в широкому діапазоні чисел Рейнольдса і Фруда, починаючи з надповільних течій, індукованих дифузиею на нерухомій непроникній перешкоді, й аж до нестаціонарного вихрового режиму течії, що відповідає перехідним числам Рейнольдса; проведено порівняння розрахованих полів стратифікованої течії з відповідними тіньовими зображеннями, отриманими з використанням комплексу унікального обладнання для моделювання гідродинамічних процесів в оточуючому середовищі.
4. Встановлено взаємозв'язок вихрової структури течії в примежовому шарі з гідродинамічними характеристиками обтічної поверхні з локальним джерелом збурення у формі біжучої хвилі заданої амплітуди, частоти і фазової

швидкості; визначено параметри біжучої хвилі на обтічній поверхні, при яких якнайдовше зберігається детермінована вихрова структура течії вниз за потоком, що відповідає ефекту затягування переходу течії в примежовому шарі в розвинений турбулентний режим.

5. Визначено умови приєднання відривної течії і виникнення пропульсивної сили на коливному криловому профілі, що здійснює вимушені обертово-коливальні рухи в потоці в'язкої нестисливої рідини, для випадків низькочастотних високоамплітудних і високочастотних низькоамплітудних коливань, що відповідають умовам імпульсного розгону і підтримання швидкісного режиму руху гідробіонтів.
6. Вперше побудовано чисельну модель обтікання крилового профілю з гнучким хвостовиком, який може здійснювати вимушені коливання із певною заданою фазовою затримкою відносно загального закону руху крила або бути пасивно деформівним тілом з в'язкопружного матеріалу, що здійснює рухи під дією збурень потоку і впливом коливань жорсткої частини крилового профілю.
7. Визначено співвідношення між пружними характеристиками, довжиною і частотою локального активного збудження вязкопружного хвостовика крилового профілю, при якому вимушені та вільні коливання деформівного елементу знаходяться у протифазі, що відповідає найбільшому пропульсивному ефекту крила.

Достовірність результатів дисертації забезпечується: використанням фундаментальних законів механіки рідин і деформівних твердих тіл; коректною постановкою граничних та початкових умов; контрольованою точністю чисельних обчислень; шляхом аналізу практичної збіжності та перевірки умов стійкості чисельного розв'язку; узгодженістю отриманих у роботі чисельних результатів з аналітичними, експериментальними та розрахунковими результатами, опублікованими іншими авторами.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає у сформованому комплексному уявленні про фізичні явища, які відбуваються на етапі ламінарно-турбулентного переходу у примежових шарах та супутніх слідах за обтічними тілами, що здійснюють періодичні нестационарні рухи у потоці в'язкої нестисливої рідини. Розроблена методика розв'язання зв'язаних задач механіки рідини і деформівного твердого тіла дає змогу моделювати складні фізичні процеси, які відбуваються під час взаємодії рідини з в'язкопружними тілами, що може бути практично використано при вирішенні широкого спектру промислових і технічних задач. Отримані результати узгодженого чисельного, лабораторного та аналітичного моделювання течій дозволяють оцінювати вплив зовнішніх динамічних факторів і неоднорідності середовища, зокрема, ефектів стратифікації та дифузії рідини на структуру і динаміку течій, що формуються навколо рухомих або нерухомих перешкод. Запропоновані підходи керування течіями та відповідні практичні рекомендації можуть бути використані при проектуванні корпусів технічних пристроїв, над- і підводних транспортних та пересувних засобів з метою зниження опору і рівня пульсацій тиску в авіа- та кораблебудуванні, конструюванні магістральних газо-, нафто- та водопроводів.

Особистий внесок здобувача. Основні результати досліджень були отримані автором самостійно. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових робіт без співавторів. У роботах, опублікованих у співавторстві, постановка задач виконана спільно; здобувачеві належить розробка алгоритмів і програм розрахунку поставлених задач, удосконалення стандартних вирішувачів, утиліт та бібліотек динамічних розрахункових сіток відкритого пакету OpenFOAM, проведення чисельних експериментів, верифікація та тестування розроблених чисельних моделей, порівняння отриманих результатів з даними експериментів і розрахунками інших авторів, аналіз отриманих результатів. Науковому консультанту і співавтору частини робіт Воропаєву Г.А. належить спільна розробка методів курування течіями з використанням деформівних поверхонь, математична постановка розглядуваних задач, вибір методів дослідження та обговорення отриманих результатів. Співавтору інших робіт Чашечкіну Ю.Д. належать лабораторні дані тіньової візуалізації течій, ідеї математичного моделювання, аналіз та обговорення отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися автором або співавторами і обговорювалися на наступних міжнародних конференціях, симпозіумах та семінарах:

- Fluxes and Structures in Fluids: Physics of Geospheres. June 24–27, 2009. Moscow, Russia; September 27–30, 2011. Vladivostok, Russia; June 25–28, 2013. Saint-Petersburg, Russia; June 23–26, 2015. Kaliningrad, Russia; August 8–14, 2018. Vladivostok, Russia;
- Topical Problems of Fluid Mechanics. February 10–12, 2010; February 15–17, 2012, Prague; February 10–12, 2016; 15–17 February, 2017; 21–23 February, 2018; 20–22 February, 2019; 19–21 February, 2020. Prague, Czech Republic;
- Approximation Methods for Molecular Modelling and Diagnosis Tools. January 26–30, 2017; 18–22 March 2019. Kyiv;
- Vortex Flows and Vortex Models. 19–22 September 2016. Rostock, Germany; 15–18 October 2018. Xi'an, China;
- General Assembly of European Geosciences Union. May 02–07, 2010; 03–08 April, 2011. Vienna, Austria;
- Turbulent Mixing and Beyond. 27 July – 7 August, 2009; August 21–28, 2011; August 04–09, 2014; 14–18 August, 2017. Trieste, Italy;
- Advanced Polymer Science and Turbulent Drag Reduction. March 10–20, 2008. Trieste, Italy;
- 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 07–10 January, 2008. Reno, USA;
- Dynamical System Modelling and Stability Investigation. 25–27 May, 2011; 22–24 May, 2019. Kyiv;
- Акустичний симпозіум “Консонанс”. 27–29 вересня, 2011; 01–02 жовтня 2013. Київ;
- Компютерна гідромеханіка, 30 вересня – 1 жовтня, 2008; 29–30 вересня, 2010; 1–2 жовтня, 30 вересня – 1 жовтня 2014; 29–30 вересня, 2016; 26–27 вересня, 2018. Київ;

- Інноваційні технології. 20–21 листопада, 2019. НАУ. Київ;
- Методи дискретних особливостей у задачах математичної фізики. 24–27 червня, 2019. Одеса;
- Гідроаеромеханіки в інженерній практиці. НТТУ «КПІ». 27–30 травня, 2019 Київ;
- European Drag Reduction and Flow Control Meeting. ERCOFTAC. 02–04 September. 2010. Kyiv; March 26–29, 2019. Bad Herrenalb, Germany;
- High Performance Computing. HPC-UA. October 07–11, 2013. October 22–23, 2018. Kyiv;
- Cluster Computations. CC'13. June 03–05, 2013. Lviv;
- Обчислювальна і прикладна математика. 10–11 вересня, 2012. Київ;
- Cloud Computing: Education, Investigations, Developments. December 6–7, 2012; December 5–6, 2013; December 4–5, 2014. Moscow, Russia;
- Waves and Vortices in Complex Media. November 30 – December 2, 2010; December 3–5, 2012; November 26–29, 2013; November 25–28, 2014; June 21–13 2015; November 30 – December 2, 2016; December 7–9, 2017; December 5–7, 2018; December 3–5, 2019. Moscow, Russia;
- Russian Supercomputing Days. September 26–27, 2016. Moscow, Russia;
- IUTAM Symposium 12–3 = GA.10-08 “Waves in Fluids: Effects of Non-linearity, Rotation, Stratification and Dissipation”. June 18–22, 2012. Moscow, Russia;
- Colloquium Euromech 531 “Vortices and waves: Identifications and Mutual Influences”. June 21–24, 2011. Moscow, Russia;
- Marine Measurements in Geophysics and Hydrophysics. September 22–26, 2011; June 23–26, 2015; August 11–14, 2018. Vladivostok, Russia;

У завершеному вигляді дисертація доповідалась і обговорювалась на Республіканському семінарі з гідромеханіки, який проводився в Інституті гідромеханіки НАН України 23 січня 2020 року під керівництвом академіка НАН України В.Т. Грінченка. Робота здобула позитивну оцінку.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано загалом 118 наукових робіт, з яких 33 статті у фахових вітчизняних та зарубіжних виданнях, 85 робіт у збірниках праць та тез міжнародних конференцій, 18 наукових робіт без співавторства, 20 статей опубліковано у наукових виданнях, індексованих у міжнародних наукометричних базах Scopus або Web of Science.

Структура й обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, восьми розділів, висновків та списку використаних джерел з 330 найменувань. Робота включає 312 сторінки основного тексту, 118 рисунків, 3 таблиці, усього 380 сторінок.

Автор висловлює щиру вдячність науковому консультантові доктору фізико-математичних наук, професору, член-кор. НАН України Геннадію Олександровичу Воропаєву за постійну увагу до роботи, допомогу у постановці задач та обговорення результатів розрахунків, а також доктору фізико-математичних наук, професору Юлію Димитровичу Чашечкіну за допомогу у розробці математичних моделей стратифікованих течій, обговорення результатів та надання даних лабораторної тіншової візуалізації для порівняння з чисельними розрахунками.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито сутність і стан наукової проблеми, обґрунтовано важливість і актуальність теми дисертації, викладено мету роботи та сформульовано основні положення, що виносяться на захист, її практичне значення та наукова новизна. Також наведено дані щодо апробації та структури роботи.

У першому розділі коротко представлено і описано існуючі активні та пасивні методи керування течіями та інтегральними гідродинамічними характеристиками обтічних тіл, а також здійснено аналіз сучасного стану питання. Найбільш детально розкрито проблематику керування потоком за допомогою деформівних поверхонь та коливних тіл з метою затягування ламінарно-турбулентного переходу та запобігання відриву течій, що є ключовими положеннями даної дисертаційної роботи. Вагомий внесок у вирішення проблеми дослідження процесів виникнення та розвитку збурень у примежових шарах на добре обтічних поверхнях та розробки методів керування вихровими структурами внесли представники світової та української наукових шкіл, зокрема відомі дослідники: Benjamin T., Landahl M., Nonweiler T., Carpenter P., Yeo K., Thomas M., Looney R., Lissaman P., Hansen R., McMichael J., Choi K., Gad-el-Hak M., Lee T., Козлов Л. Ф., Семенов Б. Н., Бабенко В. В., Воропаєв Г. О., Амфілохіїв В. Б., Мануйлович С. В., Ступін О. Б., Коробов В. І. та ін. Дослідженнями структури і динаміки течій навколо коливного крила та розробкою методів керування відривом з метою генерації пропульсивної сили займалися такі вчені: Fish F. E., Hess F., Ashraf M. A., Xiao Q., Young J., Platzer M. F., Rostami A. B., Голубєв В. В., Романенко Є. В., Горєлов Д. Н., Ахмедов Т. Х., Довгий С. А., Шеховцов О. В. та багато інших. За результатами огляду визначено мету роботи, обрано і обґрунтовано напрями досліджень.

Розробка ефективних методів керування потоком та динамічними характеристиками обтічних тіл вимагає детального теоретичного та експериментального дослідження структури і динаміки течій навколо обтічних тіл. Так, течії в'язкої рідини на добре обтічних поверхнях у режимі ламінарно-турбулентного переходу вимагають детального дослідження структури власних збурень у примежовому шарі і закономірності їх конвективної стійкості, а відривні течії на погано обтічних тілах потребують знань про нестационарні особливості виникнення та розвитку відривних зон і структури супутньої течії в сліді за обтічними тілами. Крім того, такі дослідження мають суттєву фундаментальну цінність, оскільки є безпосередньо пов'язаними з вивченням нестационарних процесів виникнення й розвитку турбулентності – актуальної фундаментальної проблеми, що й досі залишається невирішеною. Тому в даному розділі наводяться важливі експериментальні та теоретичні дані досліджень розвитку у просторі і часі власних збурень примежового шару на добре обтічних поверхнях, а також нестационарної структури відривних течій на погано обтічних тілах, зокрема, перешкодах найпростішої форми – циліндрі та похилій пластині. Особлива увага приділяється аналізу теоретичних та експериментальних досліджень структури і динаміки течій на перешкодах з урахуванням ефектів стратифікації та дифузії – невід'ємних властивостей природніх середовищ внаслідок неоднорідності розподілів концентрації розчинених речовин, зважених частинок, температури

тощо. Дослідженнями течій стратифікованих рідин навколо перешкод, зокрема, вивченням процесів формування внутрішніх хвиль, вихорів та тонкої структури у стратифікованих середовищах, займалися такі світові та українські вчені: Baines P. G., Castro I. P., Voisin B., Phillips O. M., Thorpe S. A., Page M. A., Peacock T., Scase M. M., Bodnár T., Fraunié Ph., Городцов В. А., Теодорович Е. В., Чашечкін Ю. Д., Кістович Ю. В., Міткін В. В., Мадерич В. С., Стеценко О. Г., Нікішов В. І., Терлецька К. В. та багато інших.

У четвертому і п'ятому підрозділах першого розділу проведено стислий огляд існуючих методів керування нестационарною структурою течій та інтегральними характеристиками обтічного тіла шляхом генерування активних локальних коливань його поверхні. Представлено розроблені у даній дисертаційній роботі методики чисельної реалізації задач обтікання нестационарно рухомих тіл, що обґрунтовують методи керування течіями за допомогою деформівних та коливних поверхонь. Одна з розроблених чисельних методик ґрунтується на новостворених алгоритмах розрахунку задач обтікання твердих тіл, що здійснюють нестационарні коливання у потоці рідини за наперед заданим аналітичним законом руху як єдине ціле. Зокрема, розглядається випадок керування потоком за рахунок здійснення активних обертально-коливальних рухів тіла у плоскості обтікання. У рамках другого підходу певна частина поверхні тіла може залишатися нерухомою або здійснювати рух із деякою фазовою затримкою відносно загального закону руху тіла. В одному частинному випадку даного підходу певна частина обтічної поверхні нестационарно деформується у вигляді біжучої хвилі, у другому – вводиться певна фазова затримка руху хвостової частини обтічного крилового профілю відносно загального закону його обертально-коливального руху, тобто реалізується модель активно махаючого хвостового плавника гідробіонту. Третю методику розроблено на основі чисельного моделювання зв'язаних задач механіки в'язкої нестисливої рідини і в'язкопружного твердого тіла шляхом реалізації жорстко зв'язаного послідовного ітераційного алгоритму на кожному часовому кроці. Такий підхід дав можливість розв'язати задачу обтікання жорсткого крилового профілю з в'язкопружним хвостовиком, що може бути як деформівним тілом, пасивно реагуючим на збурення потоку, так і здійснювати додаткові коливні рухи, ініційовані нестационарним рухом основи деформівного елемента. Всі описані методики реалізовано на основі прямого чисельного моделювання тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса та рівнянь руху в'язкопружного середовища з використанням методів динамічних розрахункових сіток у рамках методу скінченного об'єму на базі оригінальних програмних кодів власної розробки відкритого пакету OpenFOAM. Чисельні розрахунки проведено на багатоядерних персональних комп'ютерах, кластерних суперкомп'ютерах Інституту кібернетики НАН України та інших доступних зарубіжних кластерах.

У **другому розділі** сформульовано математичні моделі обтікання нестационарно рухомих тіл та описано методи їх чисельної реалізації. Наводяться приклади розв'язання тестових задач, на яких демонструється ефективність і точність розроблених чисельних підходів.

Фундаментальна система рівнянь механіки рідини і газу, що входить в усі класичні монографії та підручники, базується на універсальних законах збереження

маси, кількості руху і енергії: закон збереження маси для потоку рідини дає рівняння нерозривності, закон збереження кількості руху – векторне рівняння імпульсу, а перший закон термодинаміки – рівняння енергії, до яких додається співвідношення, що встановлює взаємозв'язок між термодинамічними параметрами рідини (тиск, густина, температура) – рівняння стану. У припущенні слабкої стисливості рідини, малості варіацій густини щодо її повного значення, великої теплоємності рідини і порівняно невеликій швидкості руху (обтікання) тіла фундаментальна система може бути скорочена до системи рівнянь механіки нестисливої лінійно стратифікованої рідини, що включає рівняння стану, нерозривності, Нав'є-Стокса в наближенні Бусинеска та дифузії стратифікуючої компоненти:

$$\rho = \rho_{00}(S) = \rho_{00}(\exp(-z/\Lambda) + s), \quad \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho_{00}} \nabla P + \nu \Delta \mathbf{v} - s \mathbf{g}, \quad \frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s = \kappa_s \Delta s + \frac{v_z}{\Lambda}. \quad (1)$$

Тут ρ – густина, P – тиск, $\mathbf{v}$ – вектор швидкості течії, s – збурення солоності (стратифікуючого компонента), що включає коефіцієнт сольового стиснення, $\mathbf{g}$ – вектор прискорення вільного падіння, ν і κ_s – коефіцієнти кінематичної в'язкості і дифузії, відповідно, t – час, ∇ і Δ – оператори Гамільтона і Лапласа. Незбурений розподіл густини характеризується масштабом $\Lambda = (d \ln \rho_0 / dz)^{-1}$, частотою $N = 2\pi/T_b = \sqrt{g/\Lambda}$ та періодом плавучості T_b .

При знехтуванні зміною густини система (1) зводиться до простих рівнянь Нав'є-Стокса і нестисливості для однорідної в'язкої нестисливої рідини:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho_{00}} \nabla P + \nu \Delta \mathbf{v}, \quad \operatorname{div} \mathbf{v} = 0. \quad (2)$$

Система рівнянь (1) доповнюється початковими і граничними умовами:

$$\mathbf{v}|_{t \leq 0} = 0, \quad s|_{t \leq 0} = 0, \quad P|_{t \leq 0} = 0, \quad v_x|_S = v_z|_S = 0, \\ \left[\frac{\partial s}{\partial \mathbf{n}} \right]_S = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}}, \quad v_x|_{x, z \rightarrow \infty} = U, \quad v_z|_{x, z \rightarrow \infty} = 0, \quad (3)$$

де U – швидкість набігаючого потоку на нескінченності, $\mathbf{n}$ – зовнішня нормаль до поверхні перешкоди S . У частинному випадку однорідної рідини, що відповідає системі (2), граничні умови зберігають форму (3) без урахування умови для солоності, оскільки у даному випадку густина рідини вважається постійною.

В залежності від необхідності врахування тих чи інших ефектів (стратифікації, дифузії, теплопровідності, стисливості та ін.) математичне моделювання розглядуваних задач реалізується на основі відповідних систем диференціальних рівнянь: при розрахунку течій стратифікованої рідини навколо перешкод, де особливо важливим є врахування ефектів стратифікації і дифузії, використовується система рівнянь (1), при моделюванні обтікання нестационарно рухомих тіл – спрощена система (2) з відповідними граничними умовами.

Рівняння руху деформованих твердих тіл, матеріали яких мають здатність як накопичувати механічну енергію, так і розсіювати її, можуть бути описані

математично за допомогою моделей теорії в'язкопружності у повній Лагранжевій постановці з використанням гіпотези про миттєву залежність значення тензора напружень від усієї передісторії зміни компонент тензора деформацій, що формально може бути виражено у вигляді інтегрального по часу представлення співвідношення між напруженнями і деформаціями з функціями релаксації у формі затухаючих експонент:

$$\begin{aligned} \rho_b \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2} = \Sigma_{ij,j}, \quad \Sigma_{ij} = \int_0^t \left[\lambda(t-s) \frac{\partial E_{ii}(s)}{\partial s} + 2\mu(t-s) \frac{\partial E_{ij}(s)}{\partial s} \right] ds + \\ \int_0^t \int_0^t \left[\frac{1}{2} \lambda(2t-s-r) \frac{\partial E_{ii}(s)}{\partial s} \frac{\partial E_{ii}(r)}{\partial r} + \mu(2t-s-r) \frac{\partial E_{ij}(s)}{\partial s} \frac{\partial E_{ij}(r)}{\partial r} \right] ds dr, \\ E_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} \right], \quad \lambda(t) = \sum_{j=0}^N \lambda_j \exp(-t/\tau_j), \quad \mu(t) = \sum_{j=0}^N \mu_j \exp(-t/\tau_j), \end{aligned} \quad (4)$$

де $\xi = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3\}$ – вектор переміщення, ρ_b – густина, E і Σ – тензори деформацій і напружень, μ_j і τ_j – набори динамічних модулів і часів релаксації, відповідно.

Граничні умови на жорстко закріпленій частині поверхні в'язкопружного тіла S мають наступний вигляд: $\xi_1|_S = D_1$, $\xi_2|_S = D_2$, $\xi_3|_S = D_3$, а на незакріпленій частині поверхні задаються значення компонент напруження: $\Sigma_{x_2 x_2}|_S = P$, $\Sigma_{x_1 x_2}|_S = Q$, $\Sigma_{x_2 x_3}|_S = R$, де D – вектор вимушеного переміщення границі, P , Q , R – нормальне і дотичні навантаження, які у загальному випадку є функціями координат і часу.

При розгляді зв'язаних задач механіки рідини і деформівного твердого тіла, коли враховується взаємний вплив течії рідини і деформацій матеріалу під дією збурень потоку, рівняння руху для обох середовищ розв'язуються узгоджено. Гідромеханічну і в'язкопружну частини задачі, які описуються математично відповідними системами (2) і (4), пов'язують кінематичні і динамічні граничні умови на поверхні розділу середовищ, що моделюють узгоджений рух рідини і деформівного тіла:

$$\mathbf{v} = \partial \xi / \partial t, \quad -P\mathbf{I} + \nu \rho [\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T] = \Sigma. \quad (5)$$

У наступному підрозділі обговорюються існуючі методи чисельного моделювання, зокрема, проблеми дискретизації конвективних та інерційних членів рівняння Нав'є-Стокса, узгодження полів швидкості і тиску, застосування методів динамічних розрахункових сіток тощо. На основі проведеного аналізу існуючих методів розрахунку обґрунтовано вибір застосованих методів чисельного моделювання для розглядуваних класів задач: дискретизація розрахункової області на основі метода скінченних об'ємів з використанням динамічних розрахункових сіток; пряме чисельне моделювання вихідної системи диференціальних рівнянь без використання моделей турбулентності з високою роздільною здатністю розрахункової області; TVD схеми другого порядку точності з обмежувачем для дискретизації конвективних членів; неявна трьохточкова несиметрична схема

другого порядку с різницями назад для дискретизації похідної за часом; алгоритм PIMPLE для узгодженості полів швидкості і тиску.

Остаточнo, рівняння Нав'є-Стокса і нестисливості (2) у дискретній формі на основі методу скінченних об'ємів на динамічних розрахункових сітках запишеться наступним чином:

$$\begin{aligned} & \frac{3\mathbf{v}_M^n V_m^n - 4\mathbf{v}_M^{n-1} V_m^{n-1} + \mathbf{v}_M^{n-2} V_m^{n-2}}{2\Delta t} + \sum_f (F - \mathbf{S}_f \cdot \mathbf{v}_{sf}^n) \mathbf{v}_f^n - \nu \sum_f \mathbf{S}_f \cdot (\nabla \mathbf{v}^n)_f = \\ & = -\frac{1}{\rho_{00}} (\nabla P^n)_M V_m^n = -\frac{1}{\rho_{00}} \sum_f \mathbf{S}_f P_f^n, \quad \frac{V_m^n - V_m^{n-1}}{\Delta t} + \sum_f \mathbf{S}_f \cdot \mathbf{v}_f^n = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Тут індекси M і f означають, що значення функції приписано до центроїда M і центроїда грані f елементарної комірки, індекси n і m відповідають номерам часового шару і елементарної комірки розрахункової сітки, S і V – площа грані і об'єм комірки, F і $\mathbf{v}_s$ – потік крізь грань f і вектор швидкості руху грані f (внаслідок переміщення розрахункової сітки), відповідно.

У підрозділах 2.2 і 2.3 обґрунтовано вибір чисельних методів і програмного забезпечення для проведення чисельного моделювання розглядуваного класу задач на основі метода скінченних об'ємів з використанням методів динамічних розрахункових сіток. Представлено обчислювальний пакет OpenFOAM з відкритим вихідним кодом, який був використаний для чисельного розв'язання задач: приведено загальну інформацію про особливості чисельного моделювання задач механіки рідини і деформівного твердого тіла в рамках пакету; представлено етапи чисельного моделювання поставлених задач на стадії пре- і постпроцесінга; описано вирішувачі, розроблені особисто автором для чисельної реалізації поставлених задач; вказано фрагменти програмного коду, якими було доповнено стандартні бібліотеки динамічних розрахункових сіток для моделювання деформівної границі. Зазначено основні переваги пакета OpenFOAM: вільне розповсюдження, що дозволяє проводити розрахунки без покупки дорогих ліцензій; відкритість вихідного коду, що дає можливість створювати власні вирішувачі, утиліти і бібліотеки під потреби конкретних задач; можливість отримання консультацій з важливих питань на спеціальних форумах у досвідчених користувачів і розробників пакету; можливість проводити розрахунки задач у паралельному режимі на багатоядерних персональних комп'ютерах і кластерних системах; відсутність необхідності розробки «з нуля» алгоритмів і програмних кодів для реалізації відомих чисельних методів.

Проведено короткий огляд існуючих методів візуалізації результатів чисельного моделювання та обґрунтовано вибір методів візуалізації, що застосовано у даній роботі: для візуалізації тривимірної вихрової структури течій використовується Q-метод внаслідок інваріантності даного підходу щодо перетворення координат і простоти фізичної інтерпретації результату, а для двовимірних течій – поля різних фізичних змінних, включаючи вихідні кінематичні і термодинамічні характеристики – швидкість, тиск, густина, наряду з вторинними, такими як – завихреність, швидкість дисипації механічної енергії, темп бароклінної генерації завихреності тощо, а також поля градієнтів вихідних фізичних змінних.

У підрозділі 2.5 приведено результати верифікації розроблених чисельних моделей, яка показала добру узгодженість отриманих чисельних результатів з відомими аналітичними даними, як у випадку використання статичних (задача Блазіуса – поздовжнє обтікання півплощини), так і динамічних розрахункових сіток (друга задача Стокса – течія поблизу плоскої стінки, що здійснює періодичні коливання у власній площині).

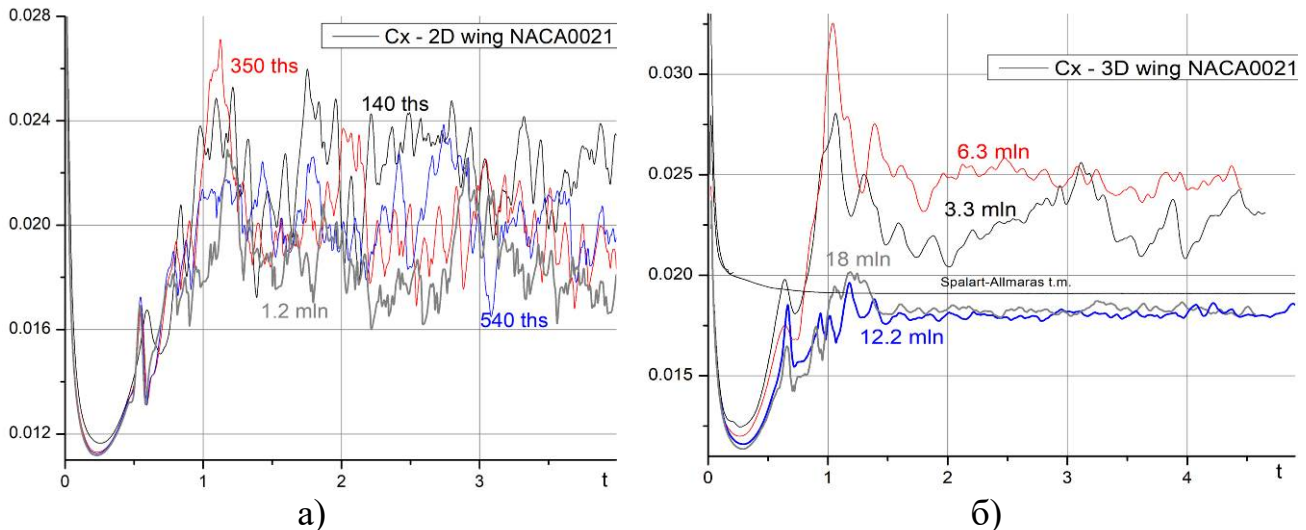


Рис. 1: Зміна у часі коефіцієнту опору при чисельному розв'язанні дво- (а) і тривимірної (б) задач обтікання крилового профілю NACA0021 при подрібненні розрахункової сітки: $U=0.5$ м/с, $\alpha=0^\circ$.

Тестування чисельних моделей на подрібненій розрахунковій сітці для випадків дво- і тривимірного обтікання крилового профілю серії NACA0021 дозволило визначити мінімальну кількість розрахункових комірок, при яких можливо отримати достовірний чисельний результат. Результати порівняння інтегральних характеристик при різному ступені подрібнення розрахункової сітки показали, що для двовимірного випадку достатньо близько $5 \cdot 10^5$ розрахункових комірок для отримання достовірного результату, а для тривимірної моделі – приблизно $1.2 \cdot 10^7$ розрахункових комірок. Дані оцінки, отримані на основі розгляду інтегральних характеристик крила, підтверджуються картинами тривимірної Q-візуалізації вихрової структури течії, які показують практичне співпадіння структур вихрової течії при кількостях розрахункових комірок $1.2 \cdot 10^7$ і $1.8 \cdot 10^7$.

Третій розділ присвячено чисельному дослідженню виникнення та розвитку в просторі і часі збурень примежового шару на локально деформівній обтічній поверхні на основі розроблених алгоритмів чисельного розв'язання задач обтікання тіл, що здійснюють нестационарні рухи за заданим законом у потоці рідини, на основі прямого чисельного моделювання тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса (2) з використанням методів динамічних розрахункових сіток.

Чисельне розв'язання тривимірної задачі обтікання жорсткої поверхні з локальною статичною регулярною неоднорідністю у формі плоскої хвилястої поверхні з фіксованими значеннями амплітуди і довжини хвилі показало, що детермінована плоска структура течії зберігається лише в безпосередній близькості

від джерела статичної неоднорідності на обтічній поверхні, яка досить швидко спотворюється та руйнується, що призводить до стрімкої хаотизації течії вниз за потоком (Рис. 2). Ці результати у порівнянні з відповідними картинами вихрової течії на динамічно деформівній поверхні, зокрема, у вигляді біжучої хвилі у напрямку набігаючого потоку, дають основу для з'ясування якісної та кількісної ефективності керування структурою течії в примежовому шарі за допомогою локально деформівних поверхонь.

На основі проведеної серії розрахунків тривимірного обтікання локально деформівної поверхні у формі плоскої біжучої хвилі заданої амплітуди (A), довжини (λ) і фазової швидкості (C_f) та аналізу отриманих результатів встановлено взаємозв'язок вихрової структури течії в примежовому шарі з інтегральними характеристиками обтічної поверхні. Джерело локального збурення на обтічній поверхні у вигляді плоскої біжучої хвилі призводить до формування квазістійких тривимірних вихрових утворень, форма та особливості розвитку яких вниз за потоком суттєво залежать від параметрів локального деформування поверхні у заданому діапазоні чисел Рейнольдса (Рис. 3). Відповідні розподіли напруження зсуву на обтічній поверхні показують наявність локальних областей як підвищення, так і зниження опору тертя, проте суттєве розширення області детермінованої вихрової структури течії вниз за потоком за рахунок дії локального джерела збурення на обтічній поверхні дає інтегральний ефект зниження опору тертя. Розрахунки показують, що найдовше затягування переходу в розвинений турбулентний режим течії в примежовому шарі відбувається при параметрах біжучої хвилі на обтічній поверхні близьких до відповідних параметрів хвилі нестійкості Толлміна-Шліхтинга, фазова швидкість та довжина хвилі якої оцінюються, як $C_{TS} \approx 0.5U_0$, $\lambda_{TS} \approx 6\delta$. Проте, оскільки товщина примежового шару δ на плоскій обтічній поверхні, а відповідно й довжина хвилі нестійкості Толлміна-Шліхтинга, зростає вниз за потоком прямо пропорційно кореню квадратному від поздовжньої координати ($\delta \sim x^{1/2}$), то ефект затягування переходу в розвинений турбулентний режим течії в примежовому шарі, що проявляється як результат збереження на певній частині обтічної поверхні детермінованої структури течії вниз за потоком, може спостерігатися й при дещо більших значеннях довжини генерованої біжучої хвилі, ніж характерна довжина хвилі Толлміна-Шліхтинга в області локально деформівної поверхні.

У підрозділі 3.4 досліджено вплив протяжності деформівної вставки, коли її довжина у багато разів перевершує довжину біжучої хвилі і вивчається сприйнятливість примежовим шаром вимушених нестационарних збурень на обтічній поверхні. Проведене чисельне моделювання для різних параметрів біжучої хвилі показало, що при значеннях довжини хвилі, менших за характерну довжину плоскої хвилі нестійкості Толлміна-Шліхтинга, та фазовій швидкості, що відповідає швидкості розповсюдження власних збурень у примежовому шарі, структура пристінної течії практично зберігає характер плоского хвильового збурення, що задається на обтічній поверхні.

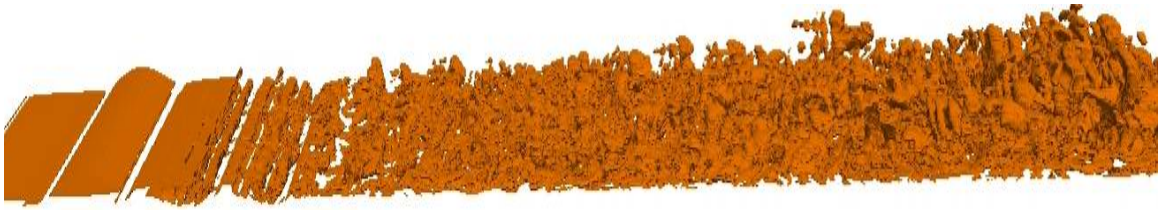


Рис. 2: Тривимірна Q-візуалізація вихрової структури течії за локальною ділянкою статично деформованої обтічної поверхні:
 $Re=2 \cdot 10^4$ ($U_0=0.1$ м/с), $L_0/L=0.1$, $A/\delta=0.1$, $\lambda/\lambda_{TS}=1.2$.

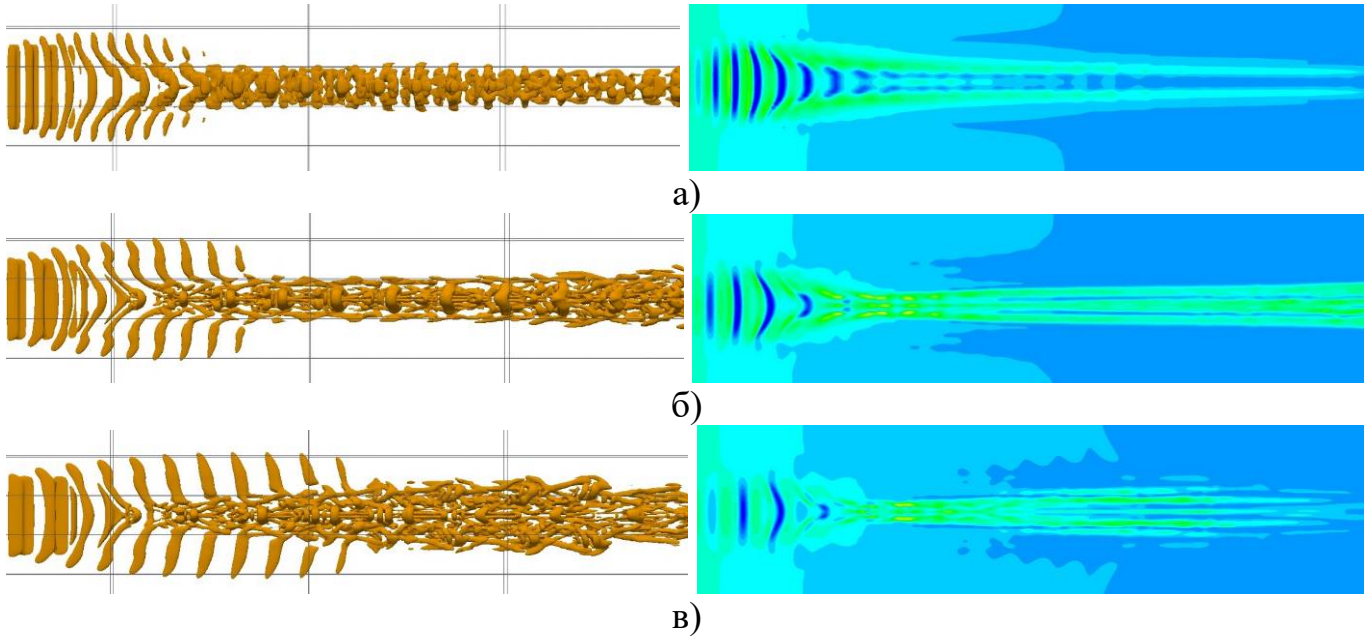


Рис. 3: Тривимірна вихрова структура течії і розподіли напруження зсуву на локально деформівній обтічній поверхні для різних значень довжини біжучої хвилі:
 $Re=2 \cdot 10^4$ ($U_0=0.1$ м/с), $L_0/L=0.1$, $A/\delta=0.1$, $C_f/U_0=0.5$, $\lambda/\lambda_{TS}=1.2; 1.8; 2.4$ (а–в).

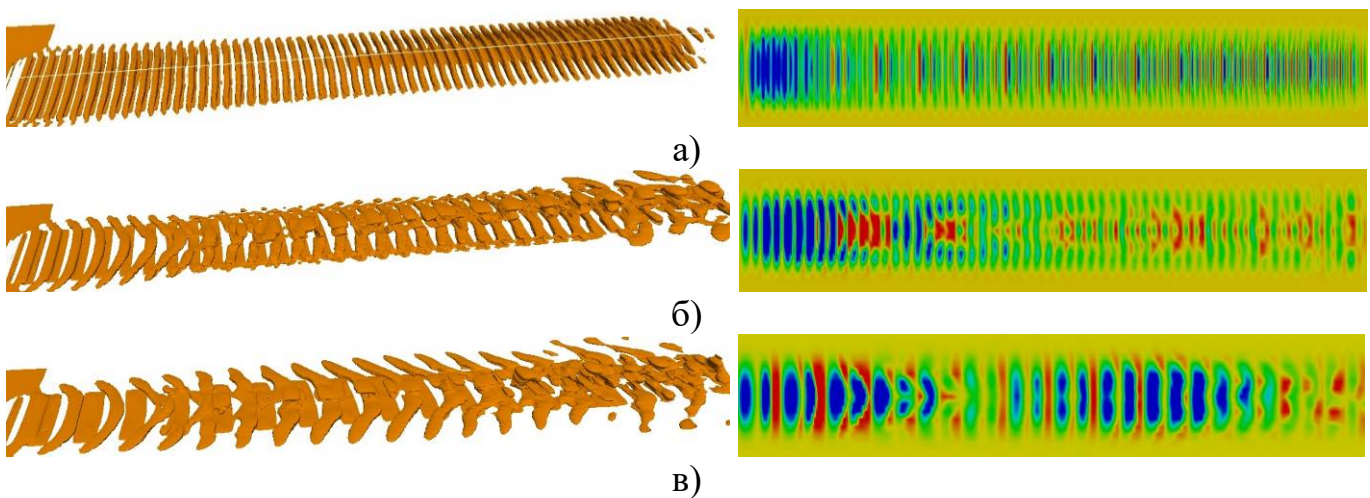


Рис. 4: Тривимірна вихрова структура течії і розподіли кореляції тиску та вертикальної компоненти швидкості на обтічній поверхні з протяжною деформівною областю для різних значень довжини біжучої хвилі:
 $Re=2 \cdot 10^4$ ($U_0=0.1$ м/с), $L_0/L=0.8$, $A/\delta=0.1$, $C_f/U_0=0.5$, $\lambda/\lambda_{TS}=0.5; 1.0; 2.0$ (а–в).

При збільшенні довжини хвилі активних деформацій обтічної поверхні вихрова течія в примежовому шарі приймає багатошарову структуру: в області зовнішньої границі примежового шару починають формуватися структури стійких тривимірних вихрових утворень, які розвиваються вниз за потоком як над деформівною частиною обтічної поверхні, так і у сліді за нею, тоді як у безпосередній близькості від обтічної поверхні структура течії зберігає плоску форму вимушених збурень (Рис. 4). Розподіли на обтічній поверхні кореляції величин вертикальної компоненти швидкості і тиску відображають масштаби збурень у примежовому шарі та механізм перерозподілу енергії по його товщині, що демонструє складні процеси трансформації вихрових структур у примежовому шарі. Із збільшенням довжини біжучої хвилі у початково плоскій структурі розподілів починають проявлятися поздовжні і поперечні неоднорідності, які відповідають областям зародження, трансформації і розпаду тривимірних вихрових структур у примежовому шарі.

Розроблений метод керування потоком дає можливість вибору параметрів локально деформівної обтічної поверхні для керування когерентними вихровими структурами у примежовому шарі оптимальної інтенсивності й масштабів з метою зниження опору тертя та інтенсифікації теплообміну.

Четвертий розділ присвячено дослідженню вихроутворення навколо обтічних крилових профілів на основі побудованого чисельного моделювання, а також розробці методів керування відривними течіями за рахунок здійснення активних обертально-коливних рухів крила у потоці в'язкої нестисливої рідини, що дає можливість в єдиному ключі отримувати гідродинамічні характеристики нестационарно рухомих і нерухомих профілів довільної форми, визначати локальні відриви течій, величини генерованої завихреності, структуру вихрового сліду в залежності від геометрії, частоти і амплітуди коливань профілю.

У першому підрозділі досліджено структуру і динаміку течій у примежовому шарі і супутньому сліді при обтіканні нерухомих крилових профілів серій NASA0010, NASA0015 і NASA0021 під різними кутами атаки. Отримані результати показали, що за міделем товстого профілю (NASA0021) з'являються локальні зони відриву примежового шару навіть при нульовому куті атаки, які, сходячи з відповідної сторони профілю, утворюють збурений слід у вигляді пар дискретних вихорів з протилежними знаками завихреності, що згортаються з певною періодичністю. Зменшення товщини крилового профілю призводить до формування практично безвідривної структури обтікання при кутах атаки близьких до нульового, проте навіть досить невелике збільшенні кута атаки тонкого профілю може призвести до виникнення раннього носового відриву. Дані результати дозволяють дати часткове обґрунтування ефективності розроблюваного методу керування потоком: із зменшенням товщини профілю амплітуда обертальних вимушених коливань має бути зменшена наряду із збільшенням частоти коливань, що у природних аналогах відповідає випадку підтримання швидкісного режиму плавання гідробіонтів.

У наступних підрозділах розглянуто дво- і тривимірні задачі обтікання симетричних крилових профілів NASA0010 і NASA0021, що здійснюють обертально-коливальні рухи з кутовою амплітудою: $\alpha=1^\circ\div 30^\circ$ та частотою коливань: $f=0\div 7.5$ Гц, що відповідає діапазону безрозмірного числа Струхалія: $St=f\cdot L/U_0=0\div 2$.

Отримані результати двовимірного моделювання обтікання коливного крилового профілю $NACA0021$ показують, що при достатньо малих частотах коливань структура вихрової течії слабо відрізняється від такої на нерухомому крилі при максимальному куті атаки з одною важливою відмінністю: характерні вихрові структури супутнього сліду переміщуються вниз за потоком не прямолінійно, а осцилюють як єдине ціле з частотою вимушених коливань крила (Рис. 5). Із збільшенням частоти коливань, як результат інтенсифікації взаємодії власних вихрових збурень із рухомою поверхнею, відбувається виродження власних збурень прилежних шарів і зменшення зони відриву аж до її повного усунення, при цьому процеси вихроутворення цілком визначаються параметрами вимушених коливань.

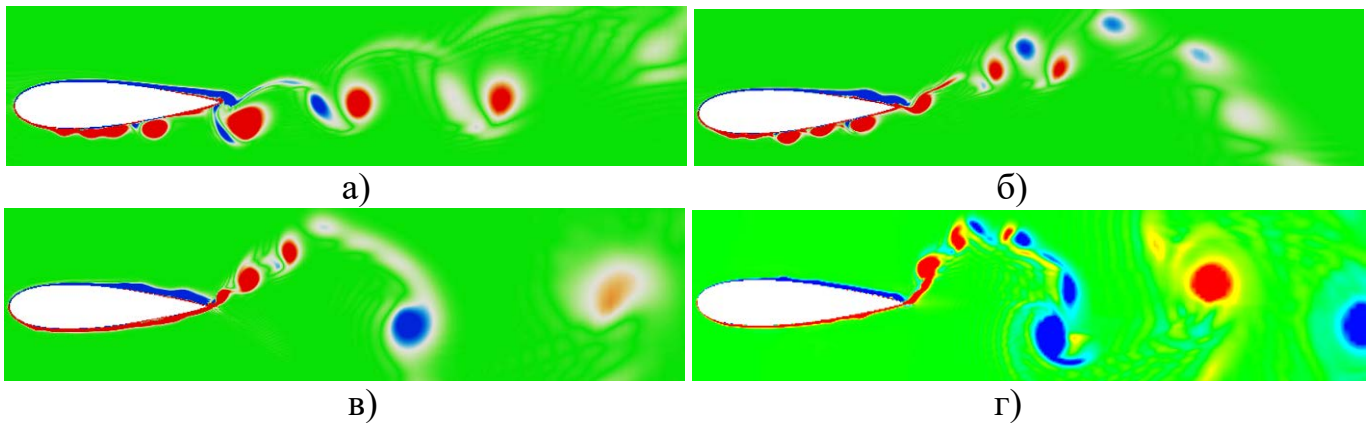


Рис. 5: Вихрова структура течії при обтіканні коливного крила $NACA0021$: $Re=6 \cdot 10^4$, $\alpha=15^\circ$, $St=0.12$ (а), 0.24 (б), 0.48 (в), 0.72 (г).



Рис. 6: Тривимірна вихрова структура течії за обтічним коливним крилом $NACA0021$ для різних частот коливань: $Re=6 \cdot 10^4$, $\alpha=15^\circ$, $St=0.12$, 0.24 , 0.36 (а–в).

Визначено універсальне співвідношення між швидкістю набігаючого потоку та частотою і амплітудою коливань крила, при якому відбувається перехід у режим безвідривного обтікання та встановлення характерної структури супутнього сліду з параметрами вимушених коливань: $St_h = 2f \cdot L_0 \cdot \sin \alpha / U_0 > 0.12$, де L_0 – відстань між центром обертання і задньою кромкою крила, α – максимальний кут відхилення.

Результати тривимірного чисельного моделювання даної задачі підтверджують основні висновки, зроблені на основі двовимірних розрахунків, проте при малих частотах коливання крила структура течії у супутньому сліді має істотно тривимірний характер із переважанням поздовжньо орієнтованих вихрових утворень. Як і у двовимірному випадку, із збільшенням частоти коливань вихрові збурення у супутньому сліді практично вироджуються, і при $St_h > 0.12$ у вихровому сліді починають домінувати плоскі вихрові утворення з параметрами вимушених коливань (Рис. 6). Інтегральні значення гідродинамічних характеристик коливного крила у дво- і тривимірних випадках практично співпадають. Тому розрахунки інтегральних характеристик коливного крила можна проводити у двовимірній постановці, тоді як визначення реальної структури течії вимагає проведення тривимірних розрахунків особливо у випадку малих чисел Струхаля, коли спостерігається домінуючий вплив власних вихрових збурень.

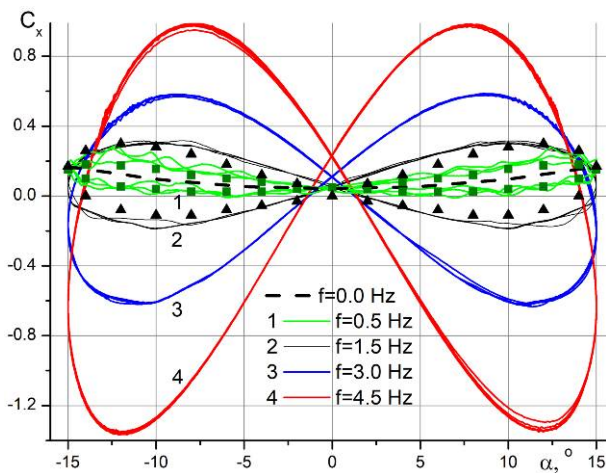


Рис. 7: Інтегральний коефіцієнт опору коливного крилового профілю NACA0021 як функція миттєвого кута атаки: $Re = 6 \cdot 10^4$, $\alpha = 15^\circ$, $St = 0.12$ (1); 0.36 (2); 0.72 (3); 1.08 (4).

вихроутворення на обтічній поверхні, а при прямуванні St до нуля асимптотично наближаються до відповідної кривої обтікання нерухомого профілю під різними кутами атаки. Збільшення частоти коливань профілю призводить до зростання значень інтегрального коефіцієнту опору за абсолютною величиною, а при $St_h > 0.25$ більша частина кривої знаходиться в області від'ємних значень, що свідчить про виникнення пропульсивної сили на коливному криловому профілі. Як видно з Рис. 7, отримані результати розрахунків знаходяться у досить добрій узгодженості з відповідними експериментальними даними, що представлені у роботі [Воропаєв Г.О., Зайнер-Гундерсен Д., Коробов В.І. 2015] і позначені на Рис. 7 фігурними символами: ■ – $St = 0.12$, ▲ – $St = 0.36$.

Залежності інтегральної величини коефіцієнту опору коливного крилового профілю NACA0021 від миттєвого кута атаки для різних значень частоти коливань мають типову «петлеподібну» форму з практично симетричною структурою відносно нейтрального положення профілю, що пояснюється проявом гістерезисних явищ – суттєвою залежністю нестационарної поведінки динамічних характеристик профілю від напрямку його обертово-коливального руху (Рис. 7). При малих числах Струхаля криві залежності коефіцієнту опору від миттєвого кута атаки мають немонотонний характер внаслідок суттєвого впливу процесів власного

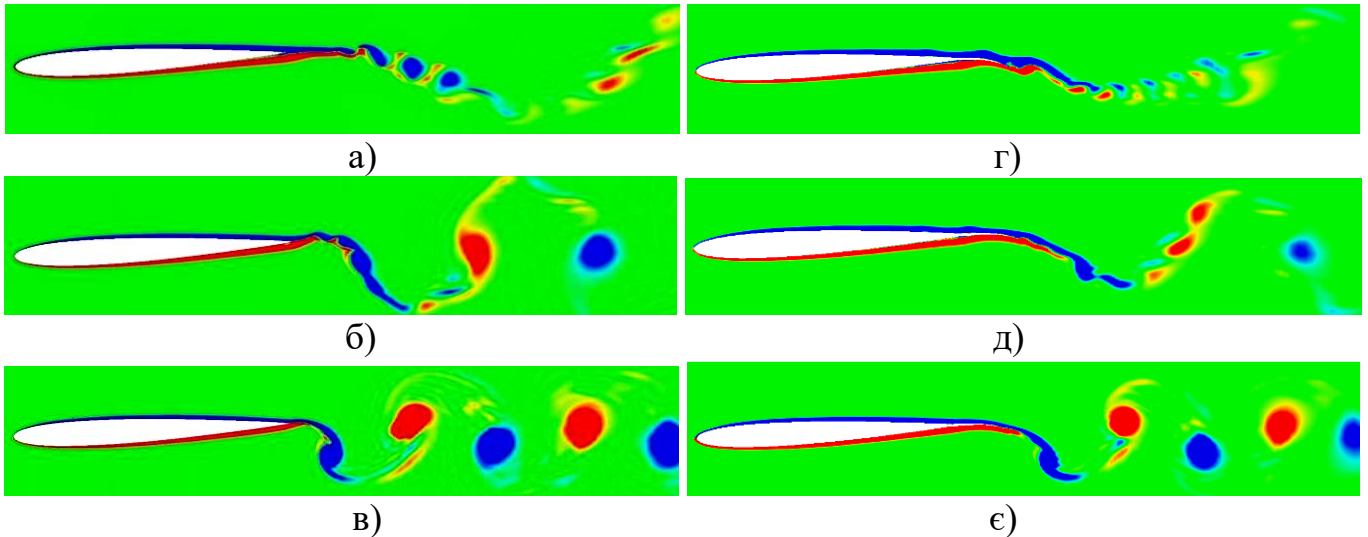


Рис. 8: Вихрова структура течії при обтіканні коливного крилового профілю NASA0010 – стандартної форми (а–в) та з гнучким хвостовим елементом (г–є): $Re=6 \cdot 10^4$, $\alpha=3^\circ$, $St=0.6$ (а, г), 1.2 (б, д), 1.8 (в, є).

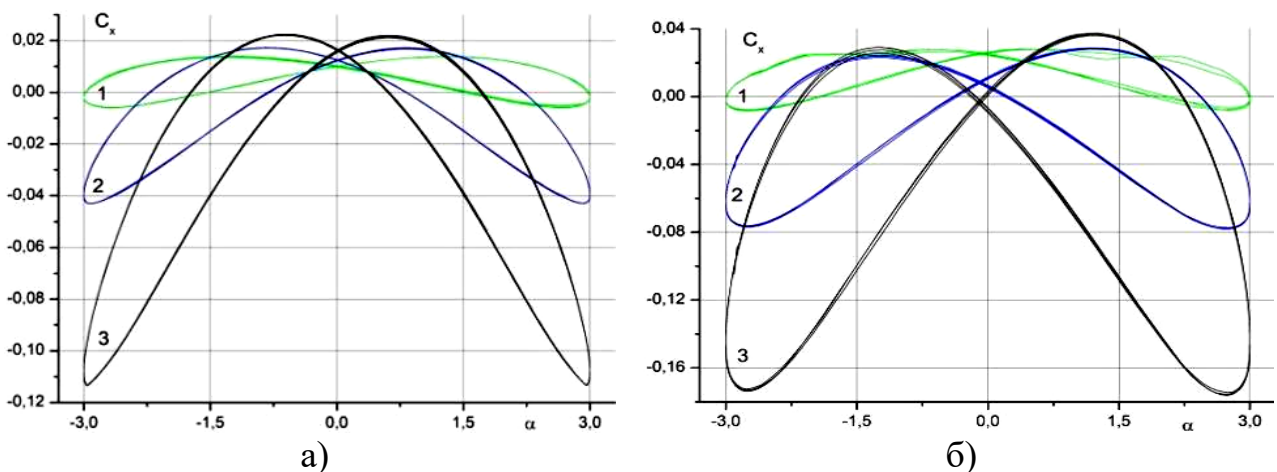


Рис. 9: Інтегральний коефіцієнт опору як функція миттєвого кута атаки коливного профілю NASA0010 (а) і його модифікації з активно гнучким хвостовиком (б): $Re=6 \cdot 10^4$, $\alpha=3^\circ$, $St=0.6$ (1); 1.2 (2); 1.8 (3).

Дослідження структури нестаціонарної течії на тонкому коливному криловому профілі NASA0010, зокрема, модифікованої форми з приєднаним додатковим хвостовим елементом, який може здійснювати рух з певною фазовою затримкою відносно загального закону обертальних коливань профілю, виконано у наступних діапазонах числа Струхалія і амплітуди коливань профілю: $St=0 \div 2$, $\alpha=1 \div 5^\circ$. Чисельні розрахунки показали, що, як й у попередньому випадку, при відносно малих частотах коливань зберігається характерна структура власних вихрових збурень на нерухомому крилі з одною важливою особливістю: при коливному русі профілю вгору домінують переважно вихрові збурення з додатнім знаком завихреності, а при русі вниз – негативним (Рис. 8). При $St_h > 0.12$ власні збурення вироджуються і в сліді починають домінувати компактні вихрові утворення з параметрами вимушених коливань. Наявність гнучкого хвостового елемента, що здійснює активні коливання

з фазовою затримкою $\pi/2$ відносно загального закону руху крила, зменшує інтенсивність завихреності супутнього сліду приблизно у 1.5 разів та помітно звужує область збуреної течії за рахунок реалізації додаткового механізму нестационарного локального впливу на процеси формування і розвитку супутніх вихрових утворень в околиці кормової частини профілю.

Представлені на Рис. 9 криві залежності від миттєвого кута атаки інтегральної величини коефіцієнту опору стандартного та модифікованого коливних крилових профілів серії NASA0010 містять ряд важливих та цікавих особливостей: при коливанні профілю з нейтрального положення у бік збільшення кута атаки інтегральний коефіцієнт опору досягає максимального значення при кутах значно менших максимального кута відхилення, після чого стрімко спадає, досягаючи мінімуму в області максимальних значень миттєвого кута атаки. При наявності гнучкого хвостовика, що здійснює активні коливання з певною фазовою затримкою відносно загального закону руху профілю, максимумами інтегрального коефіцієнту опору зміщуються в область більших значень миттєвого кута атаки, а мінімальні значення досягаються при кутах атаки дещо менших максимального кута відхилення, що візуально проявляється у відносному збільшенні площі фігури, обмеженої замкнутою кривою. Зі збільшенням частоти коливання крилового профілю суттєво зменшується інтегральний коефіцієнт опору в області максимального кута відхилення, а також збільшується величина максимумів, що досягаються при коливанні профілю з нейтрального положення в бік збільшення кута атаки, при чому у випадку модифікованого профілю з додатковим хвостовим елементом величини максимумів практично не змінюються. Криловий профіль з активним гнучким елементом чинить менший опір у порівнянні зі стандартним, а найбільший пропульсивний ефект коливного крила з гнучким хвостовиком, що відповідає області від'ємних значень коефіцієнту опору, спостерігається при фазовій затримці краю хвостового елемента відносно загального закону коливання крила рівній $\pi/2$ і найбільших значеннях амплітуди та частоти його коливань в розглянутих діапазонах.

У п'ятому розділі розглянуто обтікання крилового профілю NASA0021 із пасивно гнучким хвостовиком, що моделюється в'язкопружним матеріалом, і досліджено особливості його нестационарної поведінки в залежності від довжини, пружних властивостей матеріалу хвостовика і параметрів коливання активно рухомої частини профілю, на основі розробленого алгоритму чисельного розв'язання зв'язаних задач механіки в'язкої нестисливої рідини і деформівного твердого тіла.

В якості тестової задачі для перевірки працездатності розробленого алгоритму у першому підрозділі розглянуто двовимірну задачу поперечного обтікання потоком в'язкої нестисливої рідини пружної балки, жорстко закріпленої на одному кінці і вільної на другому. На початковому етапі впливу набігаючого потоку рідини величина прогину балки стрімко зростає, досягаючи максимального значення за проміжок часу, що залежить від відношення довжини балки до швидкості поширення пружної хвилі, а далі поступово спадає, прагнучи до певного постійного значення. У структурі залежностей від часу інтегрального тиску на поверхні балки чітко проглядаються накладені високочастотні осциляції власних коливань балки,

які з часом згасають і встановлюється певне практично незмінне значення. За відомими інтегральними значеннями тиску на поверхні балки, які відповідають результуючій силі, що діє на обтічне тіло з боку рідини, може бути обчислено максимальний прогин балки на основі простої формули опору матеріалів: $Y_{\max} = P_{\text{int}} L^4 / 8E_b J$, де P_{int} – інтегральне значення тиску на поверхні обтічної балки, E_b – модуль пружності, J – осьовий момент інерції, L – довжина балки. Результати чисельних розрахунків добре узгоджуються з теоретичними формулами курсу опору матеріалів, а також даними експериментів по дослідженню форми прогину пружної балки при її обтіканні потоком рідини.

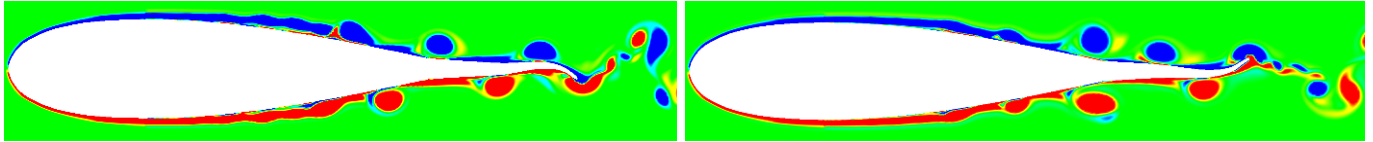


Рис. 10: Миттєва вихрова структура течії навколо крилового профіля NASA0021 з додатковим в'язкопружним хвостовиком у різні моменти часу:
 $U=0.5$ м/с, $\rho=1000$ кг/м³, $\nu=10^{-6}$ м²/с, $E_b=5 \cdot 10^4$ Па, $\nu_b=0.4$, $\rho_b=1000$ кг/м³.

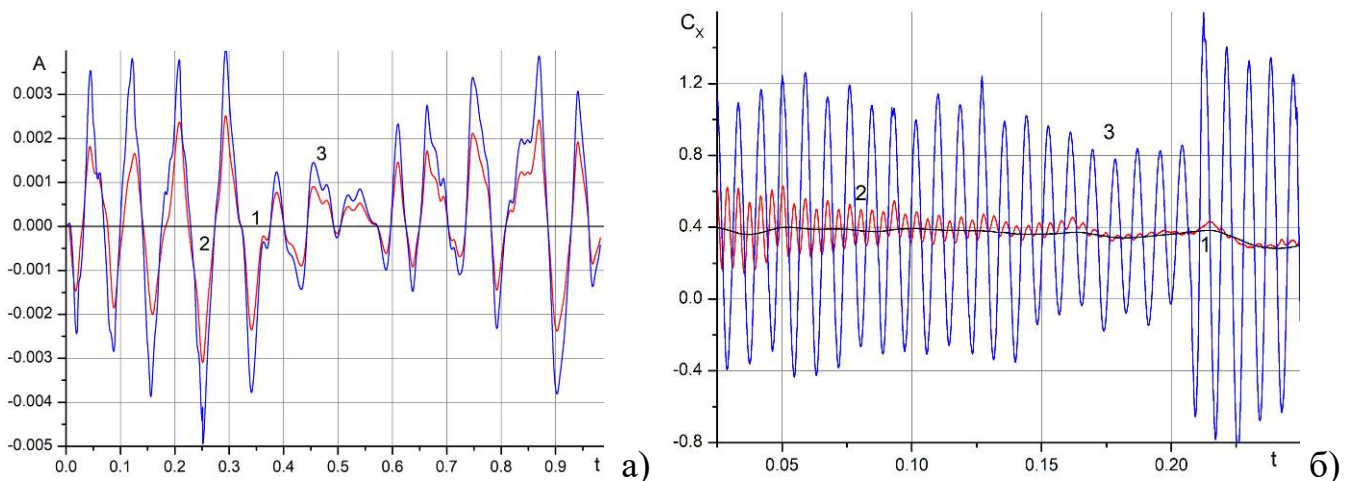


Рис. 11: Амплітуда коливань вільного краю в'язкопружного хвостовика та інтегральний коефіцієнт опору крилового профілю як функції часу при пасивній взаємодії деформівного хвостовика з потоком: $\rho_b=1000$ кг/м³, $\nu_b=0.4$; 1 – $E_b=\infty$, 2 – $E_b=2 \cdot 10^5$ Па, 3 – $E_b=5 \cdot 10^4$ Па.

У підрозділі 5.2 розглянуто задачу обтікання крилового профіля NASA0021 із жорстко приєднаним в'язкопружним хвостовим елементом, який може пасивно деформуватися під дією збурень потоку і чинити зворотній вплив на потік. Характер нестационарного деформування в'язкопружного хвостовика крилового профілю під впливом збурень потоку визначається його локальною взаємодією з ланцюгами дискретних вихрових елементів, що зароджуються в області міделя профілю і дрейфують вниз за потоком вздовж його поверхні (Рис. 10). В результаті цієї взаємодії встановлюється узгоджений з процесами вихроутворення коливний рух хвостовика з характерною частотою, що визначається відношенням середньої швидкості переміщення дискретних вихорів до відстані між ними: $f_v = C_v / \lambda_v \approx 10$ Гц при $U=0.5$ м/с, $\rho=1000$ кг/м³, $\nu=10^{-6}$ м²/с. Зворотній вплив

деформівного хвостовика на вихрову структуру течії зростає із зменшенням величини модуля пружності матеріалу і проявляється у її частковому руйнуванні як результат локальної взаємодії вільного краю хвостовика з окремими вихровими елементами, що сукупно призводить до трансформації всієї супутньої течії і більш швидкого загасання інтенсивності вихрового сліду вниз за потоком (Рис. 11, а). Залежність від часу інтегрального значення коефіцієнту опору профілю при порівняно великих значеннях модуля пружності ($E_b \geq 10^5$ Па) практично повторює відповідні криві на абсолютно жорсткому обтічному профілі з накладеними на них фоновими височастотними низькоамплітудними осциляціями, обумовленими процесами поширення пружних хвиль у матеріалі (Рис. 11, б). Зменшення величини модуля пружності матеріалу призводить до суттєвого зростання амплітуди цих осциляцій, частота яких визначається відношенням швидкості поширення зсувної хвилі у в'язкопружному матеріалі $C_\mu = \sqrt{\mu_b / \rho_b}$ до довжини деформівного хвостовика профілю L_t : $f_e = C_\mu / L_t$, тобто період власних коливань хвостовика визначається часом проходження зсувною хвилею відстані, рівній його довжині.

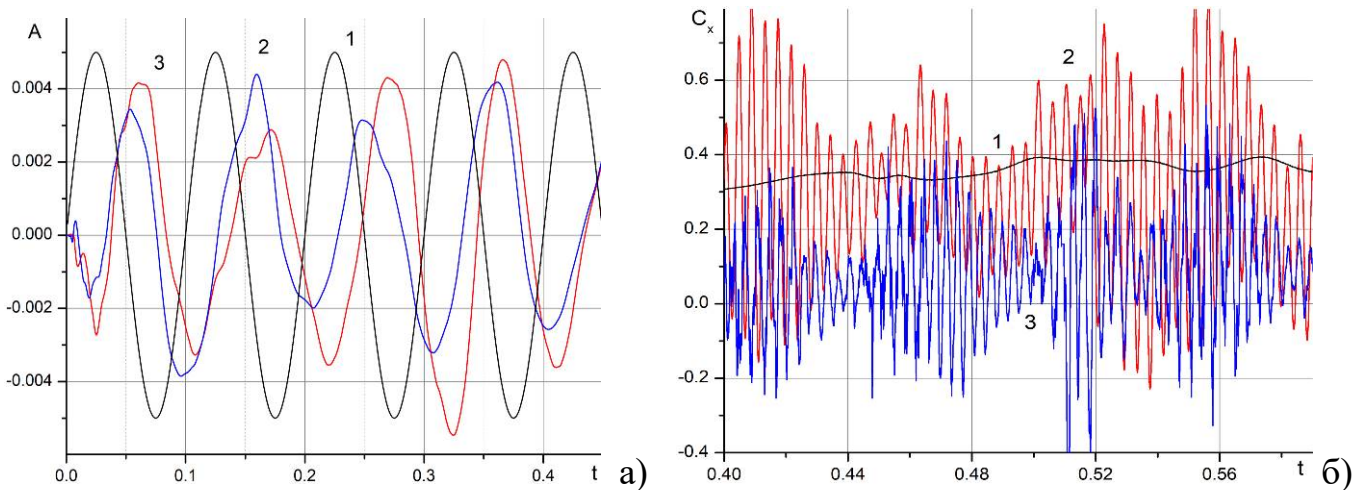


Рис. 12: Амплітуда коливань вільного краю в'язкопружного хвостовика та інтегральний коефіцієнт опору крилового профілю як функції часу при наявності активного джерела збурень: $\rho_b = 1000$ кг/м³, $\nu_b = 0.4$, $f_s = 10$ Гц; 1 – $L_t = 0.04$ м, $E_b = \infty$; 2 – $L_t = 0.04$ м, $E_b = 2 \cdot 10^5$ Па; 3 – $L_t = 0.032$ м, $E_b = 2 \cdot 10^5$ Па.

З метою дослідження особливостей нестационарного деформування в'язкопружного хвостовика в умовах наявності додаткових вимушених впливів розглянуто задачу обтікання нерухомого крилового профілю, коли основа хвостовика приводиться в активний коливний рух локальним джерелом періодичних збурень. Результати чисельного моделювання відповідної зв'язаної задачі показують, що характер нестационарної поведінки хвостовика в режимі його активного періодичного збудження залежить, головним чином, від швидкості поширення зсувної хвилі у в'язкопружному матеріалі, довжини хвостовика та частоти вимушених коливань і фактично визначається відношенням частот власних та вимушених коливань хвостовика: $f_e / f_s = C_\mu / L_t f_s$. Залежності від часу амплітуди коливань вільного краю в'язкопружного хвостовика для різних значень

його довжини і модуля пружності матеріалу показують, що при виконанні умови: $f_e/f_s > 25$ зсув фаз між вимушеними та вільними коливаннями деформівного хвостовика наближається до $\pi/2$ (Рис. 12, а). Тобто режим нестационарного деформування в'язкопружного хвостовика, при якому його вільний край виконує коливання у протифазі до загального закону активного руху профілю, що відповідає випадку генерації найбільшої пропульсивної сили крила, визначається умовою проходження зсувною хвилею щонайменше 25 відстаней, рівних довжині хвостовика, за один період вимушених коливань. Таким чином, найефективніша робота деформівного елемента профілю можлива лише при певних обмеженнях по величині пружних характеристик і довжині хвостовика в залежності від частоти вимушених коливань профілю: при малих частотах матеріал деформівного хвостовика може бути м'якшим, а його довжина більшою, тоді як при відносно великих частотах він має бути жорсткішим і коротшим, що спостерігається на кінограмах руху дельфінів.

Залежність від часу інтегрального значення опору крила має осцилюючий характер як результат одночасного впливу трьох основних нестационарних факторів: вимушених коливань активного джерела збурення, реакції деформівного матеріалу на дрейфуючі вниз за потоком вихрові структури і процесів розповсюдження зсувних пружних хвиль у в'язкопружному матеріалі (Рис. 12, б). Середнє значення інтегрального опору крила з в'язкопружним хвостовиком виявляється майже на 20% нижчим, ніж на ідеально жорсткому крилі, а при умові узгодження параметрів хвостовика з частотою вимушених коливань за наведеною вище формулою – починає функціонувати в режимі генерації пропульсивної сили.

У **шостому розділі** представлено методи узгодженого чисельного, аналітичного і лабораторного моделювання нестационарних течій навколо перешкод вибраної форми з урахуванням ефектів стратифікації і дифузії. Обґрунтовано фундаментальну і прикладну цінність таких досліджень, виконано класифікацію стратифікованих течій, визначено діапазони зміни параметрів досліджуваних задач та отримано деякі аналітичні розв'язки в рамках спрощених постановок.

Застосовані у роботі математичні моделі стратифікованих течій навколо перешкод базуються на системі диференціальних рівнянь механіки неоднорідних рідин (1), що включає рівняння Нав'є-Стокса у наближенні Бусінеска, дифузії стратифікуючої компоненти та пасивних домішок, а також рівняння нестисливості, з відповідними початковими і граничними умовами (3). Експериментальні дослідження лабораторної візуалізації стратифікованих течій навколо перешкод виконано за допомогою високороздільних тіньових приладів ІАБ-458 і ІАБ-463 стенду «Лабораторний пересувний басейн», що входить до складу комплексу унікальних установок ПІМ РАН для моделювання гідродинамічних процесів у навколишньому середовищі та їх впливу на підводні технічні об'єкти, а також розповсюдження домішок в океані й атмосфері. Для створення стійкої неперервної стратифікації у лабораторному басейні використовувався водний розчин кухонної солі; перешкода підвішувалася на прозорих ножах до каретки і переміщувалася рівномірно й прямолінійно по напрямних, встановлених над басейном; спостережувані картини стратифікованих течій за допомогою тіньових приладів відображають варіації освітленості, що знаходяться у лінійно пропорційному співвідношенні з

горизонтальною компонентою градієнту густини. Величини параметрів та умов чисельного і лабораторного досліджень було узгоджено між собою, що дозволило провести взаємодоповнююче комплексне вивчення структури й динаміки стратифікованих течій на перешкодах вибраної форми з можливістю додаткового контролю адекватності розробленої чисельної моделі шляхом якісного та кількісного порівняння розрахованих і тіньових картин течій.

Представлено побудований точний розв'язок лінеаризованої задачі генерації полів внутрішніх хвиль при ковзанні полоси вздовж похилої площини, а також асимптотичні розв'язки стаціонарних і нестаціонарних задач формування течій, індукованих дифузиею на похилій непроникній площині. Дані розв'язки використовуються у роботі для попереднього аналізу структурних компонентів стратифікованих течій, обґрунтування вибору вихідної системи диференціальних рівнянь та верифікації розробленого методу чисельного моделювання.

Виділено характерні режими течій відповідно до введеної класифікації структурних компонентів течій, їх власних масштабів та типів середовища:

- надповільний, повзучий, хвильовий, вихровий та нестаціонарно вихровий режими течій;
- структурні компоненти: хвилі, вихори та високоградієнтні тонкоструктурні елементи;
- типи рідин: сильно та слабо стратифіковані, що є типовими для лабораторних умов і природних систем, відповідно; потенційно та актуально однорідні, що відповідають випадку «ідеально чистого» середовища, коли варіації густини приймаються гранично малими або взагалі нехтуються із припущенням її незмінності.

Вказано досліджувані діапазони параметрів задач обтікання перешкод: $L=1\div 10$ см, $U=0\div 50$ см/с, $N=10^{-5}\div 1.5$ с⁻¹, $Fr=U/NL=0\div 10^6$, $Re=UL/\nu=0\div 5\cdot 10^4$. Сформульовано вимоги до чисельного моделювання стратифікованих течій та визначено критерії екстраполяції отриманих чисельних результатів на типові природні умови.

Сьомий розділ присвячено фундаментальним дослідженням нестаціонарних процесів формування і розвитку течій неперервно стратифікованої й однорідної рідин навколо непроникних перешкод, зокрема, похилої пластини, циліндру, диску та клиновидного тіла, що можуть бути як нерухомими, так і рухатися рівномірно й прямолінійно з малими швидкостями. Побудовано спостережувані в експерименті поля компонент градієнту густини, а також швидкості, тиску, завихреності, швидкості дисипації енергії та ін., визначено масштаби й інтенсивність характерних структурних елементів течій в залежності від величин визначальних параметрів задач. Вивчено нестаціонарні процеси формування течій, індукованих дифузиею на нерухомих перешкодах, та полів внутрішніх хвиль при їх рівномірному русі. Розраховано сили і моменти на обтічних перешкодах та проведено систематичні якісні і кількісні порівняння результатів розрахунку стратифікованих течій навколо перешкод із відповідними лабораторними даними тіньової візуалізації.

Виявлено, що усталена структура надповільної течії, індукованої дифузиею на горизонтальній пластині, яка виникає в результаті переривання дифузійного переносу стратифікуючої компоненти (температури або концентрації розчинених

речовин) на непроникній нерухомій границі навіть за відсутності зовнішніх дестабілізуючих факторів, являє собою багаторівневу послідовність горизонтально орієнтованих вихрових комірок із симетричною структурою відносно центральної площини пластини (Рис. 13, а). Відхилення від горизонтального положення пластини призводить до порушення симетрії течії і суттєвої трансформації циркуляційних систем: формування єдиної циклонічної вихрової комірки навколо перешкоди, виникнення висхідної струминної течії на її верхній стороні і низхідної – на нижній, та злиття суміжних компенсаційних комірок з однаковими напрямками циркуляції (Рис. 13, б). Течії, індуковані дифузією на циліндрі і горизонтальному клині, мають схожу багаторівневу комірчасту структуру з головною відмінністю, яка полягає у наявності зон нульових збурень навколо вертикально орієнтованих ділянок поверхні перешкод – на задній стороні клину та в околиці полюсів циліндру, рознесених горизонтально (Рис. 13, в, г).

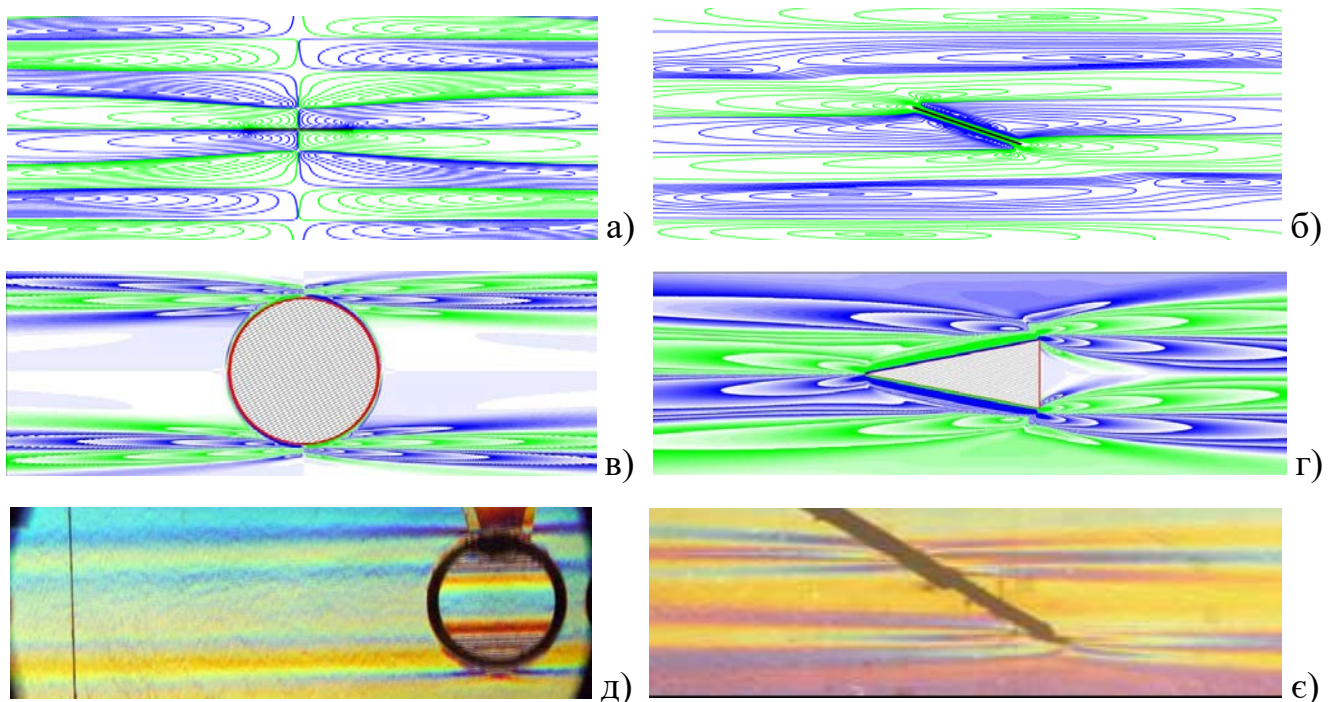


Рис. 13: Розрахована (а–г) і тіньова (д, е) картини течій, індукованих дифузією на нерухомих перешкодах: а) – горизонтальна пластина, б, є) – похила пластина ($\alpha=10^\circ$), в, д) – круговий циліндр, г) – клиноподібне тіло; $N=1.2 \text{ c}^{-1}$.

Визначено масштаби та інтенсивність руху рідини у циркуляційних комірках, проаналізовано профілі швидкості та густини у струминних течіях, що формуються на поверхні перешкод, в залежності від їх розмірів, кутової орієнтації відносно горизонту, величин стратифікації та коефіцієнту дифузії. Проведено порівняння отриманих чисельних результатів з асимптотичними розв'язками стаціонарної і нестаціонарної задач формування течій, індукованих дифузією на нескінченній похилій площині, а також із даними лабораторної тіньової візуалізації, в яких найбільш інтенсивні збурення спостерігаються на екстремальних точках перешкод у вигляді протяжних горизонтальних шаруватих структур, довжина яких залежить від чутливості методу реєстрації (Рис. 13, д, є; Рис. 14, а). Виявлено, що струменеві течії

на сторонах похилої пластини створюють момент сил, який прагне повернути її у стійке горизонтальне положення, а перед гострою вершиною горизонтального клину виникає інтенсивна зона від'ємного тиску, що створює пропульсивну силу і призводить до його саморуху.

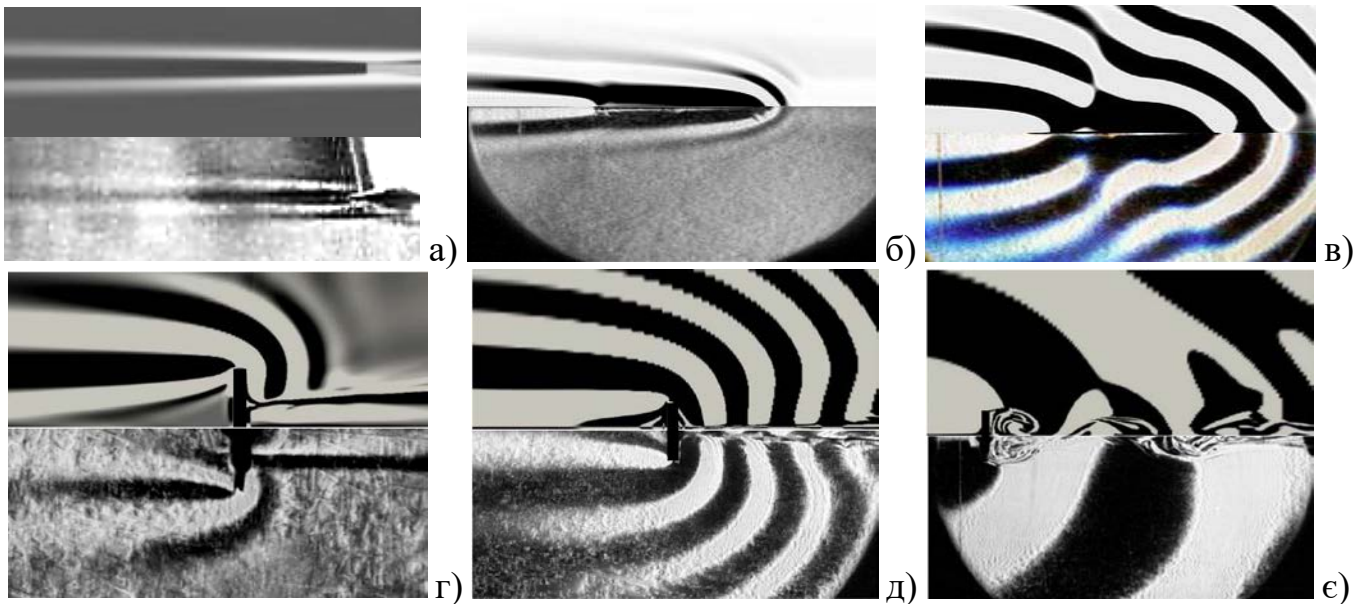


Рис. 14: Розраховані поля горизонтальної компоненти градієнту густини і тіньові картини (верхня і нижня половини зображень, відповідно) течій неперервно стратифікованої рідини навколо горизонтальної (а–в) і вертикальної (г–є) пластин:
 $L=7.5$ см, $N=0.83$ с⁻¹, $U=0, 0.1, 0.32$ см/с; $Fr=0, 0.016, 0.051$ (а–в);
 $L=2.5$ см, $N=0.5$ с⁻¹, $U=0.03, 0.18, 0.75$ см/с; $Fr=0.024, 0.144, 0.6$ (г–є).

Із початком руху перешкоди у стратифікованому середовищі на її екстремальних точках починають генеруватися поля внутрішніх хвиль, нестационарну структуру і динаміку яких у дисертаційній роботі проаналізовано для випадку рівномірного і прямолінійного руху похилої пластини, включаючи граничні випадки її горизонтального та вертикального розміщення (Рис. 14). Досліджено структуру полів різних фізичних змінних, проведено кількісні оцінки інтенсивності й масштабів генерованих хвильових збурень в залежності від величин базових параметрів задачі – частоти плавучості рідини, швидкості руху та кутового положення пластини. Детально вивчено процес формування і розвитку стратифікованої течії навколо похилої пластини та виділено основні його нестационарні етапи:

- ✓ зародження чотирьох груп внутрішніх хвиль на гострих кромках пластини, в околі яких відбуваються найінтенсивніші зсуви частинок рідини з початкових горизонтів нейтральної плавучості;
- ✓ розповсюдження внутрішніх хвиль від джерел збурень, що супроводжується взаємодією окремих полів хвиль між собою та з поверхнею пластини;
- ✓ придушення хвильових збурень на навітряній стороні пластини під впливом зустрічного потоку рідини та об'єднання двох груп внутрішніх хвиль, генерованих гострими краями задньої кромки пластини;

✓ зародження супутнього сліду на підвітряній стороні пластини та його взаємодія із генерованими полями внутрішніх хвиль;

✓ усталення структури випереджаючих збурень перед пластиною і приєднаних внутрішніх хвиль за перешкодою на фоні нестационарних збурень вихрового сліду.

Досліджено особливості формування і розвитку тонкої структури стратифікованих течій для різних значень швидкості руху похилої пластини та частоти плавучості рідини. Виявлено, що у повзучому режимі течії при малих швидкостях руху пластини, окрім характерної структури внутрішніх хвиль, в області заблокованої рідини перед перешкодою формуються тонкоструктурні шаруваті елементи, а в сліді за перешкодою розвиваються протяжні горизонтальні прошарки, які з подальшим збільшенням швидкості руху пластини трансформуються у сукупність розщеплених тонкошаруватих збурень, що захоплюються супутньою течією і формують тонку структуру зароджуваного вихрового сліду (Рис. 14, г–є). Розраховані картини поля горизонтальної компоненти градієнту густини знаходяться у гарному узгодженні з картинами тіньової візуалізації стратифікованих течій навколо рухомих перешкод у лабораторних дослідах (Рис. 14).

У випадку руху пластини вздовж похилої траєкторії структура стратифікованої течії суттєво відрізняється: поле внутрішніх хвиль складається із системи поперечних хвиль у нижньому півпросторі і косих хвиль у верхньому, що взаємодіють між собою вздовж траєкторії руху пластини. Виявлено, що при куті нахилу траєкторії руху $\alpha \sim 30^\circ$ хвильові збурення в області течії над пластиною практично зникають, а при $\alpha \geq 45^\circ$ фазові поверхні внутрішніх хвиль починають стелитися вздовж площини руху пластини. В аналітичному розв'язку лінеаризованої версії даної задачі при наявності жорсткої площини вздовж траєкторії руху пластини суттєво змінюється структура випереджаючих збурень перед пластиною, збільшується інтенсивність і кут нахилу косих внутрішніх хвиль у нижньому півпросторі, зменшується критичний кут траєкторії руху, при якому зникають

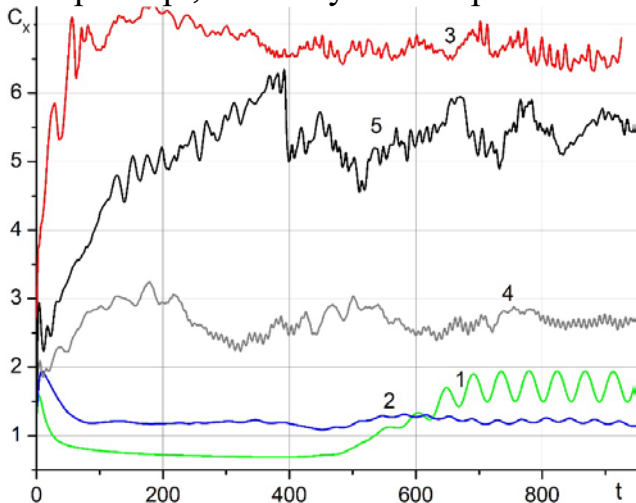


Рис.15: Інтегральний коефіцієнт опору пластини ($U=0.75$ см/с, $L=2.5$ см) у потоці стратифікованої рідини:
 $\alpha=90^\circ$, $N=10^{-5}$, 0.5 , 1.5 с $^{-1}$ (криві 1–3);
 $\alpha=45^\circ$, $N=1.5$ с $^{-1}$ (4); $\alpha=60^\circ$, $N=1.5$ с $^{-1}$ (5)

хвильові збурення у верхньому півпросторі. Проте в рамках єдиної математичної постановки результати чисельного моделювання й аналітичний розв'язок даної задачі показують досить непогану узгодженість.

Параметричний аналіз результатів розрахунків інтегральних характеристик похилої пластини для різних значень частоти плавучості рідини, швидкості руху та кута нахилу пластини дозволив визначити вклад окремих складових у величину повного опору, включаючи хвильовий, вихровий, в'язкий та лобовий опір. У режимі малих швидкостей руху пластини домінуючою складовою є хвильовий опір, величина якого зростає із

збільшенням вертикального масштабу перешкоди ($L \cdot \sin \alpha$) і частоти плавучості рідини пропорційно $\sim N^2$. Із збільшенням швидкості руху і вертикального масштабу пластини зароджується супутній вихровий слід і, відповідно, з'являється вихрова складова опору, величина якої має тенденцію до спадання із збільшенням частоти плавучості рідини як результат руйнівного впливу стратифікації на вихроутворення (Рис. 15).

У **восьмому розділі** представлено результати чисельного моделювання нестационарних течій навколо горизонтальної і похилої пластин при помірних і досить великих числах Рейнольдса у режимі інтенсивної генерації супутніх вихрових структур.

Значну увагу приділено вивченню структурних особливостей і динаміки нестационарних течій сильно та слабо стратифікованих, а також потенційно та актуально однорідних рідин навколо горизонтальної пластини при зміні її геометричних параметрів. Проаналізовано картини нестационарних полів швидкості, тиску, густини (та їх градієнтів), завихреності, швидкості дисипації енергії. Простежено еволюцію окремих структурних компонент: спільних для всіх видів рідин вихорів, а також специфічних для стратифікованих середовищ – внутрішніх хвиль та тонких прошарків. Визначено фізичні механізми формування вихорів в областях великих градієнтів тиску і густини в околиці крайок перешкоди, виконано оцінки масштабів, інтенсивності та частот генерації вихрових структур і проведено розрахунки інтегральних характеристик перешкоди в залежності від величин стратифікації рідини, товщини та довжини пластини, а також для різних модифікацій форми пластини, реалізованих шляхом згладжування її гострих крайок та зменшення товщини у напрямку хвостової частини.

Досліджено нестационарні процеси формування вихрової структури стратифікованої течії навколо похилої обтічної пластини, визначено її інтегральні характеристики, а також характерні масштаби й інтенсивність структурних елементів течії відповідно до введеної класифікації нестационарних режимів вихроутворення навколо пластини в залежності від кута нахилу до горизонту:

- ✓ $\alpha=0^\circ$: генерація на передній кромці ланцюгів дискретних вихорів, їх переміщення вниз за потоком вздовж сторін пластини та нестационарна взаємодія цих вихорів із вихровою доріжкою, генерованою задньою кромкою;
- ✓ $\alpha>0^\circ$: збільшення масштабів і віддалення від поверхні дискретних вихорів на підвітряній та придушення вихроутворення на навітряній стороні пластини;
- ✓ $\alpha>10^\circ$: залучення ланцюгів дискретних вихорів, генерованих передньою кромкою пластини, у більш масштабні антициклонічні вихрові структури;
- ✓ $\alpha>30^\circ$: формування крупномасштабної циклонічної структури в області задньої кромки пластини із залученням у неї дискретних елементів вихрової доріжки;
- ✓ $\alpha>45^\circ$: нестационарна взаємодія двох крупномасштабних протилежно обертових вихрових утворень, складених із ланцюгів дискретних вихорів;
- ✓ $\alpha=90^\circ$: формування симетричної пари когерентних вихрових структур.

Проведено комплексні порівняння розрахованих і тінювих картин течій стратифікованої і однорідної рідин навколо похилої пластини, які показали досить непогану якісну узгодженість (Рис. 16). Як лабораторне, так і чисельне моделювання показують, що структура супутнього сліду за похилою пластинною

складається з характерної вихрової доріжки у формі послідовності грибоподібних структур. На відміну від однорідної рідини, в якій вихрова доріжка певною мірою розширюється вниз за потоком, у стратифікованому середовищі супутні вихори поступово колапсують, розпадаючись на тонкоструктурні елементи.

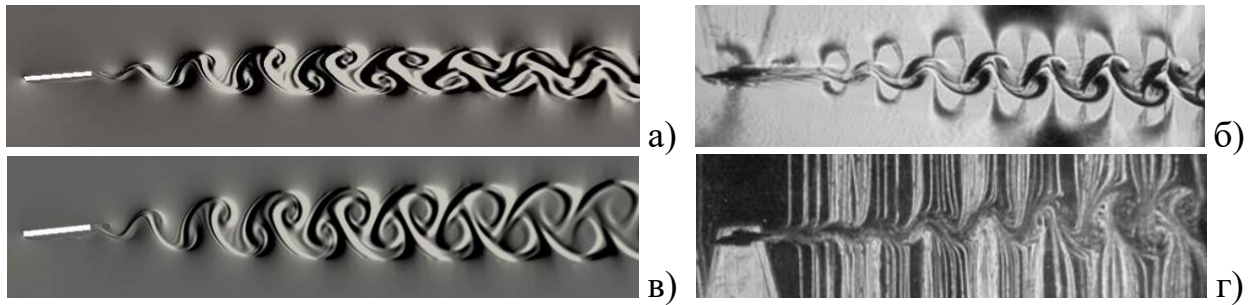


Рис. 16: Розраховані (а, в) і тіньові картини (б, г) супутніх течій стратифікованої і однорідної рідин у сліді за похилою пластинною:
 $L=2.5$ см; $U=4.3$ см/с; $\alpha=6^\circ$; а, б) – $N=0.83$ с $^{-1}$; в, г) – $N=0$.

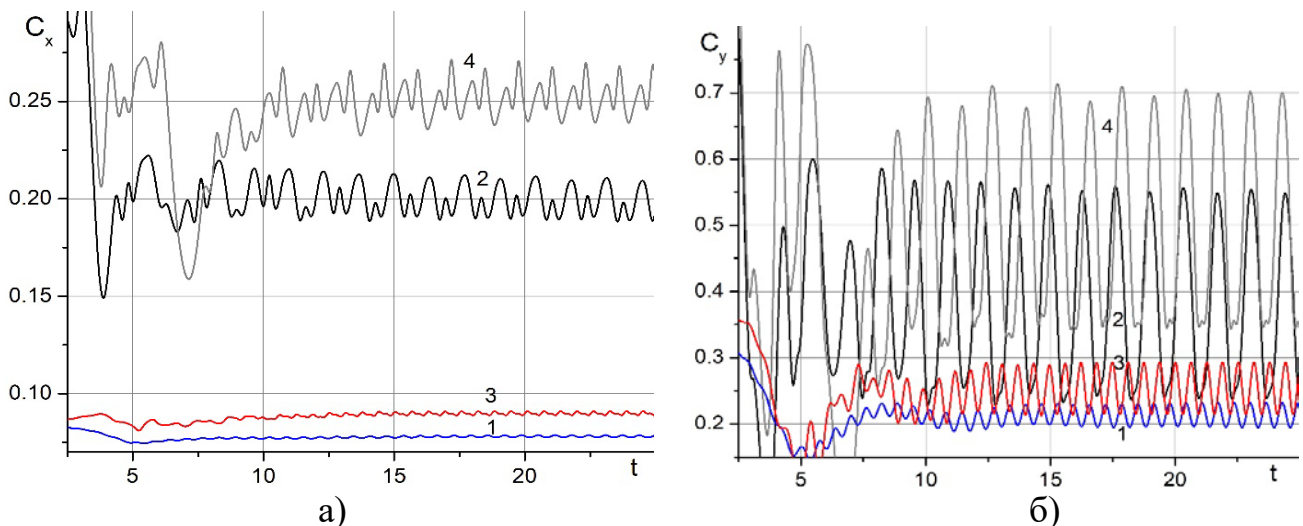


Рис. 17: Залежності від часу інтегрального коефіцієнту опору (а) і підйомної сили (б) похилої пластини ($L=2.5$ см) у стратифікованій і однорідній рідині:

1 – $U=4.3$ см/с, $\alpha=6^\circ$, $N=0.83$ с $^{-1}$, $Fr=2.07$; 2 – $U=3.6$ см/с, $\alpha=16^\circ$, $Fr=1.74$;
 3 – $U=4.3$ см/с, $\alpha=6^\circ$, $N=10^{-5}$ с $^{-1}$, $Fr=1.7 \cdot 10^5$; 4 – $U=3.6$ см/с, $\alpha=16^\circ$, $Fr=1.4 \cdot 10^5$.

Залежності від часу інтегральних характеристик похилої пластини мають суттєво нестационарний осцилюючий характер з частотою вихроутворення, що в найбільшій мірі проявлено в значеннях коефіцієнта підйомної сили (Рис. 17). Характерна частота вихроутворення практично не залежить від величини частоти плавучості рідини, але суттєво змінюється при варіюванні кутом нахилу пластини до горизонту: при збільшенні α майже у тричі частота вихроутворення зменшується приблизно вдвічі, при цьому амплітуда осциляцій збільшується майже на порядок. В режимі інтенсивної генерації супутніх вихрових структур значення інтегральних характеристик пластини спадають із збільшеннями частоти плавучості рідини, що пояснюється руйнівним впливом стратифікації на вихрові структури з відповідним зменшенням вихрової компоненти повного опору, яка є домінуючою для даного режиму течії.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню актуальної науково-прикладної проблеми, пов'язаної з розробкою методів керування течіями з метою зменшення опору тертя і тиску обтічних тіл. Досліджено процеси виникнення і розвитку вихрових утворень у примежовому шарі та супутньому сліді, визначено взаємозв'язок хвильової і вихрової структури течій з інтегральними характеристиками обтічних тіл. В роботі отримано наступні нові наукові результати:

1. Розроблено методику керування нестационарною структурою течій та інтегральними характеристиками обтічних тіл, яку обґрунтовано на основі новостворених алгоритмів чисельного розв'язання задач обтікання тіл, що здійснюють довільні нестационарні рухи у потоці рідини. Реалізовані чисельні методики дають можливість визначати параметри вимушеного коливного руху обтічних тіл або локального деформування поверхні, при яких спостерігається приєднання відривних течій на погано обтічних тілах або затягування процесів ламінарно-турбулентного переходу на добре обтічних тілах, що призводить до інтегрального ефекту зниження опору тиску і тертя.

2. Побудовано чисельне моделювання обтікання тіл, що здійснюють обертально-коливальні рухи як єдине ціле або частина поверхні яких активно деформується за заданим нестационарним законом, на основі прямого чисельного моделювання тривимірних рівнянь Нав'є-Стокса з використанням методів динамічних розрахункових сіток на базі методу скінченного об'єму і оригінальних програмних кодів власної розробки відкритого пакету OpenFOAM. Зокрема, розроблено чисельне моделювання зв'язаних задач механіки в'язкої нестисливої рідини і в'язкопружного твердого тіла, на основі якого розв'язано задачу обтікання жорсткого крилового профілю з в'язкопружним хвостовиком, що може бути як пасивно деформівним тілом, реагуючим на збурення потоку, так і здійснювати додаткові коливні рухи, ініційовані вимушеними коливаннями його основи.

3. На основі проведених чисельних розрахунків обтікання плоскої поверхні з активно деформівною зоною отримано наступні результати:

- оцінено ефективність методу керування структурою примежового шару на локально деформівній обтічній поверхні у формі плоскої біжучої хвилі шляхом якісного співставлення картин течії на динамічно деформівній поверхні з відповідними результатами на статично деформованій хвилястій поверхні;
- встановлено взаємозв'язок характеристик вихрової структури течії у примежовому шарі з параметрами локального джерела збурення у формі біжучої хвилі заданої амплітуди, частоти і фазової швидкості у заданому діапазоні чисел Рейнольдса;
- визначено, що з метою якнайдовшого збереження детермінованої вихрової структури течії вниз за потоком, що відповідає затягуванню переходу в розвинений турбулентний режим течії в примежовому шарі та інтегральному ефекту зниження опору тертя, параметри біжучої хвилі на обтічній поверхні повинні бути близькими до відповідних параметрів хвилі нестійкості Толлміна-Шлихтинга;

– виявлено, що за рахунок генерації хвильових збурень з параметрами хвилі Толлміна-Шлихтинга довжину зони переходу можна подовжити у кілька разів відповідно до довжини зони збурювання.

4. Проведені розрахунки обтікання нерухомих крилових профілів і таких, що здійснюють вимушені обертально-коливальні рухи заданої амплітуди і частоти, дозволили виявити ряд важливих закономірностей:

– при малих числах Струхаля структура вихрової течії на коливному профілі відповідає структурі на нерухомому крилі при максимальному куті атаки, що осцилює як єдине ціле з частотою вимушених коливань; із збільшенням числа Струхаля власні вихрові збурення примезових шарів вироджуються, зони відриву зменшуються аж до повного їх усунення, а структура супутнього сліду цілком визначається параметрами вимушених коливань;

– режим, при якому відбувається приєднання відривної течії із встановленням структури супутнього сліду з параметрами вимушених коливань та виникненням пропульсивної сили крила визначається умовою, що зв'язує швидкість набігаючого потоку, частоту вимушених коливань та максимальне вертикальне відхилення крила: $St_h = 2f \cdot L_0 \cdot \sin \alpha / U_0 > 0.12$;

– наявність додаткового гнучкого хвостового елемента, що здійснює активні коливання у протифазі до загального закону руху крилового профілю, зменшує інтенсивність завихреності супутнього сліду приблизно у 1.5 разів, звужує ширину збуреної течії та підсилює пропульсивний ефект крила майже на 40 %;

– характер нестационарного деформування пасивного в'язкопружного хвостовика крилового профілю під впливом збурень потоку визначається його локальною взаємодією з ланцюгами дискретних вихрових елементів, що формуються на профілі і дрейфують вниз за потоком вздовж його поверхні, і встановленням узгодженого з частотою вихроутворення коливного руху хвостовика;

– динаміка в'язкопружного хвостовика в режимі активного періодичного збудження його основи визначається частотами власних $f_e = \sqrt{\mu_b / \rho_b} / L_t$ і вимушених f_s коливань хвостовика, а також частотою вихроутворення f_v на криловому профілі;

– режим нестационарного деформування в'язкопружного хвостовика, при якому його вільний край виконує коливання у протифазі до загального закону активного руху профілю, що відповідає випадку генерації найбільшої пропульсивної сили крила, визначається умовою проходження зсувною хвилею більше 25 відстаней, рівних довжині хвостовика, за один період вимушених коливань: $f_e / f_s > 25$.

5. На основі чисельних розрахунків течій неперервно стратифікованої рідини навколо перешкод різної форми у широкому діапазоні чисел Рейнольдса і Фруда проведено важливі фундаментальні дослідження:

– виділено характерні режими течій відповідно до введеної класифікації їх структурних компонентів, характерних масштабів та типів середовищ;

– досліджено структуру надповільних течій, індукованих дифузєю на непроникних перешкодах, що представляє собою багаторівневу систему циркуляційних комірок, включаючи інтенсивні висхідні і низхідні струменеві течії вздовж похилих сторін перешкоди, а також систему компенсаційних горизонтально орієнтованих комірок;

- визначено, що інтегральний момент сил, діючий на нерухому похилу пластину, прагне повернути її у найбільш стійке горизонтальне положення, а на клиноподібному тілі виникає пропульсивна сила, що ініціює саморух клину в сторону його гострої вершини;
- вивчено закономірності формування стратифікованих течій навколо рівномірно рухомої похилої пластини при різних її довжинах і кутах нахилу до горизонту у хвильовому і вихровому режимах, проаналізовано структуру і динаміку течій для випадків сильно і слабо стратифікованої, а також актуально і потенційно однорідної рідин, та досліджено вплив геометричних модифікацій пластини на структуру і динаміку стратифікованих течій;
- узгоджене чисельне і лабораторне моделювання течій стратифікованих рідин на перешкодах вибраної форми дозволило провести взаємодоповнююче комплексне дослідження структури і динаміки течій з додатковою можливістю контролю адекватності розроблених чисельних моделей шляхом якісного та кількісного порівняння з картинами тіньової візуалізації;
- визначено, що в режимі малих швидкостей руху тіла домінуючою компонентою інтегрального опору є хвильова складова, величина якої зростає із збільшенням частоти плавучості рідини і вертикального масштабу перешкоди, тоді як у режимі інтенсивної генерації супутніх вихрових структур інтегральний опір перешкоди спадає із збільшеннями частоти плавучості рідини внаслідок руйнівного впливу стратифікації на вихрові утворення з відповідним зменшенням вихрової компоненти повного опору, яка є домінуючою для даного режиму течії.

6. Отримані результати чисельних досліджень дозволяють сформувати комплексне уявлення про фізичні явища, які відбуваються у примежових шарах на етапі ламінарно-турбулентного переходу та у супутніх слідах за обтічними тілами, що здійснюють періодичні нестационарні рухи у потоці в'язкої нестисливої рідини. Розроблена методика розв'язання спряжених задач механіки рідини і деформівного твердого тіла дає змогу моделювати складні фізичні процеси, які відбуваються при взаємодії рідини з в'язкопружними тілами, що може бути практично використано при вирішенні широкого спектру промислових і технічних задач. Отримані результати узгодженого чисельного, лабораторного та аналітичного моделювання течій дозволяють комплексно досліджувати нестационарні процеси виникнення і розвитку різномасштабних утворень навколо рухомих або нерухомих перешкод, а також оцінювати вплив зовнішніх динамічних факторів та неоднорідності середовища на структуру і динаміку течій. Запропоновані підходи керування течіями та відповідні практичні рекомендації можуть бути використані при проектуванні корпусів технічних пристроїв, над- і підводних транспортних та пересувних засобів з метою зниження опору і рівня пульсацій тиску в авіа- та кораблебудуванні, конструюванні магістральних газо-, нафто- та водопроводів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у вітчизняних наукових фахових виданнях.

1. Воропаев Г. А., Загуменный Я. В. Численное моделирование взаимодействия локальных возмущений пограничного слоя с деформирующейся поверхностью. *Вестн. Дон. Унив., Сер. А: Естественные науки*. 2009. Вып. 1. С. 154–165 (здобувачу належить участь у постановці задачі, розробка чисельного моделювання, проведення чисельних розрахунків, аналіз та обговорення чисельних результатів).
2. Чашечкин Ю. Д., Бардаков Р. Н., Загуменный Я. В. Расчет и визуализация тонкой структуры полей двумерных присоединенных внутренних волн. *Морський гідрофізичний журнал*. 2010. № 6. С. 3–15 (здобувачу належить проведення чисельної візуалізації точного розв'язку, аналіз та обговорення результатів).
3. Загуменный Я. В., Чашечкин Ю. Д. Течения непрерывно стратифицированной жидкости, индуцированные прерыванием диффузионного переноса неподвижной пластиной. *Мор. гідрофіз. журн.* 2012. № 5. С. 3–23 (здобувачу належить участь у постановці задачі, чисельне моделювання, аналіз лабораторних і чисельних даних).
4. Воропаев Г. А., Димитриева Н. Ф., Загуменный Я. В. Структура турбулентного пограничного слоя при совместном использовании деформирующейся поверхности и полимерных добавок слабой концентрации. *Прикл. гідромех.* 2013. Т. 15, № 2. С. 3–12 (здобувачу належить проведення розрахунків, аналіз результатів).
5. Загуменный Я. В., Чашечкин Ю. Д. Индуцированное диффузией течение на клине. *Доп. НАНУ*. 2013. № 3. С. 31–39 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельного моделювання і розрахунків, аналіз чисельних результатів).
6. Загуменный Я. В. Динамика и структура стратифицированного течения около горизонтальной пластины. *Доповіді НАН України*. 2014. № 7. С. 60–67.
7. Zagumennyi Ia. V. Modeling of molecular diffusion in non-homogeneous media. *Naukovi Visti NTUU KPI*. 2017. № 2. Р. 65–73.
8. Воропаев Г. А., Загуменный Я. В. Численное моделирование обтекания нестационарно движущихся тел. *Комп. математика*. 2018. № 2. С. 13–20 (здобувачу належить участь у постановці задачі, розробка чисельного моделювання, проведення чисельних розрахунків, аналіз та обговорення отриманих чисельних результатів).
9. Воропаев Г. А., Загуменный Я. В. Управление динамическими характеристиками обтекаемого колеблющегося крыла. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Мат. модел. в техніці та технологіях*. 2019. № 8 (1333). С. 87–93 (здобувачу належить участь у постановці задачі, чисельне моделювання і розрахунки, аналіз та обговорення результатів).
10. Voropaev G. A., Zagumennyi Ia. V. Boundary layer perturbations generated by locally deformable surface. *Int. J. Fluid Mech. Res.* 2019. V. 46, № 4. Р. 325–335 (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельного моделювання і розрахунків, аналіз та обговорення результатів).

Публікації у періодичних наукових виданнях, внесених до міжнародних наукометричних баз даних SCOPUS та Web of Science.

11. Yurchenko N., Rosumnyuk N., Zagumennyi Ya. Numerical simulation of near-wall turbulence structure affected by MW-generated point plasma discharges. *AIAA Paper*. 2008. № 2008-1440 (**SCOPUS**) (здобувачу належить розробка чисельного моделювання, проведення розрахунків, аналіз та обговорення отриманих результатів).

12. Voropaev G. A., Zagumennyi Ia. V. Wave and vortex structure of transitional boundary layer over deformable surface. *Physica Scripta*. 2010. T 142. 014010 (SCOPUS) (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельного моделювання і розрахунків, аналіз та обговорення чисельних результатів).
13. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V. Structure of diffusion-induced flow on an inclined plate. *Doklady Physics*. 2012. Vol. 57, N 5. P. 210–216 (SCOPUS) (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельного моделювання і розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних і чисельних даних).
14. Zagumennyi Ia. V., Chashechkin Yu. D. The structure of convective flows driven by density variations in a continuously stratified fluid. *Physica Scripta*. 2013. T 155. 014034 (SCOPUS) (здобувачу належить проведення чисельного моделювання і розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних і чисельних даних).
15. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V. Fine structure of unsteady diffusion-induced flow over a fixed plate. *Fluid Dynamics*. 2013. Vol. 48, N 3. P. 374–388 (SCOPUS) (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельного моделювання і розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних і чисельних даних).
16. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V. Non-equilibrium processes in non-homogeneous fluids under the action of external forces. *Physica Scripta*. 2013. T 155. 014010 (SCOPUS) (здобувачу належить проведення чисельного моделювання і розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних і чисельних даних).
17. Zagumennyi Ia. V., Bardakov R. N. Ground effect in hydrodynamics of a strip in a stratified fluid. *Procedia IUTAM*. 2013. V. 8. P. 248–256 (SCOPUS) (здобувачу належить чисельне моделювання, розрахунки, аналіз та обговорення результатів).
18. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V. The structure of convective flows driven by density variations in a continuously stratified fluid. *Procedia IUTAM*. 2013. V. 8. P. 257–266 (SCOPUS) (здобувачу належить проведення чисельного моделювання і розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення лабораторних і чисельних результатів).
19. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V. Structure of the pressure field on a plate in the transient flow regime. *Doklady Physics*. 2015. Vol. 60, N 7. P. 299–304 (SCOPUS) (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельного моделювання і розрахунків, аналіз та співставлення лабораторних і чисельних даних).
20. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V. 2D fluid flow around a plate: consistent analytical, numerical and laboratory investigations. *Proc. Topical Problems of Fluid Mechanics 2016, Prague, 2016*, P. 29–36 (WoS) (здобувачу належить проведення чисельних розрахунків, аналіз та співставлення експериментальних і чисельних результатів).
21. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V. Pattern of unsteady vortex flow around plate under a zero angle of attack. *Fluid Dynamics*. 2016. Vol. 51, N 3. P. 53–70 (SCOPUS) (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельного моделювання і розрахунків, аналіз та співставлення експериментальних і чисельних даних).
22. Zagumennyi Ia. V., Dimitrieva N. F. Diffusion induced flow on a wedge-shaped obstacle. *Physica Scripta*. 2016. V. 91, N 8. 084002 (SCOPUS) (здобувачу належить проведення чисельних розрахунків, аналіз та співставлення лабораторних і чисельних даних).
23. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V., Dimitrieva N. F. Dynamics of formation and fine structure of flow pattern around obstacles in laboratory and computational experiment. *Communications in Computer and Information Science*. 2016. V. 687. P. 41–56 (SCOPUS) (здобувачу належить участь у постановці задачі, чисельне моделювання і розрахунки, аналіз та співставлення експериментальних і чисельних даних).

24. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V. Stratified flow fine structure around a sloping plate. *Proc. Topical Problems of Fluid Mechanics*, 2017, Prague, P. 87–94 (**WoS**) (здобувачу належить проведення чисельного моделювання і розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних і чисельних результатів).
25. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V. Features of flows past a horizontal plate in stratified and homogeneous media. *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*. 2017. V. 12. P. 33–42 (**SCOPUS**) (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельного моделювання і розрахунків, співставлення експериментальних і чисельних даних).
26. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V., Dimitrieva N. F. Unsteady vortex dynamics past a uniformly moving tilted plate. *Proc. Topical Problems of Fluid Mechanics*, 2018, Prague, P. 47–56 (**WoS**) (здобувачу належить, проведення чисельного моделювання і розрахунків, аналіз та співставлення експериментальних і чисельних результатів).
27. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V. Formation of waves, vortices and ligaments in 2D stratified flows around obstacles. *Physica Scripta*. 2019. V. 94, N 5. 054003 (**SCOPUS**) (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельного моделювання, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних і чисельних даних).
28. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V. Numerical analysis of flows of stratified and homogeneous fluids near horizontal and inclined plates. *Fluid Dynamics*. 2019. Vol. 54, Suppl. 7. P. S59–S70 (**SCOPUS**) (здобувачу належить, проведення чисельного моделювання, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних і чисельних даних).
29. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V. The 2D flow around tilted plate. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*. 2019. N 4. P. 73–88 (**SCOPUS**) (здобувачу належить проведення чисельного моделювання і розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення експериментальних і чисельних даних).
30. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V. Visualization of stratified flows around a vertical plate: laboratory experiment and numerical simulation. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2020. V. 8, N 2. P. 148–161 (**SCOPUS**) (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз та співставлення експериментальних і чисельних даних).

Інші публікації та матеріали конференцій.

31. Chashechkin Yu. D., Bardakov R. N., Zagumennyi Ia. V. Flow generated by uniformly moving strip in a continuously stratified fluid. *Proc. Topical Problems of Fluid Mechanics*, 2010, Prague, Czech Republic, P. 25–27.
32. Загуменний Я. В. Волновая структура течений неоднородной жидкости около наклонной пластины. *Праці акустичного симпозіуму «Консонанс-2011»*. Київ. 2011. С. 129–134.
33. Chashechkin Yu. D., Bardakov R. N., Zagumennyi Ia. V. Stratified flow around a strip: analytical, numerical and laboratory studies. *Proc. Topical Problems of Fluid Mechanics*, 2012, Prague, Czech Republic. P. 21–22.
34. Zagumennyi Ia. V., Bardakov R. N. Hydrodynamics of the moving plate in an inhomogeneous fluid. *Selected Papers Int. Conf. "Fluxes and structures in fluids: Physics of geospheres"*. Moscow: MAKSPress. 2012. P. 9–12.
35. Bardakov R. N., Zagumennyi Ia. V. Analytical and numerical calculations of the flow pattern around a moving plate in a stratified fluid. *Selected Papers Int. Conf. "Fluxes and structures in fluids"*. Moscow: MAKSPress. 2012. P. 163–167.

36. Zagumennyi Ia. V. The features of diffusion-driven flow fine structure around a thin sloping plate. Selected Papers Int. Conf. "Fluxes and structures in fluids: Physics of geospheres". Moscow: MAKSPress. 2012. P. 158–163.
37. Чашечкин Ю. Д., Загуменный Я. В. Расчет течений непрерывно стратифицированной жидкости с использованием открытых вычислительных пакетов на базе технологической платформы UniHUB. *Труды ИСП РАН*. 2013. Т. 24. С. 87–106.
38. Чашечкин Ю. Д., Загуменный Я. В., Дмитриева Н. Ф. Расчет и визуализация волновых процессов в неоднородных средах. Консонанс-2013, Праці акустичного симпозіуму, Київ, 2013. С. 101–107.
39. Zagumennyi Ia. V. HPC calculations of inhomogeneous fluid flows using open source packages. Proc. Int. Conf. "Cluster Computations", Lviv, 2013. P. 240–247.
40. Zagumennyi Ia. V., Dimitrieva N. F. Parallel computations of stratified flows using continuum mechanics web-laboratory. Proc. Int. Conf. "High Performance Computing", Kyiv, 2013. P. 107–113.
41. Zagumennyi Ia. V. Ground effects on a horizontal plate in a stratified environment. Selected Papers Int. Conf. "Fluxes and structures in fluids". Moscow: MAKSPress. 2014. P. 242–249.
42. Zagumennyi Ia. V., Dimitrieva N. F. Calculation of admixture transport around a horizontal plate in a continuously stratified fluid. Selected Papers Int. Conf. "Fluxes and structures in fluids". Moscow: MAKSPress. 2014. P. 61–68.
43. Загуменный Я. В., Дмитриева Н. Ф. Численное моделирование стратифицированных течений с использованием OpenFOAM. *Труды ИСП РАН*. 2014. Т. 26, Вып. 5. С. 187–200.
44. Чашечкин Ю. Д., Загуменный Я. В. Гидродинамика горизонтальной полосы. *Проблемы эволюции открытых систем*. 2015. Т. 2, Вып. 18. С. 25–50.
45. Voropaev G. A., Zagumennyi Ia. V. Boundary layer perturbations generated by locally deformable surface. Proc. 7th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models, 19–22 September 2016, Rostock, Germany, P. 91–94.
46. Voropaev G. A., Zagumennyi Ia. V., Shkvar Ye. A. Vortex formation on an oscillating wing. Proc. 8-th Int. Conf. on Vortex Flows Dynamics, 2018, Xi'an, China, P. 25.
47. Voropaev G. A., Zagumennyi Ia. V. Numerical simulation of flows around unsteady moving bodies. Proc. Int. Conf. High Performance Comput., 2018, Kyiv, P. 179–182.
48. Voropaev G. A., Zagumennyi Ia. V. Boundary layer structure control by actuating local surface oscillations. Proc. European Drag Reduction and Flow Control Meeting, 26–29 March 2019, Bad Herrenalb, Germany, P. 55–56.
49. Voropaev G. A., Zagumennyi Ia. V. Study of flow patterns past an unsteady moving solid for biological and technical applications. Proc. Final AMMODIT Conference "Mathematics for Life Sciences", 18–22 March 2019, Kyiv, Ukraine, P. 55–56.
50. Zagumennyi Ia. V. Flow vortex structure control past a body by changing its shape and angular position. Proc. Topical Problems of Fluid Mechanics, 2019, Prague, Czech Republic, P. 235–240.
51. Воропаев Г. А., Загуменный Я. В. Структура нестационарного пограничного слоя на деформирующейся поверхности. Праці Міжн. наук.-техн. конф. «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці», 27-30 травня 2019, С. 110–114.

52. Загуменний Я. В. Зв'язані методи розв'язання рівнянь механіки рідини і деформівного твердого тіла в задачах гідропружності та біоніки. Матеріали XVI науково-технічної конф. «Інноваційні технології», 2019, Київ. С. 331–335.
53. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi Ia. V. Natural unsteadiness of the flow pattern around a plate in numerical simulation and laboratory modeling. Proc. Topical Problems of Fluid Mechanics, 2020, Prague. P. 11–18.

АНОТАЦІЯ

Загуменний Я. В. Задачі керування структурою нестационарних течій та інтегральними характеристиками обтічних тіл. – 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 закономірностей хвиле- та вихроутворення навколо обтічних тіл, що можуть здійснювати нестационарні рухи, в однорідній та стратифікованій в'язких рідинах. У роботі вивчаються процеси взаємодії різномасштабних структурних елементів течій у примежових шарах та у супутньому сліді за обтічними тілами, визначається взаємозв'язок структури течій з локальними та інтегральними гідродинамічними характеристиками обтічних тіл. Розроблено методику керування нестационарною структурою течій та інтегральними характеристиками обтічних тіл на основі нових алгоритмів прямого чисельного розв'язання задач обтікання тіл, що здійснюють нестационарні рухи за заданим законом у потоці рідини. Побудовано алгоритм чисельного розв'язання спряжених задач механіки в'язкої нестисливої рідини і в'язкопружного тіла з використанням метода скінченного об'єму на базі оригінальних програмних кодів власної розробки відкритого пакету OpenFOAM. На основі розробленого алгоритму чисельного моделювання течій неперервно стратифікованої рідини вперше виконано високороздільні і високоточні розрахунки стратифікованих течій навколо перешкод різної форми в широкому діапазоні чисел Рейнольдса і Фруда, починаючи з надповільних течій, індукованих дифузиею на нерухомій непроникній перешкоді, й аж до нестационарного вихрового режиму течії, що відповідає перехідним значенням числа Рейнольдса, а також проведено серії порівнянь розрахованих полів стратифікованої течії з відповідними тіншовими зображеннями, отриманими з використанням комплексу унікального обладнання для моделювання гідродинамічних процесів в оточуючому середовищі. Встановлено взаємозв'язок вихрової структури течії в примежовому шарі з гідродинамічними характеристиками обтічної поверхні з локальним джерелом збурення у формі біжучої хвилі заданої амплітуди, частоти і фазової швидкості та визначено параметри біжучої хвилі на обтічній поверхні, при яких якнайдовше зберігається детермінована вихрова структура течії вниз за потоком, що відповідає ефекту затягування переходу течії в примежовому шарі в розвинений турбулентний режим. Визначено умови приєднання відривної течії на коливному криловому профілі, що здійснює вимушені обертово-коливальні рухи в потоці в'язкої нестисливої рідини, а також умови виникнення інтенсивної пропульсивної сили на криловому профілі з гнучким хвостовиком – моделі хвостового плавника гідробіонта. Визначено

співвідношення між пружними характеристиками, довжиною і частотою локального активного збудження вязкопружного хвостовика крилового профілю, при якому вимушені та вільні коливання деформівного елементу знаходяться в протифазі, що відповідає найбільшому пропульсивному ефекту крила.

Ключові слова: керування структурою течій, примежовий шар, обтікання крилового профілю, вихровий слід, стратифікована рідина, внутрішні хвилі.

АННОТАЦИЯ

Загуменний Я. В. Задачи управления структурой нестационарных течений и интегральными характеристиками обтекаемых тел. – 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 закономерностей волно- и вихреобразования около нестационарно движущихся обтекаемых тел в однородной и стратифицированной жидкостях. Изучаются процессы взаимодействия разно-масштабных структурных элементов течений в пограничных слоях и спутном следе за обтекаемыми телами, определяется взаимосвязь структуры течений с локальными и интегральными гидродинамическими характеристиками обтекаемых тел. Разработана методика управления нестационарной структурой течений и интегральными характеристиками обтекаемых тел на основе новых алгоритмов прямого численного решения задач обтекания движущихся по заданному закону тел, а также сопряженных задач механики жидкости и вязкоупругого тела на базе оригинальных программных кодов собственной разработки открытого пакета OpenFOAM. Установлена взаимосвязь вихревой структуры течения в пограничном слое с гидродинамическими характеристиками обтекаемой поверхности с локальным источником возмущения в форме бегущей волны заданной амплитуды, частоты и фазовой скорости; определены параметры бегущей волны, при которых наиболее долго сохраняется детерминирована вихревая структура течения вниз по потоку, затягивающая ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое. Определены условия присоединения отрывного течения на колеблющемся крыловом профиле, осуществляющем вынужденные вращательные колебания в потоке вязкой жидкости, а также условия возникновения пропульсивной силы на крыле с гибким хвостовиком – модели хвостового плавника гидробионта. Определено соотношение между упругими характеристиками, длиной и частотой локального активного возбуждения вязкоупругого хвостовика, при котором вынужденные и свободные колебания хвостовика находятся в противофазе, что соответствует наибольшему пропульсивному эффекту крыла. На основе разработанного алгоритма численного моделирования течений непрерывно стратифицированной жидкости впервые проведены высокоточные расчеты стратифицированных течений около препятствий различной формы в широком диапазоне чисел Рейнольдса и Фруда, начиная со сверхмедленных течений, индуцированных диффузией на неподвижном непроницаемом препятствии, и вплоть до нестационарного вихревого режима течения, что соответствует переходным значением числа Рейнольдса. Проведены серии сравнений

рассчитанных полей стратифицированных течений с соответствующими теневыми изображениями, полученными с использованием уникального оборудования для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде.

Ключевые слова: управление структурой течений, пограничный слой, обтекание крылового профиля, вихревой след, стратифицированная жидкость, внутренние волны.

SUMMARY

Zagumennyi Ya. V. Control problems of unsteady flow structure and integral characteristics of bodies. – Manuscript.

Thesis for the doctor degree in physical and mathematical sciences in specialty 01.02.05 "Mechanics of fluid, gas and plasma" – Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The thesis is devoted to the study of unsteady flows in the boundary layer on a locally deformable surface and around an oscillating wing with the purpose to determine relations between the flow structure and the integral hydrodynamic characteristics of bodies. A local source of 2D forced surface oscillations in the form of a travelling wave with fixed values of amplitude, frequency and phase velocity initially generates the respective 2D boundary layer perturbations. As developing downstream, the 2D perturbations are transformed into the typical 3D Λ -structures and longitudinally oriented vortex elements, which then are distorted downstream with a gradual loss of their initial deterministic forms. Parameters of the traveling surface wave, which correspond to a longest preservation of the deterministic zone of the vortex flow structure downstream and, respectively, to the greatest integral effect of laminar-turbulent transition delay in the boundary layer, are determined by the condition of consistency of the forced parameters and the typical length and phase velocity of the 2D Tollmien-Schlichting instability wave. Although the shear stress distributions on the locally perturbed surface contain areas of both increase and decrease of shear stress relative to the respective values on the unperturbed surface, there is a significant integral effect of drag reduction and transition delay to turbulence due to an extension of the deterministic boundary layer region.

Flow structure and dynamics around an unsteady moving NACA wing profile in the free stream of viscous incompressible fluid are studied with the purpose to verify capability of flow separation control and total drag reduction up to the case of propulsion force generation by implementation of rotational-oscillatory motion of the profile. The conditions for the flow detachment and propulsion effect on an oscillating wing are determined for the case of high-frequency low-amplitude oscillations that corresponds to the mode of maintaining the high-speed motion of hydrobionts. It is shown that at values of Strouhal number defined by the maximal vertical deviation of the profile, $St_h = 2f \cdot L_0 \cdot \sin \alpha / U_0 > 0.12$, the wing starts to operate in the propulsive mode which is amplified with a growth of frequency and angular amplitude of the rotational oscillations. An additional flexible tail element of the profile oscillating in the active mode with a certain phase shift to the general law of motion of the profile amplifies the propulsive force. The greatest propulsive force is observed in the case of the antiphase mode of the tail operation relative the general unsteady law and maximal values of the oscillation amplitude within the considered range. In order to study unsteady behaviour of the flexible tail, a coupled problem of fluid-structure interaction is solved numerically, in which the

viscoelastic tail can be passively deformed under action of the flow perturbations and forced oscillations of the profile. The numerical results show the deformable element starts to oscillate with the typical frequency of vortex structure formation on the wing's surface as a result of the passive unsteady response of the tail to the negative pressure zones within the vortex cores. The $\pi/2$ -phase shift between the forced and free oscillations of the deformable tail is implemented under the condition, $25Lf < C_\mu$, which means that shear wave in the viscoelastic material must pass more than 25 distances equal to the wing tail length for the forced oscillation period, i.e. the eigen oscillation frequency of the wing tail must be 25 times greater than the forced one.

The structure and dynamics of flows around obstacles are studied taking into account the stratification and diffusion effects in a wide range of Reynolds and Froude numbers. A classification of flow regimes, including creeping, extra-slow, wave, vortex and unsteady vortex ones, is presented, as well as the basic structural elements of stratified flow, such as waves, vortices, and ligaments, which are high-gradient thin-layered structures, shells, fibers, etc. The numerical simulation results show that diffusion-induced flows are formed on fixed impenetrable obstacles due to interruption of the diffusion flux of the stratifying component, and consist of a complex system of circulating cells arising as a result of formation of ascending and descending flows along the inclined sides of an obstacle and their separation at the extreme points of the body. Around a moving obstacle a set of new flow components is formed, including upstream perturbations, internal attached waves, and vortex wake. The stratified flow structure transformation is shown for various values of speed and angle of attack of an obstacle, and buoyancy frequency of the fluid up to the zero value corresponding to the homogeneous case. Computations of the stratified flows in the vortex mode show that, at small angles of attack, compact vortices are generated at the plate leading edge, drift downstream along its sides, and interact with the vortex street generated by the plate trailing edge. As the angle of attack of the plate increases, the unsteadiness of stratified flow vortex pattern is significantly complicated by intensification of interaction of the vortex structures generated by the plate edges, which is accompanied by the processes of their structural transformation, including splitting, fusion, lamination, and formation of new large-scale and fine-structure vortex flow elements.

The calculated patterns of stratified flows are compared with the schlieren images of laboratory visualization, which show a fairly good agreement for all the flow regimes considered, including extra-slow diffusion induced, wave and unsteady vortex ones. The calculated flow patterns contain all the typical flow components, including large-scale ones such waves and vortices, and fine-scale high-gradient ligaments, analogous to those observed in the laboratory experiments. The integral characteristics of the plate are analysed for different buoyancy frequencies, velocities and angular positions, which enabled to determine the contribution of wave, vortex, viscous and form drag components to its total value. In the mode of low velocities of the plate movement, the wave drag turns to be a dominant drag component proportional to the vertical scale of the plate and fluid buoyancy frequency. With an increase of the velocity and the vertical scale of the obstacle the vortex drag component appears, which tends to decrease with increasing buoyancy frequency as a result of destructive effects of the stratification on the vortex structure.

Key words: flow structure control, boundary layer, flow around a wing profile, vortex wake, stratified fluid, internal waves.