

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента на дисертаційну роботу Сун Лінъ

“Моделювання та розрахунків процесів обтікання просторових тіл зі складною геометрією поверхні”,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 13-Механічна інженерія, спеціальності 134 – Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

В даній дисертаційній роботі розглядається, головним чином, течія рідини у примежовому шарі, а також вихрові течії, що генеруються за рахунок нестійкості та криволінійності обтічної поверхні. Предметом аналізу є розробка моделей вказаних течій.

Основними ідеями роботи можна вважати такі, що, по-перше, вказують на неправомірність використання незалежності молекулярної в'язкості від просторових координат в ламінарній течії рідини; по-друге, доводять фізичну недосконалість моделей вихрових течій, зокрема порушення фундаментального закону фізики – збереження енергії.

Актуальність тематики досліджень.

Під час руху тіла в рідині постійно відбувається взаємодія “тіло-рідина”. Ця взаємодія проявляється у генерації примежового шару на поверхні рухомого тіла. Модель нестисливої течії рідини використовують для значень швидкості повітря до 70-100 м/с. Як відомо, в межах цих швидкостей відбувається зліт та приземлення сучасних великих цивільних літаків. Також до цієї категорії можна віднести БПЛА, швидкість яких знаходиться в указаних межах. Як свідчить практика, сучасні засоби комп'ютерного моделювання і розрахунку є поки що далеко не досконалими. Комп'ютерна техніка ще не досягла такого рівня аби використовувати пряме чисельне моделювання задач із різними просторовими масштабами, а існуючі моделі теж поки що не в змозі коректно описати усі випадки течій. Тож подальший розвиток моделей течії рідини, зокрема у примежовому шарі та у вихрових течіях, є дійсно актуальною темою і потребує ґрунтовного вивчення.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації підтверджуються отриманими автором результатами критичного аналізу існуючих джерел щодо теорій примежового шару нестисливої ламінарної течії рідини та аналітичних моделей вихроутворень при русі тіла у рідині. Дослідження автора ґрунтуються на загальновідомих методах, а також їх оригінальному поєднанні. Це забезпечило належний рівень обґрунтованості і достовірності роботи. Результатами даної роботи стали запропоновані нові

моделі ламінарної нестисливої течії рідини у примежовому шарі та нові моделі вихрових течій, що утворюються під час польоту літака. Ці результати відповідають визначеній меті і завданням.

Достовірність основних положень роботи підтверджується:

- здійсненням всебічного дослідження із фаховим послідовним застосуванням загальноновизнаних наукових методів;
- позитивною оцінкою наукових праць у рецензованих фахових виданнях;
- апробацією результатів на міжнародних конференціях;
- апробацією результатів на міжнародних конференціях;

На підставі усього вищезазначеного, впливає позитивний висновок щодо обґрунтованості і достовірності основних положень представлених в роботі досліджень, а також їх відповідності заявленим меті та завданням.

Науковою новизною одержаних результатів варто вважати такі:

1. Відкриття неточності, якої припустився Стокс при застосуванні аналогії між математичним описом законів теплопровідності Фур'є (другим законом) і в'язкою течію нестисливої течії рідини. А саме: відсутність анізотропії простору в області примежового шару (поблизу рухомого тіла) не дозволяє аналогію із другим законом Фур'є, де стало значення коефіцієнту тепло провідності ґрунтується саме на просторовій ізотропії рідини.

2. Відкриття ще одного, дуже важливого, недоліку теорії Стокса в'язкої течії рідини: відсутність миттєвого і повного прилипання частинок рідини до поверхні рухомого тіла в області розвитку течії; цей недолік однозначно конфліктує із законом збереження маси і, таким чином, унеможлиблює саме поняття існування області розвитку течії.

3. Удосконаленням моделей основних вихрових течій, що утворюються під час польоту літака; удосконалення відноситься до узгодженості моделей із законом збереження енергії та характером руху течії.

Практичне значення дослідження полягає у тому, що вперше обґрунтовано доведено відсутність повної оберненості прямої задачі (рух тіла в нерухомій рідині) і так званої оберненої задачі (обтікання рідиною нерухомого тіла). Як показано у роботі, примежові шари мають, у зазначених задачах, зовсім іншу структуру. Отже, повне перенесення результатів експериментів, що проводяться в аеродинамічній трубі (обернена задача) на умови польоту (пряма задача) є некоректним. Тому в роботі пропонується використовувати вимірювання на рухомих моделях літака – замість обдування його в аеродинамічній трубі. Безумовно, отримані автором результати нададуть нового

поштовху в області літакобудування, а також чисельному експерименті, де будуть враховані теоретичні здобутки роботи.

Оцінка наукових публікацій.

За результатами дослідження Сун Лінь опубліковано 12 наукових робіт, в яких повною мірою відображені основні результати роботи. Серед них 3 статті в фахових виданнях України категорії «Б» за спеціальністю 134 та 2 статті у фахових виданнях України категорії «Б» за спеціальністю 131.

Кількість та якість наукових публікацій Сун Лінь відповідає вимогам п.8 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії».

Оцінка змісту, стилю та мови дисертації, її завершеності, оформлення.

Дисертація складається із анотацій, вступу, чотирьох розділів з висновками, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг становить 155 сторінки, в тому числі основний текст – 123 сторінки, рисунки – 15, використані джерела – 112 найменувань, додатки – акт і довідка про впровадження.

У **вступі** дисертантом викладено актуальність теми дослідження, його зв'язок із науковими програмами. Мета роботи відповідає сформульованій темі і визначена в завданнях. Чітко визначено предмет і об'єкт дослідження. Вказано на наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У **першому розділі** наведено критичний огляд існуючого матеріалу за тематикою дослідження. Так, у першому підрозділі розглянуто розвиток теорій і експериментальні дані про стаціонарний ламінарний примежовий шар нестисливої течії рідини. У другому підрозділі першого розділу йдеться вже про нестаціонарний ламінарний примежовий шар нестисливої течії рідини. Вказується на недоліки існуючих теорій і необхідність їх усунення. Логічним продовженням дослідження є наступний підрозділ, який присвячено питанню формування примежового шару – так званій області розвитку течії. Нарешті, огляд робіт завершує підрозділ, у якому надано критичний аналіз моделей вихрових течій, які утворюються під час обтікання рідиною поверхні рухомого тіла, зокрема літака.

У **другому розділі** розвинута модель ламінарного примежового шару нестисливої течії рідини. Сутність нововведення полягає у тому, що замість сталості молекулярної в'язкості в примежовому шарі запропонована її змінність. Нестачу рівнянь компенсує використання варіаційних принципів, зокрема оптимальний характер течії рідини у примежовому шарі. Зазначений крок дозволив отримати профіль швидкості в примежовому шарі, що повністю

збігається із експериментальними даними. Також у другому розділі розглянута задача про розгін із подальшим сталим рухом площини. При цьому утворюється нестационарний ламінарний примежовий шар, який, після розгону, перетворюється на стаціонарний. Існуючі роботи Стокса і Релея, що спираються на сталість молекулярної в'язкості, уможливають існування так званого «вічного двигуна»: після розгону площини зсувні напруження тертя на поверхні зникають із плином часу. Введення у розгляд змінної у часі і просторі молекулярної в'язкості дозволило отримати в роботі цілком фізичний розв'язок: після розгону, тертя нікуди не зникає, а приймає сталі значення. Завершує другий розділ підрозділ про розширення розробленої теорії на складну (криволінійну) геометрію. Суть полягає у тому, що масштаб товщини примежового шару (10-15 мм) і розмір фюзеляжу та крила літака (метри) дозволяє, із великою точністю, переносити отримані результати для плоскої геометрії на криволінійну.

У третьому розділі розглянуто дуже важливе питання – як формується примежовий шар. Це пояснюється скінченністю розмірів реальних тіл. Наявні роботи зводяться до автотельних розв'язків, згідно із якими примежовий шар постійно змінюється – від початку півплощини і далі, до нескінченності. Насправді, і це відомо навіть із гідравліки, течія рідини, після проходження певної відстані (області), встановлюється і далі є вже незмінною. В роботі виявлено причину невідповідності – використання умови повного прилипання рідини до поверхні твердого тіла. Як строго доведено в дисертації, ця умова не виконується в області розвитку течії, бо суперечить закону збереження маси. Завершує третій розділ вкрай важливе розширення отриманих результатів на більші значення швидкості руху рідини (повітря), коли вона вже є слабко стисливою. Показано, що основні результати, які отримані для нестисливої течії, переносяться на частину примежового шару слабко стисливої течії. Йдеться про область прилеглу до поверхні тіла твердого тіла. Утім, робиться важливий висновок про суттєвість врахування області розвитку слабко стисливої течії рідини, оскільки при цьому варіації тиску вже є одного порядку із атмосферним тиском. А це, у свою чергу, впливає на розподіл деформацій – із усіма наслідками (втома, руйнування).

У четвертому розділі отримали розвиток існуючі моделі вихрових течій, що формуються під час польоту літака. Це вихрова пелена, супутній вихор Бюргерса-Ротта, вихрова доріжка фон Кармана. На початку четвертого розділу висвітлено два серйозних нерозуміння в моделях вихрових течій. Перше нерозуміння стосується думки про те, що стаціонарна вихрова течія не може бути в'язкою і тому має охоплювати весь простір. Посилаючись на всесвітньо відому монографію Джорджа Бетчелора (Вступ до гідродинаміки), було

доведено, що стаціонарний рух рух частинок рідини по колу є в'язким і само збалансованим. Це, як раз, і уможливило існування вихрової течії із скінченими розмірами. Друге незрозуміння -- це підміна поняття компактного поля швидкості у вихровій течії компактністю поля завихрення. В роботі, з посиланням на джерела, вказано на цей недолік і отримані компактні аналоги існуючих моделей вихрових течій.

В цілому ж робота має послідовність і логічність викладення інформації, збалансованість наповнення всіх розділів. Загальні висновки відповідають поставленим науковим завданням і є змістовними. Робота є завершеною самостійною науковою працею, належно оформленою. Поставлена мета дослідження була досягнута.

До основних здобутків роботи слід відзначити таке:

- розроблена нова модель ламінарного примежового шару нестисливої та слабо стисливої течії рідини; ця модель є наслідком узагальнення моделі Стокса в'язкої течії рідини коли в'язкість може бути функцією як координат так і часу;
- на підставі відходу від сталості молекулярної в'язкості та умови полого прилипання, вдалося отримати модель області розвитку течії в примежовому шарі, стаціонарному і нестаціонарному;
- удосконалено аналітичні моделі основних вихрових течій, що генеруються під час польоту літака;
- обґрунтовано відсутність повної оберненості задач руху тіла в рідині та обтікання рідиною нерухомого тіла: примежові шари в таких задачах мають зовсім різну структуру.

Зауваження та побажання

1. В роботі чітко не вказано приклади існування ламінарного примежового шару на поверхні частини літака. Бажано почути їх.

2. У третьому розділі наведено розподіл тиску у області встановлення течії, вказується на істотність його неоднорідності. Чи не доцільно включити в модель обернений зв'язок – вплив коливального руху поверхні на течію у примежовому шарі?

3. У четвертому розділі, коли йдеться про вихроутворення, то вихровий рух впливає на перерозподіл тиску. На мою думку, в майбутніх дослідженнях це бажано врахувати.

Проте, зазначені зауваження не змінюють загального позитивного враження від представленої дисертації, вони мають переважно рекомендаційний характер.

Наукова обґрунтованість отриманого здобувачем результатів не викликає сумніву. Робота має як наукову новизну, так і практичне значення і в цілому заслуговує позитивної оцінки.

Загальний висновок

Наведені вище дані свідчать про високий рівень виконання здобувачем поставленого наукового завдання та належне володіння методологією наукових досліджень.

Наукова значущість отриманих теоретичних і практичних результатів повною мірою характеризує дану дисертаційну роботу як таку, що вирішує проблему моделювання та розрахунку течії рідини навколо просторових тіл та дає рекомендації щодо експериментальних досліджень у цій області.

Вважаю, що дисертація «Моделювання та розрахунок процесів процесів обтікання просторових тіл зі складною геометрією поверхні», представлена на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 13 – Механічна інженерія, спеціальності 134 – Авіаційна та ракетно-космічна техніка, є завершеною науковою працею, яка відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії ...» , затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, та напряму досліджень освітньо-наукової програми ДУ КАІ з вищезазначеної спеціальності, а її автор, Сун Лінь, заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 – Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Професор кафедри конструкції літальних апаратів
Державного Університету
«Київський авіаційний інститут»
МОН України,
доктор технічних наук,
професор

14.03.2025р.

Михайло КАРУСКЕВИЧ

Карускевич М. Ярославич
секретар КАІ

Сун Лінь

