

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Сун Лін

на тему **«Моделювання та розрахунків процесів обтікання просторових**

тіл зі складною геометрією поверхні»

представлену на здобуття ступеню доктора філософії

в галузі знань 13 «Механічна інженерія»

за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»

Актуальність теми дисертації

Задачі про моделювання та вивчення течії, які утворюється при обтіканні різноманітних тіл, що рухається у повітрі, є важливими для подальшого вдосконалення авіаційної та ракетно-космічної техніки.

Не зважаючи на те, що більшість течій у примежовому шарі є турбулентними, ламінарний режим обтікання частини поверхні рухомого тіла також має місце. У деяких літальних апаратів (відносно невеликих літаків) більша частина (60%) примежового шару на фюзеляжі має ламінарний характер. Як відомо, при ламінарному характері течії тортя значно менше за те, що має місце при турбулентному режимі. Відповідно, це значно зменшує опір.

Як показано у дисертаційній роботі, відомі теорії ламінарної нестисливої течії у примежовому шарі мають низку недоліків. Саме усунення цих недоліків і подальший розвиток теоретичних уявлень про ламінарну нестисливу течію рідини у примежовому шарі та практичних наслідків, які впливають із цього, присвячено основну частину роботи. В цьому і полягає її актуальність.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Отримані в роботі результати базуються на загально визнаних фізичних законах, зокрема на законі збереження кількості руху, законі збереження маси. Для опису течій у примежовому шарі застосовується рівняння Нав'є-

Стокса. В даних рівняння молекулярна в'язкість виражається з використанням її функціональної залежності у відповідності до законів теплопровідності Фур'є, за аналогією з якими Стокс побудував свою модель в'язкої течії рідини. Удосконалення моделей вихрових течій, що генеруються несучими поверхнями літальних апаратів, також має чітке підґрунття - закон збереження енергії.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1) Вперше обґрунтовано, що в без градієнтному нестисливому приміжевому шарі розподіл швидкості відповідає змінній у просторі молекулярній в'язкості.

2) Новим результатом є залежність молекулярної в'язкості не тільки від відстані до твердої стінки, але і від часу – у нестационарній течії. Змінність у часі та у просторі молекулярної в'язкості впливає із математичного замикання задачі.

3) Суттєвим науковим здобутком роботи є пряме аналітичне розв'язання задачі про формування течії у так званій області розвитку, після якої течія вже є встановленою, тобто незмінною униз за потоком. Показано та доведено ефект часткового ковзання рідини на поверхні рухомого тіла. Необхідність виконання закону збереження маси строго обґрунтовано неможливістю миттєвого повного прилипання частинок рідини до поверхні рухомого тіла. У області розвитку течії, таким чином, відбувається поступовий перехід від ковзання до повного прилипання.

4) Результати, отримані для нестислової течії рідини, перенесені і на слабко стисливу течію, що показує важливість урахування динамічних характеристик у області розвитку течії.

5) Отримали подальше вдосконалення математичні моделі основних вихрових течій, що можуть генеруватися несучими поверхнями літального апарата.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

Дисертаційна робота здобувача Сун Лінь за змістом повністю відповідає освітньо-науковій програмі третього рівня вищої освіти «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» за спеціальності 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» галузі знань 13 «Механічна інженерія».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і містить особистий внесок здобувача у науковий напрям «Механічна інженерія».

Високий рівень оригінальності (99,6%) вказує на те, що дисертаційна робота Сун Лінь є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить будь яких видів плагіату. Всі ідеї та результати інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою із використанням загальноприйнятої термінології. Матеріал роботи викладено послідовно науковим стилем мовлення та має чітку логічну структуру.

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та двох доданків. Загальний обсяг роботи – 155 сторінок.

У вступі роботи викладено всі необхідні складові: аналіз теми роботи, обґрунтування її актуальності, формулювання мети, завдання та методів дослідження, сформульовані наукова новизна та практичне значення отриманих в дисертації результатів.

У першому розділі здійснено критичний огляд робіт, які стосуються теми досліджень. До них відносяться роботи безпосередньо самого Стокса, а також Прандтля, Блазіуса, Кармана, Польгаузена, ван Дріста, Сохраба та інші. Так основною ідеєю є та, що майже 60 років після опублікування роботи Стокса його теорія не отримала належного розвитку. Натомість, замість прямого використання моделі Стокса в'язкої течії рідини з'явилися нові теорії примежового ламінарного шару. Їх поява – яскраве свідчення про певну недосконалість моделі ламінарної нестисливої в'язкої течії рідини у примежовому шарі. У дисертації виявлено причину цієї недосконалість: відсутність ізотропії сродоту поблизу твердої стінки (отже у примежовому шарі), що є результатом змінності молекулярної в'язкості в примежовому ламінарному шарі.

Подальший критичний огляд робіт привів до виявлення, в задачах про нестационарну течію рідини у примежовому шарі, суттєвих фізичних недоліків, що є наслідком припущення про сталість молекулярної в'язкості. Так показовими є роботи Стокса (1851) і Релея (1911) про течію рідини, що викликана розгоном площини із подальшим стаціонарним рухом. Згідно із вказаними роботами, після закінчення розгону, течія в примежовому шарі продовжує бути нестационарною. Та головний недолік навіть не в цьому. Після розгону, тертя зникає у часі і подальший рух є рухом без тертя. В дисертації доводиться, що таке неможливе.

В третьому підрозділі першого розділу показано, із посиланнями на відповідні джерела, що умова миттєвого повного прилипання рідини до поверхні рухомого тіла не є такою, що впливає із якихось фундаментальних законів фізики. Наводяться посилання на статті у журналах світового рівня, де також піддається критиці ця умова.

Завершує перший розділ критичний огляд моделей вихрових течій, що генеруються у примежовому шарі і взагалі при обтіканні літака (тіла взагалі). Основний напрям критики полягає у невідповідності існуючих моделей закону збереження енергії. Практично усі моделі описують обертання цілого простору, що відповідає нескінченій кінетичній енергії кожного вихра. Перекачка нескінченної енергії до вихрового руху за досить малий скінчений проміжок часу просто неможлива.

У другому розділі дисертації проведено теоретичне дослідження нестисливої течії рідини в ламінарному примежовому шарі. Як зазначено у огляді, модель Стокса із сталою молекулярною в'язкістю всередині примежового шару призводить до нефізичних результатів. У якості подолання недоліків пропонується в загальному випадку вважати в'язкість змінною величиною, яка залежить від відстані до твердої стінки (поверхні рухомого тіла). Поява додаткової невідомої величини, -- змінної в'язкості, -- обумовлює пошук шляхів для математичного та фізичного замикання задачі. Як виявилось, одним із можливих шляхів є використання варіаційних принципів. Основна ідея полягає у тому, що взаємодія рухомого тіла із рідиною відбувається не довільним чином, а оптимально: витрата рідини у

перерізі примежового шару є оптимальною. Це дає можливість замкнути математичну задачу і отримати фізично коректний розв'язок, що підтверджується експериментально.

Логічним продовженням досліджень є вивчення нестационарної течії в примежовому шарі, яка зумовлена нестационарним рухом тіла (розгін, гальмування).

Логічним продовженням досліджень є вивчення нестационарної течії в примежовому шарі, яка зумовлена нестационарним рухом тіла (розгін, гальмування). Аби отримати фізично-узгоджений розв'язок, в роботі знову пропонується розглядати молекулярну в'язкість в примежовому шарі як змінну величину. Але тепер вже таку, яка змінюється як у просторі, так і у часі. Задачу про розгін із подальшим стаціонарним рухом площини розв'язано по-новому і отримано повністю фізичну картину течії рідини у примежовому шарі. Щойно розгін припиняється, течія стає стаціонарною, а тертя сталим -- і нікуди не зникає із плином часу.

Завершує другий розділ інформація про узагальнення отриманих результатів на обтікання криволінійних поверхонь. Основна ідея полягає у тому, що товщина примежового шару на кілька порядків менша за розміри літака і тому, із великою точністю, отримані результати можна переносити на просторові тіла із плавно змінною геометрією поверхні.

У третьому розділі розглянуто ще одну, дуже важливу, проблему. Йдеться про так звану область розвитку течії. У цій області наявні дві складові компоненти швидкості: повздовжня і поперечна. Саме умова повного прилипання не дозволяє, за законом збереження маси (рівняння нерозривності), існуванню нормальної складової швидкості. І лише відхід від припущення про сталість молекулярної в'язкості разом із припущенням поступового збільшення швидкості частинок рідини до швидкості руху тіла дало можливість узгодити отримані результати із законом збереження маси.

У четвертому розділі розглянуто низку аналітичних моделей, що описують різного роду вихрові течії, які генеруються утворюються, або можуть утворюватися при обтіканні рухомого тіла в рідині. Існуючі

математичні моделі, що описують вихрову пелену та вихрову доріжку фон Кармана удосконалені до рівня їх узгодженості із законом збереження енергії: у будь-який момент часу область простору, яка знаходиться у вихровому русі, є скінченою (компактною). Цікавим результатом роботи є також те, що аналітичну модель супутнього вихра Бюргерса-Ротта доведено також до компактного вигляду, а також розроблена більш фізично коректна модель цього вихору -- із ламінарним ядром та турбулентною периферією.

У додатках наведено акт впровадження та довідка впровадження результатів, отриманих в роботі, в навчальний процес.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій»

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати роботи висвітлені в 12 наукових публікаціях здобувача, серед яких 5 статей у фахових журналах. Результати, які отримані в дисертації, апробовані на 7 доповідях на фахових конференціях.

Усі публікації охоплюють результати, представлені в дисертаційній роботі і мають високий рівень дотримання академічної доброчесності.

Недоліки та зауваження по дисертаційній роботі

1. В рівнянні (1.1) допущено технічну опіску, а саме розмірність величин (динамічна в'язкість –кінематична в'язкість) не співпадають фізичні розмірності величин правої та лівої частини .

2. В формулах (2.1)—(2.13) є різні позначення молекулярної в'язкості, а в рівняннях (3.1) не вказується, чи є «мю» кінематичною чи динамічною в'язкістю.Співвідношення кінематична та динамічної в'язкості загальновідомі Допущена опіску - втрачено густину потоку.

3. В роботі слід було б надати більшш якісний графічний матеріал в порівняння з результатами інших авторів.

4. У висновку по роботі сказано «Показано, що отримані результати легко переносяться на примежовий шар поблизу криволінійних поверхонь із

осьовою симетрією (труби, фюзеляж літака, інше). Слід було б прописати межі використання методики (наприклад за числами Маха, Рейнольдса).

Висловлені зауваження не є принциповими і не зменшують наукових результатів роботи, їх практичну значимість та не впливають в цілому на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Сун Лін на тему «Модельовання та розрахунок процесів обтікання просторових тіл зі складною геометрією поверхні» виконана на належному науковому рівні в межах дотримання принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних завдань розв'язує наукове завдання, що має важливе значення для галузі знань 13 – «Механічна інженерія». Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Сун Лін заслуговує присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

Офіційний опонент

д.т.н., проф. каф. Транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів

Анатолій СОХАЦЬКИЙ

«17» березня 2025 року

Підпис А. Сохачького
Проректор з наукової роботи
УМСФ



В. Приймачук