

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Коновалюк Т.П.

“Звукові поля, генеровані когерентними вихровими структурами, які взаємодіють”, поданої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.06 – акустика

В даній дисертаційній роботі на прикладі декількох когерентних вихрових структур, що взаємодіють між собою, моделюються процеси виникнення та розповсюдження акустичних коливань. Вивчення елементарних актів вихрової взаємодії та звукових полів, що є результатом такої взаємодії, поглиблює розуміння фізичних процесів, що відбуваються в течіях, та дозволяє узагальнити отримані дані щодо більш складних фізичних ситуацій. Це є загальноприйнятий методологічний науковий підхід щодо виділення основних механізмів будь-якого фізичного явища.

Вивчення шумів течій має самостійний науковий інтерес, оскільки дозволяє зрозуміти сутність фізичних процесів, які виникають при перетворенні енергії переносу речовини (рідина) в енергію переносу стану (звукові хвилі). Відзначимо, що шум, генерований течією, є значною проблемою в багатьох інженерних застосуваннях. Дослідження саме когерентних вихрових структур щодо процесів звукоутворення від течій обумовлено властивостями таких вихорів найбільш ефективно серед усіх складових вихрового поля течії перетворювати енергію своєї взаємодії в енергію звукових хвиль. Цими твердженнями обумовлена **актуальність теми роботи**. Тема досліджень відповідає напрямкам роботи наукових досліджень Інституту гідромеханіки НАНУ, де виконана рецензована дисертаційна робота.

Детальний аналіз літературних джерел дозволив здобувачеві з'ясувати, що, незважаючи на велику кількість отриманих результатів щодо звукового випромінення при вихровій взаємодії, недостатньо саме кількісних даних, що пов'язують особливості течії та генерованого нею звукового поля. Цим обумовлено вибір мети досліджень. **Мета** сформульовано таким чином:

- виявлення якісних та кількісних зв'язків між динамічними та акустичними характеристиками когерентних вихрових структур, що взаємодіють;
- встановлення зв'язків між великомасштабними вихровими рухами та внутрішньою динамікою вихорів Kirchhoff з одного боку та характеристиками звукових полів, що генеруються в процесі взаємодії вихорів, з іншого;
- визначення акустичного критерію, що дозволяє моделювати великомасштабні вихрові рухи плям еквівалентною системою точкових вихорів; вирішення питання щодо можливості моделювати розподілені вихори точковими при побудові звукового джерела.

В роботі розв'язані такі задачі:

- досліджена взаємодія двох та трьох когерентних вихрових структур в межах моментної теорії вихрової взаємодії першого та другого порядків;

- в межах акустичної аналогії Lighthill розраховані звукові поля при взаємодії двох та трьох когерентних вихорів.

Взаємодія когерентних вихрових структур та генеровані ними звукові поля описувались за допомогою відомих апробованих математичних моделей: *моментної моделі вихрової взаємодії першого та другого порядків та акустичної аналогії Lighthill, відповідно.*

Вірогідність отриманих результатів забезпечується використанням апробованих математичних моделей; строгістю математичної постановки задачі; використанням стійких чисельних схем; перевіркою узгодження отриманих чисельних результатів з результатами інших авторів.

Особистий внесок здобувача полягає в побудові аналітичних виразів досліджуваних величин, розробці та реалізації чисельних алгоритмів, в аналізуванні отриманих результатів разом з науковим керівником.

Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, трьох розділів, загальних висновків, переліку джерел посилання, 6-тьох додатків. Повний обсяг дисертації становить 168 сторінок; робота містить в собі 38 рисунків, 3 таблиці, 6 рисунків розташовано на окремих сторінках, 1 таблиця розміщена в додатку; список використаних джерел складає 108 посилань.

В **анотації** подається узагальнений виклад змісту роботи. У **вступі** обґрунтовано актуальність теми роботи та викладено її основну структуру. В **першому розділі** стисло проведено огляд літератури за темою дисертації та розглянуто моделі, які було використано при розрахунках взаємодії когерентних вихорів та генерованого при цьому звукового поля. У **другому розділі** на прикладі двох початкових вихорів Rankine різного розміру розглядаються можливі типи взаємодії двох розподілених вихорів. Наведено результати обчислення граничної кривої, що розділяє пружну та непружну вихрові взаємодії, які з задовільною точністю узгоджуються з даними, отриманими методом контурної динаміки. Показано, що моментна модель добре описує поведінку вихорів при пружній вихровій взаємодії та окреслює основні тенденції у вихровій поведінці при непружній взаємодії. На прикладі двох вихорів Kirchhoff сформульовано динамічний критерій щодо можливості описування великомасштабних рухів плям точковими вихорами. В даному розділі розглянуто типи взаємодії трьох точкових вихорів з різними інтенсивностями. **Третій розділ** присвячено дослідженню звукових полів від кількох вихорів, які взаємодіють між собою. На прикладі двох вихорів Kirchhoff побудовано акустичний критерій, що дає можливість замінювати великомасштабні вихрові рухи еквівалентними точковими вихорами. Відзначено, що динамічний критерій, побудований саме для двох вихрових плям, узгоджується з акустичним критерієм з задовільною точністю. Ефективність звукового випромінювання, розрахована для двох вихорів Kirchhoff, наочним чином продемонструвала, що моделювання звукового джерела при неврахуванні внутрішніх ступенів свободи вихорів призводить до суттєвого зниження рівня звукового поля. Досліджено звукові поля при прямій, обмінній взаємодії трьох точкових вихорів та їхньому взаємному захопленні. Визначено область ефективної вихрової взаємодії для великомасштабних рухів. Отримано співвідношення, що пов'язують повний

оберт вихрової системи з повним обертом генерованого звукового поля для досліджуваних типів вихрової взаємодії точкових вихорів. Знайдено, що рівні генерованого звукового поля в випадку взаємного захоплення на кілька порядків вищі за рівні генерованого звукового поля при прямій та обмінній взаємодії: це пояснено більшими значеннями кінетичної енергії, притаманної для взаємного захоплення в порівнянні з прямою/обмінною взаємодіями. Виявлено, що максимальні рівні звукового поля пов'язані з великими значеннями часових похідних прискорень вихорів в певні моменти часу. Сформульовано акустичний критерій, що дає можливість в загальному випадку детермінованої вихрової взаємодії замінювати великомасштабні рухи розподілених вихорів еквівалентною системою точкових вихорів. На прикладі трьох вихрових плям, які взаємодіють між собою, було продемонстровано, що їхнє моделювання точковими вихорами при побудові звукового джерела суттєвим чином занижує очікуваний рівень звукового поля. Знайдено, що певним типам вихрової взаємодії притаманний характерний амплітудний спектр. Отримано, що характерна частота низькочастотної смуги спектра звукового поля визначається областю ефективної вихрової взаємодії для великомасштабних рухів, а високочастотна смуга в основному формується частотами деформації еліпсів та подвійними частотами їхнього обертання. Прийнята в теперішній час концепція, яка стверджує, що звук породжується вихровою взаємодією в течії, підтверджена чисельними експериментами. Продемонстровано, що при зростанні кількості вихорів, які взаємодіють між собою, спектр генерованого звукового поля розширюється, а його щільність зростає. В **додатках** наведено виведення необхідних формул; подано перелік конференцій, де доповідалися основні результати рецензованої роботи, та перелік друківаних праць здобувача за її темою.

Новизну результатів, що отримано в даному науковому дослідженні, сформулюємо таким чином:

- виявлено нові кількісні та якісні зв'язки між динамічними та акустичними характеристиками когерентних вихрових структур, що взаємодіють між собою;
- в межах моментної моделі вихрової взаємодії другого порядку показано, яким чином внутрішня динаміка вихрових плям впливає на генероване звукове поле;
- встановлено акустичний критерій, що дозволяє моделювати великомасштабні вихрові рухи плям еквівалентною системою точкових вихорів; дана відповідь на запитання щодо можливості описувати розподілені вихори точковими при побудові звукового джерела.

Найбільш важливі результати рецензованої дисертаційної роботи:

- побудовано зв'язки між динамічними та акустичними характеристиками течії, сформованої кількома когерентними вихорами, що взаємодіють;
- сформульовано акустичний критерій, що дозволяє моделювати великомасштабні вихрові рухи плям еквівалентною системою точкових вихорів;

- продемонстровано, яким чином формується спектр звукового сигналу від вихрової взаємодії.
- відзначено, що сингулярна модель точкових вихорів в ряді випадків задовільно описує взаємодію розподілених вихорів, проте не може бути використаною при дослідженні звукових полів, генерованих вихорами.

Основні результати дисертації доповідались на 4 наукових конференціях та республіканському науковому семінарі по гідромеханіці ІГМ НАН України. **Основні положення дисертації** достатньо повно висвітлено у 12 друкованих роботах, серед них: 7 робіт надруковано в наукових фахових виданнях України, 2 роботи--у виданнях, внесених до міжнародної наукометричної бази SCOPUS. Кількість публікацій та їхній обсяг відповідає вимогам МОН України.

Практичне значення отриманих результатів полягає у встановленні зв'язків між динамічними та акустичними характеристиками течії, що дає розуміння механізму перетворення її кінетичної енергії в енергію акустичних хвиль.

Дисертаційна робота Коновалюк Т.П. *“Звукові поля, генеровані когерентними вихровими структурами, які взаємодіють”* є завершеним науковим дослідженням. Робота має основні складові наукової роботи: теоретичні дослідження, чисельні розрахунки, аналіз отриманих результатів. Зміст роботи викладено чітко і послідовно з використанням відповідної термінології; оформлення роботи відповідає вимогам ДАК України. Структура роботи та її зміст стисло відтворено в авторефераті.

Зауваження:

1. З метою більш детального дослідження динаміки течії та особливостей генерованих нею звукових полів доречно було б замість моментної моделі скористатися гібридною моделлю, запропонованою Н.Hirsh et al. (1995 р.), яка описує вихрову взаємодію як вихорами Kirchhoff (в області пружної взаємодії), так і методом контурної динаміки (в області непружної взаємодії).
2. В роботі не досліджено поведінку діаграми напрямленості звукового поля для характерних випадків взаємодії вихрових плям; це дало б змогу порівняти ці дані з отриманими в роботі даними щодо еквівалентної системи точкових вихорів.
3. Цікаво було б дослідити, як швидко заповнюється та розширюється звуковий спектр при більш значному збільшенні кількості вихрових плям, що взаємодіють: в роботі це зроблено лише для кількості плям, що дорівнює 9.

Наведені зауваження не зменшують якості отриманих результатів, які є такими, що відповідають окресленій меті та мають наукове та практичне значення. Дана дисертаційна робота є завершеною науковою працею, виконаною на достатньо високому науковому рівні, та дозволяє оцінити здобувача Т.П. Коновалюк як кваліфікованого вченого, здатного самостійно виконувати наукові дослідження. У відповідності до Постанови Кабінету

Міністрів України №567 від 24.07.2013 р. "Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів" вважаю, що дана дисертаційна робота задовольняє усім вимогам, що пред'явлені до кандидатських дисертацій з фізико-математичних наук.

Вважаю, що результати, отримані в рецензованій дисертаційній роботі, мають науковий інтерес та дозволяють глибше зрозуміти фізичні процеси, що відбуваються при перетворенні кінетичної енергії течії в енергію розповсюдження звукових хвиль. Автор дисертаційної роботи "Звукові поля, генеровані когерентними вихровими структурами, які взаємодіють" Коновалюк Т.П. має високу наукову кваліфікацію та є гідною присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю **01.04.06** – акустика.

Офіційний опонент –

доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач кафедри
загальної та медичної фізики
Одеського національного
політехнічного університету
МОН України

Ю.М. Дудзінський

14.02.2018 р.

Підпис проф. Ю.М. Дудзінського засвідчую
Вчений секретар ОНПУ, к.т.н., доцент



В.І. Шевчук