

## **В І Д З И В**

офіційного опонента на дисертаційну роботу Бровченко Ігоря Олександровича "Чисельні лагранжеві методи в задачах прибережної гідродинаміки" на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних за спеціальністю 01.02.05 - механіка рідини, газу та плазми

### **1. Актуальність теми**

Традиційною галуззю застосування механіки рідини та газів є авіакосмічна техніка та кораблебудування. Розвиток судноплавства, авіації, а потім і космонавтики, послужив потужним стимулом для проведення комплексних науково-дослідних робіт фундаментального та прикладного характеру. За останні півтора-два десятиліття галузі застосування механіки рідини та газів придбали цивільний, «конверсійний» вигляд. На відміну від оборонної техніки, тут на перший план виходять проблеми ресурсозбереження, поліпшення економічної ефективності, підвищення комфортності та безпеки життя людини. Механіка рідини та газів поширюється в області наук, що традиційно вважаються спостережливими, такі як метеорологія, океанографія, геофізика, геологія, екологія. Проводяться чисельні моделювання течій в атмосфері, океані, змін стану магми у вулканах, нафти або газу в підземних природних резервуарах. Довгостроковий прогноз погоди виконується за допомогою засобів обчислювальної аеродинаміки.

Дисертаційна робота Бровченко І.О. відноситься до важливого розділу у механіці рідин та газів - гідродинаміці океанів, морів та руслових течій, переносу намулів, забруднень і є суттєвим кроком у розробці математичних моделей, методик, алгоритмів та програм для дослідження гідродинамічних процесів.

### **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій**

У дисертації та авторефераті досить чітко сформульована актуальність, наукова новизна та практична цінність виконаних досліджень.

Автором проведено огляд існуючих методів розрахунку течій у прибережній зоні океанів та морів, визначена мета роботи, сформульована постановка задач дослідження, розроблена методологія, алгоритми розрахунку. Положення дисертації ґрунтуються на фундаментальних законах механіки рідин та газів, відомих експериментальних даних та емпіричних залежностях. До активу автора роботи треба віднести вдалий на момент досліджень підхід до вибору рівня вихідної постановки кожної із розв'язаних задач. У дисертації наводиться великий обсяг результатів обчислювальних експериментів та докладний аналіз результатів. Результати теоретичних досліджень задовільно співпадають з відомими розрахунковими та експериментальними даними.

Висновки, подані у дисертації та авторефераті, відображають головні результати досліджень.

### **3. Найсуттєвіші наукові результати та достовірність досліджень**

У дисертації на основі рівнянь руху нестисливої рідини та рівнянь переносу дискретної фази за допомогою чисельних методів узагальнені та розвинуті теоретичні основи математичного моделювання течій та переносу домішок у прибережній зоні океанів та морів.

Основними науковими результатами дисертації є:

1. Розробка, верифікація та тестування програмно-методичного забезпечення на основі моделі нестисливої рідини та рівнянь переносу дискретної фази для дослідження гідродинамічних процесів та переносу забруднень у прибережній зоні океанів та морів.

2. Розробка математичних моделей, реалізація та тестування алгоритмів, аналіз результатів дослідження:

- прибережних процесів, що дозволяють описувати взаємодію хвиль, гравітаційних та струменевих течій для розрахунку переносу намулів та забруднень,

- переносу багатofракційних намулів, сумішей зв'язних та незв'язних намулів, міграцію намулів у донних шарах та зміну гранулометричного складу та пористості в донних відкладеннях,

- розповсюдження нафтопродуктів в прибережних зонах, що враховує вплив обертання Землі за рахунок утворення примежового шару Екмана під поверхневою плівкою нафти, дозволяє моделювати взаємодію з нафтовими бонами та вплив дисперсантів на розповсюдження нафтового забруднення,

- розповсюдження радіонуклідів в прибережних зонах, що враховує радіоактивний розпад, адсорбцію-десорбцію на багатofракційних намулах, міграцію радіонуклідів у донних відкладеннях та у поровій воді, наслідків аварії на АЕС Фукусіма

Достовірність отриманих у дисертаційній роботі наукових результатів забезпечується використанням відповідних фізико-математичних моделей для опису гідродинамічних процесів у нестисливих середовищах, наявності рухомих меж, коректних методів числового розв'язку задач, задовільним співпаданням одержаних результатів з відомими експериментальними та розрахунковими даними.

### **4. Значення отриманих результатів для науки та практики**

Розроблене програмно-методичне забезпечення використано при розробці і реалізації математичних та числових моделей гідродинаміки та розповсюдження забруднень в прибережних зонах, що враховують наявність намулів, моделювання наслідків аварійних забруднень, розповсюдження радіонуклідів (аналіз наслідків аварії на АЕС Фукусіма), розповсюдження нафтопродуктів (аналіз нафтових розливів у Сінгапурській протоці).

Результати роботи знайшли впровадження в багатьох науково-дослідницьких та прикладних проектах.

Методики та результати досліджень будуть корисними для визначення джерел, прогнозування розповсюдження та подолання наслідків забруднення водного простору України та інших країн Державною службою України з надзвичайних ситуацій.

### **5. Критичні зауваження щодо змісту та оформлення роботи**

Відмічаючи позитивні моменти виконаних досліджень, слід звернути увагу на наступні зауваження.

1. Назва дисертації (лагранжеві методи) не в повному обсязі відповідає її змісту:

- рівняння гідродинаміки (динаміки фази, що переносить) записані на основі підходу Ейлера (розділ 3),
- динаміка частинок намулів описується як в ейлеровому (п.3.4), так в лагранжевому підході (розділ 4),
- власне лагранжеві методи застосовуються тільки для нафтових плям і радіоактивних частинок,
- до такого висновку сам автор прийшов у вступі до дисертації та автореферату.

2. Розділ актуальність роботи не може зводитися до «переваг лагранжевих методів над ейлеровими, а також *перспектив* їх застосування», тут необхідно було з точки зору механіки рідини та газу сформулювати проблему, якій присвячена дисертація.

3. У вступі автор стверджує, що лагранжеві методи вільні від числової дифузії. Але це не так, теоретично ця властивість лагранжевих методів дуже мало вивчена. При використанні наближених співвідношень для опису механічної та теплової взаємодії фази, що переносить, та дискретної фаз виникають ефекти числової дифузії. Відомі ґрунтовні теоретичні роботи по оцінці апроксимаційної в'язкості цього класу числових методів.

Там же автор стверджує, що ейлерові методи потребують наперед визначеної незмінної області моделювання – це так, межі і вузли можуть рухатися при використанні ейлерового методу.

4. Дисертація недостатньо структурована:

- відсутня (як окремий розділ або окремий пункт) постановка завдання дослідження як фізична, так і математична, не завжди наведені розрахункові схеми (типу рис. 6 автореферату), розрахункові області, початкові та межові умови,
- описано велику кількість лагранжевих методів (розділи 2, 4). Однак які з них застосовуються до якої задачі дуже важко розрізнити. Крім того, фактично відсутній порівняльний аналіз різних лагранжевих методів,
- верифікація для розглянутих підходів досить обмежена. Верифікацію варто було б зробити більш докладною, особливо в частині запропонованих моделей, алгоритмів, турбулентності, і виділити в окремий розділ.

5. Класичні роботи з гідродинаміки та тепломасопереносу у багатофазних течіях передбачають ретельне вивчення поля течії і лише потім аналіз переносу, тепло– та масообміну, седиментації і так далі. У дисертації гідродинаміка докладно не досліджується, вплив форми дна і інших чинників не вивчається. У рівняннях гідродинаміки (розділ 3) відсутні джерельні складові, що відповідають за зворотний вплив дисперсних частинок на динаміку фази, що переносить. Якщо автор припускає, що таким впливом можна знехтувати, то це необхідно окремо обґрунтовувати. Крім того, необхідно вказувати межі застосовності такого підходу, як з масових концентрацій, так і по імпульсу дисперсних частинок. Взагалі кажучи, частинки, взаємодіючи з турбулентними вихорами, поведуться складним чином, який ніяк не можна вважати ізотропним або рівномірним за напрямками у просторі.

6. Ще одна проблема дослідження багатофазних течій пов'язана з відтворенням декількох характерних масштабів (глибина товщі води, висота хвилі, товщина примежового шару, товщина плівки, розмір наносів, розмір крапель та частинок) та проміжків часу. Завдяки яким моделям та числовим методикам вдалось врахувати всі масштаби? Для частинок, наприклад, піщинок, рівняння Ланжевена навряд чи підійде. У них маса ненульова. Для молекул це справедливо. Чомусь автор весь час пише, що наноси складаються з піску, а мул як утворюється? Може, там частинки дрібніші? Теорія багатофазних течій (а автор якось уникає називати ці течії багатофазними) говорить, що для оцінки характеру руху частинки дуже важливо відношення площі її поверхні до об'єму (або зворотне відношення). А автор це відношення взагалі не використовував при аналізі.

7. Автор змішує поняття «модель механіки суцільного середовища» та «спосіб (підхід, метод) опису руху суцільного середовища».

8. Для рівнянь гідродинаміки на ейлеровому етапі відсутні межові умови для компонент швидкості та тиску. Коректна постановка особливо важлива для придонної зони течії. Зазвичай використовуються або умови прилипання, або часткового ковзання з прив'язкою до поверхневого тертя. Обидві постановки межових умов повинні призводити до появи примежового шару в придонній зоні течії, як це показано у автора на рис. 4.1. Однак, в розподілах векторів швидкостей (рис. 3.12, 3.13, 4.7) структура течії, відповідна примежовому шару, відсутня.

9. В дисертації не наведено опис способів реалізації числових методик на ейлеровому етапі, особливо на неструктурованих сітках. З тексту дисертації не зрозуміло – це власна розробка автора, чи пакет програм, наданий співавторами? Яким чином при реалізації числової методики погоджені поля швидкості та тиску при використанні моделі нестисливої рідини?

10. Автор не обговорює здатності сітки відтворювати параметри турбулентності. Оскільки застосовуються порівняно грубі сітки (типу 100x80x50), необхідно обґрунтовувати обрані кількості вузлів вздовж кожного напрямку, або застосовувати пристінні функції.

11. У авторефераті та дисертації не розкриті методологічні аспекти моделювання за допомогою лагранжевого способу: задаємо загальну масу нафтових крапель (частинок), визначаємо кількість крапель (за яким критерієм), як визначається початковий розподіл маси, геометрії і розташування у просторі крапель, чи розглядаються представницькі краплі, за якою тоді методикою враховується маса всіх крапель і таке інше?

12. В авторефераті та дисертації відсутні данні про витрати часу на розрахунки задач. Дуже важко оцінити обчислювальну ефективність розроблених методик.

13. При розгляді модифікованої моделі, яка здатна описувати динаміку розтікання поверхневої плями з урахуванням сили Коріоліса, в'язких ефектів, випарування, наявності поверхневих течій для випадків миттєвого або неперервного витоку, моделювати тривимірну дисперсію нафтових крапель в стовпі води, автор не обговорює можливість подрібнення та коагуляції окремих крапель при великих деформаціях вільної поверхні, у тому числі при перевероті хвилі. За рахунок яких фізичних процесів нафтова пляма через один день після початку розливу згідно спостережень та розрахунків прийняла таку складну форму (рис. 6 автореферату)?

14. На рис. 24 автореферату наведено порівняння розрахунків концентрації  $^{137}\text{Cs}$  на поверхні з даними спостережень ТЕРСО. Які фізичні процеси викликали такі періодичні коливання концентрації у часі, завдяки яким доданкам у вихідних рівняннях ці зміни у часі описані?

Перераховані вище недоліки не змінюють загальної позитивної оцінки усієї роботи.

## **6. Висновки щодо дисертаційної роботи**

Рецензована робота є закінченим науковим дослідженням, в якому здійснене теоретичне узагальнення і рішення науково-прикладної проблеми математичного моделювання гідродинамічних процесів та переносу забруднень у прибережній зоні океанів та морів.

Наведені в дисертації та авторефераті результати досить повно опубліковані в 85 роботах, обговорені на конференціях і семінарах. Серед публікацій є 34 (2 без співавторів), що опубліковані у фахових збірниках наукових праць, дві монографії, 17 робіт індексовані у міжнародній наукометричній базі Scopus. Публікації повною мірою відбивають наукові положення, висновки і рекомендації дисертації.

Автореферат відповідає змісту дисертації.

Вважаю, що дисертація Бровченко Ігоря Олександровича "Чисельні лагранжеві методи в задачах прибережної гідродинаміки" задовольняє усім вимогам «Порядку присудження наукових ступенів» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р., а її автор заслуговує присудження йому вченого ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.05- механіка рідини, газу та плазми.

Завідуючий кафедрою механотроніки  
Дніпровського національного університету  
ім. О. Гончара,  
доктор фіз.-мат. наук, професор

О.А. Приходько

15 травня 2017 року

Підпис Приходька О.А. засвідчує  
Вчений секретар  
Дніпровського національного університету  
ім. О. Гончара



Т.В. Ходанен