

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Бровченка Ігоря Олександровича**

“Чисельні лагранжеві методи в задачах прибережної гідродинаміки”,

представленої на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми

Останнім часом стрімкий розвиток інноваційних технологій значно підвищує ризик техногенних аварій, розвиток у часі яких здатний призвести до забруднення величезних територій, виснаження і руйнування екологічної системи прибережної зони.

Розливи нафтопродуктів представляють сьогодні одну з найсерйозніших загроз для прибережної екосистеми. Джерелами їх появи в прибережних регіонах можуть служити аварійні і експлуатаційні скиди з суден, морські катастрофи, витік нафти з нафтопереробних заводів, підприємств їх зберігання і розподілу. Не меншу небезпеку для нормального функціонування прибережної екосистеми представляють стоки побутових і промислових відходів, стічні води різного походження.

Далекосяжні наслідки розливів нафти з минулих і недавніх морських аварій, поширення радіоактивного забруднення в морському середовищі, що з'явилося в результаті аварій на прибережних атомних електростанціях, доводять необхідність створення ефективних інструментів для прийняття зважених рішень і ліквідації наслідків екологічних катастроф. Ці інструменти мають визначальне значення для вироблення довгострокових стратегій і короткострокових оперативних заходів в проблемі локалізації поширення забруднень в екологічних системах.

З цих позицій, вирішення проблеми переносу скалярних полів в реальному морському середовищі з урахуванням різних механізмів взаємодії забруднюючих речовин з морськими течіями, донними відкладеннями і хвилюванням на морській поверхні становить певний науковий і практичний інтерес.

**Актуальність теми** досліджень обумовлена широким проявом процесів переносу гідродинамічними течіями скалярних полів в природі і техніці. Чисельне моделювання процесу поширення забруднень різної природи в неоднорідному морському середовищі вимагає значних обчислювальних ресурсів сучасних комп'ютерів. З цієї причини розробка нових методів і моделей, що описують еволюцію забруднень, представляє сьогодні один із пріоритетних напрямків обчислювальної гідромеханіки. Вирішення цієї проблеми надасть безсумнівну стимулюючу дію при формуванні більш глибокого розуміння особливостей протікання фізичних процесів в складних гідродинамічних системах різного призначення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за темою дисертації були виконані в інституті проблем математичних машин і систем Національної академії наук України в рамках держбюджетних тем та фундаментальних досліджень, проектів Державного фонду фундаментальних досліджень Ф64/22, Ф68/12879, проектів INTAS 03-51-

3728, 03-51-4620, спільних проектів РФФД (Росія) - ДФФД (Україна) і проекту МАГАТЕ, науково-дослідних роботах молодих вчених, стипендій та грантів.

**Метою** дисертаційної роботи є розробка методологічних і технологічних основ для моделювання процесів переносу скалярних полів лагранжевими методами в прибережній гідродинаміці.

**Об'єктом дослідження** є процес поширення забруднень різної природи і намулів в прибережних зонах морів.

**Предметом** дослідження є методи моделювання поширення забруднень і намулів в прибережних зонах світового океану.

**Методи дослідження.** При виконанні дисертаційної роботи використовувалися загальноприйняті моделі суцільного середовища, коректні математичні методи моделювання процесів переносу скалярних полів в суцільному середовищі, апробовані чисельні методи розв'язання початково-крайових задач, методи апроксимації функції декількох змінних, коректні аналітичні методи математичного аналізу.

**Наукова новизна** результатів роботи визначається:

- розробкою та обґрунтуванням нових чисельних моделей переносу скалярних полів неоднорідними гідродинамічними течіями методом частинок;
- застосуванням стохастичних методів для моделювання процесів переносу частинок, багатофракційних намулів в гідродинамічних течіях різного масштабу, адаптації граничних умов в методі частинок в термінах ймовірності зміни стану частинок коло границь;
- подальшим розвитком гідродинамічних лагранжових моделей перенесення багатофракційних намулів у прибережних течіях з урахуванням взаємодії хвиль з глобальними течіями, зміщення наносів, зміни гранулометричного стану і пористості в донних відкладеннях;
- адаптації розробленої моделі для випадку поширення нафтопродуктів на морській поверхні з урахуванням впливу сили Коріоліса, сили поверхневого натягу, процесів випаровування, емульгації і розчинення;
- встановленими кількісними даними залежностей розподілу концентрації намулів від параметрів гідродинамічних течій і геометрії обмежуючих поверхонь з урахуванням різних типів взаємодій в багатофракційних динамічних системах;
- практичними чисельними розрахунками поширення радіонуклідів в морському середовищі з урахуванням процесів розпаду, адсорбції і десорбції радіонуклідів на багатофракційних наносах стосовно до задачі моделювання наслідків екологічної аварії на атомній електростанції Фукусіма (Японія).

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в можливості застосування розроблених в роботі математичних і чисельних моделей процесів переносу скалярних полів різної природи гідродинамічними течіями, виявлених особливостей взаємодії забруднень і відкладень з потоками рідини в прибережній зоні світового океану. Графічний матеріал і наведений аналіз фізичних закономірностей розподілу забруднень дозволяють глибше зрозуміти особливості взаємодії рідкої і твердої фаз у суцільному середовищі, Результати дисертаційної роботи становлять безсумнівний інтерес для дослідників в

області гідромеханіки, екології, зацікавлених фахівців в різних областях науки і техніки.

**Достовірність** наукових результатів дисертації забезпечується використанням загальноприйнятих моделей суцільного середовища, коректністю математичної постановки задач і застосуванням надійних чисельних методів для їх розв'язання, контрольованою точністю інтегрування рівнянь переносу скалярних полів і несуперечливістю отриманих результатів з відповідними відомими результатами інших авторів, які опубліковані в національній та світовій науковій літературі.

**Структура дисертації.** Робота складається з вступу, семи розділів, висновків, списку використаної літератури та додатку. Робота містить 322 сторінки основного тексту, 146 рисунків і 9 таблиць. Список літературних джерел містить 324 найменування.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету і задачі, об'єкт і предмет дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення роботи, вказано особистий внесок здобувача в проведеній науковій роботі відповідно до вимог ДАК України до дисертаційних робіт.

**У першому розділі** дисертації проведено огляд літературних джерел з проблеми чисельного розв'язку задач переносу скалярних полів гідродинамічними течіями при лагранжевому підході до опису руху суцільного середовища. Окрему увагу автор приділив перевагам і недолікам сіткових, гібридних і безсіткових методів розв'язання задач. У заключній частині розділу розглянуто особливості безсіткового лагражевого методу для розв'язання рівнянь мілкої води.

**Другий розділ** дисертації присвячений обґрунтуванню розв'язання рівнянь адвекції-дифузії методом частинок. Автор запропонував новий алгоритм для формування чисельної схеми для випадкових флуктуацій з незміщеною дисперсією. Аналіз деяких часткових аналітичних розв'язків дозволив автору отримати критерій оцінки максимального часового кроку при чисельному інтегруванні задачі переносу маси. Було доведено, що коефіцієнт дифузії при формуванні чисельної схеми повинен визначатися не в точці, в якій знаходилася частинка на попередній ітерації за часом, а в середній точці детермінованого зміщення центру мас.

Окрему увагу в роботі приділено порівнянню чисельних схем випадкових флуктуацій різної точності. В роботі розглядаються тестова задача для постійної швидкості осідання частинок, постійного, лінійного і квадратичного коефіцієнта дифузії в вертикальному напрямку. Порівняльний аналіз отриманих чисельних даних дозволив автору дисертації оцінити область значень кроку інтегрування задачі по часу для лінійного наближення.

Заключну частину розділу дисертації присвячено розробці та обґрунтуванню чисельної схеми розв'язання поставленої задачі для загального випадку розрахунку ймовірності зміни стану кожної частки. В результаті автор наводить узагальнений чисельний алгоритм розв'язання рівнянь переносу та дифузії неконсервативних домішок лагранжевим методом.

**У третьому розділі** проведено аналіз різних гідродинамічних моделей, які дозволяють моделювати фізичні процеси в прибережних зонах морів з урахуванням складного рельєфу дна і берегової лінії, вітрових поверхневих хвиль, приливних і гравітаційних хвиль і прибережних струменевих течій. В основу сформованої автором моделі покладена тривимірна гідродинамічна модель THREE\_TOX, поєднана з хвильовою моделлю SWAN. Отриману модель було протестовано на задачі нахату поверхневих хвиль на похилу поверхню дна. Порівняльний аналіз даних лабораторного експерименту і результатів чисельного моделювання показав хороший збіг. Основним результатом проведених досліджень стала чисельна ідентифікація берегового течії, яка виникає при падінні хвиль під кутом до берегової лінії.

Автор роботи сформував нову модель тривимірної течії, яка заснована на розщепленні полів швидкості і тиску на гідростатичну і негідростатичну компоненти в  $\sigma$ -системі координат. Методика розв'язання задачі зводиться до послідовного визначення форми вільної поверхні, гідростатичних компонентів поля швидкості тиску, негідростатичних компонентів полів і розрахунку процесу переносу скалярних полів.

У заключній частині розділу приведена вдосконалена модель переносу багатофракційних намулів з урахуванням процесів перемішування донними організмами і пористості донних відкладень, яка дозволяє описати еволюцію незв'язаних і зв'язаних шарових наносів для випадку неоднорідного розподілу фракційного складу і пористості наносів.

**У четвертому розділі** дисертації автор формує і обґрунтовує тривимірну модель переносу зв'язаних і незв'язаних намулів, яка об'єднана з тривимірною гідродинамічною моделлю на  $\sigma$ -системі координат. Модель бере до уваги процеси переносу зважених намулів у водному середовищі і в активному донному шарі, змучування і осідання частинок різних фракцій намулів.

Модель перевірено на послідовності тестових задач і на результатах лабораторних експериментів: розвиток шару завислих намулів в горизонтальному однорідному потоці, перенос намулів в каналі із заглибленням, розмив донних відкладень під дією струменевих течій, одиночної внутрішньої хвилі і шельфової конвекції. Показано, що гравітаційні течії і внутрішні хвилі є одним з головних механізмів переносу донних намулів в шельфових зонах світового океану.

**П'ятий розділ** роботи присвячений аналізу розповсюдження нафтопродуктів на основі лагранжевого підходу. Для опису поля швидкості течії використовувалися чисельні дані прикладних пакетів ROMS, waveWatch III і ін. для складних геометрій течій і аналітичні розв'язки для деяких окремих випадків. Чисельний алгоритм розв'язання задачі зводився до інтегрування задачі Коші з правою частиною, яка бере до уваги різні фізичні ефекти взаємодії частинок нафти з водним середовищем. При формуванні моделі автор роботи врахував вплив сил Коріоліса для гравітаційно-в'язкого режиму взаємодії, сил в'язкості в рамках теорії приграничного шару з урахуванням наявності шару Ейкмана, процеси випаровування, емульгації, розчинення і диспергування.

Дослідження починаються з розгляду автономної задачі односпрямованого і вісесиметричного розтікання нафтової плями на

незбудженій поверхні при безперервному і миттєвому витоку нафтопродуктів. Показано, що при гравітаційно-в'язкому режимі взаємодії нафти з водним середовищем з'являється окружна швидкість на зовнішній границі нафтової плями, яка викликана дією сили Коріоліса. Встановлено загальну закономірність, пов'язану зі зменшенням площі розмиву нафтової плями під впливом сили Коріоліса. Порівняння аналітичних розв'язків і чисельних даних, отриманих при розв'язанні відповідних задач, свідчить про досить високу точність чисельних результатів.

В задачі, яка пов'язана з проблемою локалізації нафтової плями бонними конструкціями, показано, що диспергування нафтових крапель під дією різних механізмів призводить до помітного збільшення кількості частинок, що проникають через загородження. Кількісні результати дозволяють оцінити якість бонних загороджень в залежності від їх геометричних параметрів і умов на водній поверхні.

У заключній частині розділу представлено моделювання процесу поширення нафтового забруднення близько корейського узбережжя в Жовтому морі в результаті зіткнення кранової баржі з танкером Hebei Spirit. Дані чисельних розрахунків і супутникових знімків знаходяться в хорошій відповідності.

**Шостий розділ** присвячений розробці моделі поширення радіоактивних забруднень на морі. В роботі наводяться основні рівняння переносу радіонуклідів у водному середовищі і в багатофракційних донних намулах. В основу покладено двоступеневу послідовну кінетичну реакцію адсорбції радіонуклідів намулами. Перша реакція визначається адсорбцією радіонукліда поверхнею частинки намулів, а друга реакція пов'язана з її дифузією всередину частинок. Безперервний вертикальний розподіл намулів і радіоактивності в донних відкладеннях апроксимується у вигляді послідовності шарів за аналогією з моделлю переносу намулів, що розглянуто раніше. Адекватність моделі підтверджується порівнянням отриманих результатів з даними лабораторного експерименту, опублікованого в науковій літературі.

Дослідження розподілу концентрації радіонуклідів в поровій воді і намулі в ізольованому донному шарі, її адаптація для одношарової та багатошарової моделей, дозволили автору провести порівняльний аналіз чисельних результатів в задачі поширення радіонуклідів в каналі з поглибленням і встановити часові масштаби застосування моделей. Показано, що найбільша концентрація радіонуклідів утворюється на дні поглиблення, в якому процеси забруднення відбуваються головним чином за рахунок дифузійних потоків. Аналіз лагранжевої моделі переносу частинок дозволив оцінити точність моделювання для заданої кількості частинок в системі. У роботі проводиться аналіз ймовірності адсорбції і десорбції в однофракційному і багатофракційному намулах при фазових переходах частинок у водному середовищі і в донних відкладеннях і при біотурбації.

Заключну частину досліджень в розділі присвячено моделюванню процесів забруднення в Жовтому морі при можливому аварійному викиді радіонуклідів на атомній електростанції Санмень (Китай). У роботі представлено розрахункову сітку, визначено граничні умови і розподіл параметрів донних намулів. Детальні дані приливних течій, поверхневих хвиль, концентрації

зважених наносів дозволили чисельній моделі, розробленій автором, визначити поля радіонуклідів у воді і на дні моря з плином часу.

**У сьомому розділі** дисертації, який присвячено моделюванню процесу переносу радіонуклідів для розрахунку наслідків забруднення навколишнього середовища після аварії на атомній електростанції Фукусіма 11 березня 2011 року, автором представлені поля розповсюджень радіоактивних елементів як на морській поверхні, так і в донних відкладеннях. Результати розрахунків розподілу радіонуклідів на поверхні моря з даними вимірювань знаходяться в хорошій відповідності для великого набору контрольних точок. Показано, що розподіл забруднення дна з плином часу носить нестационарний характер. Встановлено, що в зонах високої концентрації донних забруднень концентрація радіонуклідів має характерну тенденцію до зменшення значень концентрації, в той час як в зонах з малими концентраціями забруднень має місце зворотна тенденція.

**У висновках** відображені основні результати дисертаційної роботи.

Текст дисертації написаний досить грамотно і акуратно, цілком логічно. Автореферат написаний цілком докладно, добре проілюстровано і повністю відображає зміст дисертації. Всі основні положення і висновки дисертаційної роботи викладені в авторефераті.

В якості зауважень по роботі необхідно зазначити наступне:

1. Компонування першого розділу дисертації ( “1. Ейлерові і лагранжеві чисельні методи”), на мій погляд, є невдалою. Фактично, в цьому розділі автор розглядає основні рівняння в задачах переносу скалярних полів в гідродинаміці, чисельні методи їх розв’язання та обмеження, які виникають при чисельному моделюванні. Мені здається, перший розділ дисертації слід присвятити огляду літературних джерел, який повинен закінчуватися формулюванням переліку нез’ясованих особливостей і закономірностей в проблемі, що розглядається, які в подальшому треба буде вирішити в дисертації.

2. У розділі 1 дисертації має місце термінологічна неточність. Перші два дискретних аналози першої похідної (1.3) називаються “різниця вперед”, “різниця назад”, а не “різниця по потоку”, “різниця проти потоку”. У наведених формулах дискретні значення поля швидкості не використовуються. Саме знак значень компонент поля швидкості визначає назву (“різниця по потоку” або “різниця проти потоку”) дискретного аналога похідної.

3. На с.154 автор пише: “Тим не менш, можливий вплив сили Коріоліса на розтікання ще не був досліджений, або навіть обговорений, незважаючи на те, що час розтікання у випадку великих розливів може тривати багато годин і навіть днів.”. Смію зауважити, що вплив сили Коріоліса враховується, наприклад, в інтегрованому пакеті OILTRANS (Berry, A., Dabrowski, T., and Lyons, K. (2012). The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea, *Marine Pollution Bulletin*, **64** (11), 2489-2501.), якій застосовується для складання довгострокового прогнозу еволюції нафтової плями на морській поверхні.

4. У розділі 2 (стор.50) автор пише: “В нашій роботі вважається, що рівняння адвекції-дифузії описує процес турбулентного переносу та перемішування з достатньою точністю.”. На підставі яких досліджень автор дисертації робить такий висновок?

5. При формуванні моделей, які беруть до уваги різні фізичні процеси в морському середовищі, автор застосовує різні емпіричні залежності і інтерполяційні формули. Однак, при цьому в роботі не вказується допустимий діапазон зміни аргументів емпіричних залежностей.

6. У розділі 4.2.3 автор наводить емпіричне співвідношення (4.13) для параметра мобільності, який визначається розміром частинок піску  $D_{*j}$  в діапазоні від 4 мм до 150 мм. В яких одиницях насправді вимірюється ця величина?

7. При описі процесу емульгації використовується безрозмірний параметр  $W$ . У тексті підрозділу дисертації він не визначений.

8. У роботі дисертант застосовує несортовані посилання на літературу. Нагадаю, що посилання в дисертаційних роботах з номерами поспіль ставляться з використанням знаку тире між першим і останнім номерами посилань на літературу.

9. У формулі (2.20) має місце описка. На мій погляд, замість  $J_N$  має бути  $T_N$ .

10. У розділі 3.2.2, при описі перевірки запропонованої моделі на аналітичному розв’язку і лабораторному експерименті автор пише: “Співставляючи розв’язки (4.27) та (3.71) отримаємо 4 рівняння для чотирьох невідомих ( $h_B, \eta_B, a_B, k_B$ ), які можуть бути ...”. Наведені в тексті посилання не містять зазначених невідомих.

11. На с.19 зустрічаються фрази; “...до вирішення складних практичних задач...”, і “...відтворює і вирішує задачу на комп’ютері...”. В українській мові “вирішують” тільки проблеми, а “розв’язують” тільки задачі.

12. Деякі рисунки (рис.2.3, 2.4-2.15, 4.19, 5.2-5.4, 5.11-5.13, 6.5, 6.6, 6.19-6.21, 7.11-7.15, 7.18, 7.19 і інші) в роботі наведені в дрібному масштабі. Це призводить до надзвичайно складного аналізу представлених на рисунках даних.

13. У тексті дисертації зустрічається фраза “згідно алгоритму...” і далі йде посилання на формулу (дивись текст на с.232, с.263). Яким чином можна за допомогою формули описати чисельний алгоритм?

Вважаю за необхідне сказати, що висловлені зауваження істотно не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи і не зменшують цінності отриманих в ній результатів.

Основні результати дисертаційної роботи повністю відображені в 34 наукових статтях, з них 16 статей (англійською мовою) опубліковані в провідних міжнародних наукових виданнях, які входять в наукометричну базу даних SCOPUS. Частина результатів роботи обговорювалася на міжнародних наукових конференціях. Автор опублікував 49 праць та тез в збірниках праць конференцій.

Все вище сказане дозволяє кваліфікувати розглянуту дисертаційну роботу як закінчену наукову роботу, яка в повній мірі задовольняє вимогам п.п. 9, 10 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013р. Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми, має беззаперечне наукове і прикладне значення, оскільки містить нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності роблять суттєвий внесок у вирішення важливої науково-прикладної проблеми керування і контролювання процесів переносу скалярних полів в прибережних зонах світового океану.

Вважаю, що автор дисертації, **Бровченко Ігор Олександрович** заслуговує присудження йому шуканого наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,  
професор кафедри

Автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

Теплоенергетичний факультет,

Київський політехнічний інститут

ім. Ігоря Сікорського

О.А. Гуржій

20 травня 2017р.

Київ, Україна

Підпис Гуржія О.А. підтверджую

Учений секретар

КПІ ім. Ігоря Сікорського



А.А. Мельниченко