

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертацію Бровченко Ігора Олександровича “Чисельні Лагранжеві методи в задачах прибережної гідродинаміки”, представленої на здобуття вченого ступеня доктора фізико-математичних наук по спеціальності 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

Прибережні райони морів і океанів з давніх часів були зоною активної людської життєдіяльності. У зв'язку з розвитком людської цивілізації, на сьогодні ці райони стали важливою складовою світової економіки і місцем проживання значної кількості населення Землі. В останні десятиліття наша планета все частіше потерпає від природних катаклізмів, обумовлених глобальним потеплінням та процесами всередині земної кори, що безпосередньо стосується і прибережних районів. Однак ці області мають ряд додаткових екологічних проблем, обумовлених не лише економічною діяльністю та забезпеченням нормальних умов проживання людей, але і наявністю великої кількості морських портів і пов'язаних з ними морських транспортних сполучень.

Однією з таких важливих проблем є попадання в морські акваторії та розповсюдження там різного роду забруднень, які часто завдають значної, а часом і небезпечної для життя людей, екологічної шкоди. Найбільш загрозливими в цьому плані є великооб'ємні викиди нафти та нафтопродуктів, а також потрапляння в морське середовище радіоактивних викидів, які мають місце при аваріях на АЕС, розташованих в прибережних зонах морів. Окрім цього, для міст і ділянок промислової діяльності важливими є процеси, обумовлені дією морських хвиль на берег, які приводять до його розмиву та можливої руйнації споруд, які там знаходяться. Щоб уникнути негативних наслідків відмічених природних явищ та аварійних ситуацій, необхідно знати природу та закономірності еволюції в часі і просторі відповідних процесів в умовах реальних морських акваторій. Головна роль у досягненні цієї мети належить вивченню фізики та гідродинаміки відповідних процесів.

Саме вивченню фізичних та гідродинамічних процесів, пов'язаних з переносом намулів та викликаною ним зміну морфології берегових схилів, обумовлених великооб'ємними викидами нафтопродуктів та їх подальшому розповсюдженню на поверхні моря та процесів поширення радіоактивних забруднень з

врахуванням попадання та переносу радіонуклідів в донні намули і є об'єктом і суттю наукових досліджень, виконаних в дисертації І.О.Бровченко.

З вищесказаного випливає безсумнівна актуальність та наукова і практична значимість теми дисертації а також відповідність її профілю спеціалізованої вченої ради, де відбувається захист.

Дисертація складається з Вступу, семи розділів, анотації, додатків та бібліографії.

У Вступі обґрунтовано вибір теми та її актуальність, сформульована мета, задачі досліджень та методи їх розв'язання, головні наукові результати, їх новизна, наукове та практичне значення, апробація розроблених фізико-математичних моделей. Охарактеризовані зв'язки роботи з науковими програмами різних рівнів та науково-дослідними темами і планами, в рамках яких виконувалась робота, відмічено особистий внесок автора в одержаних результатах, а також наводиться короткий зміст дисертації.

У першому розділі виконано огляд та відповідний аналіз ідей та схем сучасних методів чисельного розв'язання гідродинамічних задач дифузійних процесів. Ці методи включають три головні класи. Це : 1) Сіткові методи, як лагранжеві, так і ейлерові; 2) Лагранжево-ейлеровий метод, в якому для опису руху рідини використовуються лагранжеві частинки, а для розрахунку сил, які на них діють, використовується нерухома розрахункова сітка; 3) Безсіткові методи частинок, в яких інтерполяція довільної змінної у довільній точці виконується через значення змінних у вузлах, які попадають в область взаємовпливу. Останні включають в себе наступні -метод з введенням штучної обчислювальної стисливості та інтегральним представленням шуканої функції через вагову функцію ядра, яка здійснює інтерполяцію зв'язку між взаємодіючими частинками в області впливу у вигляді суми вкладу від кожної частинки на рух центральної частинки, метод найменших квадратів, в якому шукана функція представляється у вигляді скінчених рядів, s метод, характерний тим, що базисна функція скінченого ряду використовується лише в локальному розподілі розрахункових вузлів.

Окремої уваги в цьому розділі заслуговує новий, розроблений автором дисертації, безсітковий лагранжевий метод розв'язку рівняння мілкої води. Характерною особливістю цього методу є те, що замість рівняння для визначення тиску запропоновано використовувати рівняння для знаходження товщини шару рідини. Тоді гідростатичний тиск в шельфовій зоні визначається градієнтом товщини цього шару, що дозволяє, використовуючи підхід методу з введенням вагової функції ядра, одержати поле швидкостей в шарі мілкої води. В результаті, розв'язок задачі зводиться до інтегрування рівнянь руху окремих частинок

У другому розділі представлено аналіз сучасних методів блукаючих частинок для чисельного моделювання процесів переносу та дифузії різного виду частинок у водному шарі. Використовується рівняння адвекції-дифузії, одержане на підставі закону Фіка для потоку речовини через виділений переріз, яке описує перенос та дифузію частинок як у ламінарному, так і у турбулентному потоці зі змінними в часі і просторі середніми швидкостями та коефіцієнтом

дифузії. Для його розв'язання застосовується стохастичний метод випадкових блукань частинок. Стохастичний процес будується таким чином, щоб виконувались умови рівності зміщення (математичне сподівання) та дисперсії положення частинки в довільний момент часу з відповідними розв'язками рівняння. Для частинних випадків одновимірного руху (лінійна зміна по координаті в околі частинки швидкості та коефіцієнта дифузії та квадратична зміна по координаті коефіцієнта дифузії в задачі з наявністю сталої вертикальної швидкості осідання частинок) одержані нові аналітичні розв'язки для зміщення центра маси частинки та її дисперсії. Розроблений алгоритм побудови чисельної схеми випадкових блукань з незміщеною дисперсією узагальнено на випадок тривимірної задачі.

Порівняння розв'язку рівняння адвекції-дифузії методом частинок в задачі з квадратичною залежністю коефіцієнта дифузії з точним аналітичним розв'язком відповідної ейлерової задачі дозволило визначити величину максимального часового кроку в чисельній схемі випадкових блукань при розв'язанні рівняння адвекції-дифузії в задачах, де використовується лінійний характер зміни коефіцієнта дифузії по координаті.

В даному розділі, з використанням теорії марковських стохастичних процесів розглянута важлива задача моделювання зміни стану речовини (хімічна реакція, радіоактивний розпад, адсорбція-десорбція розчинних радіонуклідів на частинках завислих та донних намулів). Ймовірність переходу речовини з одного стану в любий з можливих інших протягом часового кроку в даній задачі описується системою рівнянь Колмогорова, яка є інтегрованою. В результаті її розв'язання методом частинок одержані вирази для математичного сподівання та дисперсії розподілу стану речовини в залежності від кількості взаємодіючих частинок та величини часового кроку. На основі одержаних результатів побудовані узагальнені чисельні алгоритми розв'язку рівнянь переносу та дифузії неконсервативних домішок методом частинок.

У третьому розділі розглянуті три моделі гідродинаміки прибережних зон, які включають модель взаємодії хвиль та течій, негідростатичну гідродинамічну модель та модель переносу багатофракційних намулів. Ці моделі описують круг задач, які є предметом дослідження дисертаційної роботи. Модель взаємодії хвиль та течій використовує спектральну модель хвиль та гідростатичну модель усереднених рівнянь Рейнольдса в наближенні Бусинеска. Спектральна модель хвиль описує перенос та зміну в часі хвильової дії в залежності від функції джерел, які враховують різні механізми передачі енергії від хвиль в область гідродинамічної течії. Гідростатична модель рівнянь Рейнольдса використовується для визначення тривимірної структури течій в процесі взаємодії хвиль і течій. Механізми передачі потоку енергії в функції джерел описуються напівемпіричними залежностями. В рамках цієї моделі були виконані розрахунки, які порівнювались з відомим аналітичним розв'язком та проведеним відповідним лабораторним експериментом в одновимірній задачі нахату хвиль на лінійно похилий берег. Встановлено добре співпадіння відповідних результатів за умови врахування тривимірності радіаційних напруг та врахування наявності бурунців у хвильовому полі.

Представлена удосконалена негідростатична гідродинамічна модель, в якій враховується прискорення вертикальної швидкості та динамічна компонента тиску, наявність вільної поверхні. Використовується вертикальна узагальнена σ - координата та криволінійна горизонтальна координата.

В даному розділі представлена також розроблена автором нова тривимірна математична модель переносу багатофракційних намулів, яка може описувати морфологічні зміни дна та зміну фракційного складу в донних шарах намулів. В рамках моделі можна встановити характер обмінних процесів, ерозію та осідання намулів, а також наявність двох типів намулів – зв'язних та незв'язних.

В цій моделі вперше одержано рівняння, яке описує еволюцію пористості в донному шарі, обумовленому процесом біотурбації. Завдяки цьому механізму відбувається додатковий масообмін між шарами намулів, що особливо важливо знати для випадку радіонуклідів.

У четвертому розділі представлена тривимірна лагранжева модель переносу багатофракційних зв'язних та незв'язних намулів, яка описує розмив, перенос та осідання вказаних класів намулів. Детально проаналізовано характерні особливості цих процесів, взаємодії фракцій мулу та піску, змучування та осідання частинок, переносу рухомих донних намулів, формування донних шарів та зміни геометрії берегів, виконано параметризацію потоку намулів між водним шаром та активним донним шаром. Моделювання процесів змучування, випадання та переносу виконується лише для одного класу мулів з виконанням умови збереження маси мулів та піску в активному донному шарі. Перенос намулів у водному шарі описується в рамках лагранжевої моделі випадкових блукань, в якій рух частинок приймається відповідним випадковому марківському процесу з коефіцієнтами дифузії, змінними вздовж координат і незмінними в часі. Просторові поля швидкостей та коефіцієнтів турбулентної дифузії розраховуються з використанням гідродинамічних моделей з третього розділу дисертації.

На основі розробленої моделі виконано розрахунки задачі руху завислих намулів в горизонтально однорідному потоці, для якої відомий аналітичний розв'язок і чисельний розв'язок, одержаний в ейлеровому описанні. Виконане порівняння цих результатів показало добре узгодження. Порівняння результатів розрахунків з даними лабораторних експериментів по переносу донних намулів в каналі з заглибленням та розмиву дна під дією струменя від гвинтового рушія на берег також показало добре співпадіння.

В рамках розробленої моделі розглянуті задачі гравітаційних каламутних течій, які виникають через наявність зимової конвекції в полярних шельфових зонах, та процеси розмиву цієї шельфової зони самотічними внутрішніми хвилями, які набігають на похиле дно.

У п'ятому розділі в рамках лагранжевого підходу досліджено процес розповсюдження нафти на поверхні води в прибережній зоні. Розроблена модель розповсюдження нафтової плівки з врахуванням дії на неї вітрових хвиль. У рівняннях руху такої плівки з дисперсантом вперше враховуються сили Коріоліса. Показана залежність масштабу розливу нафти від числа Росбі, яке визначає той розмір плями, коли пограничний шар на межі нафта-вода починає взаємодіяти з

екмановським пограничним шаром, обумовленим обертанням Землі. Одержано аналітичний автомобільний розв'язок для миттєвого розливу нафти та, відповідно, чисельний розв'язок для випадку постійного витоку нафти. Чисельні розрахунки виконувались методом частинок. Показано, що врахування обертання Землі помітно зменшує розмір площі нафтової плями, що необхідно враховувати при прогнозуванні можлих крупномасштабних викидів нафти в морі.

В даному розділі розроблено також моделі диспергованих нафтових крапель при моделюванні процесів вивітрювання та в моделі локалізації розливу нафти бонами. В рамках цих моделей виконані чисельні розрахунки поширення нафтової плями в полі течій і поверхневих хвиль в околі бона без та з використанням дисперсантів. Показано реальний вплив врахування дисперсантів через зміну величини коефіцієнта поверхневого натягу як на кількість частинок на поверхні води та загальну кількість нафтових крапель, так і на кількість крапель, які пройшли крізь бон.

На підставі розробленої лагранжевої моделі виконано моделювання аварійного розливу нафти з танкера “Hebei Spirit” у 2007 році біля узбережжя Південної Кореї. Порівняння розрахункової картини поширення нафти з натурними спостереженнями показали достатньо добре прогнозування зони розповсюдження нафтових плям та зони враження берегової лінії.

У шостому розділі представлена нова лагранжева модель розповсюдження радіонуклідів у прибережній зоні з врахування наявності там багатofракційних намулів. Модель описує тривимірний процес переносу радіонуклідів з врахуванням адвекції, турбулентної дифузії, процесів адсорбції-десорбції, які передають радіоактивність між розчиненими та адсорбованими радіонуклідами для кожної з фракцій намулів. При цьому враховуються також процеси розпаду радіонуклідів та механічного перемішування донних намулів живими організмами (біотурбація). Одержані нові аналітичні розв'язки задачі визначення ймовірностей переходу частинок із одного стану в інший при радіоактивному розпаді та врахуванні адсорбції-десорбції. Побудовано алгоритм моделювання граничних умов для методу частинок, який ґрунтується на розрахунку ймовірностей зміни стану частинок біля границі. Робота моделі перевірена на лабораторному експерименті розповсюдження радіонуклідів за рахунок лише молекулярної дифузії.

Чисельні експерименти згідно розробленого лагранжевого алгоритму даної моделі виконані з використанням для опису процесів переносу та дифузії методу випадкових блукань, відповідних марковському процесу, а для опису перетворень станів речовини – розрахунку ймовірностей переходу з системи рівнянь Колмогорова. Порівняння розрахунків вертикальних розрізів концентрації адсорбованих радіонуклідів у каналі з заглибленням, одержаних в лагранжевому та ейлеровому підходах, показало добре співпадіння.

З використанням розробленої лагранжевої моделі виконані розрахунки гіпотетичного аварійного викиду радіонукліду ^{137}Cs на АЕС Санмен (Китай) в акваторії Жовтого моря. Результати розрахунків для поля вітрових хвиль в цьому районі, відповідного червню 2011 роу, показали, що розроблене моделю-

вання відтворює характер та абсолютні значення розподілу та концентрації намулів в прибережних районах та в центральній частині Жовтого моря. Показана можливість забруднення дна моря та важливу роль у розповсюдженні розчинених у воді радіонуклідів процесів адсорбції-десорбції на завислих намулах.

У цьому розділі розроблена в роботі лагранжева модель та ейлерова модель розповсюдження радіонуклідів застосована для розрахунку полів радіоактивних забруднень внаслідок аварії на АЕС Фукусіма у 2011 році в Японії. В розрахунках використовувались поля середньої швидкості та коефіцієнти вертикального перемішування, розраховані гідродинамічними моделями по даним гідрометеорологічних служб з часовим кроком 1 година.

Аналіз виконаних розрахунків області поширення радіонуклідів показав важливість врахування процесів, які відбуваються в донних намулах, оскільки показано, що з часом вода очищується і головним джерелом забруднення в прибережних зонах залишаються донні намули. З цього випливає важливість моделювання процесів розповсюдження радіонуклідів в донних намулах, включаючи процеси біотурбації.

У Висновках сформульовані головні наукові результати виконаних досліджень.

В анотації коротко проаналізована суть вдосконалених та нових моделей, алгоритмів побудови чисельних схем, методів та підходів моделювання досліджуваних процесів.

У додатку представлені алгоритми швидкого сортування частинок по координатам, швидкого пошуку частинок в комітках та алгоритм взаємодії нафтових крапель з берегом та бонами.

Таким чином, в дисертації на основі сучасних математичних методів та методів фізичної статистики поставлені і розв'язані нові актуальні задачі моделювання процесів розповсюдження забруднень та намулів у прибережних зонах морських акваторій. Детально досліджені і описані фізичні механізми, які визначають природу процесів переносу забруднень в цих областях. На підставі виконаних модельних розрахунків встановлені характерні особливості та закономірності розповсюдження забруднень в реальних природних умовах шельфових зон морських акваторій.

В рамках розроблених моделей розглянуті задачі мають не лише наукове, але і важливе практичне значення. Характерною особливістю роботи є її чітка направленість та комплексний підхід до розв'язання проблеми.

Розроблені у роботі моделі розповсюдження нафтових плям, радіонуклідів та намулів в прибережних зонах з вкрай складною гідрофізичною та гідродинамічною структурою середовища та отримані на їх основі нові фізичні висновки, без сумніву, важливі для розуміння та аналізу процесів розповсюдження забруднень в прибережних зонах та використання їх для прогнозних розрахунків гіпотетично можливих аварійних ситуацій. Вони будуть також вкрай корисними для визначення напрямків подальших наукових досліджень процесів даного напрямку. Результати роботи вже використовувались за кордоном Сінгапурським національним університетом для моделювання нафтових розливів у Сінгапурській протоці.

З усього вищевикладеного випливає, що виконані І.О.Бровченко дослідження є вагомим результатом і розв'язанням крупної наукової проблеми, яка має важливе теоретичне і прикладне значення.

По дисертації є такі зауваження :

1) В роботі відсутній окремий розділ з оглядом та системним аналізом попередніх робіт, виконаних по напрямку досліджень дисертації вітчизняними та зарубіжними вченими. В роботі такий аналіз, по суті, є, але він розкиданий по тексту в міру посилання на відповідні роботи, що ускладнює представлення цілісної картини історії та сучасного рівня досліджень у світі.

2) У рівнянні (3.1) для хвильової дії спектральної моделі хвиль не наведені відповідні вирази для складових функції джерел, які описують потоки енергії.

3) У представлених нестационарних спектральній моделі хвиль, гідростатичній та негідростатичній гідродинамічних моделях не приведені початкові умови та алгоритм їх визначення.

4) В моделі розповсюдження нафтових плям в роботі відмічено, що, на відміну від багатьох інших моделей розливу нафти, в даній роботі не враховується дія вітрових напружень, яка приводить до додаткової, так званої “вітрової” складової швидкості руху, що відрізняється від поверхневої швидкості. Однак аргументів на користь такого спрощення автор не наводить.

5) У прибережній зоні, в залежності від її глибини, в більшій чи меншій мірі, присутня стратифікація середовища, обумовлена змінною солоністю та температурою, а також присутністю частинок мулу, що і представлено у розроблених гідродинамічних моделях. Однак, при аналізі фізики досліджуваних рухів та одержаних результатів автор недостатньо акцентує увагу на ролі цього фактора в задачах розповсюдження радіонуклідів, де він може мати помітний вплив на характер процесу.

6) В роботі не обговорюється характер універсальності використаних напівемпіричних співвідношень та апроксимацій при використанні розроблених моделей для різних прибережних районів світового океану. Характерно, однак, що при моделюванні розповсюдження радіонуклідів в результаті аварії на АЕС Фукусіма, при побудові розподілу змінної пористості донних намулів та кореляційної залежності коефіцієнта біотурбації від глибини використані емпіричні залежності, одержані на основі вимірів, зроблених в районі аварії.

Відмічені недоліки, однак, не впливають, в цілому, на високу оцінку дисертаційної роботи І.О.Бровченко. Ним розв'язана крупна наукова проблема, в якій одержані нові наукові результати фундаментального характеру в області вивчення процесів розповсюдження різного роду забруднень в прибережних зонах морів і океанів. Ці результати суттєво збагачують і просувають далі наші знання в цій області науки. Виконані дослідження відмічені високим науковим рівнем, а їх автор проявив високу наукову ерудицію, широкий дослідницький кругозір, володіння різними методами досліджень, як теоретичними, так і експериментальними.

В дисертації узагальнені результати досліджень автора, які знайшли відображення у 85 публікаціях (включно з двома монографіями у співавторстві), які добре відомі спеціалістам в області моделювання процесів переносу в шельфо-

вих зонах світового океану. З цих публікацій 34 входять до списку головних, що вийшли у фахових вітчизняних та зарубіжних виданнях фізико-математичного профілю. Результати досліджень доповідались дисертантом на багатьох наукових конференціях в Україні та за кордоном.

Вважаю, що дисертація І.О.Бровченко “Чисельні Лагранжеві методи в задачах прибережної гідродинаміки” відповідають вимогам пункту 11 діючого “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння звання старшого наукового співробітника” та “Порядку присудження наукових ступенів, затвердженого Постановою Кабінету міністрів України від 24.07.2013 року № 567 із змінами, внесеними від 19 серпня 2015 року № 656, від 30 грудня 2015 року № 1139 та від 27 липня 2016 року № 56”, які пред’являються до докторських дисертацій, а її автор заслуговує присудження йому вченого ступеня доктора фізико-математичних наук.

Автореферат відповідає змісту дисертації. Результати роботи можуть бути впроваджені Міністерством екології України для прогнозу можливих аварійних ситуацій з викидами забруднень в районах морського узбережжя України.

Зав. відділом вихрових рухів
Інституту гідромеханіки НАНУ,
Доктор фіз.- мат. наук

Сейл

О. Г. Стеценко

Підпис д.ф.м.

р. секретар



О. Г. Стеценко завідуюча

прод. кафедри М.С.