

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГІДРОМЕХАНІКИ**

БРОВЧЕНКО Ігор Олександрович

УДК 532.5.517

**ЧИСЕЛЬНІ ЛАГРАНЖЕВІ МЕТОДИ В ЗАДАЧАХ ПРИБЕРЕЖНОЇ
ГІДРОДИНАМІКИ**

01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем математичних машин і систем НАН України.

Науковий консультант:

доктор фізико-математичних наук, професор,
Мадерич Володимир Станіславович,
завідувач відділу моделювання морських та річкових
систем Інституту проблем математичних машин і
систем НАН України.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, старший науковий
співробітник,

Гуржій Олександр Андрійович,
професор кафедри автоматизації проектування
енергетичних процесів та систем
Національного технічного університету КПІ

доктор фізико-математичних наук, професор,
Приходько Олександр Анатолійович,
завідувач кафедри механотроніки Дніпропетровського
національного університету ім. Олеся Гончара
Міністерства освіти і науки України

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
Стеценко Олександр Григорович,
завідувач відділу вихрових рухів
Інституту гідромеханіки НАН України

Захист відбудеться 1 червня 2017 р. о 14-й годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 26.196.01 в Інституті гідромеханіки НАН України за адресою:
м. Київ, вул. Желябова, 8/4.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці та на офіційному сайті
Інституту гідромеханіки НАН України.

Автореферат розісланий 27 квітня 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.196.01
доктор технічних наук, професор



С.І. Криль

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Суть лагранжевих методів для опису суцільного середовища (рідини або газу) полягає у використанні лагранжевих змінних, що рухаються разом з потоком. При чисельному моделюванні суцільного середовища використовується велика кількість рідких частинок, що рухаються разом з потоком та кожна з яких представляє собою певну кількість речовини та має певні властивості (наприклад швидкість, тиск, густина, температура). На відміну від ейлерового підходу, в якому всі характеристики суцільного середовища розглядаються в деякій нерухомій точці простору, в лагранжевому підході всі характеристики розглядаються в рухомій точці середовища. Хоча для рідин та газів метод Лагранжа є більш складним для математичної та чисельної реалізації, але, водночас, він є більш природнім, бо в дійсності будь-яке середовище на молекулярному рівні складається з елементарних частинок, які рухаються та взаємодіють між собою. Лагранжеві чисельні методи для розрахунків переносу домішок та забруднень мають ряд значних переваг у порівнянні з ейлеровими: вони не потребують наперед визначеної незмінної області моделювання (частинки можуть рухатися як завгодно далеко в залежності від сил, що на них діють); вони дозволяють відслідковувати траєкторію руху кожної частинки середовища; вони дозволяють розглядати мілкомасштабні процеси у великих розрахункових областях; вони вільні від числової дифузії та є консервативними за своєю суттю. Моделювання методами частинок стає все більш популярним з розвитком розрахункових можливостей і паралельних технологій. Важливим моментом як в теоретичних, так і експериментальних дослідженнях є вміння простежувати рух великої кількості частинок в полях, створюваних ними самими і під дією зовнішніх сил. В даний час все більш привабливими стають гібридні лагранжево-ейлерові моделі (частинки та сіткові моделі), особливо в гідродинамічних задачах, в яких необхідно розглядати різномасштабні процеси. Термін “моделі частинок” є загальним для класу обчислювальних моделей лагранжевої гідродинаміки, в яких дискретний опис фізичних явищ включає використання взаємодіючих частинок. У більшості застосувань цим частинкам можна прямо зіставити фізичні об'єкти. Кожна частинка може мати набір атрибутів, таких як маса, заряд, положення, швидкість. Стан фізичної системи визначається атрибутами ансамблю частинок, а еволюція системи визначається законами взаємодії цих частинок. Особливість, яка робить моделі частинок привабливими з обчислювальної точки зору, полягає в тому, що ряд атрибутів зберігається, і тому їх не треба змінювати протягом всього часу обчислень.

Актуальність роботи полягає в низці переваг лагранжевих методів над ейлеровими та перспектив їх застосування до нових задач прибережної гідромеханіки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в рамках: бюджетних тем та фундаментальних досліджень

Інституту проблем математичних машин та систем НАН України: “Розробка теоретичних основ побудови нових моделей, алгоритмів і розподілених інформаційних технологій підтримки прийняття рішень в системах електронного урядування (Е-СИСТЕМА)”, “Розробка моделюючої системи оперативного прогнозування температури у водоймищі–охолоджувачі АЕС для підтримки прийняття рішень з підвищення ефективності вироблення електроенергії на АЕС у літній період”, “Методи та моделі створення та інтеграції новітніх інформаційних технологій в системах підтримки прийняття рішень різного призначення (ІНТЕГРАЦІЯ)”, “Розробка наукових засад систем підтримки прийняття рішень зі збереження та поліпшення навколишнього середовища на основі новітніх Веб та ГІС технологій”, “Комплексна система підтримки прийняття рішень у розподілених середовищах (РЕГЛАМЕНТ)”; проекту Державного Фонду Фундаментальних Досліджень Ф64/22 “Моделювання змін рівня, температури, солоності у Чорному та Азовському морях та їх впливу на навколишнє природне морське середовище згідно сценаріїв змін клімату в ХХІ столітті”; проекту Державного Фонду Фундаментальних Досліджень Ф68/12879 “Перенос радіоактивності між забрудненими донними намулами і морським середовищем після аварій на Чорнобильській та Фукусімській АЕС” разом із Японським Інститутом радіоактивності навколишнього середовища; проектів INTAS № 03-51-3728 “Північні моря в глобальній кліматичній системі” (2004-2007), № 03-51-4620 “Сильно нелінійні внутрішні хвилі в озерах: виникнення, трансформація та перемішування” (2004-2007).

Основною метою дисертаційної роботи є розробка методологічних та технологічних засад для моделювання лагранжевими методами гідродинамічних полів та полів розповсюдження забруднень в задачах, що виникають в прибережній гідродинаміці.

Представлена мета передбачає такі основні **задачі**, що підлягають вирішенню в рамках дисертаційної роботи:

- Розробка ефективних лагранжевих методів моделювання переносу забруднень у різних станах та багатofракційних намулів;
- Розробка ефективних гідродинамічних моделей прибережних процесів;
- Застосування розроблених методів до задач прибережної гідродинаміки.

Об'єктом наукового дослідження є розповсюдження забруднень та намулів в прибережних зонах морів.

Предметом наукового дослідження є методи моделювання розповсюдження забруднень та намулів в прибережних зонах морів та гідродинамічні процеси, що на нього впливають.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в:

- Розробці узагальненого алгоритму побудови чисельних схем з незміщеними моментами розподілу для розв'язання рівняння переносу та дифузії методом частинок в неоднорідних полях течій та коефіцієнту дифузії; отриманні нових аналітичних розв'язків для параметрів розподілу частинок для характерних випадків одновимірного руху.
- Застосуванні стохастичних методів до моделювання ймовірності зміни стану речовини; розробці методу оцінки точності при моделюванні таких процесів методами частинок; одержанні нових аналітичних розв'язків для процесів розпаду та адсорбції-десорбції радіонуклідів на багатофракційних намулах; розробці нового алгоритму апроксимації граничних умов у методах частинок через розрахунок ймовірності зміни стану частинки в околі границі.
- Розробці та вдосконаленні нових гідродинамічних моделей прибережних процесів, що дозволяють описувати взаємодію хвиль та течій, негідростатичні гравітаційні та струменеві течії для розрахунку переносу намулів та забруднень.
- Розробці нової лагранжевої моделі переносу багатофракційних намулів, що описує суміш зв'язних та незв'язних намулів, міграцію намулів у донних шарах та зміну гранулометричного складу та пористості в донних відкладеннях.
- Розробці нової лагранжевої моделі розповсюдження нафтопродуктів в прибережних зонах, що враховує вплив обертання Землі за рахунок утворення пограничного шару Екмана під поверхневою плівкою нафти, дозволяє моделювати взаємодію з нафтовими бонами та вплив дисперсантів на розповсюдження нафтового забруднення; отриманні нових автотомельних розв'язків для розтікання одновимірних та осесиметричних плям у гравітаційно-в'язкому та гравітаційно-в'язко-обертальному режимах; застосуванні розробленої моделі до моделювання наслідків нафтових аварій.
- Розробці нової лагранжевої моделі розповсюдження радіонуклідів в прибережних зонах, що включає радіоактивний розпад, адсорбцію-десорбцію на багатофракційних намулах, міграцію радіонуклідів у донних відкладеннях та у поровій воді; застосуванні моделі до моделювання наслідків аварії на АЕС Фукусіма.

Достовірність наукових положень дисертації забезпечується: використанням загальноприйнятих моделей рідин; коректною постановкою граничних задач; застосуванням надійних аналітичних методів для розв'язку задач; контрольованою точністю чисельних обчислень; узгодженістю між собою чисельних, аналітичних та експериментальних результатів, отриманих в роботі; несуперечливістю одержаних результатів відповідним опублікованим результатам інших авторів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці низки математичних та чисельних моделей гідродинаміки та розповсюдження забруднень в прибережних зонах, що дозволяють враховувати більшість основних гідродинамічних процесів, що впливають на розповсюдження забруднень та намулів. Результати роботи знайшли впровадження в багатьох науково-дослідницьких та прикладних проектах. Розроблені моделі використовувались для моделювання наслідків аварійних забруднень, зокрема, розповсюдження радіонуклідів внаслідок аварії на АЕС Фукусіма. Розроблена модель розповсюдження нафтопродуктів використовується Сінгапурським Національним Університетом для моделювання нафтових розливів у Сінгапурській протоці.

Методи досліджень. В роботі використовувались сучасні методи чисельної гідродинаміки, аналітичні методи, методи аналізу розмірностей, статистичний аналіз експериментальних даних та результатів моделювання.

Особистий внесок здобувача Аналітичні результати, розробка чисельних алгоритмів, що представлені в роботі та їх чисельна реалізація належить автору. В роботах [25,27,32,36] автору належить участь у постановці задач по розповсюдженню радіонуклідів у морському середовищі внаслідок аварії на АЕС Фукусіма разом з міжнародною групою співавторів з метою проведення порівняння різних розрахунків та моделей, проведення частини розрахунків власними моделями та обговорення формулювання висновків. В роботах [5,42,44,52] автору належить розробка чисельної гідродинамічної моделі негідростатичних гравітаційних течій, розрахунки, участь в обговоренні постановки задач та висновків разом з групою чл.-кор. НАНУ Нікішова В.І., якій належить проведення лабораторного експерименту. В роботах [4,37,38,39,50] автору належить постановка задач по оцінці стійкості дна під дією струменевих течій та чисельна реалізація розрахунків. В роботах [3,8,16,45,46,51,72] автору належить участь в постановці задач про перенос намулів, розробка та впровадження лагранжевих чисельних алгоритмів. В роботах [22,55,61,72,79,84] автору належить участь в постановці задач про перенос радіонуклідів, розробка та впровадження лагранжевих чисельних алгоритмів. В роботах [6,14] автору належить ідея впровадження алгоритмів швидкого пошуку та їх реалізація. В роботі [11,21,48] автору належить участь у постановці задач, впровадження різних підходів до врахування взаємодії хвиль та течій, проведення частини чисельних розрахунків. В роботах [20,60,62,65,67,68] автору належить отримання аналітичних результатів щодо розповсюдження нафти по поверхні води, розробка чисельних лагранжевих алгоритмів розв'язку рівнянь, що описують розповсюдження нафтових забруднень та їх реалізація. В роботах [2,7,17,34,41,43,56,64,74,82] автору належить участь у постановці задач та чисельна реалізація їх розв'язку. В роботах [1,9,10,13,15,18,19,23,24,26,28-30,35,40,47,49,53,54,57-59,63,66,69-73,75,76,80,83,85] автору належить розвиток гідродинамічних моделей негідростатичних течій та їх чисельна реалізація,

постановка задач та інтерпретація результатів належать співавторам. Доповіді на 20-ти конференціях проведені особисто автором, інші доповіді проведено співавторами.

Апробація результатів дисертації. Матеріали різних розділів дисертації доповідались та обговорювались на 49-ти доповідях на міжнародних та вітчизняних конференціях, зокрема на: 5-ти конференціях “Моделювання” Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Е. Пухова НАН України (2006,2010,2012,2013,2014); 9-ти конференціях “Математичне та імітаційне моделювання систем” (МОДС) (2006,2007,2008,2009,2010,2011,2013,2014,2016); конференції Euromech Fluid Mechanic Conference, Стокгольм (2006); 6-ти конференціях Європейської Геофізичної Спілки (EGU), Відень (2007,2012,2013,2014,2015,2016); 3-х конференціях Американської Геофізичної Спілки (AGU), Сан-Франциско (2007), Портленд (2009), Солт Лейк Сіті (2012); на щорічному з’їзді Кореїської Асоціації наук та технологій про океан (KAOST) (2008); на IV Міжнародній Антарктичній конференції, Київ (2009); на V Міжнародній Антарктичній конференції, Київ (2011); на XXIII конференції ІСТАМ, Пекін (2012); на XXII Науковій Сесії Ради РАН по нелінійній динаміці, Москва (2013); на конференції “Комп’ютерна Гідромеханіка”, Київ (2016).

Робота в цілому доповідалась на семінарах в Інституті Проблем Математичних Машин та Систем НАНУ, на семінарі Ради молодих вчених ПІММС НАНУ (2016), на семінарі Інституту Гідромеханіки НАНУ (2016). Окремі розділи роботи доповідалась на семінарах Першого Океанографічного Інституту (FIO), Циндао, Китай (2012-2016); семінарах Кореїського Інституту Наук про Океан та Технологій (KIOST), Ансан, Південна Корея (2010-2016); семінарах Національного Університету Сеулу (SNU), Південна Корея (2011-2014).

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 85 роботах: у двох главах монографій (у співавторстві), 34 статті у фахових вітчизняних та зарубіжних виданнях (з них 2 одноосібні), 49 робіт в збірниках праць та тез міжнародних конференцій. З опублікованих робіт 17 індексовані у міжнародній наукометричній базі Scopus.

Структура й обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел з 324 найменувань. Робота включає 305 сторінок основного тексту, 146 рисунків, 9 таблиць, усього 370 сторінок.

Автор висловлює щирі вдячність науковому консультантові доктору фізико-математичних наук Володимирі Станіславовичу Мадеричу за постійну увагу до роботи та корисні дискусії.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито сутність і стан наукової проблеми, обґрунтовано важливість і актуальність теми дисертації, викладено мету роботи та сформульовано основні положення, що виносяться на захист, її практичне

значення та наукова новизна. Наводяться дані щодо апробації та структури роботи.

Математична та фізична теорія броунівського руху, процесів дифузії та перемішування була започаткована роботами А. Ейнштейна, М. Смолуховського, А. Маркова, М. Планка, А. Фоккера, П. Ланжевена, А. Колмогорова, Н.Вінера, О. Хінчина, К.Іто, Р. Стратоновича та ін. У розвиток хаотичної динаміки домішок слід відзначити вклад робіт Х. Арефа, Дж. Отіно, В.Мелешко, В.Грінченка, Т.Краснопольської, О.Гуржія. Основи розв'язання задач гідродинаміки методами частинок закладені роботами Л.Лусі, Д.Монагана, Р.Хокні, Дж. Іствуда, Г.Лю. В дослідження процесів переносу в стратифікованих та турбулентних течіях, започаткованих О. Рейнольдсом, Л.Прандтлем, Л. Річардсоном, важливим внеском стали роботи Г.Воропаєва, Дж. Меллора, Є.Нікіфоровича, В.Нікішова, О.Обухова, А.Окубо, О.Приходько, О.Стеценка. В новій галузі обчислювальної гідродинаміки навколишнього середовища слід відзначити внесок Г. Марчука, М.Еббота, М.Сполдінга, В.Мадерича, М.Желєзняка, Р.Періанеза, С.Степаненка, П.Ткаліча.

Перший розділ присвячено огляду існуючих чисельних сіткових, гібридних та безсіткових методів розв'язання гідродинамічних задач, висвітлюються переваги, недоліки, проблеми і складності при моделюванні лагранжевими методами. Поряд з відомими методами, представлено розроблений автором метод розв'язку рівнянь мілкої води безсітковим методом взаємодіючих частинок.

Рівняння мілкої води можуть бути розв'язані методом, подібним до SPH (L. Lucy 1977, J. Monaghan 1988, G. Liu, M. Liu 2003), але без гіпотези штучної стисливості, що використовується для тривимірних задач. Задача зводиться до інтегрування рівнянь траєкторій руху кожної частинки:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{u}$$

де швидкість знаходиться з дискретизованого рівняння руху і залежить від товщини шару рідини та градієнту товщини, для визначення яких використовуються вагові функції частинок. Для вагових функцій вибираються симетричні “гаусоподібні” функції або їх поліноміальні наближення, щоб було просто розрахувати як саму функцію, так і її перші похідні. Відмінність від класичного методу SPH полягає в тому, що замість рівняння для знаходження тиску використовується рівняння для знаходження товщини шару рідини. Градієнт гідростатичного тиску в рівняннях мілкої води виражається через градієнт товщини, тому немає необхідності у використанні штучної стисливості рідини подібно до класичних методів SPH. Двовимірне рівняння нерозривності є, по суті, рівнянням переносу, тому, при відомому полі швидкостей, розв'язок такого рівняння зводиться до інтегрування рівнянь руху для кожної частинки.

Представлений метод розв'язання рівнянь мілкої води вперше був запропонований [І.Бровченко, В.Мадерич 2002], схожі методи пізніше було

розвинуто в роботах [M. Rodriques-Paz, J. Bonet 2004, R. Ata, A. Soulaïmani 2005]. Метод взаємодіючих частинок для розв'язання рівнянь мілкої води використано в розділі 5 для моделювання розтікання нафтових плівок по поверхні води.

Другий розділ присвячений методам частинок розв'язку рівняння адвекції-дифузії та балансових рівнянь зміни станів речовини. Викладені теоретичні основи моделювання броунівського руху та дифузії стохастичними методами. Представлений новий алгоритм, що дозволяє будувати чисельні схеми випадкових блукань з незміщеною дисперсією для тривимірного випадку змінних полів течій та коефіцієнту дифузії.

Алгоритм методу випадкових блукань для розв'язку рівняння переносу та дифузії оснований на подібності рівняння до рівняння Фоккера-Планка, що описує розподіл ймовірностей положення частинки. Розподіл щільності ймовірності положення частинки домножене на кількість частинок та їх масу дорівнює середній концентрації речовини. Метод випадкових блукань будується таким чином, щоб перші моменти розподілу положення частинки (матсподівання та дисперсія) дорівнювали моментам розв'язку рівняння переносу та дифузії. В одновимірному просторі момент порядку (n)

$$M_n = \int_{-\infty}^{\infty} x^n C dx$$

де C – концентрація речовини, нормована на загальну масу. Домножуючи рівняння переносу та дифузії на x^n та інтегруючи по нескінченних границях отримаємо систему звичайних диференціальних рівнянь для знаходження моментів розподілу:

$$\frac{dM_n}{dt} = n \int_{-\infty}^{\infty} x^{n-1} (u + D') C dx + \int_{-\infty}^{\infty} x^n u' C dx + n(n-1) \int_{-\infty}^{\infty} x^{n-2} D C dx,$$

де u, D – швидкість та коефіцієнт дифузії, що в загальному випадку є неоднорідними в просторі і часі. Для знаходження розв'язків системи можна використовувати відомі вирази для u, D або скористатися розкладенням цих функцій в ряд Тейлора в околі точки положення частинки. Знайдені розв'язки для моментів використовуються для побудови схеми випадкових блукань, що гарантує рівність середнього зміщення та дисперсії положення частинки розв'язку відповідного рівняння переносу та дифузії:

$$x^{n+1} = x^n + M_1(\Delta t) + \frac{R}{\sigma_R} \sqrt{M_2(\Delta t) - M_1^2(\Delta t)},$$

де R – випадкова величина з нульовим матсподіванням, а σ_R її середньоквадратичне відхилення. Для випадку лінійного коефіцієнту дифузії схема набуває загально прийнятого вигляду:

$$x^{n+1} = x^n + \left(u + \frac{\partial D}{\partial x} \right) \Delta t + \frac{R}{\sigma_R} \sqrt{2D\Delta t}.$$

В роботі отримано нові аналітичні розв'язки для зміщення центру мас та дисперсії розподілу положення частинки при моделюванні методом випадкових блукань для окремих часткових випадків одновимірного руху, зокрема, для випадку лінійної зміни швидкості та коефіцієнта дифузії та для квадратичної залежності коефіцієнта дифузії. За допомогою отриманих аналітичних розв'язків виведено критерії оцінки максимальних часових кроків для розв'язку рівняння адвекції-дифузії методом частинок. В роботі проведено узагальнення алгоритму побудови чисельної схеми випадкових блукань з незміщеною дисперсією для тривимірного випадку. Використовуючи викладений в цьому розділі підхід можна отримати схеми більш високих порядків, залишаючи більше членів нескінченних рядів та знаходячи моменти вищих порядків. В загальному випадку, при неоднорідному полі швидкості та коефіцієнті дифузії, розподіл випадкової величини може стати несиметричним, і потрібно розраховувати асиметрію, ексцес розподілу, та генерувати випадкову величину з відповідним законом розподілу. Якщо ж задовольнитися тільки другими моментами та лінійним наближенням невідомих функцій, то моделювання проводиться за допомогою випадкових величин з симетричним розподілом.

Теорію стохастичних процесів Маркова застосовано до моделювання методом частинок процесів зміну стану речовини, таких як, наприклад, хімічні реакції, радіоактивний розпад та адсорбція-десорбція розчинених речовин на піщинках завислих чи донних намулів. Представлений чисельний алгоритм для загального випадку розрахунку ймовірності $p_i(t)$ перебування системи в кожному з можливих дискретних станів зі скінченного набору $S_1, S_2, \dots, S_n$ в кожний момент часу. Ймовірність переходу речовини із стану i в стан j визначається щільностями переходу:

$$\alpha_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(\Delta t)}{\Delta t},$$

де $p_{ij}(\Delta t)$ – ймовірність переходу зі стану i в стан j за час Δt . Такі системи описуються системою рівнянь Колмогорова [А. Колмогоров 1938] для розподілу ймовірностей $p_i(t)$ між можливими станами системи:

$$\frac{dp_i}{dt} = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} p_j, \quad i = \overline{1, n}$$

Це система лінійних однорідних звичайних диференціальних рівнянь, вона є інтегрованою в елементарних функціях або квадратурах. Розв'язок цієї системи $p_i(t)$ з початковими умовами $p_i(0) = p_{i0}$ визначає розподіл ймовірностей перебування в кожному стані системи, причому $\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1$. Якщо відомо, що система перебуває в деякому стані S_i , тобто в деякий момент часу $t_0 = 0$ $p_i = 1, p_j = 0, j \neq i$ ймовірність залишитися в цьому ж стані через час Δt дорівнює $p = p_i(\Delta t)$. Щоб визначити ймовірності всіх можливих переходів, необхідно отримати n розв'язків системи з початковими умовами $p_{i0} = 1, p_{j0} = 0, j \neq i$ для

кожного $i = \overline{1, n}$. Таблиця з n^2 функцій $p_{ij}(\Delta t)$ повністю визначає ймовірності всіх можливих переходів між станами за час Δt . Задача моделювання переходів частинки між можливими станами зводиться до визначення коефіцієнтів рівняння Колмогорова, що описують відповідні перетворення та до методів розв'язку такого рівняння. В розділі 6 детально описано застосування розробленого підходу до моделювання процесів радіоактивного розпаду та адсорбції-десорбції радіонуклідів на намулах.

Розв'язання рівнянь зміни стану речовини методом частинок зводиться до знаходження ймовірності переходів частинок між всіма можливими станами за допомогою розв'язків рівнянь Колмогорова. Кожен перехід між станами є випадковою подією, яка розігрується за допомогою генератора випадкових чисел. При моделюванні частинками розв'язок вихідних рівнянь є випадковою величиною, тому постає питання точності отриманого розв'язку. Точність може залежати від кількості частинок, що використовуються при моделюванні, від часового кроку та від обраної чисельної схеми чи аналітичного співвідношення. В роботі виведено розподіл кількості частинок в кожному стані в залежності від початкової кількості частинок. Було показано, що розподіл є біноміальним, математичне сподівання дорівнює точному розв'язку вихідних рівнянь, а середньоквадратичне відхилення можна виразити співвідношенням

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{\mathbf{P}(t)(\mathbf{1} - \mathbf{P}(t))}{n}},$$

тут $\sigma(t)$ вектор середньоквадратичних відхилень для кількості частинок в кожному стані, що залежить від часу; $\mathbf{P}(t) = (p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t))^T$ – точний розв'язок відповідних рівнянь Колмогорова з відповідними початковими умовами, $\mathbf{1}$ – одиничний вектор, n – загальна кількість частинок. В шостому розділі метод оцінки точності застосовується до задач для яких вдалося отримати точні аналітичні розв'язки рівнянь Колмогорова.

У третьому розділі представлені вдосконалені гідродинамічні моделі, що дозволяють описувати основні гідродинамічні процеси прибережних зон: вплив складного рельєфу та берегової лінії на течії, вітрові поверхневі хвилі, припливні та гравітаційні течії, негідростатичні гравітаційні та струменеві течії.

Представлена моделююча система нелінійної взаємодії хвиль та течій, що оснований на динамічному поєднанні тривимірної гідродинамічної моделі з вільною поверхнею (Y. Zhang, A. Baptista 2008, V. Maderich та ін. 2008) та спектральною моделлю вітрових хвиль (A. Roland 2009, N. Booij та ін. 1999). Нелінійна взаємодія між течіями з великим часовим масштабом (наприклад припливні течії) з короткоперіодними хвилями відіграє важливу роль особливо в прибережних районах через декілька механізмів. Потік імпульсу від хвильових рухів до середніх течій, що визначається “радіаційними напруженнями”, які приводять до генерації течій, що вперше були отримані [Longuet-Higgins M., Stewart R. 1962], а потім узагальнені на тривимірний

випадок [G. Mellor 2003, 2005, 2008, 2011, F. Ardhuin та ін. 2008]. Хвилі підсилюють поверхневе тертя, турбулізують приповерхневий шар [P. Craig, M. Banner 1994] за рахунок перекидання, та спричиняють додаткові донні напруження в мілководних районах [W. Grant, O. Madsen 1979, L. Xie та ін. 2001].

В приповерхневому шарі хвилі викликають стоки дрейф, що має бути врахований при моделюванні розповсюдження забруднень у поверхневих шарах морів. На рис. 1 зображено схему взаємодії спектральної моделі хвиль та моделі циркуляції. Окрім вже згаданих радіаційних та донних напружень в моделі хвиль розраховується потік імпульсу, що передається течіям внаслідок перекидання хвиль, а також шорсткість поверхні води, що впливає на вітрові напруження та теплообмін з атмосферою. В свою чергу, модель циркуляції передає в хвильову модель усереднені за глибиною та поверхневі поля течій, рівень вільної поверхні та зміну розрахункової області внаслідок затоплення чи осушення. В цьому розділі надано опис спектральної моделі хвиль, тривимірної гідродинамічної моделі, алгоритму їх взаємодії, та приклади перевірки та застосування. Використовувались двовимірні [M. Longuet-Higgins, R. Stewart 1962] та тривимірні [G. Mellor 2011] формулювання радіаційних напружень. На рис. 2-4 показаний приклад розрахунків для лабораторного експерименту [P. Visser 1984] по набіганню поверхневих хвиль під кутом до похилого уклону берега. Схема лабораторного експерименту показана на рис. 2, порівняння профілю вздовж берегової течії, що формується внаслідок передачі імпульсу від хвиль до течій, з даними вимірювань зображено на рис. 3. Тривимірна структура течій при використанні тривимірних формулювань для радіаційних напружень показана на рис. 4 у поперечному розрізі.



Рисунок 1. Схема взаємодії хвиль та течій.

Рівень вільної поверхні та зміну розрахункової області внаслідок затоплення чи осушення. В цьому розділі надано опис спектральної моделі хвиль, тривимірної гідродинамічної моделі, алгоритму їх взаємодії, та приклади перевірки та застосування. Використовувались двовимірні [M. Longuet-Higgins, R. Stewart 1962] та тривимірні [G. Mellor 2011] формулювання радіаційних напружень. На рис. 2-4 показаний приклад розрахунків для лабораторного експерименту [P. Visser 1984] по набіганню поверхневих хвиль під кутом до похилого уклону берега. Схема лабораторного експерименту показана на рис. 2, порівняння профілю вздовж берегової течії, що формується внаслідок передачі імпульсу від хвиль до течій, з даними вимірювань зображено на рис. 3. Тривимірна структура течій при використанні тривимірних формулювань для радіаційних напружень показана на рис. 4 у поперечному розрізі.

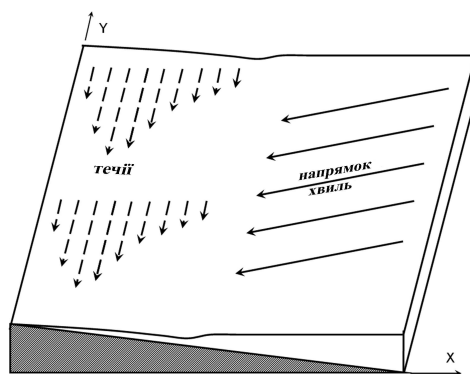


Рисунок 2. Схема лабораторного експерименту [P. Visser 1984] по набіганню монохромної хвилі на похилий берег.

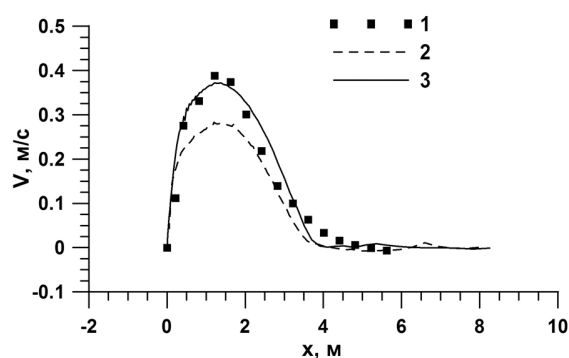


Рисунок 3. Профілі вздовжберегової течії. 1-експеримент, 2- розрахунки з двовимірними радіаційними напруженнями. 3- розрахунки з тривимірними радіаційними напруженнями.

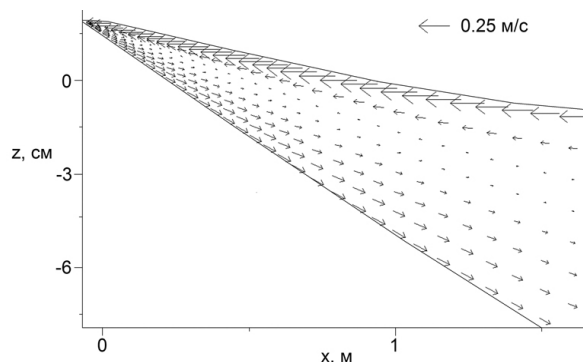


Рисунок 4. Розрахована тривимірна структура течій у поперечному перерізі при використанні тривимірного формулювання радіаційних напружень.

Однією з характерних особливостей прибережних зон морів є наявність завислих наносів та донних відкладень, які можуть впливати як на гідродинаміку через зміну рівня дна, каламутності води, густини каламутних потоків, так і напряму впливати на розповсюдження різного роду забруднень через процеси адсорбції. Тому моделювання процесів, що пов'язані з переносом намулів становить як окремий інтерес для задач прибережної гідродинаміки, так і є важливим фактором при моделюванні транспорту забруднень. В підрозділі 3.4 представлена нова тривимірна математична модель переносу багатofракційних намулів та морфологічних змін дна, що включає міграцію донних намулів у шарі відкладень завдяки механічному перемішуванню донними організмами та відповідну еволюцію гранулометричного складу та пористості донних намулів. Модель описує транспорт як незв'язних, так і зв'язних намулів, а також суміші фракцій різних розмірів зв'язних/незв'язних намулів. Шар води та дно поділені на набір шарів: шар води, кілька активних донних шарів та донний шар, що не розмивається. Для осідання та ерозії суміші зв'язних та незв'язних намулів ми користуємось припущенням [М. van Ledden 2003] про те, що ці процеси залежать від критичної фракції зв'язних намулів у суміші у дні $\varphi_{0,cr}$. Ерозія суміші зв'язних та незв'язних намулів є незалежною, якщо фракція зв'язних намулів є нижчою за критичну. При концентрації зв'язних намулів вище критичної дно поводить ся зв'язно. В незв'язному режимі обмін з дном зв'язних та незв'язних намулів відбувається незалежно, в той час як в зв'язному режимі ерозія обох типів намулів відбувається як ерозія зв'язних намулів.

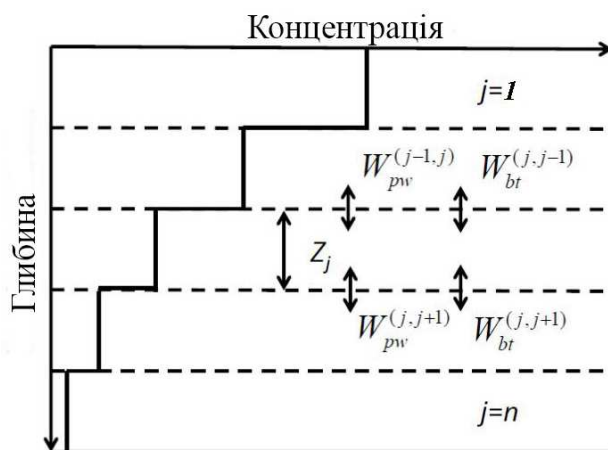


Рисунок 5. Схема донних шарів намулів.

Осідання є завжди незалежним процесом незалежно від концентрації зв'язних намулів. Якщо об'ємна фракція зв'язних намулів у верхньому донному шарі $\phi_{0,1}$ є нижчою за критичне значення $\phi_{0,cr}$ то ерозія та осідання відбувається у незв'язному режимі.

Неперервний вертикальний розподіл намулів апроксимується як послідовність добре перемішаних шарів ($1 \leq j \leq m$) (рис. 5). Фракційний склад першого шару може змінюватись за рахунок осідання та ерозії, а глибших шарів через обмін між шарами за рахунок біотурбації. По суті, біотурбація діє на мікроскопічному рівні окремих частинок, які переміщуються окремо у вигляді дискретних подій змішування, викликаних різними типами взаємодії між донними організмами та намулами, такі як закопування, споживання/екскреція та пересування. В роботі виведено рівняння, що описує еволюцію пористості в кожному донному шарі внаслідок біотурбації багатофракційних намулів. Можливість розраховувати пористість важлива при розрахунках розповсюдження забруднень, таких як радіонукліди, які розповсюджуються через дифузію у поровій воді та механічне пересування разом із частинками намулів. При перемішуванні завдяки біотурбації відбувається масообмін між шарами намулів. Якщо гранулометричний склад намулів був неоднорідний по вертикалі, то відбувається зміна фракційного складу намулів. Якщо пористість ε_j також неоднорідна по вертикалі, то пористість також буде змінюватись з часом за рахунок випадіння намулів та біотурбації.

У четвертому розділі описано нову тривимірну лагранжеву модель переносу багатофракційних намулів, представлений чисельний алгоритм моделі, результати перевірки на аналітичних розв'язках та лабораторних експериментах, наведені приклади застосування моделі.

Моделювання переносу намулів у водному середовищі є складною задачею, особливо у випадку гравітаційних потоків, що несуть намули, коли важлива взаємодія завислих намулів та течій. Прикладом таких течій на шельфі океанів і морів є, наприклад, каламутні потоки в підводних каньйонах на схилах. Додаткові складності виникають, коли каламутні потоки є полідисперсними і коли плавучість в гравітаційних течіях підтримується різницею температур та солоності разом із намулами. Потоки наносів із гирл річок в море та шельфова конвекція в полярних морях відносяться до такого типу течій.

Останніми роками був розроблений ряд тривимірних ейлерових та лагранжевих моделей переносу намулів (див. напр. [D. Gessler та ін. 1999, G. Lesser та ін. 2004, Y. Krestenitis 2007, A. Lane 2005]). Лагранжеві моделі [Y. Krestenitis 2007, A. Lane 2005] мають ряд переваг у порівнянні з ейлеровими, які зумовлені природнім описом транспорту часток та можливістю опису переносу на масштабах менших за крок ейлерової сітки. Однак, на відміну від ейлерових моделей [D. Gessler та ін. 1999, G. Lesser та ін. 2004], у відомих лагранжевих моделях не розглядаються процеси переносу багатофракційних намулів.

Зворотній вплив сил плавучості, що викликані присутністю завислих намулів також брався до уваги лише в деяких ейлерових моделях (напр. [Н. Huppert 2006, Н. Fohrman 1998, S. Chao 1998, L. Pinto та ін. 2012]).

В цьому розділі описана тривимірний лагранжева модель переносу зв'язних та незв'язних намулів, що є узагальненням двовимірної моделі [3]. Модель поєднана з тривимірними моделями гідродинаміки, в яких використовується σ -система координат, що дозволяє природнім шляхом описувати перенос у пограничному шарі і переформування дна. Результати розрахунків співставлені з аналітичними і чисельними розв'язками ейлерових задач. Наведені результати моделювання переносу намулів в лабораторному каналі [L. Van Rijn 1984]. Модель застосована до задачі зимової конвекції на арктичному шельфі, коли конвективні потоки викликають рушення намулів на схилах і посилення гравітаційних течій за рахунок намулів.

Так же як і в [3] тривимірний лагранжева модель описує розмив, перенос та осідання багатофракційних зв'язних та незв'язних намулів, а також їх сумішей. В подальшому для скорочення будемо називати “піском” фракції незв'язних намулів, починаючи з гальки і закінчуючи розміром часток $D > 0.063 \text{ мм}$, а “мулом” – намули, що включають в себе мул ($0.063 \text{ мм} > D > 0.004 \text{ мм}$) та глину ($D < 0.004 \text{ мм}$). Водний шар та дно поділене на ряд шарів: водний шар, активний шар, декілька донних шарів та нижній донний шар (Рис. 6). Завислі намули переносяться течіями та хвилями у водному шарі. В активному шарі (АШ) частки піску можуть рухатись у вигляді донних рухомих наносів, підійматися в шар води або випадати в самий верхній активний донний шар (АДШ). Якщо в результаті ерозії або дивергенції донних рухомих наносів товщина АДШ h_{AB} стає рівною нулеві, тоді нижній шар починає взаємодіяти з водним шаром та стає АДШ. Якщо товщина АДШ перебільшує деяке значення $h_{AB}^{(c)}$, тоді виникає новий донний шар. Нижній донний шар, що не розмивається знаходиться нижче донних слоїв. Модель дозволяє розраховувати перенос будь-якої кількості фракцій піску. Припускається, що всі часточки піску даного класу розмірів в АШ та АДШ піддаються впливу потоку води та залучення до водного шару та АШ, відповідно. Розподіл фракцій піску в АШ відрізняється від АДШ внаслідок різної швидкості залучення часток різного розміру у водний шар. Таке сортування приводить природнім шляхом до ефекту «самовідмостки» донного матеріалу. Вплив мігруючих гряд на перенос і сортування донного матеріалу в моделі не враховується.

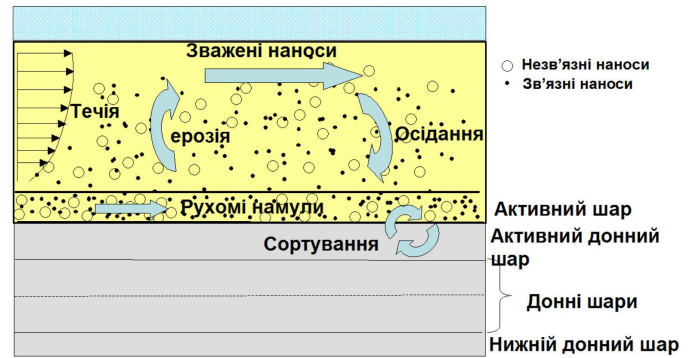


Рисунок 6. Схематичне представлення процесів переносу намулів в лагранжевій моделі.

Мул рухається у вигляді завислих намулів лише у водному шарі, в який він потрапляє з *АДШ*, та осідає в *АДШ*. Моделюється лише один клас мулів. Консолідація донних шарів в моделі не враховується. Процеси змучування піску та мулу в суміші можуть бути взаємопов'язані. Умова збереження маси суміші в *АДШ*, що включає одну фракцію мулу та n фракцій піску має вигляд:

$$p_m + \sum_{i=1}^n p_{si} = 1$$

де p_{si} та p_m вміст i -ї фракції піску та фракції мулу, відповідно, який визначається як відношення маси часток одного класу в *АДШ* на елементі поверхні дна до маси всіх часток намулів, що знаходяться в цьому об'ємі. Вважається, що змучування суміші мулу та піску відбувається згідно закономірностям, що описані в розділі 3.4.

Для моделювання змучування, випадіння та переносу намулів використовується лагранжевий підхід. Концентрація завислих намулів характеризується ансамблем часток, а задача переносу зводиться до стеження за траєкторією часток. Маса суспензії у водному шарі і в *АШ* розподілена між великою кількістю часток однакової маси. Кожна частка має три властивості протягом моделювання: стан (або “зависла” або “на дні”); клас розмірів (від 1 до n -того, “0” клас відповідає мулу); клас джерела (від 1 до n_s -того). Частинки “на дні” знаходяться в *АШ*. Частинки піску в *АШ* можуть також рухатись у вигляді рухомих донних наносів. *АДШ* є джерелом часток для *АШ* коли цей шар втрачає масу за рахунок переходу часток в завислі намули та/або дивергенції потоку рухомих донних намулів. Він також забирає частки із *АШ*, коли товщина останнього h_A перевищує деяке задане значення. Завислі частки мулу характеризуються діаметром “флоків” D_{floc} , що виникають внаслідок злипання (флокуляції) часток мулу в турбулентному водному шарі. Частки марковані класом джерела для того, щоб мати можливість відстежити траєкторію часток від заданого джерела.

Для моделювання переносу завислих намулів у водному шарі використовується лагранжева модель випадкових блукань, в якій зсуви часток моделюються як випадковий марківський процес. Рівняння для зміщення частинки $d\vec{x} = (dx, dy, dz)$ на кожному кроці по часу dt мають вигляд

$$dx = \left(u + \frac{\partial K_x}{\partial x} \right) dt + \sqrt{2K} d\xi_x, \quad dy = \left(v + \frac{\partial K_y}{\partial y} \right) dt + \sqrt{2K} d\xi_y, \quad dz = \left(w - w_s + \frac{\partial K_z}{\partial z} \right) dt + \sqrt{2K_x} d\xi_z.$$

Тут $\vec{U} = (u, v, w)$ – адвективна складова швидкості частинки: $\vec{x}(t) = (x, y, z)$ – координати частинки; вісь z напрямлена вгору, а початок координат $z = 0$ розміщено на незбуреній поверхні води; w_s – швидкість гравітаційного осідання частинок у воді, K_x, K_y, K_z – ненульові діагональні елементи тензора коефіцієнтів турбулентної дифузії, в моделі покладається $K_x = K_y = K$; $d\xi_x, d\xi_y, d\xi_z$ – нормально розподілені випадкові величини з відхиленням dt .

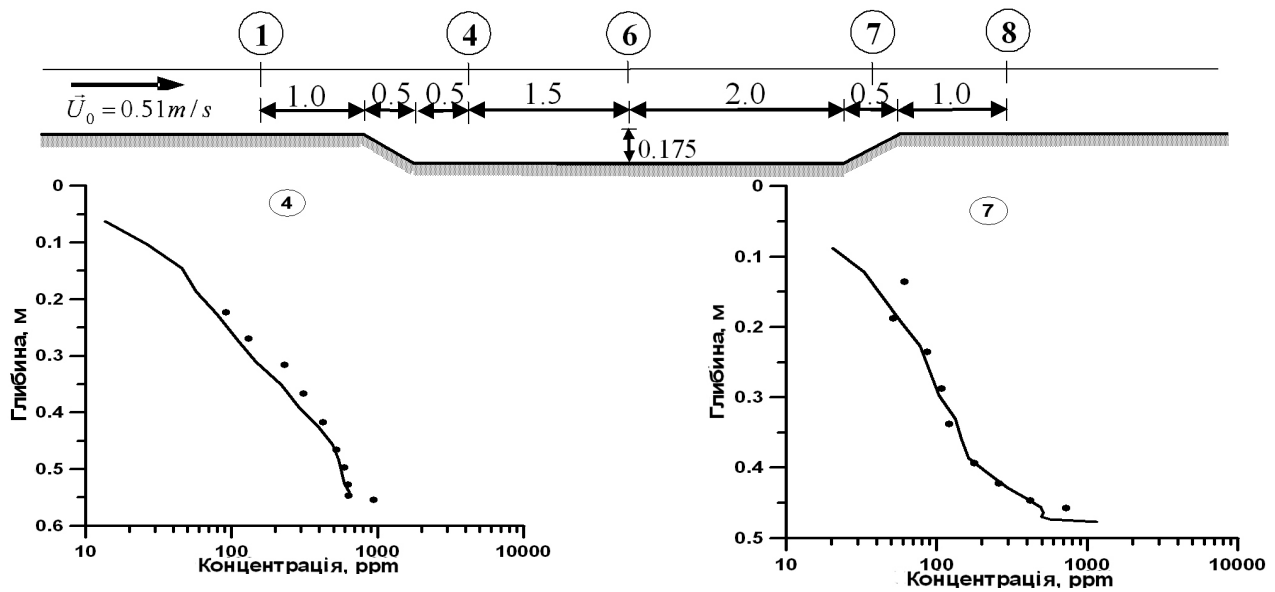


Рисунок 7. Схема лабораторного експерименту та порівняння розрахованих та експериментальних вертикальних профілів концентрації намулів.

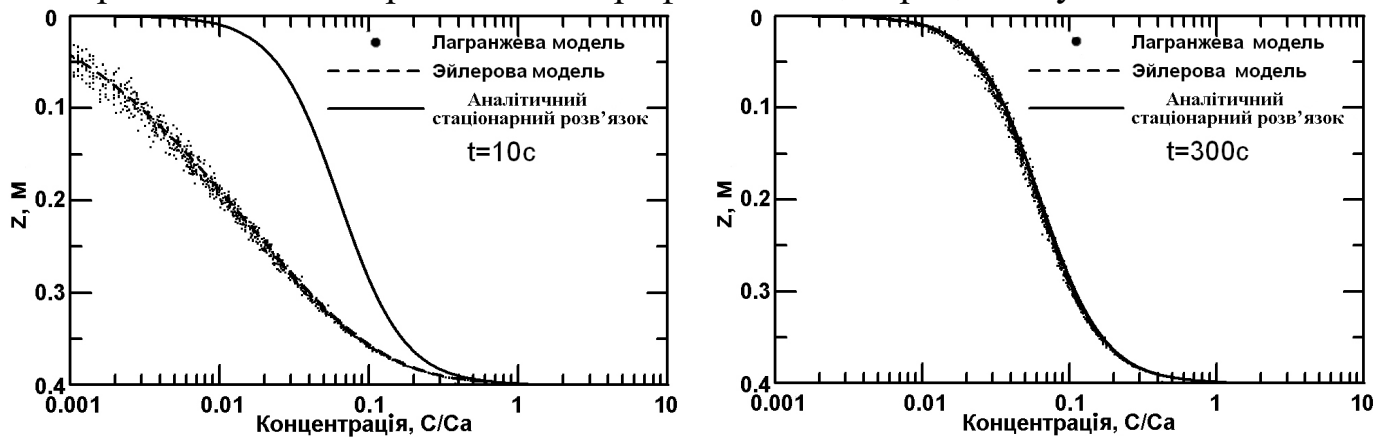


Рисунок 8. Порівняння розрахованого лагранжевою моделлю вертикального профілю концентрації намулів із аналітичним стаціонарним розв'язком в горизонтально однорідному потоці та з розрахунками ейлерової моделі.

Тривимірні поля швидкостей та коефіцієнтів турбулентної дифузії розраховуються за допомогою гідродинамічної моделі. Ці значення інтерполюються у просторі та часі для кожної частинки.

На рис. 7-10 показано приклади застосування моделі. На рис. 8 – перевірка моделі на аналітичному розв'язку та на результатах розрахунків ейлерової моделі. На рис. 7 – порівняння з даними лабораторного експерименту по переносу завислих наносів в каналі із заглибленням. На рис. 9 показаний приклад розрахунку розмиву дна придонним струменем від гребного гвинта в експерименті [G. Hammil 1988]. На рис. 10 показано розрахунки по переносу донних намулів внутрішніми хвилями, що накочуються на похилий берег.

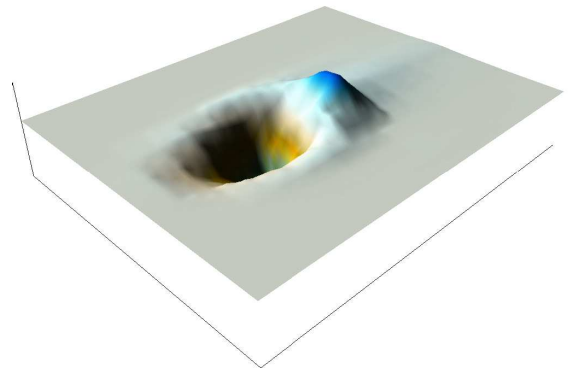


Рисунок 9. Приклад розмиву дна під дією придонного струменя.

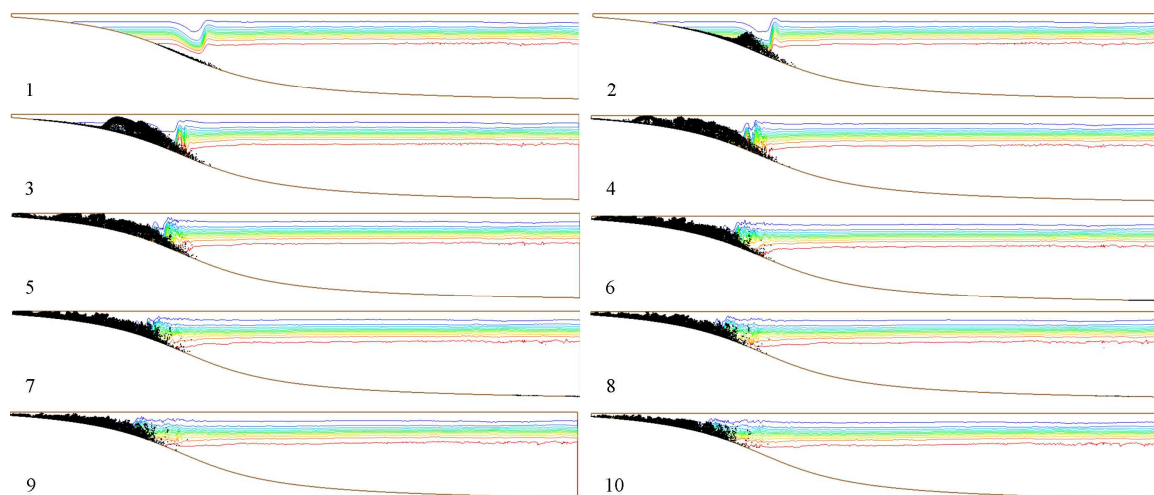


Рисунок. 10 Перенос намулів під дією поодинокі внутрішньої хвилі, що накочується на шельф. Показано ізолінії солоності та розташування частинок у послідовні моменти часу.

П'ятий розділ присвячений аналітичним та чисельним розв'язкам задачі про розповсюдження нафтопродуктів у водному середовищі. Перенос і зміна фізико-хімічних властивостей нафти в морі регулюється великою кількістю взаємопов'язаних процесів: перенос течіями; розтікання поверхневої плями за рахунок гравітаційних сил і поверхневого натягу; масообміну і зміни фізико-хімічних властивостей за рахунок процесів вивітрювання; взаємодії нафти з зваженими і донними відкладеннями та береговою лінією. Поверхнева плівка нафти розтікається через гравітаційні сили та за рахунок зсувних течій і вихорів. Розтікання є важливим процесом у зміні фізико-хімічних властивостей нафти, тому що це призводить до суттєвого росту площі поверхневої плями та до інтенсифікації процесів вивітрювання. J. Fay [1969] за допомогою аналізу розмірностей розділив процес поширення плями на три етапи: інерційний етап (1), коли при русі сила плавучості врівноважується силою інерції; гравітаційно-в'язка стадія (2), коли сили плавучості врівноважуються силами в'язкості; етап поверхневого натягу (3), коли сили поверхневого натягу врівноважуються силами в'язкості. Розтікання нафти – складний процес, який був детально вивчений для деяких ідеалізованих задач. Більшість досліджень були обмежені випадками автомодельного поширення симетричної плями після миттєвого розливу в спокійному середовищі. На даний момент відома тільки невелика кількість моделей, що описують розтікання плям реалістичних форм: двовимірні ейлерова модель поверхневої плями [J. Nihoul 1983], що була отримана з рівнянь мілкої води для в'язкого режиму та режиму поверхневого натягу і тривимірні лагранжева модель [І. Бровченко, В. Мадерич 2002, І. Brovchenko та ін. 2003] та ейлерова модель [Р. Tkalich та ін. 2003], які були нещодавно розроблені, для того, щоб врахувати ефекти вивітрювання. 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 декілька днів і місяців, як у випадках розливів “Ixtoc I” та “Deer Horizon”. Таким чином, важливо розуміти можливий вплив, що спричинений силою Коріоліса на динаміку розповсюдження поверхневої плями, що утворилась внаслідок безперервного або миттєвого витоку.

У розділі розглядається модифікована модель [І. Бровченко, В. Мадерич 2002, І. Brovchenko та ін. 2003, V. Maderich та ін. 2012], яка здатна описувати динаміку розтікання поверхневої плями при урахуванні сили Коріоліса і наявності поверхневих течій для випадків миттєвого або неперервного витоку, та моделювати тривимірну дисперсію нафтових крапель в стовпі води.

Основні рівняння, що описують розтікання нафтової плями виводяться в наближенні мілкої води, з рівнянь нерозривності та Нав'є-Стокса, що усереднюються по товщині шару нафти. Рівняння мілкої води та метод його розв'язку методом частинок в загальному випадку розглянуто в розділі 1.7. Усереднені по товщині нафтового шару рівняння мають вигляд:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{\nabla}(\vec{u}_o h) = Q,$$

де t - час, h - товщина плівки; $\vec{u}_o = (u_o, v_o)$ - усереднена по товщині нафтової плівки швидкість у декартовій системі координат $\vec{x} = (x, y)$, $\vec{\nabla}$ - горизонтальний диференціальний оператор. Припускається, що відома швидкість на поверхні $\vec{u}_w = (u_w, v_w)$. Q – джерела та стоки завдяки випаровуванню, дисперсії нафтових крапель вглиб води, діючим джерелам розливів та заходам щодо збору нафти. Інерційний режим є відносно коротким. Нехтуючи інерційними членами у рівняннях руху, що усереднені по товщині шару нафтової плями, ми припускаємо баланс між силами плавучості, тертя і силою Коріоліса, що дає:

$$f\vec{z} \times \delta\vec{u} = -g'\vec{\nabla}h + \frac{\vec{\tau}_a - \vec{\tau}_b}{\rho_o h},$$

де $\vec{z}$ – одиничний вектор, що направлений вгору; $\delta\vec{u} = \vec{u}_o - \vec{u}_w$; f – параметр Коріоліса; $g' = g(\rho_o - \rho_w)/\rho_o$; g – гравітаційне прискорення; ρ_o та ρ_w - густина нафти та води, відповідно; $\vec{\tau}_b$ та $\vec{\tau}_a$ є напруження тертя на межі нафта-вода, та нафта-повітря, відповідно. Оскільки в'язкість нафти μ_o набагато більше, ніж в'язкість води μ_w ($\mu_o/\mu_w \approx 20$) ми можемо припустити, що швидкості в нафтовій плямі розподілені рівномірно по товщині. Тому, імпульс від дії вітру передається безпосередньо до води, що під плямою. Це означає, що $\vec{\tau}_b = \vec{\tau}_a + \vec{\tau}_w$, де $\vec{\tau}_w = (\tau_w^x, \tau_w^y)$ є напруження тертя, викликане відносним рухом плями та поверхневих потоків. На відміну від багатьох моделей розливів нафти в даній роботі не використовується некоректне припущення, що вітрові напруження викликають додаткову “вітрову” швидкість, що відрізняється від поверхневої швидкості. Через велику в'язкість нафти пограничний шар, що викликається відносним рухом плями і води, існує тільки у воді. Припускаючи ламінарний характер цього пограничного шару, напруження тертя на поверхні води та нафти без врахування обертання Землі параметризуються в рамках класичної

теорії пограничного шару Л. Прандтля використовуючи відстань до кромки плями замість характерного масштабу плями, або відстані від її центру. Для характерного часу $t' \sim f^{-1}$ обертання Землі обмежує товщину пограничного шару глибиною екманівського шару $\delta_E = \sqrt{\nu_w / f}$. У шарі Екмана член Коріоліса знаходиться у балансі із в'язкістю. Напруження тертя між нафтовою плямою та водою отримується з розв'язку для пограничного шару Екмана. Відмітимо, що вектор дотичних напружень відхиляється на кут 45° від вектору дотичних напружень без обертання Землі. Характер ламінарного пограничного шару залежить від числа Росбі $Ro = \delta_E / \delta_w = U / f \ell$. Якщо $Ro \gg 1$, тоді напруження тертя між водою та плямою описується в рамках теорії ламінарного пограничного шару, в той час як при $Ro \ll 1$ домінують напруження тертя в шарі Екмана. Підставляючи напруження тертя в пограничному шарі Екмана в рівняння руху нафтової плівки, отримано вираз для швидкостей руху нафтової плівки для обертального режиму. Для отриманих параметризацій сил в'язкого тертя отримані нові автомоделі розв'язки осесиметричних та одновимірних задач розтікання поверхневої плівки нафти на гравітаційно-в'язкій стадії для обертального та необертального режимів для миттєвого та неперервного розливу. Отримані розв'язки для гравітаційно-в'язкого розтікання узгоджуються з відомими асимптотичними залежностями, аналітичними розв'язками та експериментальними даними. В таблиці 1 наведено автомоделі показники, що отримані для різних режимів розтікання. $n=0/1$ відповідає одновимірному/осесиметричному випадку. $m=0/1$ відповідає миттєвому/неперервному розливу. α – показник затухання товщини з часом, β, θ – радіальної та трансверсальної швидкості, γ – показник зміни розміру з часом, ϕ – числа Рейнольдса.

Таблиця 1. Чисельні значення ступенів в степеневих законах подібності для односпрямованого і осесиметричного розтікання нафтової плями

Режим	n	m	α	β	θ	γ	ϕ
Гравітаційно-в'язкий	0	0	-3/8	-5/8	–	3/8	-1/4
Гравітаційно-в'язкий	1	0	-1/2	-3/4	–	1/4	-1/2
Гравітаційно-в'язкий	0	1	1/8	-1/8	–	7/8	3/4
Гравітаційно-в'язкий	1	1	-1/6	-5/12	–	7/12	1/6
Гравітаційно-турбулентний	0	1	4/23	-4/23	–	19/23	15/23
Гравітаційно-турбулентний	1	1	-5/33	-14/33	–	19/33	5/33
Гравітаційно-в'язко-обертальний	0	0	-1/4	-3/4	-3/4	1/4	-1/2
Гравітаційно-в'язко-обертальний	1	0	-1/3	-5/6	-5/6	1/6	-2/3
Гравітаційно-в'язко-обертальний	0	1	1/4	-1/4	-1/4	3/4	1/2
Гравітаційно-в'язко-обертальний	1	1	0	-1/2	-1/2	1/2	0

На рис. 11, 12 показані результати розрахунків чисельною лагранжевою моделлю неперервного розтікання $3 \cdot 10^4 \text{ м}^3$ сирової нафти при неперервному витокі $0.3 \text{ м}^3/\text{с}$. Показані траєкторії частинок протягом двох днів моделювання,

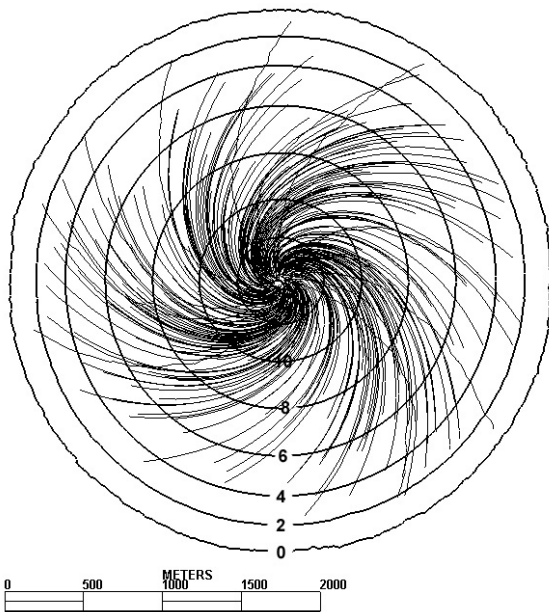


Рисунок 11. Траєкторії частинок в інтервалі від $t = 2$ hr до $t = 48$ годин. Товщину плівки позначено в мм на момент часу 48 годин.

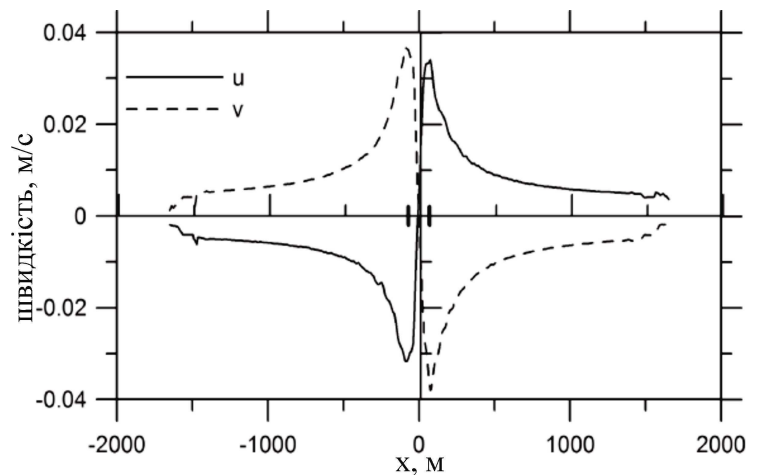


Рисунок 12. Переріз компонент швидкості вздовж вісі x в гравітаційно-в'язко-обертальному режимі при неперервному розливі в момент часу $t = 48$ годин. Джерело позначено товстими вертикальними лініями.

розподіл товщини плями в кінцевий момент часу та перерізи радіальної та трансверсальної швидкості. Згідно з автотельним аналізом в розділі, профілі цих компонент є подібними. Траєкторії частинок відхиляються від напрямку градієнту товщини плівки за рахунок екманівського тертя. В моделюванні брало участь 10^5 частинок, параметр Коріоліса дорівнював 10^{-4} c^{-1} .

На рис. 13 показано результати чисельного моделювання неперервного розливу в полі течій з урахуванням та без урахування сили Коріоліса. Умови витоку були такі ж як і в попередньому сценарії. Течія була напрямлена під

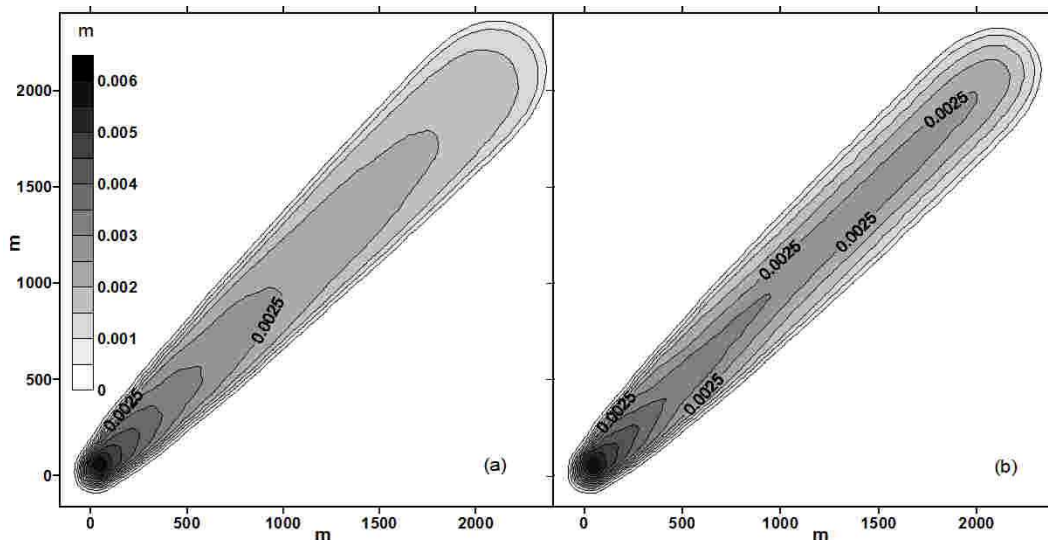


Рисунок 13. Товщина нафтової плівки при неперервному розливі в полі течій після 3-х годин моделювання. (а) без обертання та (б) з обертанням.

кутом 45° до вісі x , а швидкість дорівнювала 0.2 м/с. Як видно з рисунку, що побудований через 3 години після початку витoku, вплив сили Коріоліса призводить до більш вузької та товстої плями при розтіканні від джерела. Через дві доби після початку витoku площа плями стала в 2.4 рази меншою за пляму в сценарії без обертання. Цей ефект є сильнішим, ніж в сценарії без течій, тому що у видовжених плямах домінує одновимірний закон розтікання.

Повна версія моделі, що включає модель поверхневої плівки нафти, тривимірну модель диспергованих нафтових крапель у водному шарі, моделі вивітрювання та зміни фізико-хімічних властивостей нафти використовувалась для моделювання витoku сирої нафти внаслідок аварії на танкері “Hebei Spirit” в грудні 2007-го року поблизу західного берега Південної Кореї. Для врахування дисперсії нафтових крапель під дією хвиль, що перекидаються та стоксового дрейфу було використано дані попередніх розрахунків полів вітрових хвиль. На рис. 14 показано порівняння положення нафтової плями через один день після початку аварійного розливу згідно спостережень та розрахунків.



Рисунок 14. Порівняння положення нафтової плями через один день після початку розливу згідно спостережень (зліва) та згідно розрахунків (справа).

У **шостому розділі** наводиться опис нової тривимірної моделі розповсюдження радіонуклідів. Модель переносу радіонуклідів описує основні обмінні процеси в системі вода-багатофракційні намули (рис. 15). У товщі води радіонукліди в розчиненій формі та адсорбовані на твердих частинках переносяться течіями (адвекційні процеси) з одночасним впливом турбулентних процесів дифузії. Радіонукліди в розчиненому стані взаємодіють з радіонуклідами адсорбованими на завислих намулах та донних відкладеннях. Передача активності між розчиненими і адсорбованими радіонуклідами описується процесами адсорбції-десорбції. Осідання забруднених завислих

наносів і розмив дна є важливими шляхами обміну радіонуклідів між дном і завислими намулами. Передача активності між водою та поровою водою у верхньому шарі донних відкладень регулюється дифузійними процесами.

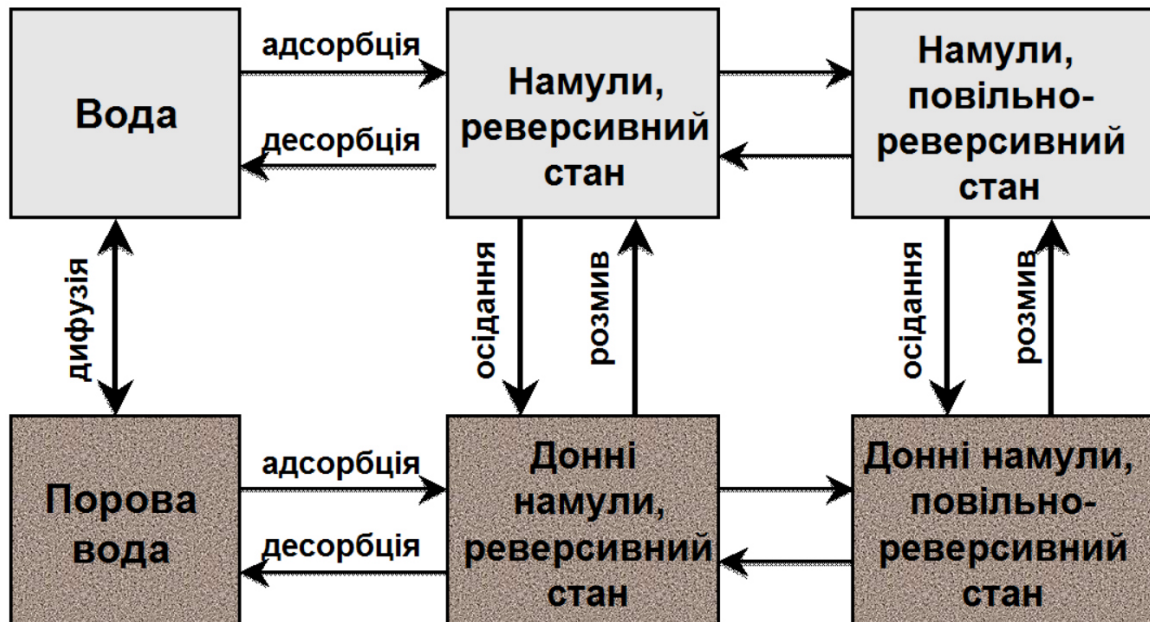


Рисунок 15. Схема розповсюдження радіонуклідів у водному середовищі.

В моделі використана двоступенева послідовна кінетична реакція адсорбції радіонуклідів намулами. Первинна адсорбція радіонукліду частинкою намулу відбувається через поверхню частинки, цей процес описується кінетичними коефіцієнтом $k_1[c^{-1}]$, який є пропорційним площі поверхні частинки. Швидкість десорбції є постійною і описується коефіцієнтом $k_2[c^{-1}]$. Після поверхневої адсорбції починається друга “повільна” реверсивна фаза реакції, повільна дифузія іонів всередину частинки. Швидкість адсорбції та десорбції для другої ступені кінетичної реакції контролюється емпіричними параметрами a_{fs}, a_{sf} .

Для опису розповсюдження радіонуклідів у водному шарі розв’язуються тривимірні рівняння переносу та дифузії для радіонуклідів у розчиненому стані, для концентрації радіонуклідів в адсорбованому реверсивному стані на кожній фракції завислих наносів та для концентрації радіонуклідів в адсорбованому повільно-реверсивному стані на кожній фракції завислих наносів.

Неперервний вертикальний розподіл намулів та радіоактивності в донних відкладеннях апроксимується в моделі як послідовність добре перемішаних шарів у відповідності з моделлю переносу намулів (рис. 5). Для опису міграції радіоактивності через донні шари за рахунок дифузії порової води та біотурбації розв’язуються балансові рівняння для кожного шару для радіоактивності у кожному можливому стані: розчиненого у поровій воді, адсорбованого у реверсивному стані на кожній фракції намулів, адсорбованого у повільно-реверсивному стані на кожній фракції намулів.

Дифузійний обмін між шарами $(j, j+1)$ параметризується через швидкість обміну $W_{pw}^{(j, j+1)}$ [м/с] та різницю концентрацій між шарами j та $j+1$. Шар $j=0$

відповідає водному шару. Швидкість обміну $W_{pw}^{(0,1)}$ може бути оцінена на основі теорії турбулентного пограничного шару [D. Shaw, T. Hanratty 1977], скоригованої для шорсткого дна [B. Boudreau 1997]

$$W_{pw}^{(0,1)} = 0.1778 u_* Re^{-0.2} Sc^{-0.604},$$

де u_* – швидкість тертя, $Re = u_* \delta_* \nu_M^{-1}$ – число Рейнольдса, δ_* – середня висота шорсткості елементів, $Sc = \nu_M / \nu_D$ – число Шмідта, ν_M – кінематична в'язкість, ν_D – коефіцієнт вільної дифузії в розчині. Швидкість обміну $W_{pw}^{(j,j+1)}$ між шарами донних намулів при $j > 0$ записується за допомогою скінчено-різницевої апроксимації дифузійного члена:

$$W_{pw}^{(j,j+1)} = \frac{2\nu'_{D,j}\nu'_{D,j+1}}{\nu'_{D,j}Z_{j+1} + \nu'_{D,j+1}Z_j},$$

де $\nu'_{D,j}$ – ефективний коефіцієнт дифузії. Цей коефіцієнт включає коефіцієнт дифузії ν_D , що скоригований на звивистість ψ^2 в намулах. Параметр звивистості пов'язаний з пористістю згідно [B. Boudreau 1997] як $\psi_j^2 = 1 - 2\ln \varepsilon_j$.

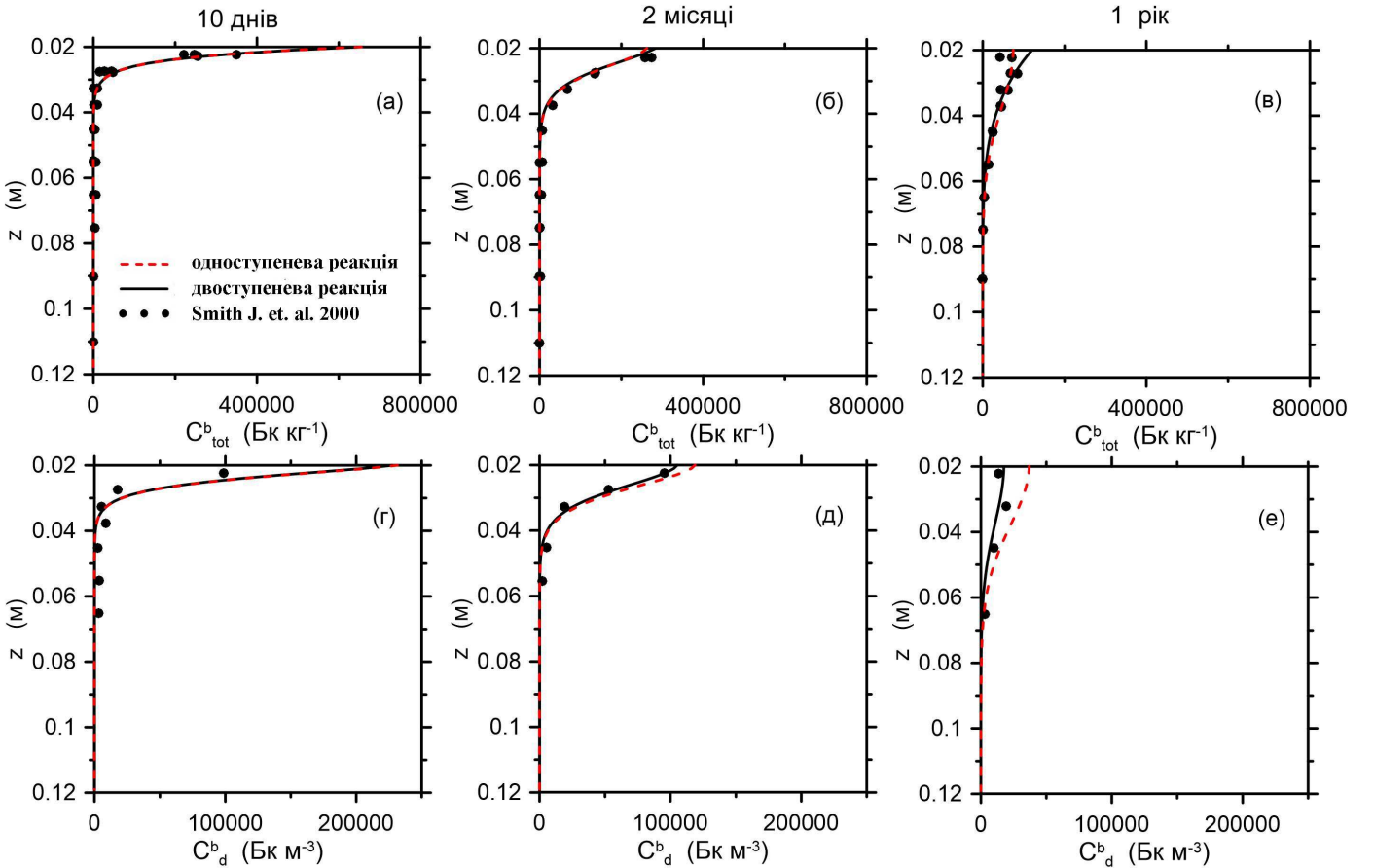


Рисунок 16. Порівняння профілів концентрації радіонуклідів з лабораторним експериментом [J. Smith, R. Comans 2000] в різні моменти проведення дослідю. На верхній панелі – концентрація в намулах, на нижній – концентрація в поровій воді. Пунктирною лінією показана концентрація при розрахунках моделлю з одноступеневою кінетичною реакцією, суцільною лінією показана концентрація при розрахунках моделлю з двоступеневою кінетичною реакцією.

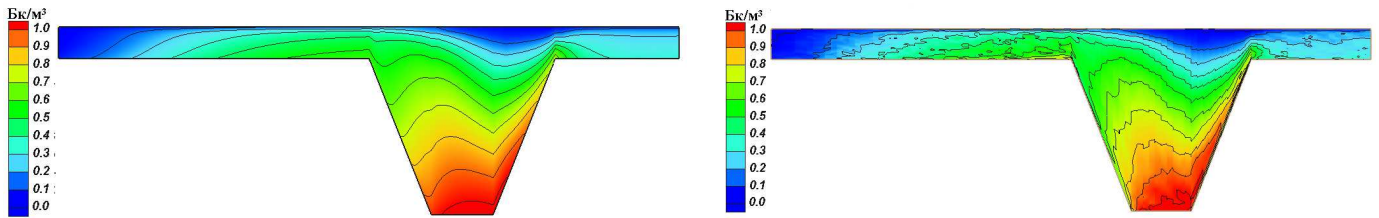


Рисунок 17. Вертикальний переріз концентрації адсорбованого ^{137}Cs розрахований за допомогою ейлерової (зліва) та лагранжевої (справа) моделей. Швидкість обміну $W_{bt}^{(j,j+1)}$ для адсорбованих радіонуклідів дорівнює швидкості обміну донних намулів.

Для перевірки моделі був чисельно відтворений лабораторний експеримент [J. Smith, R. Comans 2000] з міграції ^{134}Cs в донних намулах. В експерименті, що тривав один рік, ^{134}Cs , що на початку знаходився в розчиненому стані у водному шарі, поступово розповсюджувався вглиб донних намулів за рахунок дифузії у поровій воді. На рис. 16 показано порівняння розрахованих вертикальних профілів концентрації у поровій воді та намулах з експериментальними даними у різні моменти часу.

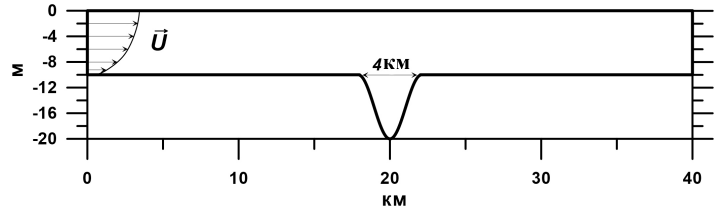


Рисунок 18. Схема чисельних експериментів в каналі з заглибленням.

Для розв'язку рівнянь моделі лагранжевим методом було застосовано алгоритми, що описані в розділі 2. Для процесів переносу та дифузії – методи випадкових блукань, для перетворень між станами речовини – розрахунок ймовірностей переходу, що базується на розв'язку рівнянь Колмогорова. На рис. 17 показано порівняння розрахунків між ейлерової та лагранжевою моделями при розв'язанні задачі про потік розчиненого радіонукліду в каналі із заглибленням при наявності завислих наносів.

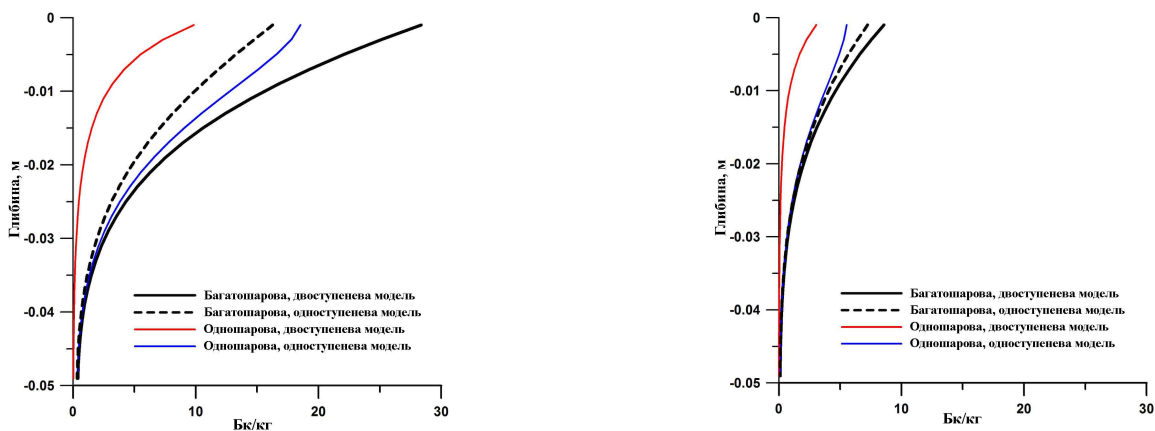


Рисунок 19. Профілі концентрації в кінці каналу після 750 днів моделювання (зліва); Профілі концентрації в заглибленні після 750 днів моделювання (справа)

Для дослідження важливості використання багатошарової апроксимації дна та двоступеневої кінетичної реакції було проведено низку чисельних експериментів по забрудненню дна при течії в каналі із заглибленням (рис.18). На рис. 19 показано порівняння вертикальних профілів забруднення у дні при використанні одно- або багатошарової моделі та одно- або двоступеневої кінетичної реакції. Було показано, що при постійно діючому джерелі забруднення використання одношарової моделі та одноступеневої реакції суттєво занижає поверхневу концентрацію забруднення та інтегральний запас у дні.

Також в шостому розділі було проведено моделювання гіпотетичного аварійного витоку ^{137}Cs в акваторії Жовтого моря з атомної електростанції Санмен (Китай). При моделюванні використовувалась тривимірна модель гідродинаміки поєднана зі спектральною моделлю вітрових хвиль, модель переносу багатофракційних наносів та модель переносу рідіонуклідів. Був показаний суттєвий вплив наявності намулів на розповсюдження аварійного забруднення.

В **сьомому розділі** описується застосування розроблених моделей до розрахунку наслідків аварії на АЕС Фукусіма у 2011 році. Проведено аналіз даних вимірювань радіоактивного забруднення у воді та у ґрунті. Проведено моделювання розповсюдження радіонуклідів протягом перших місяців після аварії, та проаналізовано результати моделювання та спостережень.

На рис. 20 відображено розрахункову область та неструктуровану сітку гідродинамічної моделі. Роздільна здатність змінювалась в просторі і досягала 500 м в районі аварійного викиду на АЕС. Для задання граничних умов на відкритих границях ставилися значення температури, солоності і швидкостей взяті з результатів розрахунків глобальної тривимірної моделі NUCOM. Для розрахунку припливних рівнів вільної поверхні на відкритій границі була використана глобальна модель прогнозування припливів NAO99b, що основана на спектральному аналізі. Для розрахунку вітрових напружень на поверхні, а також теплообміну між атмосферою та океаном були

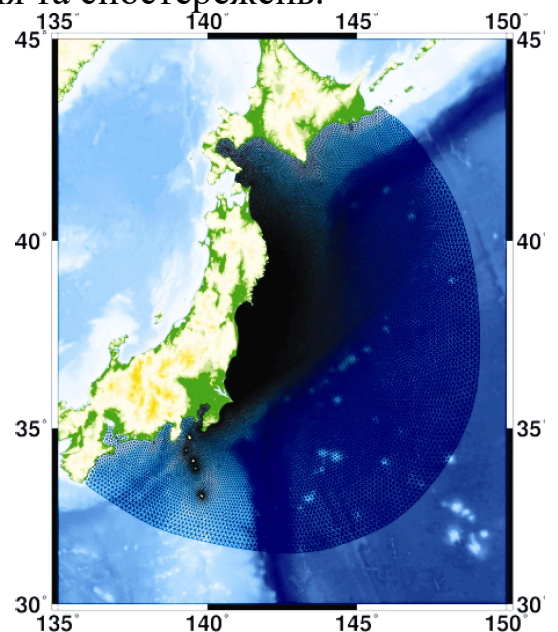


Рисунок 20. Розрахункова область і сітка.

використані глобальні метеорологічні дані ERA-INTERIM. Було використано дані з температури повітря, атмосферного тиску, вологості повітря, хмарності та швидкості вітру з часовим кроком 6 годин. З використанням опублікованих даних натурних досліджень було побудовано неоднорідний по простору розподіл середніх розмірів піщинок намулів та пористості. Використовуючи

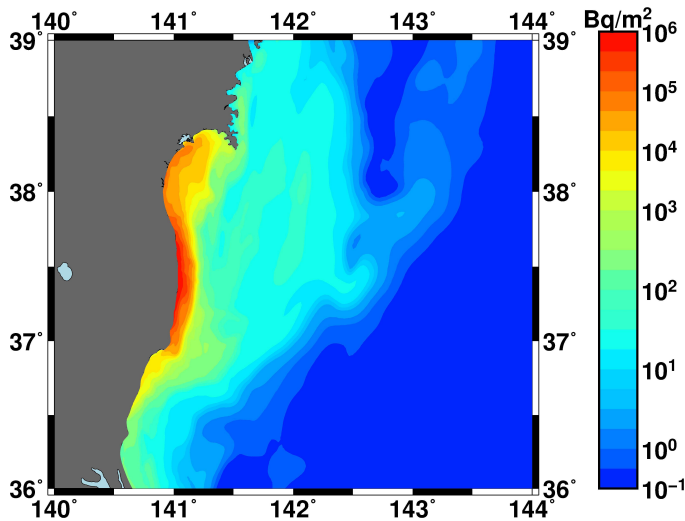


Рисунок 21. Загальне забруднення дна на 11 травня 2011р.

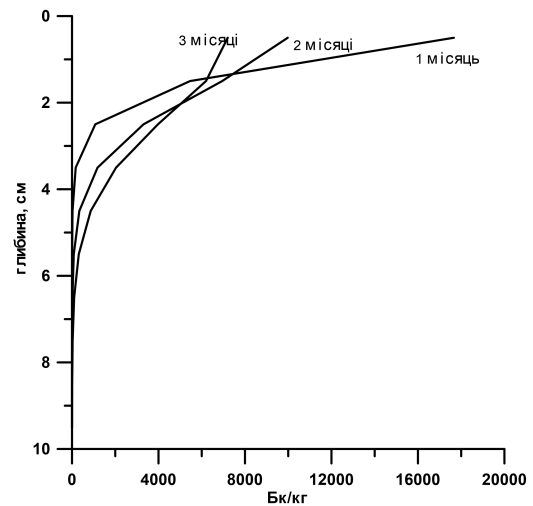


Рисунок 22. Профілі концентрацій в намулах в точці близькій до витоку в послідовні моменти часу.

експериментальну оцінку коефіцієнту біодифузії [Е. Black, К. Buesseler 2014] було отримане кореляційне співвідношення для залежності коефіцієнту біодифузії від глибини, яке було використано при моделюванні.

Розрахунки розповсюдження ^{137}Cs проводилися як ейлеровою так і лагранжевою моделями. При розрахунках лагранжевою моделлю використовувались поля швидкостей та коефіцієнту вертикального перемішування, що розраховані гідродинамічною моделлю та збережені з часовим кроком 1 год. В моделюванні брало участь 100000 частинок. На рис. 23 зображено приповерхневу концентрацію розчиненого ^{137}Cs , побудовану за розподілом частинок методом усереднення по об'єму. На рис. 24 показано порівняння розрахунків ейлеровою моделлю концентрації ^{137}Cs на поверхні з даними спостережень в точці недалеко від розташування витоку.

На рис. 21, 22 показано розраховане загальне забруднення дна на момент часу 11 травня та вертикальні профілі забруднення намулів в точці біля станції в різні моменти часу. З графіків видно, що вже через місяць після аварії верхній шар намулів починає очищуватись, в той час як забруднення мігрує в глибші шари намулів. Розрахунки показують необхідність використання багатошарової моделі донних намулів при моделюванні наслідків аварії на АЕС Фукусіма.

Розрахунки та аналіз даних вимірювань ^{137}Cs показали, що з часом після аварії в результаті інтенсивних течій вода очищується, та основним джерелом забруднення стають донні намули. Максимальні концентрації спостерігаються через 1-2 тижні після початку аварій, а потім монотонно зменшуються до майже фонових значень (за виключенням кілька-кілометрової зони навколо місця аварії).

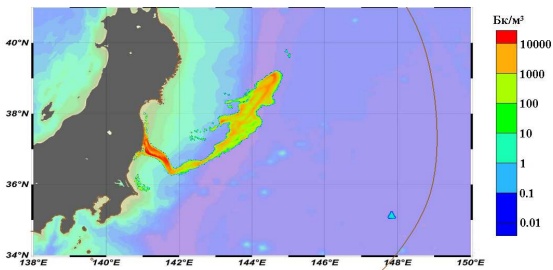


Рисунок 23. Концентрація розчиненого ^{137}Cs на поверхні на момент часу 20 квітня 2011 року побудована по розподілу частинок, що розрахований лагранжевою моделлю переносу радіонуклідів

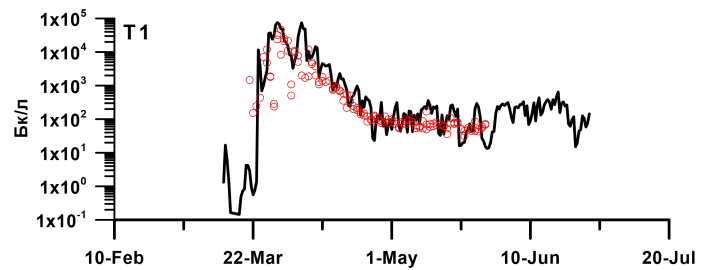


Рисунок 24. Порівняння розрахунків концентрації ^{137}Cs на поверхні з даними спостережень ТЕРСО.

Виміри забруднення дна показують, що можуть відбуватися значні зміни концентрації забруднення і через 1-2 роки після аварії. Виміри в однакових точках в різний час показують, що концентрація в дні може як зменшуватись, так і збільшуватись. Зони, що зазнали сильного початкового забруднення мають тенденцію до зменшення концентрації, а в зонах з невисоким рівнем забруднення концентрація може збільшуватися. Тому для довгострокових прогнозів важливе моделювання процесів, що відбуваються в донних намулах, зокрема, біотурбація та дифузія в поровій воді. Дифузія в поровій воді та біотурбація призводять до міграції активності вглиб шару намулів і, відповідно, до зменшення потоку радіонуклідів в воду в процесі очищення дна за рахунок зменшення концентрації радіонуклідів на поверхні дна. Розрахунки показали необхідність використання для даної задачі моделі з багатошаровим представленням донних відкладень через складність процесів, що відбуваються при міграції радіонуклідів в донних покладах. Було показано, що тільки багатошарова модель, яка представлена в роботі, здатна коректно описувати інтегральне забруднення дна. Отримані результати продемонстрували, що лагранжеве моделювання є найбільш ефективним на ранніх етапах розповсюдження забруднень та може бути використане в системах підтримки прийняття рішень при ядерних та хімічних аваріях.

В додатках наведені деталі чисельних алгоритмів, що використані при моделюванні лагранжевими методами. Зокрема, алгоритм швидкого сортування частинок, алгоритм швидкого пошуку частинок в комірках та алгоритм взаємодії нафтових крапель з берегом та бонами.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено розробці та впровадженню чисельних методів моделювання розповсюдження забруднень та намулів в прибережних зонах морів. Побудовано нові чисельні схеми розв'язання рівнянь переносу та дифузії та рівнянь мілкої води методами частинок. Розроблено комплекс математичних та чисельних моделей, що дозволяє прогнозувати та досліджувати розповсюдження намулів та більшості типів забруднень в прибережних зонах. Порівняння розрахунків з даними лабораторних та натурних експериментів показують, що розроблені підходи та моделі можуть застосовуватись як для підтримки прийняття рішень для аварійних ситуацій, пов'язаних з викидами шкідливих речовин в морське середовище, так і для планування з ціллю зниження ризиків та мінімізації наслідків забруднення навколишнього середовища та можливих аварійних ситуацій.

Зокрема, в роботі отримано такі нові наукові результати:

1. Представлено узагальнений алгоритм, що дозволяє будувати чисельні схеми випадкових блукань з незміщеною дисперсією для загального випадку змінного поля течії та коефіцієнту дифузії. Отримано нові аналітичні розв'язки для зміщення центру мас та дисперсії розподілу частинки при моделюванні переносу та дифузії методом випадкових блукань для окремих часткових випадків одновимірного руху, за допомогою яких виведено критерії оцінки максимальних часових кроків для розв'язку рівняння адвекції-дифузії методом частинок.
2. Застосовано теорію стохастичних процесів до моделювання методом частинок процесів зміну стану речовини, таких як, наприклад, хімічні реакції, радіоактивний розпад та адсорбція-десорбція радіонуклідів на піщинках завислих чи донних намулах. Побудовано нову чисельну схему для узагальненого випадку розрахунку ймовірності зміни стану для частинки протягом часового кроку. Вираз для математичного сподівання та дисперсії розподілу стану речовини, отриманий з розв'язку рівняння Колмогорова, використано для побудови алгоритму для оцінки точності розв'язку рівняння перетворення станів речовини в залежності від часового кроку та кількості частинок. На основі отриманих результатів побудовано узагальнені чисельні алгоритми розв'язку рівнянь переносу та дифузії неконсервативних домішок методом частинок.
3. Модифіковано тривимірну гідростатичну гідродинамічну модель для врахування взаємодії поверхневих хвиль та течій з урахуванням радіаційних напружень, хвильового придонного тертя і потоку імпульсу в течії за рахунок перекидання хвиль. Порівняння модельних розрахунків з аналітичним розв'язком та з вимірами в лабораторному експерименті показали необхідність використання тривимірного представлення

радіаційних напружень, а також необхідність врахування перелічених факторів.

4. Вдосконалено чисельний алгоритм тривимірної негідростатичної моделі з вільною поверхнею для застосування узагальненої вертикальної системи координат, що дозволяє розв'язувати задачі моделювання негідростатичних струменевих та гравітаційних течій в прибережних областях з різкими змінами рельєфу дна.
5. Представлено нову математичну модель переносу багатофракційних намулів, яка описує морфологічні зміни дна та зміни фракційного складу в донних шарах намулів в результаті ерозії та осідання намулів. Вперше побудовано рівняння для зміни пористості викликане механічним перемішуванням донними організмами (біотурбацією).
6. На основі ейлерової моделі переносу багатофракційних намулів побудовано нова тривимірну лагранжеву модель, що використовує метод випадкових блукань для моделювання переносу та дифузії та описує перенос суміші зв'язних та незв'язних багатофракційних намулів з перемінним гранулометричним складом. Отримано вираз для ймовірності осідання незв'язних намулів залежно від характеристик турбулентності та швидкості осідання частинок намулів, що використовується для задання граничних умов для при розв'язанні рівняння переносу та дифузії методом частинок. Результати розрахунків добре узгоджуються з аналітичним і чисельним розв'язками для ейлерової моделі та з даними лабораторного експерименту. Модель було застосовано для дослідження виникнення гравітаційних каламутних течій на схилах в результаті шельфової конвекції та для моделювання набігання внутрішніх хвиль на уклін дна. Показано, що гравітаційні течії та внутрішні хвилі є одними з механізмів переносу донних намулів в шельфових зонах.
7. В результаті дослідження стійкості дна та берегів під дією струменевих течій від судових рушіїв за допомогою негідростатичної гідродинамічної моделі показано, що при моделюванні розмиву дна градієнт динамічного тиску необхідно враховувати поряд з дотичними напруженнями тертя. Розроблена лагранжева модель переносу намулів в поєднанні з негідростатичною гідродинамічною моделлю може використовуватись для розрахунків локального переформування дна навколо перешкод, моделювання днопоглиблювальних робіт або розмиву дна під впливом струменів від судових рушіїв або хвиль при проходженні
8. Розроблено нову чисельну тривимірну лагранжеву модель переносу нафтопродуктів, що складається з моделі поверхневої плівки нафти та моделі дисперсії нафтових крапель в шарі води. Побудовано чисельний лагранжевий метод взаємодіючих частинок, що дозволяє в рамках моделі суцільного середовища розраховувати поле тиску в плямі та розв'язувати задачу про гравітаційне розтікання поверхневої плівки нафти в

неоднорідному полі течій. Особливістю моделі є врахування впливу обертання Землі, що важливо для великих часових масштабів.

9. Отримано нові автотельні розв'язки рівнянь моделі для одновимірного та осесиметричного розтікання нафтової плівки в гравітаційно-в'язкому, гравітаційно-турбулентному і гравітаційно-в'язко-обертальному режимах для миттєвого і неперервного розливу. Показано, що при великих часових масштабах під нафтовою плівкою може виникати ламінарний пограничний шар Екмана, який призводить до істотного уповільнення розтікання порівняно з необертальним рухом та до відхилення швидкості розтікання нафти на 45° від напрямку швидкості в разі відсутності обертання.
10. Порівняння проведеного чисельного моделювання розповсюдження нафтового розливу внаслідок аварії на танкері "Hebei Spirit" у грудні 2007-го року зі спостереженнями показало, що модель адекватно прогнозує положення нафтової плями та зони максимального ураження берегової лінії. Зроблено висновок, що для даного випадку процес дисперсії нафти під дією хвиль, що перекидаються, несуттєвий, хоча ефект поверхневих хвиль необхідно враховувати при розрахунках стокового дрейфу поверхневої плівки.
11. Розроблено нову математичну тривимірну модель розповсюдження радіонуклідів, що описує перенос та турбулентну дифузію, ерозію та осідання адсорбованих радіонуклідів, процеси адсорбції, десорбції із завислими та донними намулами, процес розпаду радіонуклідів, враховує міграцію радіонуклідів у донному шарі за рахунок молекулярної дифузії та біотурбації. Розрахунки моделі перевірені на лабораторному експерименті по міграції радіонуклідів в донному ґрунті.
12. На основі побудованих алгоритмів розв'язку рівнянь переносу та дифузії методом частинок розроблено новий лагранжевий алгоритм розв'язку рівнянь моделі розповсюдження радіонуклідів в морському середовищі, що дозволяє моделювати процеси радіоактивного розпаду та адсорбцію-десорбцію на багатотракційних намулах. Розроблено алгоритм задання граничних умов для методу частинок, що заснований на розрахунку ймовірності зміни стану частинок біля границі. Проведене моделювання гіпотетичного аварійного витоків ^{137}Cs в Жовтому морі з АЕС з урахуванням припливів, хвиль та намулів показало, що для даних умов велику роль для забруднення дна та розповсюдження розчиненого радіонукліду відіграють процеси адсорбції та десорбції радіонуклідів на завислих намулах.
13. Лагранжеву та ейлерову чисельні моделі розповсюдження радіонуклідів було застосовано до розрахунку наслідків аварії на АЕС Фукусіма. Розрахунки та аналіз даних вимірювань ^{137}Cs показали, що з часом після аварії в результаті дії інтенсивних течій вода очищується, та основним

джерелом забруднення стають донні намули. Тому для довгострокових прогнозів рівня забруднення важливе моделювання процесів, що відбуваються в донних намулах, зокрема біотурбація та дифузія в поровій воді. Дифузія в поровій воді та біотурбація призводить до ефективного зменшення потоку радіонуклідів в воду в процесі очищення дна за рахунок зменшення концентрації радіонуклідів на поверхні дна. Проведені розрахунки показали, що лагранжеве моделювання є найбільш ефективним на ранніх етапах розповсюдження забруднень та може бути використане в системах підтримки прийняття рішень при ядерних та хімічних аваріях.

СПИСОК ОСНОВНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Maderich V., Brovchenko I., Terletska E., Hutter K Numerical simulations of the nonhydrostatic transformation of basin-scale internal gravity waves and wave-enhanced meromixis in lakes Nonlinear internal waves in lakes. – Springer. Series: Advances in Geophysical and Environmental Mechanics. – 2012. – P. 193-276.
2. Choi B.H., Kim K.O., Yuk J.H, Brovchenko I. Simulation of Tide-Surge-Wave in the Yellow Sea using Integrally Coupled Models // In Tides in the East Asian Marginal Seas, Ed. B.H. Choi, Hanrimwon Publishing Company. – 2016. – 208p.
3. Бровченко И., Мадерич В., Двумерная лагранжевая модель переноса многофракционных наносов в прибрежной зоне моря // Прикладная гидромеханика. – 8 (81), № 2. – 2006. – С. 9-17.
4. Brovchenko I., J. Kanarska, V. Maderich, K. Terletska 3D non-hydrostatic modeling of bottom stability under impact of the turbulent ship propeller jet // Acta Geophysica, vol. 55, (1). – 2007. – P. 47-55.
5. Бровченко И., Городецкая Н., Мадерич В., Никишов В., Терлецкая К. Взаимодействие внутренних уединенных волн большой амплитуды с препятствием // Прикладная гидромеханика. – 2007. – 9 (81), № 1. – С. 3-7.
6. Каліон В., Бровченко І., Кушан А. Використання методу гідромеханіки згладжених часток для розв'язання задач гідродинаміки довкілля // Вісник Київського університету. Сер.: Фізико-математичні науки. – 2007. – №4. – С. 77-83.
7. Maderich V., Heling R., Bezhenar R., Brovchenko I., Jenner H., Koshebutsky V., Kusch A., Terletska K. Development and application of 3D numerical model THREEETOX to the prediction of cooling water transport and mixing in the inland and coastal waters // Hydrol. Process. – 2008. – 22. – P.1000–1013.
8. Бровченко И.А., Мадерич В.С. Трехмерная Лагранжева модель переноса многофракционных наносов и ее применение к описанию гравитационных течений // Прикладная гидромеханика. – 2008. – 11(83), № 2. – С. 3-12.
9. Maderich V., Talipova T., Grimshaw R., Pelinovsky E., Choi B.H., Brovchenko I., Terletska K., Kim D. C. The transformation of an interfacial solitary wave of elevation at a bottom step // Nonlin. Processes Geophys. – 2009. – 16. – P. 33–42.

10. Терлецкая К., Мадерич В., Бровченко И. Трансформация уединенных внутренних волн большой амплитуды над ступенькой на дне // Прикладна гідромеханіка. – 2009. – 11 (83), № 3. – С. 65-76.
11. Мадерич В., Беженар Р., Бровченко И. Трехмерное моделирование взаимодействия волн и течений // Прикладна гідромеханіка – 2010. – 12(84) №3. – С. 38-46.
12. Бровченко И. Применение методов частиц в задачах с неструктурированными сетками // Мат. машины и системы. – 2010. – №3. – С. 111-115.
13. Мадерич В., Терлецкая К., Бровченко И. Структура и динамика гравитационных течений на склоне: поток трансформированных под ледником Ронне-Фильхнера вод в море Уэддела // Украинский Антарктический Журнал. – 2010. – № 9. – С. 263-270.
14. Kalion V.A., Brovchenko I.O., Nakvasyuk V.V. Study of a 2D turbulent free-surface flow using SPH // Збірник праць Ін-ту математики НАН України. – 2010. – том 7. – №2. – С. 65-72.
15. Maderich V., Talipova T., Grimshaw R., Terletska E., Brovchenko I., Pelinovsky E., Choi B., Transformation of the Large Amplitude Interfacial Solitary Waves of depression at the Bottom Step // Physics of Fluids. – 2010. – № 22. – P. 176-185.
16. Бровченко И., Мадерич В. Исследование роли подводных каньонов в выносе наносов из береговой зоны восточного побережья Черного моря // International Journal of Civil and Structural Engineering. – 2011. – Том 7(2). – С. 39-46.
17. Бровченко И., Мадерич В., Терлецкая К. Численное моделирование трехмерной структуры течений в районе глубоководных каньонов восточного побережья Черного моря // International Journal of Civil and Structural Engineering. – 2011. – Том 7(2). – С. 47-53.
18. Терлецкая К.В., Мадерич В.С., Бровченко И.А. Сильно-нелинейные внутренние сейши в удлинненных стратифицированных озерах и феномен «озерных монстров» // Прикладна гідромеханіка. – 2011. – 13 (85), № 1. – С. 51-55.
19. Терлецкая К., Мадерич В., Бровченко И. Взаимодействие уединенных внутренних волн при их фронтальном взаимодействии // Прикладна гідромеханіка. – 2011. – 13 (85), № 4. – С. 41-45.
20. Maderich V., Brovchenko I., Jung K.T. Oil spreading from continuous source on rotating Earth // Journal of Environmental Fluid Mechanics. – 2012. – V. 12, N4. P. 361-378.
21. Roland A., Zhang Y.,J., Wang H.,V., Meng Y., Teng Y.,C., Maderich V., Brovchenko I., Dutour-Sikiric M., Zanke U.A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids // J. Geophys. Res. – 2012. – 117. – P. 2156 – 2202.
22. Беженар Р.В., Бровченко И.А., Железняк М.И., Кошебуцкий В.И., Мадерич В.С. Моделирование радиоактивного загрязнения морской среды при аварии на АЭС Фукусима // Збірник наукових праць СХУЯЕтаП. – 2012. – 4(44). – С. 82-91.
23. Talipova T., Terletska K., Maderich V., Brovchenko I., Jung K.T., Pelinovsky E., Grimshaw R. Internal solitary wave transformation over a bottom step: loss of energy // Physics of Fluids. – 2013. – 25. 032110. – P. 1-14.

24. Мадерич В., Терлецкая Е., Бровченко И. Неполная автомодельность внутренних волн второй моды в слое раздела // Прикладна гідромеханіка. – 2014. – 15 (88), № 2. – С. 15-22.
25. Shibata T., Nakajima T., Igarashi Y., Tsuruta H., Ebihara M., Hattori T., Hoshi M., Ishimaru T., Masumoto K., Bailly du Bois P., Bocquet M., Boust D., Brovchenko I., Choe I., Christoudias T., Didier D., Dietze H., Garreau P., Higashi H., Jung K. T., Kida S., Le Sager P., Lelieveld J., Maderich V., Miyazawa Y., Park S. U., Quelo D., Saito K., Shimbori T., Uchiyama Y., van Velthoven P., Winiarek V., Yoshida S. A review of the model comparison of transportation and deposition of radioactive materials released to the environment as a result of the Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident // Technical report: Sectional Committee on Nuclear Accident Committee on Comprehensive Synthetic Engineering. – Science Council of Japan. – 2014. – 111p.
26. Maderich V., Jung K., Terletska K., Talipova T., Brovchenko I. Incomplete similarity of internal solitary waves with trapped core Fluid Dynamics Research // Fluid Dyn. Res. – 2015. – 47. – P. 035511.
27. Perianez R., Brovchenko I., Duffa C., Jung K.T., Kobayashi T., Lamego F., Maderich V., Min B.I., Nies H., Osvath I., Psaltaki M., Suh K.S. A new comparison of marine dispersion model performances for Fukushima Dai-ichi releases in the frame of IAEA MODARIA program // Journal of Environmental Radioactivity. – 2015. – 150. – P. 247-269.
28. Терлецкая К., Мадерич В., Бровченко И. Численное исследование взаимодействия внутренних уединенных волн второй бароклинной моды при их фронтальном столкновении // Прикладна гідромеханіка. – 2015. – 17 (89), № 3. – С. 44-55.
29. Терлецкая К., Семин В., Талипова Т., Смирнов Д., Бровченко И. Трансформация внутренних уединенных волн понижения над донной ступенькой в трехслойной стратифицированной жидкости // Прикладна гідромеханіка. – 2015. – 17 (89), № 2. – С. 56-64.
30. Терлецкая К., Семин С., Степанянц Ю., Бровченко И., Мадерич В. Моделирование трансформации волновых пакетов поверхностных волн в водоеме с резким изменением дна // Прикладна гідромеханіка. – 2015. – 17 (89), № 1. – С. 3-10.
31. Мадерич В.С., Терлецкая Е.В., Бровченко И.А. “Фронтальное столкновение внутренних волн большой амплитуды” // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2015. Т. 8, No 3 с.44-53.
32. Periañez R., Bezhenar R., Brovchenko I., Duffa C., Iosjpe M., Jung K.T., Kobayashi T., Lamego F., Maderich V., Min B.I., Nies H., Osvath I., Outola I., Psaltaki M., Suh K.S., G. de With Modelling of marine radionuclide dispersion in IAEA MODARIA program: Lessons learnt from the Baltic Sea and Fukushima scenarios // Science of The Total Environment. – 2016. – 569-570. – P. 594-602.
33. Бровченко І.О. Модель міграції радіонуклідів у донному шарі намулів// Прикладна гідромеханіка. – 2016. – 18 (90), № 2. – С. 11-16.

34. Maderich V., Brovchenko I., Dvorzhak A., Ievdin I., Koshebutsky V., Periañez R. Integration of 3D model THREETOX in JRODOS, implementation studies and modelling of Fukushima scenarios. // Radioprotection. – 2016. – 51. – P. 133-135.
35. Terletska K., Jung K.T., Talipova T., Maderich V., Brovchenko I., Grimshaw R. Internal breather-like wave generation by the second mode solitary wave interaction with a step // Physics of fluids. – 2016. – 28(11). – P. 10.1063/1.4967203.
36. Periañez R., Bezhenar R., Brovchenko I., Duffa C., Iosjpe M., Jung K.T., Kobayashi T., Lamego F., Maderich V., Min, B.-I., Nies H., Osvath I., Outola I., Psaltaki M., Suh K.S., G. de With A comparison of radionuclide dispersion model performances for the Baltic Sea and Fukushima releases in the Pacific Ocean // Radioprotection. – 2017. – 52(1). – P. 247-269.
37. Brovchenko I., Maderich V., Kanarska Y., Fenical S., Terletska K., Tirindelli M., Non-hydrostatic Modeling of Bottom and Bank Stability Subjected by Ship Propeller Jets. // Proceedings of 30th International Conference Coastal Engineering. – 2006. – V. 2. – P. 1222-1233.
38. Brovchenko I., Maderich V., Kanarska Yu., Fenical S., Terletska K.. 3D Non-Hydrostatic Modeling of Bottom and Bank Stability Subjected by Ship and Propeller Jets // Euromech Fluid Mechanic Conference-6. – Stockholm: Royal Institute of Technology. – 2006. – P. 296.
39. Бровченко І., Канарська Ю., Мадерич В., Терлецька К. Трехмерное негидростатическое моделирование воздействия струй судовых движителей на дно и берега. // Збірник наукових праць “Моделювання 2006”. – Київ.: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Е. Пухова НАН України. – 2006. – С. 137-141.
40. Бровченко І., Терлецька К., Кошебуцкий, Мадерич В. Трехмерное моделирование гравитационных течений по склону во вращающейся жидкости. // Пр. конф. “Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2006”. – Київ.: Інститут проблем математичних машин і систем НАН України. – 2006. – С. 24-24.
41. Беженар Р., Бровченко І., Мадерич В., Кошебуцкий В., Куцан А., Терлецька К., Хелінг Р., Дженер Х. Застосування тривимірної чисельної моделі Тритокс для прогнозування переносу та перемішування гарячої води при її викидах до водоймищ // Пр. конф. “Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2007”. – Київ.: Інститут проблем математичних машин і систем НАН України. – 2007. – С. 22-23.
42. Maderich V, Brovchenko I, Fenical S, Nikishov V, Terletska K Development and application of non-hydrostatic model to the coastal engineering problems // Eos Trans. AGU, 88(52), Fall Meet. Suppl. – 2007. – Abstract OS42B.
43. Bezhenar R., Brovchenko I., Heling, R. Jenner H., Kuschan A., Koshebutsky V., Maderich V., Terletska K. Application of 3D numerical model THREETOX to the prediction of cooling water. Geophysical Research Abstracts, Vol. 9. – 2007. – 07821.
44. Brovchenko I., Gorodetska N., Hutter K., Maderich V., Nikishov V., Terletska K. Laboratory and numerical study of interaction of large amplitude internal solitary

- waves with local obstacle, narrows and steep slopes. Geophysical Research Abstracts. – 2007. – Vol. 9, 07773.
45. Brovchenko I., Koshebutsky V., Maderich V., Terletska K. Application of 3D Lagrangian multi-size sediment transport model to the simulation of dense water cascading due to winter shelf convection and turbidity // Geophysical Research Abstracts. – 2007. – Vol. 9, 07776.
 46. Бровченко І., Мадерич В., Терлецка К. Применение трехмерной лагранжевой модели многофракционных наносов к прибрежным задачам // Пр. конф. “Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2008”. – Київ.: Інститут проблем математичних машин і систем НАН України. – 2008. – С. 21-22.
 47. Беженар Р., Бровченко І. Мадерич В. Тривимірне чисельне моделювання взаємодії хвиль та течій в задачах прибережної гідродинаміки. // Пр. конф. “Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2009” – Київ.: Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, 2009. – С. 14-16.
 48. Maderich V., Fenical S., Brovchenko I., Terletska K., Shepsis V. 3D Modelling System of Bottom and Bank Erosion // Proc. of the 9th Int. Conf. on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 09, – 2009. – Vol.2. – P. 887-898.
 49. Brovchenko I., Maderich V. Modelling of the Navigation Channel Impacts on Coastal Zone of the Danube Delta // Proc. of the 9th Int. Conf. on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 09. – 2009 – Vol.2. – P. 899-905.
 50. Бровченко І., Мадерич В., Никишов В., Терлецка К., Численное моделирование взаимодействия внутренних волн с подводным прямоугольным препятствием // Збірник наукових праць “Моделювання 2010”. – Т.3. – Київ.: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Е. Пухова НАН України, 2010. – С. 222-229.
 51. Беженар Р., Кошебуцький В., Бровченко І, Мадерич В., Железняк М. Моделювання розповсюдження Cs-137 в прибережних водах та накопичення його на дні в результаті аварії на атомній станції Фукусіма-1 // Пр. конф. “Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2011” – Київ.: Інститут проблем математичних машин і систем НАН України. – 2011. – С.18-19.
 52. Jung K.T., Kim K.O., Maderich V., Brovchenko I., Shim W.J., Yang C.S., Cho Y.K., You S.H. Oil spill modeling in tidal sea of complicated geometry: “Hebei spirit” (Yellow Sea 2007) case study // Ocean Sciences Meeting, Salt Lake City · Utah · USA. – 2012. – (Abstract ID: 9830).
 53. Jung K.T., Maderich V., Brovchenko I., Kim Y.H., Kim K.O. Multiscale and multiphase lagrangian modeling of the radioactivity dispersion in the sea after accident at the fukushima NPP // Ocean Sciences Meeting, Salt Lake City · Utah · USA. – 2012. – (Abstract ID: 9829).
 54. Maderich V., Brovchenko I., Jung K.T. Oil spreading in instantaneous and continuous spills on rotating earth // Ocean Sciences Meeting, Salt Lake City · Utah · USA. – 2012. – (Abstract ID: 9504).
 55. Бровченко І.О., Мадерич В.С., Терлецька К.В., Беженар Р.В., Кошебуцький В.І. Різномасштабне чисельне моделювання циркуляції в Чорному морі та Дніпро-

- Бузькому лимані // Сборник трудов конференции Моделирование-2012. – Київ: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Е. Пухова НАН України. – 2012. – С. 121-124.
56. Бровченко І., Мадерич В., Jung K.T. Вплив сили Коріоліса на розтікання нафти при неперервному та миттєвому розливі // Збірник наукових праць “Моделювання-2013”. – Київ: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Е. Пухова НАН України. – 2013. – С. 69-72.
57. Kantardgi I., Maderich V., Terletska K., Brovchenko I., Prokhoda-Shumskih L. Water quality protection: Grand-Marina, Sochi // Proceedings of the 10th Global Congress on ICM: Lessons Learned to Address New Challenges, EMECS 2013. – MEDCOAST 2013 Joint Conference. – Vol. 2. – 2013. – P. 989-1000.
58. Maderich V., Brovchenko I., Jung K.-T. Effects of the coriolis force on the oil spreading in instantaneous and continuous spill // Geophysical Research Abstracts. – 2013. – Vol. 15, 286-1.
59. Бровченко І.О., Мадерич В.С. Багатофазна лагранжева модель дисперсії радіонуклідів у водному середовищі // Пр. конф. “Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2014”. – Київ: Інститут проблем математичних машин і систем НАН України. – 2014. – С. 99-102.
60. Maderich V., Brovchenko I., Jung K., 3D model of radionuclide dispersion in coastal areas with multifraction cohesive and non-cohesive sediments // Geophysical Research Abstracts. – 2015. – Vol. 17, 1060.
61. Gong Kai, Tkalic Pavel, Hengkek Choo, Vladimir Maderich, Igor Brovchenko, George Barbastathis. (2015). Oil Spill Risk Assessment of Singapore Strait Based on 3D Lagrangian Multiphase Oil Spill Modelling. 2015 Gulf of Mexico Oil Spill and Ecosystem Conference, Feb 16-19, Houston, USA
62. Jung K.T., Brovchenko I., Maderich V., Kim K.O., Qiao F.L. Towards a unified modeling system of predicting the transport of radionuclides in coastal sea regions. // Geophysical Research Abstracts. – 2016. – Vol. 18, 2417

АНОТАЦІЯ

Бровченко І.О. Чисельні лагранжеві методи в задачах прибережної гідродинаміки. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми. – Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, 2017.

Розроблено новий алгоритм побудови чисельних схем з незміщеними моментами розподілу для розв'язання рівняння переносу та дифузії методом частинок в неоднорідному полі течій та коефіцієнту дифузії. Отримано нові аналітичні розв'язки для параметрів розподілу частинок для окремих випадків одновимірного руху.

Застосовано стохастичні методи до моделювання ймовірності зміну стану речовини. Розроблений метод оцінки точності при моделюванні таких процесів методами частинок. Одержано нові аналітичні розв'язки для процесів розпаду та

адсорбції-десорбції радіонуклідів на багатофракційних намулах. Розроблений новий алгоритм моделювання граничних умов у методах частинок через розрахунок ймовірності зміни стану частинки в околі границі розрахункової області.

Вдосконалені гідродинамічні моделі прибережних процесів, що дозволяють описувати взаємодію хвиль та течій, негідростатичні гравітаційні та струменеві течії. Розроблена нова лагранжева модель переносу багатофракційних намулів, включаючи суміш зв'язних та незв'язних намулів, міграцію намулів у донних шарах та зміну гранулометричного стану та пористості в шарах донних намулів.

Розроблена нова лагранжева модель розповсюдження нафтопродуктів в прибережних зонах, що враховує вплив обертання Землі за рахунок утворення пограничного шару Екмана під поверхневою плівкою нафти, дозволяє моделювати взаємодію з нафтовими бонами та вплив дисперсантів на розповсюдження нафтового забруднення. Отримано нові автотельні розв'язки для розтікання одновимірних та осесиметричних плям у гравітаційно-в'язкому та гравітаційно-в'язко-обертальному режимах. Розроблена модель застосована до моделювання наслідків нафтових аварій.

Розроблена нова лагранжева модель розповсюдження радіонуклідів в прибережних зонах, що включає радіоактивний розпад, адсорбцію-десорбцію на багатофракційних намулах, міграцію радіонуклідів у шарах донних намулів та у поровій воді. Модель застосовано до моделювання наслідків аварії на АЕС Фукусіма.

Ключові слова: Чисельні лагранжеві методи, обчислювальна гідродинаміка.

АННОТАЦІЯ

Бровченко І.А. Численные лагранжевые методы в задачах прибрежной гидродинамики. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы. – Институт гидромеханики НАН Украины, Киев, 2017.

Разработан новый алгоритм построения численных схем с несмещенными моментами распределения для решения уравнения переноса и диффузии методом частиц в неоднородном поле течений и коэффициента диффузии. Получены новые аналитические решения для параметров распределения частиц для отдельных случаев одномерного движения.

Применены стохастические методы к моделированию вероятности изменения состояния вещества. Решение уравнений изменения состояния вещества методом частиц основано на решении уравнений Колмогорова для вероятности пребывания частиц в разных состояниях. Разработан метод оценки точности при моделировании таких процессов методами частиц. Получены

новые аналитические решения для процессов распада и адсорбции-десорбции радионуклидов на многофракционных наносах. Разработан новый алгоритм моделирования граничных условий в методах частиц через расчет вероятности изменения состояния частицы в окрестности границы расчетной области.

Усовершенствованы гидродинамические модели прибрежных процессов, позволяющие описывать взаимодействие поверхностных ветровых волн и течений, негидростатические гравитационные и струйные течения. Разработана новая модель переноса многофракционных наносов, включающая смесь связанных и несвязанных наносов, миграцию наносов в донных слоях и изменение гранулометрического состава и пористости в слоях донных наносов. Модель миграции многофракционных наносов в донных слоях основана на разбиении донного слоя на несколько хорошо перемешанных слоев и расчете обмена между ними вследствие биодиффузии наносов и диффузии поровой воды.

Разработана новая лагранжева модель распространения нефтепродуктов в прибрежных зонах, учитывающая влияние вращения Земли за счет образования пограничного слоя Экмана под поверхностной пленкой нефти. Модель описывает распространение нефтяных капель под поверхностью воды, которые образуются вследствие разрыва поверхностной пленки обрушающимися волнами. Модель позволяет учитывать основные процессы выветривания, рассчитывать взаимодействие с нефтяными боами и влияние дисперсантов на распространение нефтяного загрязнения. Получены новые автомодельные решения для растекания одномерных и осесимметричных пятен в гравитационно-вязкой и гравитационно-вязко-вращательном режимах. Разработанная модель применена к моделированию последствий нефтяных аварий.

Разработана новая лагранжева модель распространения радионуклидов в прибрежных зонах, включая радиоактивный распад, адсорбции-десорбцию на многофракционное ила, миграцию радионуклидов в слоях донных наносов и в поровой воде. Модель динамически связана с моделью распространения наносов, использует согласованные потоки наносов между донными слоями. Модель проверена на аналитическом решении, на данных лабораторного эксперимента. Проведен ряд численных экспериментов, в результате которых обоснована необходимость использования многослойного представления дна. Модель применена как для прогнозирования гипотетической аварии так и для моделирования последствий аварии на АЭС Фукусима.

Ключевые слова: численные лагранжевые методы, вычислительная гидродинамика.

SUMMARY

Brovchenko I.O. Numerical lagrangian methods in the coastal hydrodynamics problems. – Manuscript.

Dissertation for a Doctor degree of physical and mathematical sciences by speciality 01.02.05 – Mechanics of fluid, gas and plasma. – Institute of Hydromechanics, National Academy of sciences of Ukraine, Kyiv, 2017.

A new algorithm for constructing of numerical schemes for unbiased distribution of particles for solving the advection-diffusion transport equation by particles method in inhomogeneous field of currents and diffusion coefficient was developed. New analytical solutions for particle distribution parameters for individual cases of one-dimensional flow were obtained.

Stochastic modeling techniques were applied for the simulating of the probability of changing states of matter. The method for estimation of accuracy for calculations using particles was developed. New analytical solutions for processes of decay and adsorption-desorption of radionuclides in multifractional sediments were obtained. A new algorithm for setting up the boundary conditions in particle methods by calculation of the probability of the particle settling was developed.

Hydrodynamic models of the coastal processes were improved to allow description of the interaction of waves and currents, nonhydrostatic gravity and jet currents.

A new Lagrangian model of multifractional sediment transport, including a mixture of cohesive and noncohesive sediments, sediment migration in the bottom layers and change of grain sizes distribution and porosity in the layers of bottom sediments was developed.

A new Lagrangian model for oil spreading in coastal areas, that takes into account the effect of the Earth's rotation due to the formation Ekman boundary layer near the surface film of oil was developed. Model is able to simulate the interaction with oil booms and impact of using of dispersants on oil pollution. A new self-similar solutions for one-dimensional and axially symmetric spills in gravity-viscous and viscous-gravity-rotational regimes were obtained. The model was used for the modeling of oil accidents.

A new Lagrangian model of transport of radionuclides in coastal areas, including radioactive decay, adsorption-desorption on multifractional sediments, migration of radionuclides in bottom sediment layers and in the pore water was developed. The model was applied to the simulation of the accident at the Fukushima NPP.

Key words: Lagrangian numerical methods, computational fluid dynamics.

Свідоцтво про Державну реєстрацію фізичної особи - підприємця
Серія ВОО №866503

Підписано до друку 10.04.2017
Формат 60×90¹/₁₆ Папір офсетний №2.
Друк трафаретний.
Ум. друк арк. 1.9 арк.
Тираж 120 прим. Замовлення № 296

Віддруковано в міні-типографії ФОП Степенко А.О.
02660, м. Київ, вул. Є.Сверстюка, 11Б.
тел.: (044)223-29-39, E-mail: 2232939@ukr.net, www.raz.com.ua