

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської підготовки
Кафедра загальної та теоретичної фізики

Магістерська кваліфікаційна робота

на тему: «ХВИЛЬОВИЙ МОНІТОРІНГ ДОМІШКОВИХ КОМПОНЕНТІВ В
ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМАХ: РОЗВ'ЯЗУВАНІ МОДЕЛІ»

Виконав студент 2 курсу групи МТЗ-18
спеціальності 183 «Технології захисту _____
навколишнього середовища» _____
Турчин Віталій Сергійович _____

Керівник д.ф-м. н., професор _____
Герасимов Олег Іванович _____
Рецензент д.ф-м. н. професор _____
Калінчак Валерій Володимирович _____

МІНІСТРЕСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської підготовки
Кафедра загальної та теоретичної фізики
Рівень вищої освіти магістр

Спеціальність 183 Технології захисту навколишнього середовища

(шифр і назва)

(наказ № 194-С, від 16.10.2020)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
загальної та теоретичної
фізики

Герасимов О. І.

“ 26 ” “ 10 ” 2020 р

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Турчин Віталій Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Хвильовий моніторинг домішкових компонентів в дискретних системах: розв'язувані моделі.

керівник роботи д.ф-м.н, проф. Герасимов Олег Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 16 ”

жовтня 2020 року №_194-С

2. Срок подання студентом роботи 10 грудня 2020 р.
3. Вихідні дані до роботи

4. Перелік графічного матеріалу (з точним значенням обов'язкових креслень)

Рис. 2.1 Надходження енергії у систему у околі квазістаціонарного стану; Рис. 2.2 – Схема випробування матеріалу способом наскрізного проникання; Рис.2.3 Схема випробування матеріалу методом поверхової прозвучки L – база прозвучивання; Рис. 2.4 – Спрощена модель структур матеріала: а - матеріал низької міцності; б - матеріал високої міцності; Рис. 2.5 – Схема вимірювання частоти резонансних, згинальних коливань матеріального зразка 1 - генератор змінної напруги; 2 - ініціатор коливань; 3 - приймальний перетворювач; 4 - підсилювач; 5 - реєструючий прилад (осцилограф / частотомер); Рис.2.6 – Частотні спектри акустичних відгуків; Рис. 2.7 – Робоча область ІЕ методу 1 - дефект з малою вірогідністю виявлення; 2 - виявляється дефект; Рис. 2.8 – Схема дифракції хвилі в зоні прояви примісів; Рис. 2.9 – Спектрограма акустичного відгуку отклику в процесі змін у структурі зразка на горизонтальній осі відліки часу твердіння зразка, хв .; на вертикальній - частота, кГц; градації щільності зображення відповідають амплітуді спектральних складових; суцільною чорною лінією fRC показана крива для основної частоти спектра; Рис. 3.1 Неоднорідний гранульований ланцюжок.

Дата видачі завдання 26. 10.2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів дипломного проекту (магістерської роботи)	Термін виконання етапів роботи	Відмітка про виконання	
			За 4-х бальною шкалою	%
1	Огляд новітніх літературних джерел за темою дипломного проекту	3 1.10.2020	4 (добре)	75
2	Узагальнення основних теоретичних положень проекту	29.10.2020	4 (добре)	75
3	Рубіжна атестація	18.-23.11.2020	4 (добре)	75
4	Попередній захист кваліфікаційної роботи	19.12.2020	4 (добре)	75
5	Перевірка на плагіат	12.-14.12.2020	4 (добре)	75
6	Рецензування	19.-20.12.2020	4 (добре)	75
7	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)		4 (добре)	75,0

Магістр _____ **Турчин В.С.**

Керівник проекту _____ **Герасимов О.І.**

АНОТАЦІЯ

«Хвильовий моніторинг домішкових компонентів в дискретних системах: розв'язувані моделі.»

Актуальність теми. Аналіз результатів тематичних досліджень дає підстави для висновку, що складається в тому, що детектування і апріорне прогнозування поведінки домішок і поверхнево-активних центрів на контактних поверхнях частинок саме до механосінтеза багато в чому сприяло б як оптимізації технологій, так і поліпшенню міцності матеріалів, а значить, розширенню робочих інтервалів і навантажень при експлуатації виробів в умовах екстремальних навантажень і агресивних середовищ. Особливу роль щодо визначення алгоритму детектування домішкових компонентів має фізичне моделювання цих процесів. Основа для здійснення фізичного моделювання виявлення одиночної, бінарної та тернарної домішки здійснюється на підставі аналізу спеціальних досліджень.

Метою магістерської роботи є побудування одномірній моделі виявлення одиночної, бінарної та тернарної домішки із герцевськими взаємодіями. Яка дозволила би здійснювати хвильовий моніторинг домішкових компонентів у дискретних системах. Ця модель може бути використана практично для вирішення досить широкого кола завдань. Зокрема для діагностики домішкових компонентів у складних полідисперсних та мультифазних системах.

Ключові слова: хвильовий моніторинг, домішкові компоненти, детектування домішкових компонентів, одномірна модель

Научний керівник: д.ф-м. н., професор Герасимов О. І.

Сторінок - 37

Рисунків - 10

Літературних посилань - 11

SUMMARY

«Wave monitoring of impurity components in discrete systems: solvable models»

Topic Relevance. Analysis of the results of case studies gives grounds for the conclusion that the detection and a priori prediction of the behavior of impurities and surface-active centers on the contact surfaces of particles just before mechanosynthesis would greatly contribute to both technology optimization and improvement of material strength, expansion of working intervals and loadings at operation of products in the conditions of extreme loadings and aggressive environments. Physical modeling of these processes has a special role in determining the algorithm for detecting impurity components. The basis for the implementation of physical modeling to detect single, binary and ternary impurities is based on the analysis of special studies.

The purepose of the master's thesis is to build a one-dimensional model for the detection of single, binary and ternary impurities with Hertzian interactions. Which would allow wave monitoring of impurity components in discrete systems. This model can be used almost to solve a wide range of problems. In particular, for the diagnosis of impurity components in complex polydisperse and multiphase systems.

Keywords: wave monitoring, impurity components, detection of impurity components, one-dimensional model,

Scientific adviser: Ph.D. Professor, Gerasymov OI

The work contains:

Pages -37

Drawings -10

References -11

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД.....	7
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	8
2.1 Перенос збуджень у низьковимірних системах силових центрів.....	9
2.2 Роль не лінійності.....	12
2.3 Типи неоднорідності.....	13
2.4 Детектування неоднорідностей типу домішок.....	13
3 АЛГОРИТМ ВИЯВЛЕННЯ ДОМІШОК У ОДНОМІРНІЙ МОДЕЛІ ІЗ ГЕРЦЕНСЬКИМИ ВЗАЄМОДІЯМИ.....	28
3.1 Модель одиночної, бінарної та тернарної домішки.....	28
ВИСНОВКИ.....	35
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	36

ВСТУП

Інтерес до дрібнодисперсних матеріалів, пов'язан з певним колом їх особливих властивостей. В деяких випадках їх конгломерацію діють як твердий матеріал, в деяких як ріднина, в деяких як газ. Це надає можливості щодо використання практичного використання цих матеріалів у багатьох напрямках промисловості: від будівельної сфери до наноелектроніки. Тому проблема детектування домішок у дрібнодисперсних механічних системах має велике значення та актуальність.

Ще слід окремо зазначити те, що у статистичної механіки цей клас задач відносно не давно почав отримувати дослідницьку увагу. Тому фізичне моделювання цих процесів дуже важливо та перспективно,

Проблема детектування домішок у дрібнодисперсних механічних системах ґрунтується на властивостях цих систем. Таких як нелінійність, неоднорідність та дисперсність.

Для детектування неоднорідностей типу домішок можуть бути використані такі методи: акустичної емісії; лазерна спектроскопія; кондуктометричні, діелькометричні; імпакт-ехо, склерометричні; радіографічні (ЯМР, гамма, томографія); радіоволнові, електромагнітні.

У алгоритмі виявлення домішок пропонується використання У одномірній моделі із герценськими взаємодіями, яка в умовах складних нерівноважних неоднорідних дрібнодисперсних мікро-механічних систем здійснити ефективно моделювання.

1 ОГЛЯД

Фізика м'якої матерії у гранульованих фазах розкриває інтенсивну дисипацію енергії з гранульованої системи, потребуючи для мобілізації руху підводу енергії зовні. Різні джерела, діючи одночасно створюють умови існування величезної кількості структурних рівнів організації гранульованої речовини. Тому однією з важливіших проблем статистичної механіки є моделювання процесу детектування домішок, які обумовлюють властивості.

Для цього розкривається хвильовий метод збудження часток, який можливо використовувати у детектуванні домішок у дрібнодисперсних мікромеханічних системах, ґрунтуючись на їх властивостях нерівноважності та неоднорідності.

Аналіз практичних методів детектування домішок створює феноменологічну базу цього дослідження.

Користуючись особливостями руху хвиль в дискретних мікро-механічних системах методом чисельного моделювання показано, що динаміка хвильового руху імпульсу який рухається уздовж гранульованого ланцюжка з нелінійними контактами у зовнішньому гравітаційному полі описується розв'язками типу дисперсійних хвиль (нормальні моди).

Ґрунтуючись на існуючих розв'язках несолітонного типу з амплітудою, зменшуючоюся за ступеневим законом, доповнюються відомі нелінійні хвильові механізми передачі енергії солітонного типу. Використання нових класів точних розв'язків рівняння руху механічного імпульсу у вертикальному гранульованому ланцюжку створює основу для одномірної моделі, використовуваної при аналізі процесів детектування домішок дрібнодисперсних мікромеханічних систем.

2 ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ

Побудування одновимірній моделі виявлення одиночної, бінарної та тернарної домішки із герцевськими взаємодіями. Яка дозволила би здійснювати хвильовий моніторинг домішкових компонентів у дискретних системах.

Ця модель може бути використана практично для вирішення досить широкого кола завдань. Зокрема для діагностики домішкових компонентів у складних полідисперсних та мультифазних системах.

Аналіз результатів тематичних досліджень дає підстави для висновку, що складається в тому, що детектування і апіорне прогнозування поведінки домішок і поверхнево-активних центрів на контактних поверхнях частинок саме до механосінтеза багато в чому сприяло б як оптимізації технологій, так і поліпшенню міцності матеріалів, а значить, розширенню робочих інтервалів і навантажень при експлуатації виробів в умовах екстремальних навантажень і агресивних середовищ.

Особливу роль щодо визначення алгоритму детектування домішкових компонентів має фізичне моделювання цих процесів. Основа для здійснення фізичного моделювання виявлення одиночної, бінарної та тернарної домішки здійснюється на підставі аналізу спеціальних досліджень. У монографічному дослідженні, стосовно поставленої задачі розкриваються «задача Герця», «збурені гранульовані матеріали поблизу асимптотично стійких станів», «хвильові процеси та структури на поверхнях шарів збурених гранульованих матеріалів», «новий клас точних розв'язків диференційно – різницевого рівняння руху для механічних збуджень в одновимірному неоднорідному гранульованому ланцюжку». Проблемам присвячені окремі параграфи. Також результати досліджень за визначеною проблематикою опубліковані у інших наукових статтях та монографіях як в Україні та у зарубіжних джерелах [1-7].

В задачах екологічної безпеки такий алгоритм є вельми актуальним для вирішення питань про необхідність очистки та обґрунтування відповідної технології.

2.1 Перенос збуджень у низьковимірних системах силових центрів

Особливості розповсюдження збуджень у низьковимірних системах створюють основу щодо моделювання принципів виявлення домішок у дрібнодисперсних мікромеханічних системах.

Проблема поширення хвиль в нелінійних системах має досить тривалу історію дослідження. Результати цих дослідження відображені у досить широкому колі джерел. Відновлення уваги до дослідження хвильових рухів в дискретних мікромеханічних системах пов'язан результатами, отриманими в експериментах з дрібно-дисперсними ланцюжками.

У цілях вирішення задачі створення моделі виявлення одиночної, бінарної та тернарної домішки із герцевськими взаємодіями варто визначити асиметричне поширення збуджень у гранульованих системах, модельованих низьковимірними розподілами силових центрів. Як це визначається у [5]: «Для низьковимірних систем характерно асиметричне поширення збуджень (наприклад, хвильового типу) в гранульованих системах модельованих низьковимірними розподілами силових центрів з урахуванням ефектів безладу і дисипативних втрат, а також декорування; - повільні критичні моди в релаксації поля щільності (компактизації) в кінетичному сценарії компактизації (сегрегації), заснованому на емпіричних підходах (Типу Ландау-Гінзбурга (Канна-Хільярда) до опису кінетики адекватно певного поблизу асимптотичних квазістаціонарних станів поля параметра порядку і порівняльна оцінка ролі ефектів виключеного об'єму. І далі: “«...нелінійні сценарії в поведінці гранульованих матеріалів, такі як поверхневі збудження (хвилі, осцилони, левітуючі шари і багато інших) зобов'язані своїм походженням саме дисипативним процесам»”. За [6]: «Найпростіши бінарні

зіткнення можна досить детально описувати, розглянувши просту модель одномірного ланцюжка сфер, що знаходиться під впливом вертикального синусоїдального збудження».

Можливо запропонувати рівняння стану дрібнодисперсної механічної системи, у якій здійснюється збудження зовнішнім впливом, грунтуючись на моделі виміру стану у термінах узагальнених функцій. Використання такої моделі створює умови щодо розкриття деяких режимів поведінки систем. Тим самим моделюючи матеріальні співвідношення. Можливо підкрислити, що рівень непружності, який буває і дуже малим, обумовлює масштаб, в умовах якого втрачається стабільність системи. Що означає здійснення у системі декілька міжстанових переходів, проявляючихся змінах конфігурацій спонтанного характеру.

Таким чином розкриття взаємодії між дрібнодисперсними частками у межах їх системи наждає можливості щодо аналізу модельної гранульованої системи поблизу асимптотично стаціонарного стану чи у безпосередньому наближенні до нього. Відповідне надходження енергії у систему у околі квазістаціонарного стану завдається рівнянням:

$$Q = \frac{m}{2}(1 - e^2)g^2 \quad (2.1)$$

де Q — порція енергії; m - приведена маса; g - відносна швидкість частинок; під час зіткнення втрачається (дисипує).

Це рівняння розкриває певні особливості поведінки описуємого процесу, вони схематично зображені на графіку, розкриваючи залежність тиску від компактизації у спостереженні поведінки тиску як функції часу, вказуючи на ймовірність фазового переходу у інтервали відповідній області визначення керуючих параметрів.

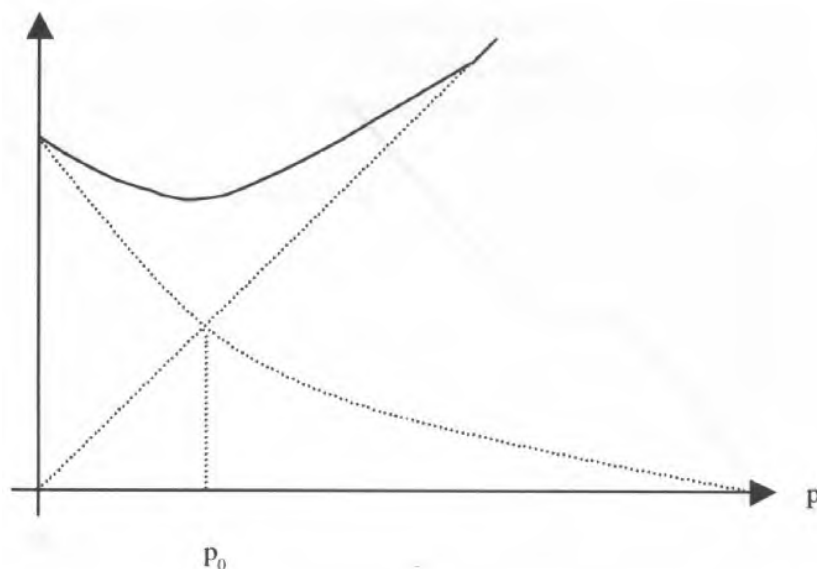


Рис. 2.1 Надходження енергії у систему у околі квазістаціонарного стану

О.І. Герасимов вказує на проблему особливості колективної поведінки у конгломерації дрібнодисперсних механічних часток: “Властивості та поведінка механічних дрібнодисперсних часток нагадують статистичні, хоча за своєю природою гранульований матеріал - механічна система, що показує колективну статистичну поведінку, внаслідок своєї нелінійності. Саме «колективний характер» поведінки гранульованих матеріалів мають на увазі, коли вживають термін «статична механіка гранульованих матеріалів». Насправді мова йде про колективне їх поведінці зовні ізоморфне поведінки статистично заданих систем”.

Щодо подальшого побудування моделі варто підкреслити, що в упакованому стані гранульованому матеріалі кожна окрема частинка стосується тільки кількох найближчих сусідніх гранул - частинок (що знаходяться в т.зв. першої, або найближчій координаційній сфері)”. І далі те, що у постановки задачі моделювання важливо розуміти те що у будь який час ми маємо справу з одиночними формами взаємодії часток. Тобто з “ближнім порядком в локальній структурі, внаслідок нелінійності, обумовленої дисипативними процесами, глобально веде до залежності саме від локальної

ступеня впорядкованості. Вплив дисипативних ефектів найчастіше настільки наочно проявляються властивостями вільного об'єму, незайнятого гранулами в ході динаміки, що саме цей останній ефект оголошується відповідальним за формування макроскопічних властивостей гранульованих матеріалів. Це надає можливості створити коректне здійснення розв'язуваної моделі на підставі диференціального аналізу рівняння. Та далі розкриваються: “...нелінійні сценарії в поведінці гранульованих матеріалів, такі скажімо як поверхневі порушення (хвилі, осцілони, левітуючі шари і багато інших) зобов'язані своїм походженням саме дисипативним процесам.

2.2 Роль нелінійності

Гранульовані матеріали виявляють унікальні властивості, проміжні по відношенню до відомих агрегатних станів — газів, рідин, аморфних і твердих тіл і є складними, багаточастинковими, істотно нелінійними, динамічними, дисипативними, мікромеханічними системами.

Матеріали які утворені конгломераціями великої кількості дискретних часток взаємодіють між собою більш за все внаслідок міжчастинкових контактів. Більшість таких контактних взаємодій нелінійні. Ці взаємодії у загальному випадку дисипативні та у стані спокою, такі системи є нерівноважними та підпорядковується дії нелінійних процесів.

Внаслідок інтенсивної дисипації енергії з гранульованої системи вони потребують для мобілізації руху підводу енергії зовні. Діючи водночас, ці різні джерела створюють умови існування величезної кількості структурних рівнів організації гранульованої речовини. Перелік таких структур, які за своїм походженням є нерівноважними або асимптотично рівноважними (і безперечно суто нелінійними) явищами, набагато перевищує відомі, скажімо, гідродинамічні нестійкості потоків суцільної речовини і, до того ж, мають абсолютно іншу (дискретну) структуру і фізичну природу” [6]. Тобто у цьому випадку варто використання теорію нерівноважних нелінійних систем,

враховуючи зовнішні фактори (форма, збурення) та внутрішніх процесів (дисипація). Тому що багатоскладова поведінка цих матеріалів ускладнює опис їх властивостей з точки зору послідовної теорії. Тому емпіричні відомостей про поведінку цих матеріалів переважають у структурі сучасних знань про них.

2.3 Типи неоднорідностей

Існує певний порядок детермінації речовини. Тобто порядок детермінації, динаміки і взаємодії елементів. Домішка може бути одиночна, бінарна та тернарна. У випадку різкої поляризації границь речовини — це бінарна домішка. У тернарних структурах розподіл елементів здійснюється нерівномірно.

Неоднорідність може також розглядатись на рівнях мікро, макро та метарівней. А також мікронеоднорідних. При вивченні структури на даному рівні в якості елементів розглядають зразки матеріалу, за якими визначаються її колекторські властивості. Характеристикою окремого зразка буде визначене за нього єдине значення кожного з тих-фізичних властивостей, вивчення яких необхідне для вирішення що стоїть завдання. Макронеоднорідність може розкриватись у тому, що кожен шар матеріалу розглядається як єдине нероздільне ціле. Макроструктура може бути відображена як графічними, так і кількісними методами. Метанеоднорідність, розкривається як елементи структури на даному рівні виступають великі частини матеріалу, що розрізняються по будь-яким найбільш загальною властивістю [9].

2.4 Детектування неоднорідностей типу домішок

Існує декілька загальних методів детектування домішок у дискретних мікро-механічних системах за допомогою зовнішніх випромінювань (електромагнітних, звукових, теплових). Окремо це рентгенівська томографія,

террагерцева спектроскопія).

Руйнівні методи контролю міцних показників в конструкціях (*in situ*) зазвичай класифікуються як механічні та фізичні. До механічних методів належать методи, які, непрямою чи, і їх параметрами похідні [10].

Розгляд цих методів надає основу щодо розробки алгоритму застосування методів розсіяння зовнішніх випромінювань (поляризованих електромагнітних хвиль, звукових коливань та хвильових пакетів) для детектування неоднорідності дрібнодисперсних матеріалів за допомогою низьковимірних моделей. Та здійснення подальшого модельного аналізу розповсюдження збурень різної природи у низько-вимірних дискретних механічних системах.

При ультразвуковому детектуванні неоднорідності здійснюється поширення ультразвуку в мікро-механічному дисперсному середовищі. Інтерпретація взаємодії акустичного випромінювання з матеріалом істотно спрощується в умовах, коли, детектуємий матеріал розглядається як рідина, а не як тверде тіло. У цьому середовищі немає зсувних хвиль та розгляд поширення хвиль здійснюється простіше, ніж в умовах аналізу твердого тіла. Таке припущення справедливе для всіх типів дрібнодисперсних матеріалів, які досліджуються у діапазоні ультразвукових частот, які застосовуються в ультразвукової акустиці. Той факт, що взаємодію ультразвуку з мелкодисперсними матеріалами можливо інтерполювати як взаємодією з рідинами, значно підвищує практичні можливості такого способу детектування домішок.

Детектування при неоднорідності у більшості приладів використовуються саме імпульсні випромінювачі, що генерують кілька періодів коливань, що дозволяє моделювати і описувати такий сигнал. Дозвіл випромінювача залежить від тривалості імпульсу та при випромінюванні коротких імпульсів зменшуються бічні пелюстки і зрізаність структури поля в порівнянні з безперервною хвилею, які погіршують якість зображення, так як призводять до неоднозначності мети або до зниження поперечного дозволу. Поширення імпульсу відбивається на обґрунтуванні вибору математичного

апарату. У зв'язку з великою кількістю незалежних змінних в описі нестационарного звукового поля в умовах використанні більш строгих теоретичних методів, втрачається їх на вічність та гнучкість [11].

В цілому наближений модельний підхід може виявитися достатнім для вирішення завдань щодо детектування домішок у дрібнодисперсних мікромеханічних системах. В цьому випадку процес зводиться до лінійного, коли ніби то існує пряма пропорційність між напругою, що в акустичної хвилі прикладується до середовища та відповідним зміщенням її частинок. Однак, рівняння механіки дрібнодисперсних мікро-механічних систем з кількох причин мають нелінійний характер. Нелінійність розкривається в рівняннях без втрат чи з викликаними поглинанням втратами.

Багато явищ, які зустрічаються в процесі імпульсної діагностиці, можуть бути описані в лінійному режимі. У цьому випадку можливо побачити, що у реальному процесі з'являється ряд істотних відхилень від лінійності. Модель, яка має певний характер узагальнення та спрощення, розглядається в найпростішому наближенні однорідного середовища без дисперсії і втрат. Найбільший практичний інтерес має «реальне» середовище у якому ці умови не виконуються. Запропоновані у моделі рівняння можуть надати відправну точку при вирішенні тих завдань детектування домішків у дрібнодисперсних мікромеханічних системах, в умовах яких можливо нехтувати втратами енергії. Припускається, що в умовах рідині існують малі відхилення від стану рівноваги.

Ультразвуковий імпульсний метод. Метод є активним методом проходження, який реалізується системою з випромінює і приймального акустичних перетворювачів і, блоку вимірювання часу між моментом випромінювання і моментом прийому акустичного імпульсу:

$$v = \frac{L}{t} \quad (2.2)$$

де L - відстань між випромінюють і прийомним ЕАП; t - інтервал часу

між моментами випромінювання і прийому ультразвукового імпульсу.

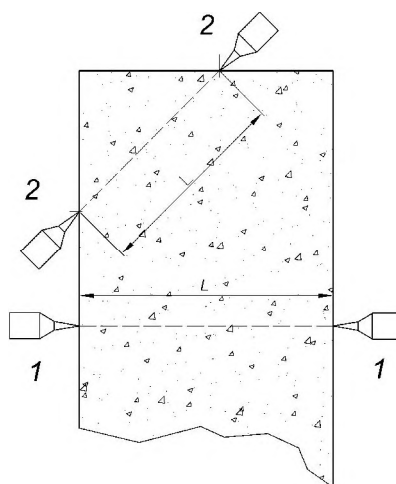


Рис. 2.2 – Схема випробування матеріалу способом наскрізного проникання

Особливий інтерес для практики детектування домішок в дрібнодисперсній мікромеханічній системі являє поверхневе прозвучування (рис.2.2), обумовлене обмеженими можливостями доступу до виробу. Оцінка неоднорідності матеріального масиву за фізико-механічними властивостями може бути ефективною на основі методу профілювання. використовується диференціальна швидкість поширення ультразвукового імпульсу $V_d = \Delta L / \Delta t$. використовується у якості інформативного параметру.

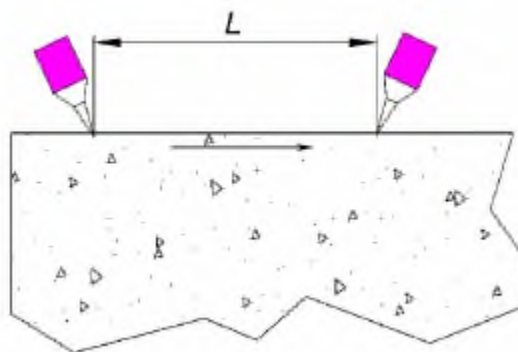


Рис.2.3 Схема випробування матеріалу методом поверхової прозвучки L – база прозвучування

На рис.2.3 схематично показана модель руху пружної хвилі скрізь неоднорідну структуру матеріалу. В структурі матеріалу з малою кількістю механічних зв'язків між компонентами траєкторії передачі імпульсу є безліч багатократно зламаних ліній та найкоротшій з яких вектор передачі імпульсу також багаторазово змінюється. Багатократні зміни напрямків передачі імпульсу поділяють його на векторні складові, виражені у розсіюванні та загасенні використовуємого в процесі детектування акустичного сигналу. У процесі акустичного детектування це виражається в неузгодженості їх акустичних імпедансів та додаткового загасання через відбиття на межах. У більш щільному матеріалі у якому існує більша кількість кристалізаційних зв'язків, траєкторії передачі енергії акустичного імпульсу зламани в меншій мірі. У наслідок цього щільність та модуль пружності матриці стає вище.

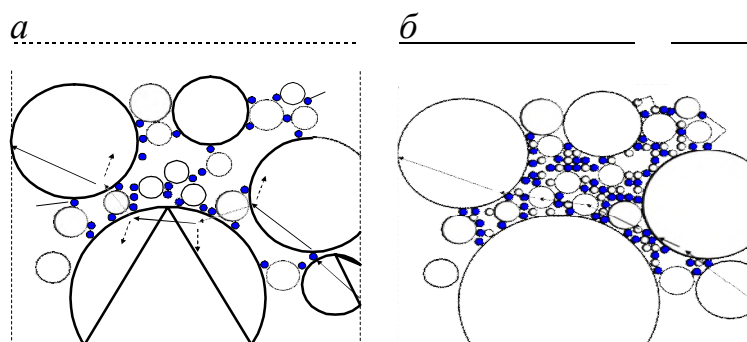


Рис. 2.4 – Спрощена модель структури матеріалу: а - матеріал низької міцності; б - матеріал високої міцності:

При однаковій міцності модуль пружності матеріалу змінюється в досить широких межах. Фракційний склад, вид і кількість великої та дрібної заповнювачів впливають на міцність матеріалу і модуль пружності по-різному. Тому не можливо розраховувати модуль пружності, без врахування складу та властивостей наповнювачів.

Акустична емісія. Проявляється меншому загасенні акустичного імпульсу, більшої швидкості його поширення і меншою частотною дисперсією швидкості. Акустичні методи детектування складу дрібнодисперсних

мікромеханічних систем засновані на залежності параметрів поширюються в них пружних хвиль - як модуля від пружності інтегральних пружно-міцних показників матеріалу - модуля пружності E_s і міцності на стиск f_s та наявності та локалізації домішок. Акустичні методи в своєму сучасному вигляді є низькоенергійними. Пружна деформація матеріалу в зоні випромінює перетворювача для типових ультразвукових приладів та складає (5 ... 20) мкм. В зоні поширення та прийому виявляється на кілька порядків менш.

Визначити порядок енергетичного впливу типового ультразвукового випромінювача на дрібнодисперсні мікро-механічні системи можливо виходячи з цих співвідношень.

При використанні інших акустичних методів, - вільних коливань та Impact-Echo, ударної ініціації коливань напруження і питома потужність порівнюються з показником склерометричних методів. Тому що оцінці піддаються параметри акустичної хвилі, що пройшла через великий обсяг контрольованої конструкції, то, як і для ультразвукових методів проходження, зони пластичного деформування матеріалу, в силу їх малого обсягу, не роблять помітного впливу на поширення акустичних хвиль. Напруження в зоні поширення хвиль на кілька порядків нижче значень в точках їх порушення. Дана обставина вказує на те, що параметри акустичних методів не мають прямої фізичної залежності від показників міцності матеріалу, а визначаються його пружними властивостями.

Метод вільних коливань. Резонансний метод. Фізична основа цієї групи методів утворюється властивостями частотного спектра вільних або вимушених механічних коливань мікромеханічних систем.

Мінімальна частота f_1 , T стоячій хвилі, відповідної першому резонансу даного елемента товщиною T визначається співвідношенням де c - швидкість поширення пружної хвилі в контрольованому матеріалі. Цей метод використовується в практиці лабораторних випробувань виробів та зразків матеріалів, використовуючи поздовжні, зсувні і крутильні коливання.

Порушення згасаючих вигинистих і поздовжніх коливань здійснюється нанесенням легких ударів по бічних (для згинальних коливань), або - торцевих гранях зразка. Безперервні коливання збуджуються певним активатором, електромагнітного або електродинамічного типу, спливаючого на детектуєму систему зосередженою силою, що змінюється за гармонійним законом. На рис. 2.5 приведена схема вимірювання параметрів згинальних коливань.

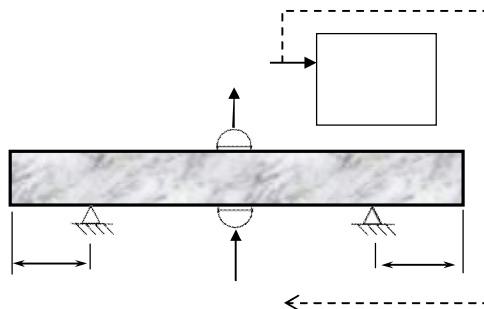


Рис. 2.5 – Схема вимірювання частоти резонансних, згинальних коливань матеріального зразка 1 - генератор змінного напруги; 2 - ініціатор коливань; 3 - приймальний перетворювач; 4 - підсилювач; 5 - реєструючий прилад (осцилограф / частотомер)

Опорні елементи ножового типу з еластичними виступами встановлюються симетрично щодо центру зразка, в зонах вузлів згинальних коливань, на відстані від торців $l = 0,224L$ (L - довжина зразка). Максимальна амплітуда сигналу, при незмінному рівні збудження, матиме місце при равенстві частоти збудження f і власної частоти f_0 зразка. В цьому випадку, динамічний модуль Юнга E_d може бути визначений із співвідношення:

$$E_d = 0,0789 \frac{f_0^2 \cdot L^4 \cdot p \cdot q}{i^2 \cdot 981} \quad (2.3)$$

Резонансний метод використовується для лабораторних випробувань зразків і виробів простої форми: призм, циліндрів, стрижнів. Створення розрахунковими методами точних динамічних моделей пов'язаних систем з

різною геометрією і з різними механічними характеристиками є нетривіальне завдання навіть при використанні сучасних засобів комп'ютерного моделювання [5].

В цілому аналіз частотних характеристик груп елементів або всього об'єкта може виявитися ефективним при виявленні особливостей суцільності матеріального масиву, для оцінки жорсткості конструкцій, відповідності їх механічних характеристик заданим вимогам.

Impact-Echo метод. Ще один метод вільних коливань - так званий Impact-Echo метод (ІЕМ). Фізична основа ІЕМ ґрунтується на амплітудно-частотних параметрах акустичного відгуку на короткочасне ударну дію з невеликою енергією, від фізико-механічних властивостей випробуваного матеріалу. Основними непрямыми параметрами у цьому випадку є тривалість відгуку і співвідношення основних частотних складових спектра коливань (рис.2.5). Для візуалізації акустичного сигналу і його аналізу, як правило, використовують спектральні методи, і відповідні комп'ютерні програми на основі алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Збудження коливань в матеріалі зазвичай проводиться спеціальних ударним механізмом, або вручну, - нанесенням удару металевою кулькою малої маси по поверхні конструкції (рис.2.5). Прийом коливань здійснюється п'єзоелектричними або електродинамічними датчиками (рис.2.6). При відсутності дефекту, після ударної дії в зоні контролю утворюється акустичне поле, основні складові якого мають частоти, кратні частоті напівхвильових коливань, яка є опорною f_1 , T і пов'язана зі швидкістю поширення поздовжньої хвилі з і відстанню T співвідношенням.

На (рис.2.6) показаний «знімок» хвильового процесу в матеріалі без дефектів, побудований за даними КЕ моделювання на момент, коли фронт імпульсу поперечної хвилі досяг донної поверхні плити. До цього моменту фронт поздовжньої хвилі відбитої від дна вже знаходиться в середині виробу. Добре помітний лідируючий фронт імпульсу падаючої поздовжньої хвилі. На рис. показана початкова стадія процесу, стояча хвиля між плоскими гранями

плити ще не сформувалася. Вона проявить себе після декількох перевідбиттів імпульсу поздовжньої хвилі від верхньої і нижньої граней плити. Фільтруючі властивості матеріалу по відношенню до частотним складовим імпульсу хвилі приведуть до швидкого загасання її високочастотних компонент і встановлення квазістаціонарного режиму загасаючої стоячої хвилі з частотою першої гармонійної складової резонансних коливань по товщині плити [11].

Залежно від розмірів і форми виробу, пружних властивостей матеріалу, присутності великих дефектів, а також маси ударника змінюється частотний спектр відгуку, змінюються тимчасові параметри окремих його ділянок. Як правило, частотний спектр відкліку простягається від одиниць кілогерц до 60 ... 80 кГц. Наявність домішки збагачує частотний спектр складовими, частота яких визначається глибиною дислокації дефекту d , а амплітуда залежить головним чином від розмірів, форми і орієнтації по відношенню до фронту хвилі (рис.2.6): На рис. показаний частотний спектр коливань стоячої хвилі в плиті товщиною 25 см без дефектів суцільності (верхній малюнок) і з дефектом розшарування (нижній малюнок). Частота 7800 Гц відповідає швидкості поздовжньої хвилі в масиві $3900 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Резонансний пік на частоті 20500 Гц (нижній малюнок) відповідає протяжному наявності домішки на глибині 9,5 см від поверхні плити. ІЕМ високо ефективний для виявлення прихованих під поверхнею домішок, тріщин, розшарувань, пустот, причому, на досить великій глибині - до 1 ... 5 метрів, що в першу чергу обумовлено використанням низьких частот коливань, що мають мале загасання в матеріалі

Поширення і розподіл пружних деформацій в обсязі контрольованої конструкції при ударному збудженні є нестационарним процесом. У момент удару сферичного індентора в області його контакту з матеріалом виникає короткочасний імпульс сили, характер зміни в часі якої може бути описаний половиною періоду синусоїди. Тривалість імпульсу може бути приблизно визначена виходячи з співвідношень теорії Герца по формулі:

$$t_c = 2.87 \sqrt{\frac{m^2 \ddot{\phi}^{1.5}}{RE^2 V_z \phi}} \quad (2.4)$$

где m – маса сферичного ударника; R – його радіус; E - приведений модуль пружності; V_z – швидкість наближення.

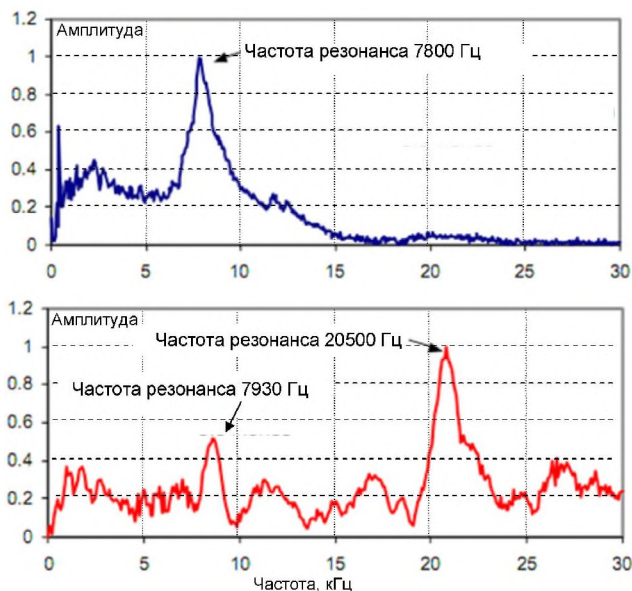


Рис.2.6 – Частотні спектри акустичних відгуків

Використання низьких частот для виявлення дефектів матеріального масиву підвищує «далекобійність» ІЕ методу, але має і зворотний бік, - чим нижче частота акустичних коливань, тим більшого розміру повинен бути дефект для створення ефекту віддзеркалення і освіти стоячої хвилі. ІЕ метод ефективний для виявлення дефекту, лінійні розміри якого порівнянні з відстанню від нього до поверхні. Якщо прийняти мінімальний розмір виявленого дефекту $\lambda/4$, то діапазон робочої області ІЕ методу - «сліпу» зону - можна відобразити графічно (рис.6) У вигляді сектора з вершиною в точці збудження зондируючих коливань. Для виявлення малорозмірних дефектів на великій глибині використовують ультразвукові дефектоскопи. У цих приладах використовується принцип імпульсної локації хвилями, довжина яких становить 3 ... 8 сантиметрів. Вимірювальний тракт приладів ІЕМ, поряд з частотними, дозволяє вимірювати часові параметри акустичного сигналу. Такий режим вимірювань можливий, якщо довжина яку ініціює

хвилі значно менше габариту виробу в напрямку контролю. Використовуються два прийомних перетворювача (рис.2.7), що встановлюються на одній лінії з точкою збудження імпульсу. Інформаційним параметром є часовий інтервал між моментами реєстрації імпульсу кожним з перетворювачів. Така методика дозволяє визначити швидкість поширення імпульсу підповерхневої і поверхневої хвиль.

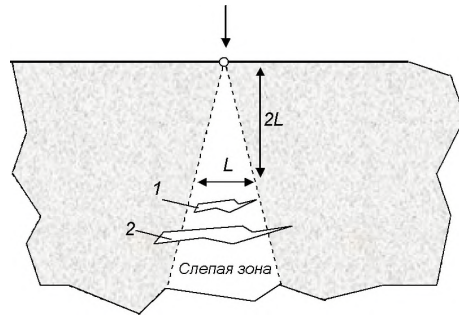


Рис. 2.7 – Робоча область ІЕМ методу 1 - дефект з малою вірогідністю виявлення; 2 - виявляється дефект

Оцінка глибини поверхневих тріщин ІЕМ може виробитись шляхом порівняння часу проходження фронту хвилі для бездефектної зони і в зоні тріщини (рис.6). Різниця в часі появи фронтів сигналів t_1 і t_2 пов'язана з геометрією тріщини. Глибина тріщини розраховується за такою ж формулою, як і для ультразвукового імпульсного методу. На рис. показана схема трансформації фронтів хвилі в зоні тріщини. Фронт хвилі ініційованої ударом p відбивається від площини тріщини. Визначення міцності матеріалу проводиться за швидкістю проходження імпульсу, на основі градуювальних залежностей, аналогічних залежностей ультразвукового імпульсного методу.

Є публікації про порівняльних випробуваннях ультразвукового імпульсного і ІЕМ, і про спільне їх використання для виявлення і локалізації дефектів в матеріалі.

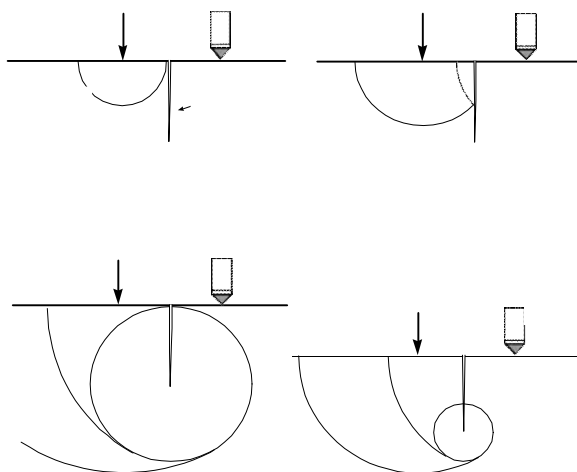


Рис. 2.8 – Схема дифракції хвилі в зоні прояви примісів

У порівнянні з ультразвуковим імпульсним методом проходження, який дозволяє виявити при односторонньому доступі до матеріалу виробу лише поверхневі і підповерхневі порожнечі / тріщини, ІЕМ володіє безперечними перевагами, надійно виявляючи і приховані дефекти. В оцінці міцності і параметрів пружності матеріалу обидва методи дають близькі оцінки. Відмінності обумовлені двома основними факторами: слабо вираженою спрямованістю акустичної хвилі ІЕМ, і відносно низькою частотою порушуваних коливань. Низька частота хвильового процесу призводить до збільшення глибини його локалізації, і відповідно - ефективної глибини контролю матеріалу, що може розглядатися як гідність. З іншого боку, низька частота і практично повна відсутність спрямованості створює певні труднощі в селекції хвильових складових, а значить і в оцінці їх швидкості поширення, і пов'язаних з нею фізико-механічних властивостей матеріалу. Крім того, довгохвильовий акустичний сигнал ІЕМ методу в меншій мірі піддається частотній дисперсії швидкості поширення через структурної неоднорідності матеріалу. ІЕМ успішно конкурує з методом ультразвукової дефектоскопії матеріалу, дозволяючи виявляти приховані під поверхнею дефекти - тріщини, зони недоутеплення, розшарування матеріалу. Незважаючи на те, що роздільна здатність ІЕМ, його можливості просторової локалізації одиночних дефектів і максимальна глибина «зондування» помітно гірше, але висока

чутливість до приповерхневим дефектів, а також до прихованих протяжним дефектів структури матеріалу, в найбільшою мірою впливає на несучу здатність конструкції, відкриває цьому методу широку перспективу практичного використання. Є дані використання методу для оцінки наростання міцності матеріалу в процесі теплової обробки. Інформаційний параметр розглядалася динаміка перерозподілу спектральної щільності акустичного сигналу. На рис. наведено приклад спектрограми процесу твердіння матеріалу. Для основної частоти f_{RC} характерні ті ж стадії, що і для швидкості ультразвукових поздовжніх хвиль, з якою вона однозначно пов'язана. Але, на додаток до цього, у міру дозрівання матеріалу спостерігається також поступове збагачення спектру відгуку високочастотними складовими [9].

Інтерпретація такого роду даних контролю (рис.7) Вимагає високої кваліфікації і досвіду оператора і, в багатьох випадках, не дає однозначних оцінок стану матеріалу. Крім того, відкритим залишається питання про вплив армування матеріалу на оцінки методу. Певні надії пов'язуються з алгоритмізацією обробки вейвлет-спектрів з залученням теорії розпізнавання образів.

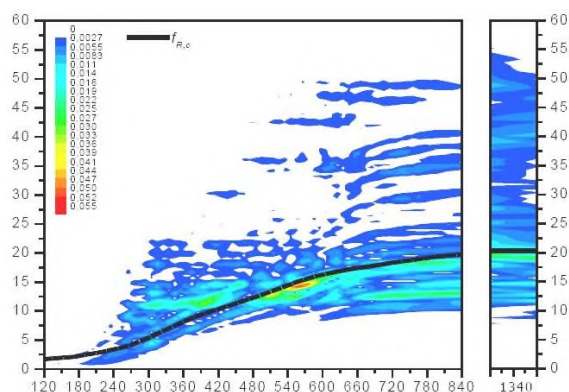


Рис. 2.9 – Спектрограма акустичного відгуку отклику в процесі змін у структурі зразка на горизонтальній осі відліки часу твердіння зразка, хв .; на вертикальній - частота, кГц; градації щільності зображення відповідають амплітуді спектральних складових; суцільною чорною лінією f_{RC} показана крива для основної частоти спектра

Методи частотного аналізу акустичних сигналів Фур'є-спектр. Для аналізу динамічних процесів, в тому числі і процесів поширення хвиль, широко використовуються спектральні методи, що дозволяють розглядати процес не в тимчасовій області розвитку, а в частотній. В основі спектральних методів лежить перетворення Фур'є (ПФ).

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \times \exp(-i\omega t) dt \quad (2.5)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \times \exp(i\omega t) d\omega \quad (2.6)$$

Вираз (2.5) – пряме перетворення Фур'є, вираз (2.6) - зворотне перетворення. Математичний зміст перетворення Фур'є полягає в поданні сигналу $f(t)$ у вигляді суми синусоїда і косинусоїда. Зворотне перетворення Фур'є переводить спектральний відображення $F(\omega)$ в вихідний сигнал $f(t)$. Для перетворення Фур'є розроблено ефективний алгоритм, який отримав назву швидке перетворення Фур'є (ШПФ), що реалізується в багатьох програмах математичної обробки даних (Excel, MathCad і ін.). На відміну від класичного перетворення (3.8), що розглядає вихідний сигнал в безперервній області аргументу від $-\infty$ до $+\infty$, БПФ дозволяє отримати частотний спектр сигналу $f(t)$ при наявності $2N$ числа його відліків. БПФ дає масив значень амплітуд частотних складових $F(\omega_i)$ сигналу, які, в загальному випадку, є комплексними величинами, що мають дійсну $Re [F(\omega_i)]$ і уявну $Im [F(\omega_i)]$ складові. Для графічного відображення, так званого амплітудно-частотного спектра зазвичай використовують модуль комплексних амплітуд, що приймає тільки позитивні значення

$$Mod[F(\omega_i)] = \{Re^2[F(\omega_i)] + Im^2[F(\omega_i)]\}^{1/2} \quad (2.7)$$

Ця процедура робить результат спектрального перетворення наочним. У багатьох практичних застосування БПФ, в першу чергу для аналізу стаціонарних, мало змінюються в часі сигналів, цього достатньо. Отримання амплітудно-частотного спектра сигналів, у яких співвідношення частотних

складових змінюється за час його існування, а саме такі сигнали використовуються в багатьох акустичних методах випробувань, призводить до втрати інформації про тимчасові параметри частотних складових. Ця інформація побічно міститься в фазовому частотному спектрі сигналу але для часового аналізу фазочастотную спектр незручний [11]:

$$\varphi(\omega_i) = \operatorname{arctg}\{ \operatorname{Im}[F(\omega_i)] / \operatorname{Re}[F(\omega_i)] \} \quad (2.8)$$

3 АЛГОРИТМ ВИЯВЛЕННЯ ДОМІШОК У ОДНОМІРНІЙ МОДЕЛІ ІЗ ГЕРЦЕНСЬКИМИ ВЗАЄМОДІЯМИ

3.1 Модель одиночної, бінарної та тернарної домішки

Користуючись особливостями руху хвиль в дискретних мікро-механічних системах методом чисельного моделювання показано, що динаміка хвильового руху імпульсу який рухається уздовж гранульованого ланцюжка з нелінійними контактами у зовнішньому гравітаційному полі описується розв'язками типу дисперсійних хвиль (нормальні моди).

Існування розв'язків несолітонного типу з амплітудою, яка зменшується за ступеневим законом, суттєво доповнює відомі нелінійні хвильові механізми передачі енергії солітонного типу.

У наближенні слабкої нелінійності знайдено нові (у порівнянні із раніше відомими) класи точних розв'язків рівняння руху механічного імпульсу у вертикальному гранульованому ланцюжку, які зокрема, визначаються в термінах функцій Бесселя першого роду, а також, у суцільній границі, функціями типу бігучої хвилі із амплітудами які зменшується за ступеневим законом. Знайдені типи розв'язків відкривають перспективи відповідних нових експериментів по оптимізації передачі енергії (імпульсу) в дискретних слабо-нелінійних, низьковимірних гранульованих системах.

Задача про перенесення імпульсу у гранульованих одновимірних ланцюжках нескінченної довжини детально вивчалася в роботах. Визначення точних розв'язків цієї задачі становить важливий елемент вивчення розподілу енергії по внутрішніх ступенях свободи у дискретних системах із силовими контактами. До того ж, вивчення транспортних властивостей хвиль, які збуджуються у таких системах, та розбудова засобів використання відповідної схемотехніки потребує знань про вплив граничних умов, розмірів системи та матеріальних співвідношень.

На цьому шляху в запропонованій роботі розглянуті обмежені

ланцюжки, які складаються із декількох елементів. Показано, що передача імпульсу збудження в таких системах описується за допомогою так званих вибираючих функцій, які у свою чергу визначаються за допомогою лінійних комбінацій дисперсійних хвиль. Отримані аналітичні розв'язки можна записати у формі, яка задовольняє довільні граничні умови. Вони також добре узгоджуються із результатами чисельних розрахунків моделі. Досліджено вплив граничних умов та матеріальних співвідношень на динаміку імпульсу. Проаналізовано роль, яку відіграє неоднорідність у переносі збурення крізь обмежену систему.

Розглянемо керуюче рівняння, яке описує рух імпульсу енергії у неоднорідному гранульованому ланцюжку у такому (лінеаризованому) вигляді.

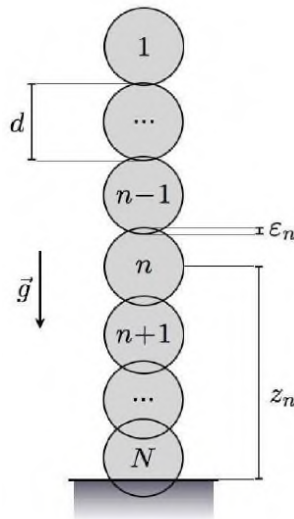


Рис. 3.1 Неоднорідний гранульований ланцюжок

В лінійному наближенні має можливість показати, як динаміка хвильового руху імпульсу, поширюючогося вздовж гравітаційно стисненого гранульованого ланцюжка з нелінійними контактами, може бути описаний розв'язками типу дисперсійних хвиль (нормальні моди) [5]. Розв'язки несолітонного типу, амплітуда яких зменшується за степеневим законом, розширює і доповнює відомі нелінійні хвильові механізми передачі енергії. При розгляді цієї задачі було знайдено новий клас точних рішень

відповідного рівняння руху механічного імпульсу у вертикальному гранульованому ланцюжку, існуючого у наближенні слабкої нелінійності і формулюється в термінах функцій Беселя першого роду [5]. Запропонуємо певне рівняння для функції зсуву, супроводжувачий поширення імпульсу у вертикальному гранульованому ланцюжку:

$$\frac{d^2 z_n}{dt^2} = g \left\{ [d - (z_n - z_{n-1})]^d - [d - (z_{n+1} - z_n)]^d + g \right\} \quad (3.1)$$

де $g = C \setminus m$, m - маса окремої частинки-гранули, d - діаметр недеформованої частинки, C - силова константа, E - модуль Юнга, V - константа Пуассона, ϵ - геометричний фактор, який залежить від параметрів перекривання пари сусідніх частинок. Параметр нелінійності контакту d здатен приймати різні значення. Наприклад, у випадку контактів між частинками герцівського типу, він дорівнює $d = 3 \setminus 2$

У випадку вертикальної системи цей параметр починає залежати від положення (номера) контакту. Якщо врахувати останню обставину, рівняння руху набуває вигляду:

$$\frac{d^2 z_n}{dt^2} = g_{m-1} \left\{ [d - (z_n - z_{n-1})]^d - g_{m+1} [d - (z_{n+1} - z_n)]^d + g \right\} \quad (3.2)$$

Керуюче рівняння, яке після лінеаризації стає однорідним з перенормованими силовими сталими (які в свою чергу, залежать від номера частинки в системі) відноситься до класу диференціально-різницевих та інтегрується точно. Розв'язок знайдено в класі циліндричних функцій Беселя першого роду, лінійна комбінація яких задовольняє довільним початковим умовам. Отримані результати суттєво доповнюють відомі результати у вигляді розв'язків, у вигляді дисперсійних хвиль (нормальні моди) і узагальнюють останні (скажімо, як функції вкладення).

Розглянуті розв'язки, після їх експериментального підтвердження мають сприяти розробці адекватних моделей для параметризації процесів транспорту енергії

(імпульсу) у низьковимірних, слабо-нелінійних, дискретних механічних системах, прикладом яких виступають гранульовані ланцюжки [5].

Тобто використовуючи відомий алгоритм Бейтмена, можна знайти аналітичні розв'язки рівняння руху імпульсу у неоднорідному герцівському ланцюжку із довільними граничними умовами. Отримані результати добре узгоджуються із чисельними розрахунками повного керуючого рівняння у випадку ланцюжків обмеженої довжини та дозволяють зробити висновок, що за умов конфайнменту взаємний вплив нелінійності та неоднорідності на характеристики транспорту імпульсу є мультипараметричним фактором і для своєї оцінки потребує врахування граничних умов і матеріальних співвідношень.

Зменшення швидкості руху фронту збудження, яке точно спостерігається при збільшенні розмірів системи, вказує на потенційну можливість перетворення дисперсійної моди на нелінійну (лінійаризовану). У суцільній границі, розв'язки солітоноподібного типу були знайдені явно. Процес взаємного перетворення локалізованих та делокалізованих збурень у дискретних мікро-механічних системах у певному сенсі нагадує корпускулярно-хвильовий дуалізм у квантовій механіці, хоча й відтворюється фактично у макро-масштабі.

ВИСНОВКИ

Запропонована модель одиночної, бінарної та тернарної домішки, яка використовується у процесі детектування домішок у мікромеханічних дрібнодисперсних системах.

Розкриваються їх базові властивості нелінійності та неоднорідності різних типів, що розкриваються в переносі збуджень у низьковимірних системах силових центрів. Що у свою чергу обумовлює практичні можливості детектування неоднорідностей типу домішок.

Розкривається алгоритм виявлення домішок у одномірній моделі із герценськими взаємодіями. В запропонованій роботі розглянуті обмежені ланцюжки, які складаються із декількох елементів. Показано, що передача імпульсу збудження в таких системах описується за допомогою так званих вибираючих функцій, які у свою чергу визначаються за допомогою лінійних комбінацій дисперсійних хвиль.

Отримані аналітичні розв'язки можна записати у формі, яка задовольняє довільні граничні умови, які в певній мірі узгоджуються із результатами чисельних розрахунків моделі. Розкривається вплив граничних умов та матеріальних взаємодій на динаміку імпульсу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Герасимов О.І., Співак А.Я., Худинцев М.М., Клименков О.А. Транспорт енергії (імпульсу) в модельних низьковимірних дисипативних системах. /Вісник ОДЕКУ. 2008. №6. С.225-233.;
2. Герасимов О.И. О новом классе точных решений дифференциально-разностного уравнения движения для механических возбуждений в одномерной неоднородной гранулированной цепочке. //Вісник ОДЕКУ.- 2011. №11. С.198-202.;
3. Герасимов О.І., Співак А.Я. Моделювання руху механічних збуджень у одновимірних неоднорідних гранульованих ланцюжках: вплив граничних умов. /Вісник ОДЕКУ. 2012. №14. С.217-223.;
4. Герасимов О.І., Сомов М.М. Статистичний опис надлишкових властивостей бікомпонентних систем. /Укр.фіз.журн. 2015. Т.60, №4.- С.326-330.;
5. Герасимов О.І. Фізика гранульованих матеріалів: Монографія. – Одеса: ТЕС, 2015. 264с.;
6. Герасимов О.І., Клименков О.А., Співак А.Я., Худинцев М.М. Кінетика гранульованих матеріалів у полі віброприскорювань. /Вісник ОДЕКУ.- 2006. №3. С.247-252.;
7. Герасимов О.І., Співак А.Я. Кінетична дисперсійна модель середнього поля для ущільнення гранульованих матеріалів. /Вісник ОДЕКУ.- 2010.-№9.- С.190-197.;
8. Герасимов О.І. Структура та динаміка гранульованих матеріалів. //Доповіді НАН України.-2010.-№11. С.59-65.;
9. Герасимов О. И. Физика гранулированных материалов: состояние и перспективы исследований. Часть 1 /Вісник Одеського державного екологічного університету. –2013. №. 16. С. 196-204.
10. Снежков, Д.Ю. Мониторинг возводимых и эксплуатируемых железоматериальных конструкций неразрушающими методами / Д.Ю.

Снежков, С.Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2016. 331 с.

11. Герасимов О.І. Фізика гранульованих матеріалів: Монографія. – Одеса: ТЕС, 2015. 264с.