Міністерство освіти України
Одеський державний університет
ім. І.І. Мечнікова

На правах рукопису

ВАХНЕНКО
Вячеслав Олексійович

МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ДОВГОХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ У БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

01.04.17 — хімічна фізика, фізика горіння і вибуху

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ — 1995

Робота виконана у Відділенні геодинаміки вибуху Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, м. Київ

Науковий консультант: доктор фізико-ма…
член-кореспонде…
В.А. Даниленко

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор
С.К. Асланов

доктор фізико-математичних наук,
професор
А.А. Березовський

доктор фізико-математичних наук,
доцент
Є.Г. Попов

Провідна організація: Інститут хімічної фізики в Черноголовці РАН

Захист відбудеться "27" жовтня 1995 р. о 14 на засіданні Спеціалізованої ради Д 05.01.06 в Одеському державному університеті ім. І.І. Мечнікова за адресою: 270100, м. Одеса, вул. Щепкіна, 14, Велика фізична аудиторія.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеського держуніверситету.

Автореферат розіслано "25" вересня 1995 р.

Вчений секретар Спеціалізованої ради
канд.фіз.-мат.наук, доцент С.В. Маргащук

Загальна характеристика роботи

Актуальність проблеми. Практично в усіх розділах фізики вчені зустрічаються з необхідністю дослідження хвильових процесів, як з метою вивчення фундаментальних законів природи, так і для використання у важливих технічних цілях. Реальним середовищам, які складаються з різноманітних твердих, рідких та газових компонент, властива наявність структури. До таких середовищ належать аерозолі, грунти, піни, композити, пористі середовища і т.п. Розвиток техніки експерименту показав, що на еволюцію хвильових рухів впливає внутрішня структура середовища. Ефекти неоднорідності суттєво ускладнюють дослідження і в той же час максимально проявляються для нелінійних хвиль. Інтенсивні високоградієнтні збурення, в тому числі і вибух, приводять до незворотніх процесів у середовищі. Незворотність та нелінійність хвильових процесів, а також неоднорідність середовища належать до головних особливостей фізичних явищ, яким у роботі приділена основна увага.

Моделі різного ступеню складності використовуються для опису хвильових процесів. У стані локальної рівноваги багато середовищ традиційно моделюється без врахування внутрішньої структури. Відома ідеалізація реального середовища за допомогою однорідного дала можливість в межах механіки суцільного середовища досягти значних успіхів для опису хвильових процесів. Широко використовують такі моделі для газорідинних систем, аерозолів, природних середовищ, в яких, виходячи з конкретного механізму мікроструктурної взаємодії, врешті–решт визначають його дисперсно–дисипативні властивості. На цьому рівні середовища моделюють однорідними в'язкопружними і пружнопластичними середовищами. Тут структура середовища враховується опосередковано через кінетичні параметри (час релаксації, коефіцієнти в'язкості і т.п.).

З моделями однорідного середовища межують одношвидкісні континуальні моделі. В цих моделях структура багатокомпонентного середовища враховується в рівняннях стану у вигляді масштабних параметрів з розмірністю часу та довжини, а рівняння руху записуються, як для однорідного середовища. Умови адекватності континуального наближення обмежують знизу характерну довжину хвилі.

Для опису динамічної поведінки багатокомпонентних середовищ розроблена модель багатошвидкісних взаємопроникаючих континуумів. У багатьох випадках ця модель буває незамінною, якщо вдається записати силову, теплову та масову взаємодії між компонентами. Одержали розвиток моделі структурованих середовищ із залученням методів елементної динаміки. Детальне врахування рухів окремих елементів структури і хвильових процесів в них призводить до складних математичних моделей. Різноманітність взаємодій та процесів обміну у багатокомпонентних середовищах ускладнює, а часто взагалі робить неможливим детальне математичне моделювання хвильових процесів. Аналітичні дослідження закономірностей течій за допомогою цих моделей наштовхуються на певні труднощі.

У зв'язку з цим теорія хвильових процесів в неоднорідних середовищах потребує подальшого розвитку. Актуальною є задача по створенню нових моделей динамічної поведінки неоднорідних середовищ під дією інтенсивних високоградієнтних навантажень в межах континуального підходу з метою математично строгого врахування структури. Обгрунтування і узагальнення існуючих моделей є важливою проблемою.

Розвиток моделей дасть можливість виявити нові закономірності еволюції нелінійних хвиль, розв'язати ряд важливих наукових задач. Інформація, яка утримується в еволюційних закономірностях хвильових полів, з одного боку, дасть інструмент для діагностики властивостей самого середовища, а з іншого, — дозволить вивчити характеристики енергоджерела, а також навчитися прогнозувати та регулювати хвильові навантаження.

Мета дисертаційної роботи полягає у побудові математичних моделей релаксуючих середовищ із структурою для опису нелінійних довгохвильових процесів, у визначенні закономірностей еволюції хвильового поля і у розробці на їх основі наукових положень регулювання хвильових навантажень, а також методів діагностики властивостей середовища.

Наукова новизна. Ґрунтуючись на уявленнях про незворотні процеси у середовищах із структурою побудована асимптотична усереднена модель, яка узагальнює одношвидкісні континуальні моделі.

Вперше виведено і проаналізовано нове нелінійне еволюційне рівняння для високочастотних хвиль у релаксуючому середовищі. Знайдено два сімейства стаціонарних періодичних розв'язків, до яких входить розв'язок у вигляді відокремленої хвилі. Вивчено взаємодію відокремлених хвиль. Проаналізовано існування петлеподібних розв'язків у випадку врахування дисипативного члена в еволюційному рівнянні.

Вперше знайдено аналітичне перетворення, яке зв'язує системи рівнянь, що описують рухи газу і двофазного газоутримуючого середовища із довільним початковим вмістом нестисливої фази.

Вперше запропонований і математично обгрунтований новий метод діагностики властивостей окремих компонент середовища за допомогою нелінійних хвиль.

Строго математично підтверджено положення, що на акустичному рівні поведінка середовища із структурою моделюється однорідним середовищем з дисперсно-дисипативними властивостями.

Запропоновано чисельно-аналітичний метод розв'язування усередненої системи рівнянь, які описують хвильові рухи в релаксуючому середовищі з мікроструктурою.

Проаналізовано особливості ударно-хвильових течій в середовищах із структурою. Вперше доведено, що структура середовища завжди збільшує нелінійні ефекти довгих хвиль. Показано, що в межах асимптотичної усередненої моделі відома модель Ляхова багатокомпонентного середовища має асимптотичну природу.

Проведено експерименти з метою визначення затухання ударної хвилі, що генерується реальним джерелом енергії у газорідинній піні. Грунтуючись на експериментальних результатах та математичних моделях встановлено, що збільшення затухання ударної хвилі у газорідинному середовищі порівняно з газом пов'язане з незворотніми процесами за ударним фронтом.

Основні наукові положення.

1. Асимптотична усереднена модель динамічної поведінки структурованого середовища узагальнює відомі одношвидкісні континуальні моделі.

2. Обгрунтовано нове нелінійне еволюційне рівняння для опису високочастотних збурень у середовищі із незворотніми внутрішніми процесами.

3. Рух двофазного газоутримуючого середовища з нестисливою компонентою аналогічний руху газу.

4. Довгі нелінійні хвилі — інструмент діагностики властивостей структурованого середовища.

5. Структура середовища завжди збільшує нелінійні ефекти довгих хвиль.

6. Затухання ударних хвиль у газорідинній піні протікає інтенсивніше, ніж у газі за рахунок незворотніх процесів за ударним фронтом.

Сукупність сформульованих та обгрунтованих наукових положень, що випливають з одержаних результатів, подана у дисертації як **новий науковий напрямок** в фізиці швидкоплинних процесів — нелінійна хвильова динаміка середовищ із просторовою релаксуючою мікроструктурою.

До захисту подаються такі основні результати:

- асимптотична усереднена модель динамічного стану релаксуючого середовища із структурою;
- аналітичні та чисельні методи, а також результати визначення закономірностей еволюції нелінійних хвильових полів;
- еволюційне нелінійне рівняння високочастотних збурень у релаксуючому середовищі;
- доведення аналогії руху газу та двофазного середовища з довільним вмістом нестисливої фази;
- метод діагностики властивостей середовища нелінійними хвилями.

Теоретична і практична цінність роботи. Розроблені моделі і пакети програм дають можливість проводити математичне моделювання довгохвильових течій у релаксуючому середовищі із структурою. Нове еволюційне нелінійне рівняння розширює клас розв'язків інтегрованих нелінійних рівнянь. Запропонований метод діагностики нелінійними довгими хвилями дає можливість визначати властивості середовищ з регулярною структурою. З точки зору загальнометодологічного розвитку гідродинаміки привертає увагу одержане перетворення, яке забезпечує однозначний зв'язок між рівняннями руху газу та двофазного газоутримуючого середовища. Одержані закономірності затухання ударних хвиль у газорідинних пінах складають основу для проектування мобільних засобів захисту від ударних хвиль. Результати досліджень використані у технологічних роботах приварюванням вибухом стикових рейкових з'єднувачів з застосуванням пінного захисту на діючих дільницях Південно–Західної залізниці.

Результати роботи можуть бути використані як матеріал для учбових курсів в ВУЗах (КДУ, КПІ, МФТІ, МІФІ, НДУ).

Апробація роботи. Матеріали дисертації доповідались і обговорювались на Міжнародних колоквіумах з газодинаміки вибуху і реагуючих систем (Мінськ, 1981р., Пуат'є, 1983р.), на 20 Асамблеї Європейського

Географічного товариства (Гамбург, 1995р.), на Міжнародних симпозіумах по використанню енергії вибуху (Готвальдов, 1979р., 1982р., 1985р.), на Міжнародній конференції по механіці гірських порід (Москва, 1993р.), на Міжнародній школі-семінарі з фізики та газової динаміки ударних хвиль (Мінськ, 1992р.), на Міжнародній школі-семінарі з нерівноважних процесів та низькотемпературної плазми (Мінськ, 1992р.), на Міжнародній школі-семінарі з нерівноважних процесів і їх використання (Мінськ, 1994р.), на Всесоюзній нараді по обробці матеріалів вибухом (Новосибірськ, 1981р.), на III Всесоюзній школі молодих вчених з чисельних методів механіки суцільного середовища (Абрау-Дюрсо, 1991р.), на I-III школах-семінарах з вибухових явищ (Алушта, 1990-1992рр.), на Всеукраїнському семінарі з газодинаміки і прогнозування землетрусів (Ворзель, 1993р.), на семінарах по Акустиці неоднорідних середовищ (Новосибірськ, 1992р., 1994р.), на конференції молодих вчених ІХФ СРСР (1980р.), на науковому семінарі Інституту Фізики Землі АН СРСР (1984р.), на наукових семінарах Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона АН УРСР (Київ, 1978-1987рр.), на наукових семінарах Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України (Київ, 1988-1995рр.).

Рівень проведених наукових досліджень відмічений Міжнародним Науковим Фондом (International Science Foundation), грант N UAE000.

Публікації. Основні положення і результати дисертації висвітлені у 43 наукових роботах, список яких подано в кінці автореферату.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, семи глав, списку літератури. Об'єм дисертації: 312 сторінок, в тому числі 53 малюнки, 2 таблиці, список літератури з 250 найменувань, додаток.

Стислий виклад роботи

У вступі сформульована мета дослідження, обгрунтована його актуальність, коротко викладена загальна структура роботи і основні положення, що виносяться до захисту.

У першій главі зроблено літературний огляд, проаналізовано математичні моделі, які описують динамічний стан багатокомпонентних середовищ. Для опису багатофазних середовищ застосовуються два принципово різні підходи. У першому випадку для виведення рівнянь руху залучаються методи кінетичної теорії газів. У другому, — феноменологічному підході, використовуючи методи механіки суцільного середовища, записуються закони збереження маси, імпульсу та енергії.

З розвитком техніки експерименту відкрилася явна можливість спостерігати вплив структури середовища на інтенсивні хвильові процеси. Неоднорідність середовища значно ускладнює моделювання і в той же час максимально повно проявляється для нелінійних хвиль. Виникають нові ефекти, пов'язані з співвідношенням між нелінійними та дисперсно-дисипативними властивостями середовища, а також розмірами неоднорідностей. Багатогранність взаємодій та процесів обміну не дає можливості на даному етапі пізнання детально врахувати їх у математичних моделях. Інтенсивні хвильові процеси приводять до незворотніх процесів у середині середовища. Стан середовища неможливо описати в межах рівноважної термодинаміки. Цікаво розглянути з єдиних позицій, грунтуючись на термодинаміці незворотніх процесів, внутрішні процеси, які протікають у середовищі. Характерною рисою хвильових течій, що вивчаються, є наявність релаксуючих процесів: зміна макропараметрів хвилі за рахунок зміни деякого внутрішнього параметру середовища. Мікроструктура середовища на більш низькому ієрархічному рівні враховується за допомогою кінетичних параметрів. В той же час на більш високому ієрархічному рівні необхідно зважувати на структуру середовища. Нелінійність та незворотність процесів, що відбуваються у середовищі, а також вплив структури середовища на еволюцію хвильового поля потребують подальшого розвитку математичних моделей динамічної поведінки багатокомпонентних релаксуючих середовищ.

У світлі вищенаведеного задачі роботи визначались таким чином:

- розробка та узагальнення моделей динамічної поведінки структурованого середовища в межах континуального підходу;
- математичне моделювання нелінійних довгохвильових збурень у релаксуючому середовищі із структурою;
- вивчення закономірностей впливу структури середовища на еволюцію нелінійних хвиль;
- дослідження високочастотних збурень у релаксуючому середовищі;
- розробка методів діагностики властивостей елементів середовища за допомогою довгих нелінійних хвиль;
- теоретичне та експериментальне дослідження затухання ударних хвиль у газорідинному середовищі і на цій базі створення теоретичних основ проектування мобільних засобів захисту від ударних хвиль.

У другій главі развивається асимптотична усереднена модель середовища із просторовою релаксуючою мікроструктурою. Середовище з однорідним розподілом елементів структури є найпростішим неоднорідним середовищем, для якого може бути проаналізований вплив структури. У роботі приводиться подальший розвиток підходу, який грунтується на методах механіки суцільного середовища. Лінійні розміри тіла значно перевершують розміри неоднорідностей, проте, неоднорідності такі великі, що їх стан описується класичними рівняннями суцільного середовища. Середовище баротропне. Вивчаються довгохвильові збурення, тобто довжина хвилі значно більша розміру структурного елемента середовища. У хвилях значної амплітуди, з одного боку, тіло можна розглядати в межах гідродинамічної моделі, нехтуючи зсувними напруженнями, а з другого боку, в цьому випадку необхідно детально враховувати вплив кожного елемента мікроструктури на розповсюдження нелінійних хвиль.

Незворотність внутрішніх обмінних процесів описується динамічним рівнянням стану, яке обгрунтоване в межах нерівноважної термодинаміки

$$\tau_p\left(\frac{d\rho}{dt} - c_f^{-2}\frac{dp}{dt}\right) + (\rho - \rho_e) = 0. \qquad (1)$$

У цих рівняннях кожному окремому елементу структури відповідає свій набір параметрів: τ_p — характерний час процесу релаксації, c_f — заморожена швидкість звуку. Тут $dp_e = c_e^2 d\rho_e$ — рівноважне рівняння стану. Інші позначення — загальновживані.

Закономірності розповсюдження довгохвильових збурень досліджуються на прикладі середовища з регулярною структурою, коли напруження та масова швидкість на контактах компонент співпадають. Методом асимптотичного усереднення виведена усереднена система рівнянь. Це дало можливість спростити початкову систему рівнянь і розробити чисельні методи розв'язування задач хвильової динаміки у неоднорідних середовищах.

Методи усереднення мають асимптотичну природу. Використовується асимптотичний метод усереднення рівнянь для середовищ регулярної структури. Метод був досліджений та математично обгрунтований у механіці композитних матеріалів. Суть його полягає у використанні методу багатьох масштабів у поєднанні з методом усереднення. Асимптотичний метод усереднення вдається застосувати до стисливих середовищ. Початкові рівняння записуються у лагранжевих масових координатах. Незмінність структури у цих координатах дозволяє використати процедуру

3-5-4095

усереднення. Незалежна змінна m у відповідності з методом багатьох масштабів розбивається на повільну $s = m$ та швидку $\xi = m/\varepsilon$ змінні. Вони вважаються незалежними. Повільна змінна s відповідає глобальній зміні хвильового поля, а швидка ξ — локальній. Розв'язок p, V, u, $\rho = V^{-1}$ шукається у вигляді ряду за степенями періоду структури ε з періодичними по ξ функціями, наприклад,

$$V(m,t) = V^{(0)}(s,t,\xi) + \varepsilon V^{(1)}(s,t,\xi) + \varepsilon^2 V^{(2)}(s,t,\xi) + \ldots \quad .$$

Завдяки тому, що структура у лагранжевій системі координат постійна, була використана процедура усереднення по швидкій масовій координаті на періоді структури $\langle\cdot\rangle = \int_0^1 (\cdot) d\xi$. Доведено, що $p^{(0)} = p^{(0)}(s,t)$, $p^{(0)} = p^{(0)}(s,t)$, $u^{(0)} = u^{(0)}(s,t)$ не залежать від швидкої змінної ξ.

Усереднена система рівнянь має вигляд

$$\frac{\partial \langle V^{(0)} \rangle}{\partial t} - \frac{\partial u^{(0)}}{\partial s} = 0, \qquad \frac{\partial u^{(0)}}{\partial t} + \frac{\partial p^{(0)}}{\partial s} = 0, \tag{2}$$

$$\langle V_0 \rangle - \langle V^{(0)} \rangle = \left\langle V_0 \frac{\tau_p c_f^{-2} \frac{dp^{(0)}}{dt} + \int\limits_{p_0}^{p} c_e^{-2} dp^{(0)}}{\left(1 + \tau_p \frac{d}{dt}\right) \left(V^{(0)}\right)^{-1} \times} \right\rangle .$$

Далі розглядається тільки нульове наближення, а верхній індекс 0 відкидається.

Система рівнянь (2) незамкнута. Це пов'язано з тим, що в усереднене рівняння стану входить неусереднена величина $V(\xi)$. Тому, під час чисельного розв'язування хвильових задач використовувалось неусереднене рівняння стану, переписане в усереднених змінних (так зване виділення задачі по повільній змінній, див. нижче).

На масштабі s дія збурень проявляється у хвильовому русі середовища, в той час як на мікромасштабі ξ дія є безхвильовою на періоді структури середовища, тобто $p \neq f(\xi)$.

Виведення рівняння (2) було проведено для строго періодичного середовища. Все ж, як показано, для середовищ з однорідним розподілом елементів структури рівняння (2) також будуть вірні. З математичної точки зору в нульовому порядку $O(\varepsilon^{(0)})$ розмір періоду нескінченно малий. Це означає, що місцезнаходження окремих компонент на періоді не має ніякого значення. Проте, масовий вміст кожної компоненти повинен зберігатися. Тоді решта усереднених характеристик співпадуть і довгохвильові рухи не будуть відрізнятися у таких квазіперіодичних (статистично неоднорідних) середовищах.

Усереднена система рівнянь (2) описує нелінійні хвильові процеси у баротропних релаксуючих середовищах із статистично неоднорідною структурою. Структурні характеристики входять тільки у рівняння стану. Система є інтегродиференційною і в загальному випадку не зводиться до усереднених характеристик p, u, $\langle V\rangle$. Отже, нелінійні хвильові процеси у структурованих середовищах у загальному випадку не вдається моделювати однорідним середовищем.

Для багатьох задач зручно використовувати запис рівнянь руху в ейлеровій системі координат. Безпосереднє застосування асимптотичного методу усереднення в ейлеровій системі координат неправомірне в силу того, що в ній розмір мікроструктур змінюється.

У роботі одержано перетворення між лагранжевою (s,t) та ейлеровою $(x,\tau_s.)$ системами координат

$$dx = \langle V\rangle ds + udt, \qquad \tau_s. \tag{3}$$

Рівняння руху (2) в ейлеровій системі координат має вигляд (індекс E опущено)

$$\frac{\partial\langle V\rangle^{-1}}{\partial t} + \frac{\partial u\langle V\rangle^{-1}}{\partial x} = 0, \qquad \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + \langle V\rangle\frac{\partial p}{\partial x} = 0. \tag{4}$$

Зазначається, що густина усереднюється так: $\tilde{\rho}= \langle\rho^{-1}\rangle^{-1}$, а не $\tilde{\rho}= \langle\rho\rangle$. Величина $\tilde{\rho}$ є середня густина середовища в ейлерових координатах.

Запис рівняння руху (4) має звичайний вигляд для середньої густини $\tilde{\rho}$. Виведення усереднених рівнянь руху (4) дає строге математичне обгрунтування використання моделей однорідного середовища. Ці моделі мають асимптотичну природу.

Проведено аналіз системи усереднених рівнянь. Показано, що вона гіперболічна. Гіперболічність рівнянь вказує на можливість опису цією системою ударно–хвильових течій.

У межах асимптотичної усередненої моделі відома модель Ляхова для багатокомпонентних середовищ одержала строге математичне обгрунтування. Модель Ляхова є окремий випадок асимптотичної моделі. Ця модель описує довгохвильові рухи середовищ, у яких тільки одна (газова) компонента релаксує, причому ця компонента нестислива у початковий момент дії навантаження, а швидкості звуку є відомими функціями тиску. Модель Ляхова має асимптотичну природу.

У третій главі аналізується еволюційне рівняння для однорідного релаксуючого середовища. Фізичні процеси та явища, які відбуваються в природі, як правило, носять складний нелінійний характер. Це призводить до того, що математичні моделі реальних процесів виявляються нелінійними. Крім практичної необхідності у дослідженні нелінійних систем значна увага до цих моделей пов'язана ще й з новими успіхами в теорії нелінійних хвиль. Перспективи, які відкрилися, зумовлені перш за все розвитком методу оберненої задачі розсіювання для рівняння Кортевега – де Вріза (KdV) та появою при цьому теорії солітонів.

На основі динамічного рівняння стану (1) одержано еволюційне рівняння, за допомогою якого моделюється розповсюдження нелінійних хвиль у релаксуючому середовищі

$$\tau_p \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - c_f^{-2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{1}{2V_0^2}\left.\frac{d^2 V_f}{dp^2}\right|_{p=p_0}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}\right) +$$

$$+\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - c_e^{-2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{1}{2V_0^2}\left.\frac{d^2 V_e}{dp^2}\right|_{p=p_0}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}\right) = 0. \qquad (5)$$

Сумісно з гідродинамічною нелінійністю складний дисперсійний закон вказує на можливість існування різноманітних розв'язків. Для аналізу цього рівняння використовувався асимптотичний метод розкладу. У низькочастотному наближенні приходимо до відомого рівняння Кортевега – де Вріза – Бюргерса ($KdVB$). Це рівняння зустрічається у багатьох розділах фізики для опису нестаціонарних нелінійних процесів. Значні успіхи в інтегруванні нелінійних рівнянь пов'язані з дослідженням рівняння KdV. Зазначимо варту уваги ще одну властивість рівняння KdV — наявність солітонних розв'язків. З ними так чи інакше пов'язані метод оберненої задачі разсіювання, перетворення Міури, метод Хіроти, перетворення Беклунда для цього рівняння. У зв'язку з цим пошук солітонних розв'язків для інших нелінійних рівнянь має особливе значення.

У другому граничному випадку — високочастотному, одержано нове еволюційне рівняння

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - c_f^{-2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \alpha_\infty \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \beta_\infty \frac{\partial p}{\partial t} + \gamma_\infty p = 0, \qquad (6)$$

$$\alpha_\infty = \frac{1}{2V_0^2}\frac{d^2V_f}{dp^2}\bigg|_{p=p_0}; \qquad \beta_\infty = \frac{c_f^2 - c_e^2}{\tau_p c_e^2 c_f^2}; \qquad \gamma_\infty = \frac{c_f^4 - c_e^4}{2\tau_p^2 c_e^4 c_f^2}.$$

Вигляд нелінійності характерний для гідродинамічних рівнянь. Крім цього, маємо члени, які відповідають за дисипацію $\beta_\infty \frac{\partial p}{\partial x}$ і дисперсію $\gamma_\infty p$. Еволюційне рівняння (6) і рівняння $KdVB$ у деякому розумінні симетричні. Дисперсійні співвідношення $\omega = \omega(k)$ для цих лінеаризованих рівнянь подаються скінченним рядом в першому випадку за степенями k, а в другому — за k^{-1}.

Спочатку досліджувалось рівняння без дисипації $\beta_\infty = 0$. До яких розв'язків може приводити взаємодія нелінійності та дисперсії у цьому рівнянні? Тут мається на увазі деяка аналогія з рівнянням KdV, в якому така взаємодія може привести до солітонних розв'язків. Рівняння (6) після факторизації, переходу в систему координат, яка рухається зі сталою швидкістю c_f, та обезрозмірювання має вигляд

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial x}\right)u + u = 0. \tag{7}$$

Воно виявилось невивченим. Зазначено, що рівняння (7) має зв'язок з рівнянням Уізема з ядром $\frac{1}{2}|x|$.

У роботі проведено аналіз рівняння (7). Його вдалося проінтегрувати і знайти стаціонарні розв'язки на біжучих хвилях $u(x,t) = u(x-vt) = u(\eta)$; $\eta = x - vt$. Існує два сімейства розв'язків, коли $v > 0$ та $v < 0$ ($z = u - v$ — нова змінна)

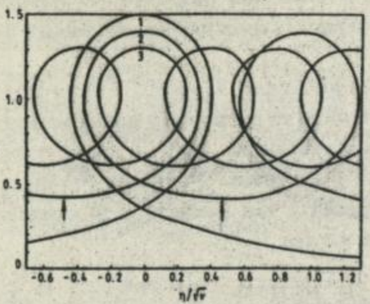
$$\pm\sqrt{\frac{2}{3}}\eta + C = \int_z^{a_3} \frac{z\,dz}{\sqrt{(z-a_1)(z-a_2)(a_3-z)}} =$$

$$= \frac{2a_1}{\sqrt{a_3-a_1}}F(\varphi,k) + 2\sqrt{a_3-a_1}E(\varphi,k). \tag{8}$$

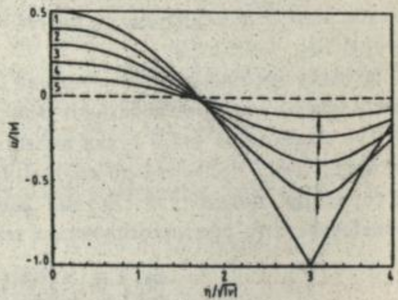
Тут $F(\varphi,k)$ і $E(\varphi,k)$ — неповні еліптичні інтеграли першого та другого роду, відповідно, $k = \sqrt{\frac{a_3-a_2}{a_3-a_1}}$, $\varphi = arcsin\sqrt{\frac{a_3-z}{a_3-a_1}}$, $a_{2,1} = \frac{1}{2}(-q \pm \sqrt{q^2-4a_3q})$, $q \equiv \frac{3}{2}v + a_3$. Причому, $a_3 \in [0, 0.5v]$ для $v > 0$ і $a_3 \in [-v, -1.5v]$ для $v < 0$. Маємо параметричну залежність шуканої функції $z = z(\varphi)$ від $\eta = \eta(\varphi)$.

На мал. 1 подані графіки амплітуди u від координати для випадку $v > 0$. Розв'язки неоднозначні, мають вигляд петель, що періодично повторюються. Для граничної амплітуди $u_{max} = 1.5v$ періодична хвиля вироджується у відокремлену хвилю (крива 1 на мал. 1). Цікавим є факт, що довжина хвилі від'ємна $\lambda \leq 0$. Для відокремленої хвилі $\lambda = 0$.

Профілі хвилі для випадку $v < 0$ наведені на мал. 2. Розв'язки $u = u(\eta)$ завжди однозначні. Для цього типу хвиль довжина хвилі додатня $\lambda > 0$.



мал. 1



мал. 2

Для малих амплітуд $u_{max} \to 0$ хвиля переходить у синусоїдальну з періодом $\lambda = 2\pi\sqrt{|v|}$. Коли максимальна амплітуда збільшується, тоді період зменшується до значень $\lambda = 6\sqrt{|v|}$. Профіль хвилі майже завжди гладкий. Тільки для хвиль з граничною амплітудою $u_{max} = 0.5|v|$ характер профілю змінюється. Крива 1, яка відповідає цьому випадку, має точки загострення і складається з парабол.

Неоднозначності розв'язку можна дати фізичну інтерпретацію. Хвильові збурення порушують термодинамічну рівновагу (динамічний процес), в той час як взаємодія між частинками середовища намагається відновити цю рівновагу (релаксаційний процес). У випадку, який розглядається, час релаксації набагато більший від характерного часу зміни хвильового поля, тому частинки з різними термодинамічними параметрами можуть з'явитися в одному мікрооб'ємі.

Для відокремленої хвилі формула (8) спрощується (χ – параметр)

$$u = \frac{3}{2} v\, sech^2 \frac{\chi}{2\sqrt{v}}, \qquad x - vt = \chi - 3\sqrt{v}\, tanh \frac{\chi}{2\sqrt{v}}. \tag{9}$$

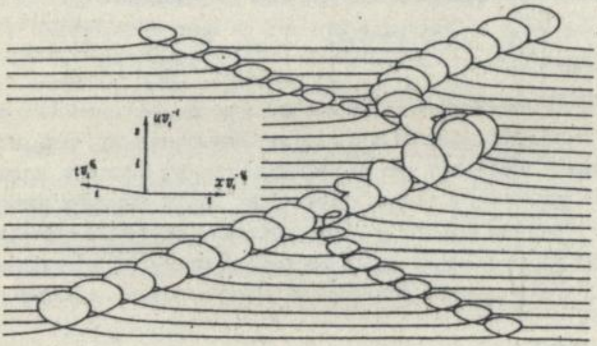
Вивчається взаємодія між відокремленими хвилями з різними швидкостями v_1 та v_2, причому $v_1 > v_2$. Неоднозначність функціональної залежності $u = u(x)$ для однієї відокремленої хвилі відкидає можливість використання прямого чисельного інтегрування рівняння (7). Однозначність обох функцій (9) від параметра дає можливість аналітично розв'язати поставлену задачу.

Потрібно звернути увагу на те, що вдалося підібрати координати, в яких початкове рівняння лінійне, отже, взаємодія вивчається відносно легко. Розв'язок задачі про взаємодію відокремлених хвиль має параметричний вигляд (μ – параметр)

$$u = \frac{3}{2} v_1 sech^2 \frac{\mu - v_1 t}{2\sqrt{v_1}} + \frac{3}{2} v_2 sech^2 \frac{\mu - \mu_2 - v_1 t}{2\sqrt{v_2}}, \tag{10}$$

$$x = x_0 + \int \left(1 - \frac{u_1^2/v_1 + u_2^2/v_2}{u_1 + u_2}\right) d\mu.$$

Константа x_0 визначається з умови $x = \mu + 3\sqrt{v_1}$, коли $x \to \infty$. Для випадку $v_2 = 0.5 v_1$ розв'язок подано на мал. 3. Для кращого зображення спостерігач рухається відносно початкової системи зі сталою швидкістю $v = 0.5(v_1 + v_2)$. Під час взаємодії відокремлена хвиля з меншою амплітуцою



мал. 3

дою швидше втрачає форму і поглинається більшою. В момент, коли хвилі зійшлися, сумарна хвиля симетрична по координаті. На великій відстані одна від одної хвилі відновлюють свою початкову форму та швидкість. Але при цьому спостерігається зсув по фазі. Хвиля, яка мала швидкість

v_1, зсувається на відстань $6\sqrt{v_2}$, а хвиля v_2 отримала зсув вперед $6\sqrt{v_1}$. Отже, відокремленій хвилі притаманна властивість солітону.

Досліджувалось питання впливу дисипативного члена в рівнянні (7)

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial}{\partial t}+u\frac{\partial}{\partial x}\right)u+\alpha\frac{\partial u}{\partial x}+u=0. \tag{11}$$

Виявилось, що до величин $\alpha^* = 2\sqrt{v}$ наявність дисипації не руйнує петлеподібних розв'язків.

У ряді робіт других вчених вивчалося рівняння (6). Паркес Е.Г. довів стійкість обох сімейств розв'язків.

У четвертій главі виведена та проаналізована асимптотична усереднена модель структурованого середовища з тепловою релаксацією. На відміну від другої глави, тут розглядаються одновимірні рухи як для плоских ($\nu = 1$), так і для циліндричних ($\nu = 2$) та сферичних ($\nu = 3$) хвиль. Показано, що запропонована модель узагальнює ряд одношвидкісних континуальних моделей.

Для релаксуючого середовища з нестисливою конденсованою фазою, коли тиск визначається тільки тиском газової компоненти, рівняння руху замикається запропонованим динамічним рівнянням стану

$$\tau_s\frac{d}{dt}\left[\langle E\rangle-\frac{p\langle E\rangle(1-\varepsilon_s)}{\gamma-1}\right]+\left[\langle E\rangle-\frac{p\langle E\rangle(1-\varepsilon_s)}{\Gamma_0-1}\right]=0. \tag{12}$$

Незворотній перехід енергії із газової фази до конденсованої завдяки теплопередачі випромінюванням або контактним способом і т.п. описується цим рівнянням. Доведено, що це рівняння описує випадок, коли конденсована фаза релаксує, а газова фаза — ні. Крім середніх величин $\langle E\rangle$, p, $\langle V\rangle$ у це рівняння входить характеристика структури середовища через об'ємний вміст конденсованої фази ε_s. Параметр Γ_0 — рівноважний показник адіабати суміші. Проведений аналіз системи показав, що вона гіперболічна.

У роботі знайдено перетворення, за допомогою якого встановлюється зв'язок між рівняннями руху для газу та для двофазного середовища з нестисливою конденсованою фазою. Якщо величину об'ємної долі ε_s не обмежувати, то розв'язування нестаціонарних гідродинамічних рівнянь значно ускладнюється, що потребує розробки методів їх розв'язку. Доведено, що рух двофазного середовища у перетвореній системі координат повністю аналогічний руху ідеального газу. Це дає можливість використовувати для розв'язування хвильових задач відомі методи газової динаміки ідеального газу. Крім того, розв'язки задач для двофазного середовища можна знаходити без інтегрування початкової системи диференційних рівнянь, якщо відомий розв'язок аналогічної задачі для газу.

Можливість виключення з рівнянь об'ємної долі конденсованої фази ε_s грунтується на фізичних міркуваннях. Дійсно, якщо об'єм конденсованої фази, що знаходиться у стисливому середовищі, не змінює свій об'єм і при цьому, не впливаючи на тиск, рухається по траєкторії частинок стисливої фази, то можна допустити, що виключення цього об'єму з розгляду значно спростить математичний вигляд системи рівнянь.

Перетворення визначає систему координат (штриховані змінні), в якій рух середовища подібний рухові газу, а зв'язок в ейлерових координатах між змінними задається співвідношеннями

$$\rho' = \frac{\rho}{1-\varepsilon_s}, \qquad p' = p, \qquad S(r')u' = r^{\nu-1}u, \qquad S(r') = r^{\nu-1}, \tag{13}$$

$$\nu S(r')dr' = (1-\varepsilon_s)dr^{\nu} + \nu\varepsilon_s r^{\nu-1}udt, \qquad t' = t.$$

Рух двофазного середовища аналогічний рухові ідеального газу в каналі змінного поперечного перерізу $S(r') = r^{\nu-1}$. Якщо б $S(r') = (r')^{\nu-1}$, то симетрія потоку збереглася б. Для плоского випадку $S(r') = 1$, і симетрія потоку не змінюється, тоді як для циліндричної та сферичної симетрії функціональна залежність $S(r') = r^{\nu-1}(r')$ визначається конкретною задачою. У роботі перетворення (13) записане також і у лагранжевих координатах.

Таким чином, щоб розв'язати рівняння для газоутримуючого середовища з довільною величиною нестисливої фази, достатньо розв'язати відомі газодинамічні рівняння і за допомогою перетворення (13) знайти розв'язки початкової системи рівнянь для заданої об'ємної долі конденсованої фази. Особливі переваги розроблений метод дає для стаціонарних та автомодельних течій. В цих випадках перетворення зводиться до алгебраїчних співвідношень.

У п'ятій главі викладені теоретичні та експериментальні дослідження сильної ударної хвилі в газоутримуючому середовищі. Динамічна поведінка двофазного середовища, вплив релаксаційних ефектів міжфазної взаємодії, основні закономірності течій при ударних навантаженнях можуть бути проаналіровані з розв'язку задачі про точковий вибух. Ця задача має велике значення в зв'язку з практичною можливістю оцінити ефективність середовищ до зниження впливу ударних хвиль і, отже, вияснити, в результаті яких основних характеристик та властивостей самого середовища досягається та чи інша ступінь затухання ударної хвилі. Крім цього, важливо визначити залежність затухання ударної хвилі ще й від параметрів навантаження, в тому числі, енергії вибуху.

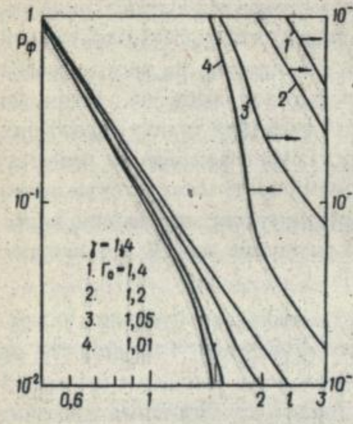
За допомогою перетворення (13) проаналізовано вплив об'ємної долі конденсованої фази. Відмічається можливість регулювання як у сторону збільшення, так і зменшення інтенсивності ударних хвиль в залежності від концентрації конденсованої фази та характеру процесу обміну між фазами. Максимальне зниження інтенсивності ударних хвиль повинно спостерігатися у середовищах з найбільшою ударною стисливістю та мінімальним об'ємним вмістом конденсованої фази.

Розповсюдження сильної ударної хвилі у середовищах з модельною кінетикою (12) аналізується на основі розв'язку системи нестаціонарних гідродинамічних рівнянь. Ця система рівнянь розв'язувалась як наближеними аналітичними методами, так і чисельними. Аналітичний розв'язок дає можливість виявити основні залежності параметрів на фронті ударної хвилі від характеристик середовища, а також потужності енергоджерела.

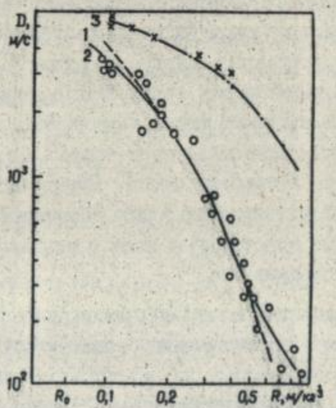
Розроблено пакет програм для розрахунку сильної ударної хвилі в середовищі з тепловою релаксацією. Чисельне інтегрування системи рівнянь пов'язане з особливостями, які з'являються як в околі центру симетрії (особливість типу сідлової точки), так і в початковий момент часу (підвищується порядок рівнянь). Наявність релаксаційних процесів приводить до якісної зміни характеру затухання ударної хвилі. На відміну від нерелаксуючого середовища, коли тиск та швидкість змінюються за степеневим законом зі сталим показником $s = \nu$ $(p \sim r_{\Phi}^{-s})$, наявність релаксації приводить до зміни s. В початковий момент s монотонно росте, досягаючи в деякий момент часу свого максимального значення, а при $t \gg \tau_s$ асимптотично наближується до своєї граничної величини $s = \nu$. Зазначену закономірність ілюструє мал. 4, на якому подана залежність безрозмірного тиску на фронті хвилі від безрозмірної відстані. Теплова релаксація за фронтом ударної хвилі впливає на зміну профілю тиску, масової швидкості та густини. Зниження швидкості ударної хвилі збільшує відносну масову швидкості u/D. Як результат цього відносна доля маси в центральній області зменшується і збільшується поблизу фронту.

Результати розрахунків порівнювалися з експериментальними дослідженнями розповсюдження ударних хвиль у водомеханічних пінах — типовим представником середовищ, в яких яскраво проявляються релаксаційні процеси. Сферичні ударні хвилі збуджувалися симетричним зарядом вибухової речовини $Q = 0,5 - 2,8$кг (енергія вибуху 5,4МДж/кг). Методика та система вимірювання давати можливість реєструвати швидкість розповсюдження і профілі тиску ударної хвилі з точністю не нижче 20%.

На мал. 5 подана залежність швидкості розповсюдження ударної хвилі в піні з масовою концентрацією конденсованої фази $10 - 15$кг/м^3 (крива 1) та в повітрі (крива 2) від приведеного радіусу $R = r_\phi / Q^{1/3}$. Позначка R_0 вказує на початковий радіус заряду. Як видно, біля заряду різниця швид-



мал. 4



мал. 5

костей ударних хвиль в піні та в повітрі невелика. Із зростанням відстані швидкості розповсюдження зменшуються, відносна різниця швидкостей збільшується. Причому показник степені в залежності від $D \sim r_\phi^\mu$ для піни досягає значення $\mu = 2$, перевищуючи показник для однорідного нерелаксуючого середовища. На відстаннях більших $R = 0,7$м/кг$^{1/3}$, коли тиск в піні стає нижче 1МПа, крутизна спаду швидкості розповсюдження хвилі зменшується.

Експериментальні результати показують, що в дослідженій області відстаней на відміну від повітря спостерігається монотонне зменшення імпульсу в піні. Це значить, що ударна хвиля в піні формується швидше, ніж у повітрі. Ефект підвищення тиску в ближній зоні заряду необхідно враховувати під час проектування захисного обладнання.

Для згаданих газорідинних пін та енергій вибуху найкраще узгодження між експериментальними і розрахунковими даними для залежностей швидкості розповсюдження хвилі, тиску, імпульсу та коефіцієнта затухання від відстані спостерігається для характерного часу релаксації $\tau_в = 150 - 180$мкс, при цьому енергетичний еквівалент джерела складає величину $50 - 60\%$ енергії вибуху.

Задовільний збіг розрахункових та експериментальних результатів вказує на можливість використання запропонованої кінетики для опису хвиль у газорідинній піні. За допомогою мінімальної кількості екпериментальних даних з одержаних залежностей можна визначити кількісні значення параметрів ударних хвиль: залежність перепаду тиску, імпульсу, коефіцієнта затухання тиску, швидкості хвилі від відстані та часу; передбачити підвищення тиску біля заряду і коефіцієнта відбиття. Розрахункові залежності дають можливість виявити величину впливу теплофізичних властивостей середовища і потужності енергоджерела на поведінку ударно-хвильових течій. Одержані закономірності можуть бути застосовані до широкого класу двофазних газоутримуючих середовищ, характерною властивістю яких є релаксаційна дисипація енергії, що визначає тиск середовища.

У шостій главі вивчаються нелінійні довгохвильові процеси в середовищах з просторовою релаксуючою мікроструктурою. Рівняння (2), які описують явища, що досліджуються, в загальному випадку є інтегродиференційними нелінійними рівняннями. Поряд з аналітичними методами залучаються чисельні методи, котрі є універсальним інструментом для розв'язування таких задач.

Метод пошуку розв'язків системи рівнянь не є традиційним, оскільки рівняння стану є інтегродиференційним з функціями, які залежать як від повільної s, так і від швидкої змінної ξ. Спочатку рівняння зводяться до вигляду, в якому шукані функції залежать тільки від повільної змінної та часу. Виділення задачі за повільною змінною полягає в розкладі функцій за деякими базисними функціями на періоді структури. Широко використовуються два способи. Універсальним можна вважати спосіб, коли функції подаються через ряди Фур'є. При цьому в загальному випадку будемо мати нескінченну систему рівнянь. У чисельних розрахунках можна обмежитися сумами скінченних рядів, причому система рівнянь буде замкнутою. Хвильові процеси будуть описуватися з тією точністю, з якою обмежений ряд Фур'є відтворює структуру середовища.

В окремих випадках, наприклад, шаруватого середовища, використовувалися запропоновані кусково–сталі ортонормовані базисні функції, які дають можливість зі значно меншими затратами машинних ресурсів проводити необхідні розрахунки. На відміну від методу, де застосовуються ряди Фур'є, в даному випадку структура передається точно кінцевим рядом. Це дало можливість проводити розрахунки з модельними середовищами, в яких властивості компонент та їх розміри можуть значно відрізнятися.

За допомогою виділення задачі по повільній змінній вдалося подолати основну трудність початкової задачі. У чисельних розрахунках крок по просторовій координаті тепер обмежується довжиною хвильового збурення, а не розміром періоду структури. Розповсюдження хвиль можна находити на великих відстанях. Розроблені пакети програм для обчислення еволюції хвильових полів у релаксуючих середовищах з мікроструктурою. Програми тестувалися на задачах, які мають аналітичні розв'язки.

На основі детального врахування структури середовища математично строго доведенно твердження, що на акустичному рівні внутрішня структура середовища проявляється тільки через дисперсно–дисипативні властивості середовища. Динамічна поведінка середовища з мікроструктурою може моделюватися в межах однорідного релаксуючого середовища.

Суттєво структура середовища проявляється в нелінійних хвилях. Доведено, що структура середовища завжди збільшує нелінійні ефекти в порівнянні з однорідним середовищем. Виняток складають середовища з такими властивостями структури, при яких величина $V(\xi)/c^2(\xi) \neq f(\xi)$, тобто не змінюється на періоді. Ці середовища ведуть себе як однорідні під впливом нелінійних довгохвильових навантажень. Окремі елементи структури реагують на зміну тиску так, що відносна структура не змінюється, тобто відношення $V(\xi,p)/V(\xi,p_0)$ не залежить від ξ.

Для низькочастотних збурень одержано нелінійне еволюційне рівняння у вигляді рівняння $KdVB$. Нелінійний, дисперсійний та дисипативний члени мають складний інтегральний вигляд. Відомо, що в залежності від співвідношення між дисперсно–дисипативними властивостями середовища можуть спостерігатися різноманітні види хвиль. Як показує аналіз, це співвідношення утримує додаткову величину — час релаксації — для структурованого середовища на відміну від однорідного релаксуючого.

Проведено аналіз співвідношень на ударному розриві, оцінена ширина ударного фронту і співставлена з чисельними розрахунками. Доведена необхідність врахування структури середовища для моделювання ударно-хвильових течій.

У сьомій главі викладено теоретичні основи нового методу діагностики властивостей середовища з внутрішньою мікроструктурою. Слід структури на нелінійних довгохвильових збуреннях такий великий, що із закономірностей еволюції поля можна відтворити властивості середовища. Зазначимо одну важливу обставину. Оскільки в асимптотичній усередненій моделі період структури нескінченно малий, то в запропонованому методі діагностики точно місцезнаходження елемента структури в періоді вказати неможливо. Маючи на увазі це обмеження, з метою визначеності будемо вважати, що залежність V/c^2 від швидкої ейлерової координати $\zeta \equiv x/\varepsilon$ є спадною інтегруємою взаємооднозначною функцією на відрізку, що відповідає періоду структури.

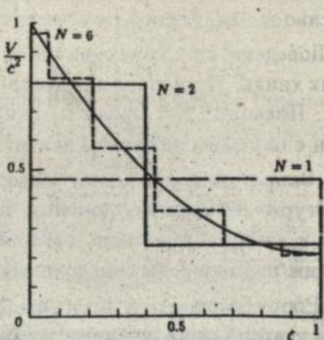
Новий метод діагностики дає можливість одержати функціональну залежність $V/c^2 = f(\zeta)$, тобто знайти розподіл величини V/c^2 на періоді структурованого середовища. Доведено, що обернена функція до шуканої $\zeta = \zeta(V/c^2)$ визначається через обернене Фур'є–перетворення

$$\zeta = -F^{-1}\left[\sum_{n=0}^{\infty}\frac{\langle V(Vc^{-2})^n\rangle}{\langle V\rangle(n+1)!}i^n q^n\right]. \qquad (14)$$

Коефіцієнти $\langle V(Vc^{-2})^n\rangle$ $(n = 3, 4, ...)$ для цієї формули вираховується з функціональної залежності $\langle V\rangle$ від p або $\langle V^2/c^2\rangle$ від p. Це основне співвідношення, яке використовується в новому методі діагностики для визначення властивостей окремих елементів структурованого середовища за допомогою нелінійних довгих хвиль. Використання запропонованого методу пов'язане з находженням коефіцієнтів $\langle V(Vc^{-2})^n\rangle$ степеневого ряду. Ці коефіцієнти можна найти, знаючи закономірності еволюції хвильових полів. У роботі відмічено декілька методів їх визначення $\langle V(Vc^{-2})^n\rangle$.

Переваги діагностики за допомогою хвильових збурень явні. Особливо це проявляється для середовищ із складною внутрішньою структурою. Універсальним інструментом можна вважати автомодельну хвилю розрідження. На автомодельну хвилю розрідження безпосередньо впливає структура періодичного середовища. Детально описаний спосіб знаходження коефіцієнтів $\langle V(Vc^{-2})^n\rangle$ з еволюції хвилі розрідження.

Вивчалося питання про точність опису структури середовища скінченним рядом (14). Доведено, що такий ряд наближує шукану функцію ступінчатою функцією, тобто середовище апроксимується шаруватим середовищем. Для того, щоб відтворити структуру середовища за допомогою N шарів, що періодично повторюються, потрібно знати $2N-1$ коефіцієнтів $\langle V(Vc^{-2})^n \rangle$. На мал. 6 подані шаруваті середовища, що найкращим чином описують відоме наперед середовище $Vc^{-2} = 0.2 + 0.8(1-\zeta)^2$.



мал. 6

Висновки

1. Теоретично та експериментально досліджені нелінійні довгохвильові збурення в середовищах із релаксуючою просторовою структурою. Розроблено асимптотичну усереднену модель таких середовищ, що узагальнює одношвидкісні континуальні моделі. Показано, що система рівнянь — інтегродиференційна, а середовище не описується у термінах усереднених характеристик.

2. Виведено нове нелінійне еволюційне рівняння для високочастотних хвиль в однорідному релаксуючому середовищі. Найдено стаціонарні періодичні розв'язки. Вивчена взаємодія відокремлених хвиль. Проаналізовано існування петлеподібних розв'язків для еволюційного рівняння з дисипацією.

3. Вперше знайдено аналітичне перетворення, яке зв'язує системи рівнянь, що описують рух газу та двофазного газоутримуючого середовища з довільним початковим вмістом нестисливої фази.

4. Запропоновано чисельно-асимптотичний метод розв'язування усереднених рівнянь, що описують хвилі в релаксуючому середовищі з мікроструктурою, який дозволив подолати основну трудність початкової задачі. Твердження, що на акустичному рівні середовище зі структурою

може моделюватися однорідним середовищем з дисперсно-дисипативними властивостями, строго математично доведене.

5. Доведено, що структура середовища завжди збільшує нелінійні ефекти довгих хвиль. Проаналізовано особливості усереднених ударно-хвильових течій. Показано, що відома модель Ляхова для багатокомпонентних середовищ є окремим випадком асимптотичної усередненої моделі.

6. Запропоновано новий метод діагностики властивостей елементів структури середовища довгими нелінійними хвилями. Наведено алгоритм, в якому середовище, що діагностується, наближено подається шаруватим періодичним середовищем.

7. Розроблено пакет програм для чисельних розрахунків розповсюдження ударної хвилі в релаксуючому середовищі. Обгрунтовано, що більш швидке затухання ударної хвилі відносно газу пов'язане з незворотніми процесами за ударним фронтом. Для ударно-хвильових течій з тепловою релаксацією розраховано величину затухання тиску, імпульс, швидкість розповсюдження ударної хвилі від повноти перебігу обмінних процесів, теплофізичних властивостей середовища, а також потужності енергоджерела.

8. Проведено експеримент для визначення затухання ударної хвилі, що генерується реальним джерелом енергії в газорідинній піні. Зазначається, що розповсюдження ударної хвилі описується моделлю із запропонованою тепловою релаксацією. Чисельний розрахунок дає кількісні значення параметрів ударних хвиль у газорідинному середовищі пінної структури.

9. Розв'язана практична задача розробки теоретичних основ проектування мобільних засобів локалізації вибухових хвиль в технологічних роботах з використанням газорідинних середовищ.

Основні матеріали дисертації опубліковані в таких роботах

1. Vakhnenko V.A. Solitons in a nonlinear model medium // J.Phys.A: Math.Gen., 1992, v.25, N15, p.4181–4187.

2. Вахненко В.О., Даниленко В.А., Куліч В.В. Хвильові процеси в періодичному релаксуючому середовищі // Доп.АН УРСР, 1991, N4, с.93–96.

3. Вахненко В.А., Даниленко В.А., Кулич В.В. Осредненное описание ударно–волновых процессов в периодических средах // Мат.моделирование, 1992, N12, с.33–34.

4. Вахненко В.А., Даниленко В.А., Кулич В.В. Осредненное описание ударно–волновых процессов в периодических средах // Хим.физика, 1993, т.12, N3, с.383–389.

5. Вахненко В.А., Даниленко В.А., Кулич В.В. Осредненное описание волновых процессов в геофизической среде // Геофизический журнал, 1993, N6, с.66–74.

6. Вахненко В.А., Кудинов В.М., Паламарчук Б.И. О влиянии тепловой релаксации на затухание сильной ударной волны в двухфазной среде // Прикладная механика, 1982, т.18, N12, с.91–97.

7. Вахненко В.О., Кудінов В.М., Паламарчук Б.І. Аналогія руху двофазного середовища, яке містить нестисливу та газову фази, з рухом газу // Доп.АН УРСР, сер.А, 1983, N6, с.21–22.

8. Вахненко В.А., Кудинов В.М., Паламарчук Б.И. К вопросу о затухании сильных ударных волн в релаксирующих средах // ФГВ, 1984, N1, с.105-111.

9. Вахненко В.А., Кулич В.В. Длинноволновые процессы в периодической среде // ПМТФ, 1992, N6, с.49–56.

10. Вахненко В.А., Паламарчук Б.И. Описание ударно-волновых процессов в двухфазных средах, содержащих несжимаемую фазу // Журн. ПМТФ, 1984, N1, с.113–119.

11. Вахненко В.А., Паламарчук Б.И. Эволюция сильной ударной волны в среде с тепловой релаксацией // Прикл.механика, 1986, N3, с.78–84.

12. Довбыш С.Г., Вахненко В.А., Паламарчук Б.И. Локализация ударных волн и шумового эффекта // Вестник ВНИИЖТ, 1984, N12, с.52–55.

13. Кудинов В.М., Паламарчук Б.И., Вахненко В.А. Затухание сильной ударной волны в двухфазной среде // ДАН СССР, 1983, т.272, N5, с.1080–1083.

14. Паламарчук Б.И., Вахненко В.А., Черкашин А.В. Воздушные ударные волны при сварке и резке взрывом и методы их локализации // Автоматическая сварка, 1988, N2, с.69–72.

15. Brizhik L.S., Vakhnenko A.A., Gaididei Yu.B., Vakhnenko V.A. Solitons generation in semi-infinite molecular chains // Physics stat.sol(b), 1988, v.146, N2, p.606–612.

16. Vakhnenko O.O. Vakhnenko V.O. Physically corrected Ablowitz–Ladik model and its application to the Peierls–Nabarro problem // Phys.Letters A, 1995, v.196, N5-6, p.307-312.

17. Вахненко В.А. Математическая постановка и метод расчета на ЭВМ сильной стадии взрыва в релаксирующих средах // Кинетика и механизмы физико–химических процессов. — Черноголовка: ОИХФ, 1981, с.69–71.

18. Вахненко В.А. Расчет сильного взрыва в релаксирующей среде с временной зависимостью показателя адиабаты // Применение энергии взрыва в сварочной технике. - Киев: ИЭС, 1983, с.131–138.

19. Вахненко В.А. Высокочастотные возмущения типа солитонов в релаксирующих средах // Акустика неоднородных сред. — 1992. — Вып.105, с.101–109.

20. Вахненко В.А. Периодические решения мóдельного эволюционного уравнения волновой динамики // Моделирование динамики деформируемых сред. — Киев: Наук.думка, 1993, с.52–57.

21. Вахненко В.А. Сопоставление асимптотической модели с моделью Ляхова для сред регулярной структуры // Акустика неоднородных сред. — 1994. — Вып.110, с.71–76.

22. Вахненко В.А., Кулич В.В. Осреднение процессов в периодических средах с наличием релаксации // Краевые задачи мат.физики. — Киев: Наук.думка, 1990, с.118–120.

23. Вахненко В.А., Кулич В.В. Эволюция длинных волн в периодических средах // Акустика неоднородных сред, 1992. — Вып.105, с.95–101.

24. Вахненко В.А., Кулич В.В. Численно–асимптотический метод описания процессов в периодических средах // Моделирование динамики деформируемых сред. — Киев: Наук.думка, 1993, с.57–61.

25. Вахненко В.А., Мукоид В.П. Динамическое уравнение состояния газосодержащей среды при ударно–волновых возмущениях // Краевые задачи мат.физики, 1990, с.110–117.

26. Вахненко В.А., Паламарчук Б.И. Начальная стадия сильного взрыва в релаксирующей среде с временной зависимостью показателя адиабат // Сварка и резка взрывом. — Киев: ИЭС, 1981, с.97–104.

27. Вахненко В.А., Паламарчук Б.И., Черкашин А.В. Методы прогнозирования действия воздушных ударных волн на остекление при технологических взрывах // Сварка, резка и обработка сварных соединений взрывом. — Киев: ИЭС, 1987, с.145–155.

28. Кудинов В.М., Паламарчук Б.И., Вахненко В.А., Малахов А.Т., Черкашин А.В. Локализация действия взрыва двухфазными средами при обработке металлов взрывом // Труды II Совещ. по обработке металлов взрывом. Новосибирск, 1981, с.213–215.

29. Кудинов В.М., Паламарчук Б.И., Вахненко В.А., Малахов А.Т., Черкашин А.В. Об эффективности затухания ударных волн в релаксирующих средах // Сб.докладов V Межд. симп. по обработке металлов взрывом. — ЧССР, Готвальдов, 1982, с.349–356.

30. Кудинов В.М., Паламарчук Б.И., Петушков В.Г., Малахов А.Т., Вахненко В.А. Мобильные средства защиты при металлообработке взрывом // Межд. симп. по использованию энергии взрыва. — ЧССР, Готвальдов, 1985, с.490–494.

31. Паламарчук Б.И., Вахненко В.А., Черкашин А.В., Лебедь С.Г. Влияние релаксационных процессов на затухание ударных волн в водных пенах // Сб.докладов IV Межд. симп. по обработке металлов взрывом. — ЧССР, Готвальдов, 1979, с.398–408.

32. Паламарчук Б.И., Вахненко В.А., Лебедь С.Г., Черкашин А.В. Влияние релаксационных процессов на затухание ударных волн в водных пенах // Сварка и резка взрывом. — Киев: ИЭС, 1979, с.97–110.

33. Паламарчук Б.И., Вахненко В.А., Черкашин А.В., Малахов А.Т. Воздействие ударных волн на окружающую среду при ведении взрывных работ // Межд. симп. по применению энергии взрыва. — ЧССР, Пардубице, 1988, с.529–534.

34. Паламарчук Б.И., Кудинов В.М., Вахненко В.А., Лебедь С.Г., Влияние объемной доли конденсированной фазы на параметры гетерогенной детонации в дисперсных средах // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. — Черноголовка, 1980, с.92–96.

35. Kudinov V.M., Palamarchuk B.I., Vakhnenko V.A., Cherkasin A.V., Lebed S.G., Malakhov A.T. Relaxation Phenomena in a Foamy Structure // Shock Waves, Explosions, and Detonations. — New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1983, p.96–118.

36. Алиев Н.А., Богатырев П.Б., Вахненко В.А. и др. Способ гашения ударных волн в жидкости // А.с. N 1062966 от 22.08.83г.

37. Петушков В.Г., Паламарчук Б.И., Вахненко В.А., Малахов А.Т. и др. Способ защиты окружающей среды при обработке металлов взрывом // А.с. N 1524283 Кл.В 21 26/08 от 22.07.1989.

38. Вахненко В.А. Периодические коротковолновые возмущения в релаксирующей среде / АН УССР, Ин-т геофизики. — Препр. — Киев, 1991. — 20 с.

39. Вахненко В.А., Даниленко В.А., Кулич В.В. Элементы теории самоорганизации и нелинейных волновых процессов в природных средах со структурой / АН УССР. Ин-т геофизики. — Препр. — Киев, 1991. — 44 с. (Переклад: Danilenko V.A., Kulich V.V., Vakhnenko V.A. Elements of self-organization and nonlinear wave processer in natural with structure. Preprint Institute of Geophysics, AS Ukraine, Kiev, 1993, 47p.).

40. Вахненко В.А., Кулич В.В. Осредненные уравнения волновой динамики периодической релаксирующей среды. / АН УССР. Ин-т геофизики. — Препр. — Киев, 1991. — 28 с.

41. Vakhnenko V.A. High–friquency waves in nonlinear relaxing medium // Nonequilibrium processes and their application, Minsk, 8–13 Sept. 1994, p.73.

42. Vakhnenko V.A. Danylenko V.A. Modelling of nonlinear waves in media with structure // Annales Geophysicae, Supplement v.13, 1995.

43. Palamarchuk B.I., Vakhnenko V.A. Analysis of shock wave damping in two–phase media optinal content of incompressible phase // 9^{th} International Colloquium on dynamics of explosions and reactive systems. (Poitiers, 3–9 juilled, 1983). E.N.S.M.A. — Universiti de Poitiers, 1983, p.41.

Вахненко В.А. Моделирование нелинейных длинноволновых процессов в многокомпонентных средах.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико–математических наук по специальности 01.04.17 - химическая физика, физика горения и взрыва, Одесский государственный университет, Одесса, 1995.

Защищается 43 научные работы, которые содержат теоретические и экспериментальные исследования по нелинейной волновой динамике сред с пространственной релаксирующей микроструктурой. Построена асимптотическая осредненная модель динамического поведения структурированной среды, установлена аналогия движения газа и газосодержащей среды, разработан метод диагностики свойств среды длинными нелинейными волнами, исследовано новое эволюционное нелинейное уравнение. Решена практическая задача по созданию научных основ проектирования мобильных средств локализации взрыва при технологических работах на основе газожидкостных сред.

Vakhnenko V. A. The modelling of nonlinear long-wave processes in multicomponent media.

The dissertation to achieve the degree of Doctor of physic-mathematical sciences on speciality 01.04.17 - chemical physics, physics of combustion and of explosion, Odessa State University, Odessa, 1995.

43 scientific works are being defended which contain theoretical and experimental investigations on the nonlinear wave dynamics of media with space relaxing microstructure. The asymptotic averaged model of a dynamic behaviour of structure medium is elaborated, the motion analogy of gas and of gas-containing medium is established, the diagnostics method of the medium properties by means of long nonlinear waves is developed, the new evolution nonlinear equation is investigated. The practical problem on the creation of the science principles to project the mobile means on the basis of gas-liquid medium to localize a technological explosion is resolved.

Ключові слова: нелінійні хвилі, багатокомпонентні середовища, вибух, діагностика, релаксація, еволюційне рівняння.

Підп. до друку 25.09.05 Формат $60\times84^{1}/_{16}$.
Папір друк. № 3. Спосіб друку офсетний. Умовн. друк. арк. 1,63.
Умовн. фарбо-відб. 1,74. Обл.-вид. арк. 2,0.
Тираж 100. Зам. № 5-4695

Фірма «ВІПОЛ»
252151, Київ, вул. Волинська, 60.