

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗАЄЦЬ ЮЛІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 539.3

**ЕКРАНУВАННЯ РОЗРИВНИХ ХВИЛЬ В НЕОДНОРІДНИХ
ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ІЗОТРОПНИХ ПРУЖНИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

05.23.17 – будівельна механіка

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі вищої математики Національного транспортного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Гуляєв Валерій Іванович,
Національний транспортний університет,
завідувач кафедри вищої математики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гайдайчук Віктор Васильович,
Київський національний університет
будівництва і архітектури,
завідувач кафедри теоретичної механіки

кандидат технічних наук
Батура Анатолій Сергійович
Інститут проблем міцності
ім. Г.С. Писаренка НАН України,
старший науковий співробітник
відділу фізичних основ міцності і руйнування

Захист відбудеться „_____” _____ 2015 року о ____годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02 у Національному транспортному університеті за адресою: 01010, м. Київ, вул. Суворова, 1, ауд. 333.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного транспортного університету за адресою: 01103, м. Київ, вул., Кіквідзе, 42.

Автореферат розісланий „_____” _____ 2015 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.І. Каськів

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Останнім часом у світі зростає кількість техногенних аварій, що спричиняють руйнування цивільних і промислових об'єктів та мають значні екологічні наслідки. Найнебезпечнішими з них є землетруси, які займають перше місце у світі за заподіяною економічною шкодою і кількістю постраждалих. Проте спеціалістами досі до кінця не з'ясовані причини їх виникнення та не розроблені методи прогнозування місць локалізації їхніх осередків, а також інтенсивності та часу їх реалізації. Тому один із способів зменшення ризиків від згенерованих землетрусами сейсмічних хвиль для населення, житлових масивів і навколишнього середовища може бути пов'язаний із застосуванням методів будівельної механіки для аналізу загальних закономірностей поширення таких хвиль та розробкою способів захисту від них.

Помічено, що інтенсивність сейсмічних дій та місце їх локалізації в значній мірі визначаються можливістю перебудови, фокусування та відбивання таких хвиль на неперервних та шаруватих неоднорідностях тектонічних середовищ. Тому шляхом моделювання динамічних явищ, пов'язаних із дифракцією ударної хвилі на тектонічних неоднорідностях, в обраному геологічному регіоні можна виділити зони з найменшим сейсмічним ризиком для стратегічно важливих об'єктів. При цьому заслуговують на увагу питання математичного моделювання ефектів екранування цих споруд та об'єктів від ударної дії сейсмічних (зокрема і розривних) хвиль на природних або штучно створених неоднорідностях середовищ, що деформуються.

У зв'язку з тим, що такі динамічні явища мають чітко виражений ударний характер, то перед рухомою поверхнею фронту хвилі середовище перебуває в недеформованому стані, за цією поверхнею функції напружень та деформацій мають скінченні значення, а безпосередньо на самій поверхні (в рамках теорії ідеальної пружності) вони зазнають розривів. Тому для таких процесів виявляються малоефективними класичні методи будівельної механіки, пов'язані з постановкою крайових задач, і найбільш повну інформацію про еволюціонуючий фронт ударної хвилі й інтенсивність імпульсу, що переноситься нею в кожній точці фронту, можна отримати за допомогою нульового наближення променевого методу.

Оскільки на сьогодні ці явища проаналізовано недостатньо, можна вважати, що питання вивчення загальних закономірностей перетворення (екранування) розривних (ударних) хвиль у пружних анізотропних середовищах з неперервними та розривними неоднорідностями становлять **актуальну** наукову задачу будівельної механіки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри вищої математики Національного транспортного університету, а також у рамках науково-технічної роботи за державним замовленням МОН України «Розробка технологій безаварійного буріння надглибоких вертикальних і криволінійних нафтових та газових свердловин» (2008–2009 рр., номер державної

реєстрації 0108U006054) і держбюджетної теми № 11 «Математичне моделювання процесів безаварійного буріння в сланцевих породах і шельфових зонах морських акваторій» (2012–2014 рр., номер державної реєстрації 0112U000137).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає в постановці і розв’язанні нових задач будівельної механіки про дифракцію розривних хвиль (слабких ударних) на природних та штучних, неперервних та розривних неоднорідностях в ізотропних та анізотропних хвиле провідних середовищах з метою вивчення ефекту їх екранування та гасіння.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати таке:

- здійснити огляд вітчизняної та зарубіжної науково-технічної літератури з проблем поширення, перетворення та екранування ударних, зокрема сейсмічних, хвиль, згенерованих в тектонічних структурах з неперервними та розривними неоднорідностями;
- розробити математичну модель поширення розривних хвиль у неоднорідних пружних середовищах зі змінними механічними параметрами;
- провести комп’ютерне моделювання впливу зміни основних механічних параметрів неоднорідного анізотропного пружного середовища на перебудову сітки хвильових променів та фронтів;
- побудувати основні співвідношення кінематики та динаміки поширення слабких ударних хвиль у пружних середовищах із шарувато-розривними неоднорідностями їхніх механічних параметрів;
- дослідити зміни інтенсивності розривних хвиль під час їх поширення в шарувато-неоднорідних пружних середовищах.

Об’єктом дослідження є явище поширення нестационарних розривних (слабких ударних) хвиль, збурених в неоднорідних ізотропних та трансверсально-ізотропних пружних середовищах.

Предметом дослідження є ефекти перетворення та екранування розривних хвиль на неперервних та розривних неоднорідностях ізотропних і трансверсально-ізотропних пружних середовищ.

Методи дослідження. Для дослідження динамічних явищ поширення розривних хвиль використовується нульове наближення променевого методу. Зокрема, для постановки задачі геометричної побудови системи променів та фронтів застосовується рівняння ейконала, а задача визначення поля напружень у деякому околі поверхні хвильового фронту розв’язується за допомогою системи транспортних рівнянь. Інтегрування побудованих розв’язувальних звичайних диференціальних рівнянь здійснювалось методом Рунге – Кутта.

Достовірність результатів визначається строгістю та коректністю постановок вихідних задач; вибором високоточного методу числового інтегрування диференціальних рівнянь; тестовою перевіркою збереження повної енергії деформівної системи при перетворенні хвиль на неоднорідностях пружного середовища та якісною узгодженістю результатів розрахунків з даними, отриманими іншими авторами при граничних значеннях характерних параметрів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Із застосуванням основних положень нульового наближення променевого методу поставлені нові задачі перетворення та екранування розривних (слабких ударних) хвиль у пружних середовищах з неперервно-змінними та шарувато-неоднорідними параметрами пружності.

2. Вперше поставлена і розв'язана задача перебудови системи променів та рухомого фронту в середовищах із майже шаруватою структурою, при цьому коефіцієнти механічних параметрів залишаються диференційованими функціями. Показано, що такий шар неоднорідності щільності середовища може відігравати роль екрана завдяки здатності до відхилення хвильових променів.

3. Поставлена і розв'язана задача поширення слабких ударних хвиль у шарувато-неоднорідних середовищах із розривними функціями механічних властивостей. Досліджені явища перетворення плоскої розривної хвилі паралельним та клиноподібним шарами з відмінними механічними властивостями та випадки сполучення середовищ із можливістю їх проковзування на площині розділу, а також без такої можливості.

4. Показано, що поширення хвилі в шарувато-неоднорідному середовищі супроводжується виникненням хвиль нової поляризації (в загальному випадку всіх трьох типів), тоді як у випадку її розповсюдження в середовищі зі змінними механічними параметрами відбувається лише поворот вектора поляризації.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертації можуть бути використані у вигляді комп'ютерного математичного забезпечення для числового дослідження явищ поширення та перетворення еволюціонуючих фронтів розривних (слабких ударних) хвиль, які генеруються в анізотропних пружних середовищах із неперервними та розривними неоднорідностями.

Отримані в дисертації результати наукових досліджень використовуються ТОВ «ПАСДОРСЕРВІС» при проектуванні об'єктів промислового призначення з метою виявлення сейсмонебезпечних для будівництва зон та захисту проєктованих об'єктів від впливу динамічних хвиль, збурених природними або техногенними чинниками.

Розроблені в дисертаційній роботі методи комп'ютерного моделювання динамічних процесів у пружних середовищах запроваджені в навчальний процес на кафедрі опору матеріалів та машинознавства Національного транспортного університету при викладанні курсу з будівельної механіки транспортних споруд.

Особистий внесок здобувача. Основні результати досліджень були отримані автором самостійно. Дисертанту належать аналітичні викладки, числова реалізація на ПК задач механіки та аналіз отриманих результатів. У роботах [1–4, 8, 9, 16, 24] В.І. Гуляєв брав участь у постановці задач та обговоренні отриманих результатів. У роботах [2, 12–14, 22] співавтором Г.М. Іванченком надана допомога в розробленні та налаштуванні обчислювального комплексу для проведення комп'ютерного моделювання досліджуваних процесів. У роботах [1, 3–8, 12, 14–16, 24] співавтор П.З. Луговий [1, 3, 4, 8, 24], співавтор О.В. Ващіліна [5–7, 12, 14–16] і співавтор І.В. Лебедева [15] брали участь в обговоренні

одержаних результатів. У монографії [1] співавтори В.І. Кошель та В.Г. Кравець надавали наукові консультації в процесі написання тексту з питань застосування отриманих результатів у практиці проведення гірських робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційних досліджень були оприлюднені на таких міжнародних конференціях: Miedzynarodowa Konferencja «IX Szkoła Geomechaniki 2009» (Polska, Gliwice – Ustroń, 23–26 października, 2009); International Conference «Dynamical system modelling and stability investigation» (Ukraine, Kyiv, May, 27-29, 2009); International Conference “Dynamical system modelling and stability investigation” (Ukraine, Kyiv, May, 29–31, 2013); 14-та Міжнародна науково-практична конференція “Ринок послуг комплексних транспортних систем та прикладні проблеми логістики” (Україна, Київ, жовтень 2012 р.); Міжнародна наукова конференція “Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів” (Україна, Рівне, 19–22 лютого 2015 р.); XII Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові (Україна, Львів, 28–29 травня 2015 р.)

Результати дисертаційної роботи доповідались також на 72-й науково-практичній конференції Київського національного університету будівництва і архітектури (Україна, Київ, 22–25 березня 2011 р.) та на 67-й і 70-й наукових конференціях Національного транспортного університету (Україна, Київ, 2011, 2014 рр.).

Публікації. Основний зміст роботи викладено у 23 публікаціях: з них 1 монографія [1], 1 стаття [2] в закордонному журналі, 2 статті [3, 4] у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз і перекладені англійською мовою видавництвом «Springer», 11 робіт [5–15] опубліковано у фахових виданнях, 2 [16, 23] - у збірниках матеріалів міжнародних конференцій і 4 [17, 19, 21, 22] — у збірниках тез міжнародних конференцій, 2 [18, 20]— у збірниках тез наукових конференцій Національного транспортного університету.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатку та списку використаних джерел (201 найменування). Вона містить 125 сторінок основного тексту, 4 таблиці, 101 рисунок. Повний обсяг дисертації складає 222 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить загальну характеристику роботи. У ньому обґрунтована актуальність вибраної теми, сформульовані мета та задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів дисертації. Наведено відомості про апробацію та публікації результатів досліджень.

У першому розділі виконано аналіз теоретичних і прикладних аспектів проблем механіки поширення хвиль у пружних середовищах, дано огляд представлених у науковій літературі результатів дослідження. Також показано, що явище удару і спровоковані ним ефекти розповсюдження ударних (розривних) хвиль у деформівних середовищах широко трапляються в природі та техніці,

наприклад, у машинах для штампування та кування деталей, руйнування гірських порід, бетонних покриттів, занурення паль та ін. Однак найбільших руйнувань і трагічних наслідків завдають землетруси.

Зауважено, що тільки протягом року на Землі відбувається до мільйона землетрусів, але людство так і не зрозуміло до кінця причин їх виникнення і не навчилося точно прогнозувати місця локалізації їхніх осередків, а також силу і час їх реалізації. Тому один із способів зменшення ризиків для населення і навколишнього середовища може бути пов'язаний зі з'ясуванням загальних закономірностей перебігу землетрусів та розробкою способів захисту від них.

Помічено, що інтенсивність сейсмічних дій та місце їх локалізації в значній мірі визначаються можливістю перебудови, фокусування та відбивання сейсмічних хвиль на неперервних та шаруватих неоднорідностях тектонічних середовищ. Шляхом моделювання динамічних явищ, пов'язаних із дифракцією ударної хвилі на тектонічних неоднорідностях, в обраному геологічному регіоні можна виділити зони з найменшим сейсмічним ризиком для стратегічно важливих об'єктів. При цьому важливими також є питання теоретичного моделювання ефектів екранування для цих споруд та об'єктів від ударної дії сейсмічних (зокрема і розривних) хвиль на природних або штучно створених неоднорідностях середовищ, що деформуються.

Встановлено, що складність розглянутих процесів поширення розривних хвиль у неоднорідних пружних середовищах зумовлена проблемами використання традиційних методів будівельної механіки для теоретичного моделювання ефектів дифракції хвиль на неоднорідностях. Наведено аналіз праць дослідників, які зробили істотний внесок у розвиток цієї проблеми. Серед них В.Г. Андрєєв, І.В. Андронов, Дж.Д. Ахенбах, Л.М. Бреховських, А.О. Бурєнін, А.О. Ватульян, В.В. Гайдайчук, Є.В. Глушков, О.Я. Григоренко, В.Т. Грінченко, О.М. Гузь, О.Ю. Жарій, Б.-К. Жен, М.Ш. Ісраїлов, А.С. Космодам'янський, В.Д. Кубенко, І.А. Лоза, Л.Ю. Лу, В.В. Мелешко, А.П. Мойсеєнок, Л.А. Молотков, А.А. Мухін, Ю.О. Россіхін, І.Т. Селезов, Д.В. Тарлаковський, А.Г. Фат'янов, Х. Фелсен, Ф. Фрідлендер, М.Н. Bidgoli, M.D. Long, P.G. Silver, V. Kahya, T.S. Ozsahin, R.D. Borchardt, G.F. Duff, E.E. Franco, J.C. Adamowski, S. Guo, A.N. Norris, D.M. Pai, R.G. Payton, A. Birinci, R. Erdol, S.J. Arif, J.F. Dolan, M.A. Grinfel'd, P. McIver, G.R. Wickham, L. Tang, S. Liu, P.K. Khan, P.P. Chakraborty, T. Tsuji, R. Kamei, R.G. Pratt та інші. Зокрема питання дифракції пружних хвиль на різних видах неоднорідностей вивчали П.В. Краукліс, С.В. Кузнєцов, Г.М. Голошубін, М.П. Малєжик, И.С. Чернишенко, Л.А. Молотков, В.А. Свекло, D.D. Barkan, G. Ding, T.W. May, B.A. Bolt, R.D. Woods та інші вчені. Прикладні аспекти екранування ударних хвиль за допомогою інженерних підходів розглянуті в роботах Я.Л. Кранцфельда, С.В. Кузнєцова, В.В. Орехова, А.К. Юсупова, S. Brule, A. Gurtis, V. Kahya та інші.

Показано, що для дослідження поширення та перетворення розривних (слабких ударних) хвиль найефективнішим є променевий метод. Основи цього методу для розв'язку задач фізики розробив нідерландський вчений Peter Debye.

Щодо задач поширення зазначених хвиль у пружних середовищах цей метод отримав розвиток у роботах В.М. Баби́ча та Г.І. Петра́шеня, а в українській школі механіків варто відзначити праці Ю.М. Поді́льчука та Ю.К. Рубцо́ва. За допомогою променевого методу в роботах В.І. Гуля́єва, Г.М. Іванче́нка, П.З. Луго́вого та О.В. Якове́нко досліджено питання фокусування та розсіювання слабких ударних хвиль пружними лінзами, ефекти утворення каустик, а також явища повного внутрішнього відбиття. Водночас поза їхньою увагою залишились проблеми екранування цих хвиль на неперервних та розривних неоднорідностях.

Відмічено, що, незважаючи на великий обсяг наукових досліджень з проблем дифракції хвиль на неоднорідностях пружних ізотропних середовищ, отримані результати здебільшого стосуються простих випадків конфігурації хвильових фронтів і поверхонь неоднорідностей, на яких вони дифрагують. Однак практично недослідженими залишаються питання перебудови та взаємодії хвильових фронтів складної геометрії на неперервних та розривних неоднорідностях, а ці явища часто трапляються в сейсмології, тому тема дисертаційної роботи, спрямована на дослідження дифракції розривних хвиль неперервними та розривними неоднорідностями анізотропних середовищ з метою вивчення ефекту їх екранування та гасіння, є актуальною.

У **другому розділі** поставлено задачу теоретичного моделювання поширення слабких ударних хвиль в анізотропних пружних середовищах. Вона ґрунтується на використанні системи диференціальних рівнянь динаміки неоднорідного анізотропного середовища у формі

$$\sum_{k,p,q=1}^3 \lambda_{ik,pq} \frac{\partial^2 u_q}{\partial x_k \partial x_p} - \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + \sum_{k,p,q=1}^3 \frac{\partial c_{ik,pq}}{\rho \partial x_k} \frac{\partial u_q}{\partial x_p} = 0, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (1)$$

де $\lambda_{ik,pq} = c_{ik,pq} / \rho$ – приведені коефіцієнти тензора пружних сталих;

u_i - складові вектора **u** пружних переміщень;

x_i - декартові координати;

t - час;

$c_{ik,pq}$ - компоненти тензора пружних сталих;

ρ - густина середовища.

Тензор пружних сталих $c_{ik,pq}$ визначається матрицею $(C_{\alpha\beta}) = \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{pmatrix}$, в якій

$$A = \begin{pmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda - l \\ \lambda & \lambda + 2\mu - p & \lambda - l \\ \lambda - l & \lambda - l & \lambda + 2\mu \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \mu - m & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu - m \end{pmatrix},$$

де l , m , p - параметри анізотропії, які відрізняють середовище від ізотропного з коефіцієнтами Ламе λ і μ .

Дослідження явищ поширення розривних хвиль за допомогою системи (1) базується на застосуванні інтерпретації Х. Гюйгенса переміщення хвильового фронту. Згідно з нею, в кожний момент часу t будь-яка точка на поверхні фронту в ізотропному середовищі є джерелом сферичної хвилі, яка в кожній точці поширюється вздовж радіального променя з відомою швидкістю v (рис. 1).

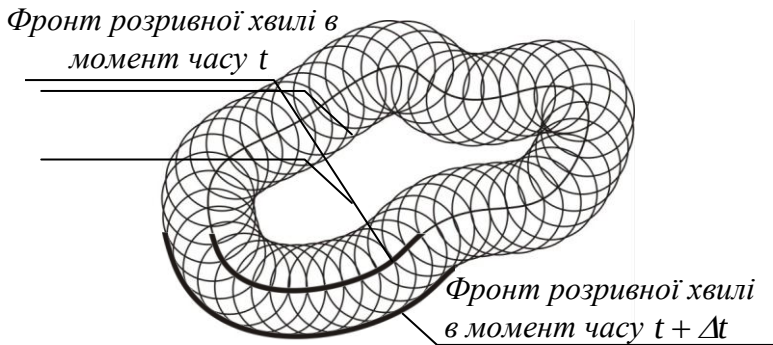


Рисунок 1 - Інтерпретація Х. Гюйгенса поширення фронту розривної хвилі

Через проміжок часу Δt обвідна елементарних сферичних фронтів утворить новий фронт глобальної розривної хвилі, яка буде продовжувати рухатись таким же чином. Така інтерпретація дала змогу сформулювати променеву теорію поширення розривних хвиль в однорідних ізотропних середовищах. У цих випадках промені

залишаються прямолінійними, а швидкості розповсюдження хвиль у всіх напрямках однакові. Основи цієї теорії були запропоновані Р. Дебюе в оптиці однорідних середовищ. Пізніше Ю.О. Кравцов та Ю.І. Орлов узагальнили її для неоднорідних оптичних систем.

Застосування променевого методу до задач динамічної теорії пружності є досить трудомістким, оскільки для цього потрібно вивчати хвилі різної поляризації з урахуванням їх дифракції на різних неоднорідностях. Задача ще більше ускладнюється, якщо пружне середовище є анізотропним. У цьому випадку під час поширення хвиль їхні вектори поляризації змінюють свій напрям, промені перестають бути прямолінійними, самі хвилі стають квазіпоzdовжніми та квазіпоперечними, а на хвильових фронтах утворюються геометричні особливості, на яких інтенсивності напружень, за ідеальною теорією пружності, можуть прямувати до нескінченності.

У цій дисертації для дослідження таких ефектів застосовується нульове наближення променевого методу, за допомогою якого аналізуються перебудови хвильових фронтів під час їх руху та обчислюються значення напружень на їхніх поверхнях.

Розглянемо довільне анізотропне пружне середовище. Розв'язок хвильового рівняння (1) побудуємо у вигляді плоскої монохроматичної хвилі $\mathbf{u} = \mathbf{A}e^{ik(\mathbf{n}\mathbf{r} - vt)}$ з хвильовим числом k і фазовою швидкістю v , фронтами якої є поверхні постійних фаз $\mathbf{n}\mathbf{r} - vt = \text{const}$, що рухаються зі швидкістю $\mathbf{v} = v\mathbf{n}$ та локально перпендикулярні орту $\mathbf{n}$. Тоді поверхню розриву поля пружних зміщень в анізотропному середовищі можна задати рівнянням

$$\tau(x_1, x_2, x_3) - t = 0, \quad (2)$$

причому функція τ має задовольняти диференціальне рівняння з частинними похідними першого порядку $\sum_{i,k,p,q}^3 \lambda_{ik,pq} p_k p_p A_q^{(r)} A_i^{(r)} = 1$, де $p_k = \partial \tau / \partial x_k = n_k / v^{(r)}(\mathbf{n})$ - компоненти вектора рефракції.

Рівняння (2) є узагальненим рівнянням ейконала для анізотропного середовища. Його розв'язок зводиться до розв'язку характеристичної системи звичайних диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{dx_m}{d\tau} &\equiv \xi_m^{(r)}(\mathbf{n}, x_k) = \sum_{i,p,q}^3 \lambda_{im,pq} p_p A_q^{(r)} A_i^{(r)} \\ \frac{dp_m}{d\tau} &\equiv \eta_m^{(r)}(\mathbf{n}, x_k) = -\frac{1}{2} \sum_{i,k,p,q}^3 \frac{\partial \lambda_{ik,pq}}{\partial x_m} p_k p_p A_q^{(r)} A_i^{(r)}, \quad (m=1, 2, 3) \end{aligned} \quad (3)$$

з початковими умовами $x_m \Big|_{\tau=0} = x_m^0$, $p_m \Big|_{\tau=0} = p_m^0 \equiv \frac{n_m^0}{v_r^0}$, $(m=1, 2, 3)$.

Щоб знайти вектор поляризації $\mathbf{A}$ хвилі та фазову швидкість v потрібно, для обраного напрямку $\mathbf{n}$ розв'язати однорідну систему алгебраїчних рівнянь

$$\sum_{k,p,q}^3 \lambda_{ik,pq} n_k n_p A_q^{(r)} = v_r^2 A_i^{(r)}, \quad (i=1, 2, 3). \quad (4)$$

Прирівнявши до нуля її визначник $\left| \sum_{k,p,q}^3 \lambda_{ik,pq} n_k n_p - v_i^2 \delta_{iq} \right| = 0$, отримуємо

алгебраїчне рівняння третього степеня відносно v^2 з трьома додатними коренями $v_r^2 = v_r^2(\mathbf{n})$, $(r=1, 2, 3)$. Причому $v_1^2(\mathbf{n}) > v_2^2(\mathbf{n}) \geq v_3^2(\mathbf{n})$.

Підставляючи в систему (4) замість v^2 кожне із значень коренів $v_r^2(\mathbf{n})$, отримаємо однозначно розв'язні алгебраїчні системи рівнянь, з яких визначаються складові $A_i^{(r)} = A_i^{(r)}(\mathbf{n})$ векторів поляризації $\mathbf{A}^{(r)}$ квазіпоздовжньої ($r=1$) та квазіпоперечних ($r=2, 3$) хвиль, підпорядковані умові нормування $\sum_{i=1}^3 [A_i^{(r)}]^2 = 1$.

Отримані співвідношення (3) розв'язку рівняння ейконала (2) дають змогу визначити інтенсивність хвилі в околі фронту. Так, співвідношення для визначення величин розривів відповідних функцій на фронтах розривних хвиль будуть мати вигляд

$$\dot{u}_i^{(r)}(0, \alpha, \beta) = \frac{\dot{u}_i^{(r)}(0, \alpha, \beta) \mathbf{A}_i^{(r)}(\tau, \alpha, \beta)}{\mathbf{A}_i^{(r)}(0, \alpha, \beta)} \cdot \sqrt{\frac{1}{L}}, \quad (i, r=1, 2, 3), \quad (5)$$

де величина $L = J(\tau, \alpha, \beta) / J_0(0, \alpha, \beta)$ - геометричне розходження променів.

У загальному випадку розв'язок поставленої задачі може бути реалізований лише із застосуванням обчислювальних методів. У цій роботі система рівнянь (3) інтегрується методом Рунге – Кутта при заданих початкових умовах на контурі

джерела, що ініціює розривну хвилю в результаті прикладання до нього ударного хвильового імпульсу.

Третій розділ присвячений аналізу ефектів послаблення (екранування) та збільшення інтенсивності розривних хвиль у неоднорідних пружних середовищах зі змінними механічними параметрами. Загалом можемо спостерігати неоднорідності пружних середовищ двох типів, для яких функції параметрів системи є неперервними та розривними функціями просторових координат. При поширенні розривних хвиль у першому випадку промені викривляються згідно з рівняннями (3), а хвильові фронти зазнають додаткової трансформації. Оскільки викривлення променів призводить до їх геометричної розбіжності чи збіжності, то цей ефект пов'язаний зі збільшенням чи зменшенням інтенсивності хвиль на їхніх фронтах. Таку дифракцію на неоднорідностях, пов'язану зі зменшенням інтенсивності хвилі, можна інтерпретувати як екранування розривної хвилі в зонах середовищ, в яких промені відхиляються внаслідок їх викривлення на неоднорідностях. У цьому розділі вивчено загальні закономірності перетворення променів та фронтів на неоднорідностях цього типу.

Динамічні властивості неоднорідного трансверсально-ізотропного пружного середовища визначаються функцією ρ його густини та п'ятьма функціями λ , μ , l , m , p його пружних характеристик, які мають відповідати умовам

$$c_{11} > 0, \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{vmatrix} > 0, \dots, |c_{\alpha\beta}| > 0, \quad (6)$$

$$(\lambda + \mu - l)^2 < (\lambda + 2\mu - p)(\lambda + \mu)$$

для забезпечення фізичного змісту задачі.

Згідно з цим були підібрані найпростіші закони зміни цих величин. Так, вважалось, що параметри анізотропії l , m і p можуть змінюватись за квадратичним законом або періодично варіюватись за законом гармонічної функції. Оскільки на характер трансформовування хвиль суттєво впливає зміна акустичної жорсткості середовища, то розглянуто також випадок шарувато-неоднорідного середовища, в якому функція густини приймає ступінчастий вигляд зі згладженими кутами.

На рис. 2 і 3 проілюстровано ефект впливу зміни параметра m за законом $m = (0.1 - 5 \cdot 10^{-6} x_3^2) \mu$ на характер перетворення фронту розривної хвилі. Вважалось, що до сферичного джерела малого радіуса був миттєво прикладений імпульс тиску, який надалі залишався незмінним. Простежується рух фронту збудженої хвилі та напрям хвильових променів. Рис. 2 відповідає випадку ізотропного середовища (m , l і p рівні нулю) з параметрами Ламе $\lambda = 3.41 \cdot 10^9$ Па і $\mu = 1.36 \cdot 10^{10}$ Па. Очевидно, що для такої системи фронти поздовжньої хвилі є сферичними і поширюються зі сталою швидкістю $v = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$. За цими властивостями досліджуване середовище є близьким до гірської породи – пісковика.

Якщо параметрам анізотропії надати значень $m = (0.1 - 5 \cdot 10^{-6} x_3^2) \mu$, $l = 0.3\lambda$, $p = 0.5(\lambda + 2\mu)$, то середовище стає трансверсально-ізотропним і характер поширення в ньому хвильових фронтів від сферичного джерела зазнає суттєвих змін.

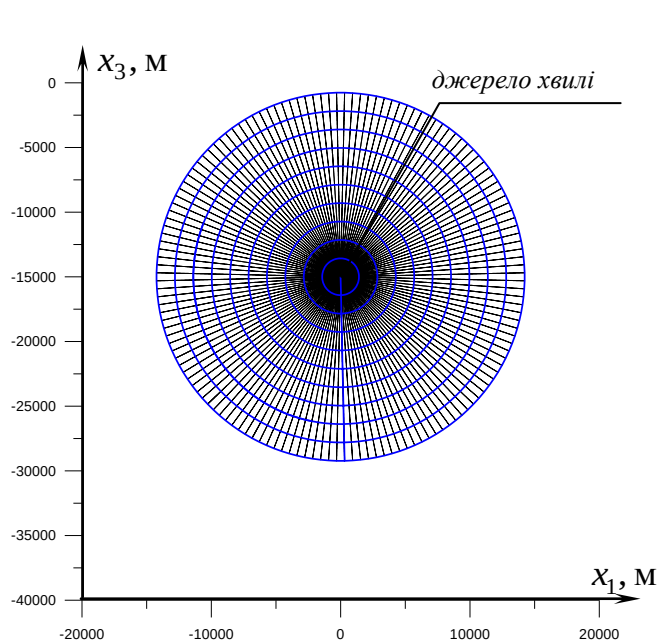


Рисунок 2 – Форма поширення поздовжньої P -хвилі в однорідному ізотропному середовищі

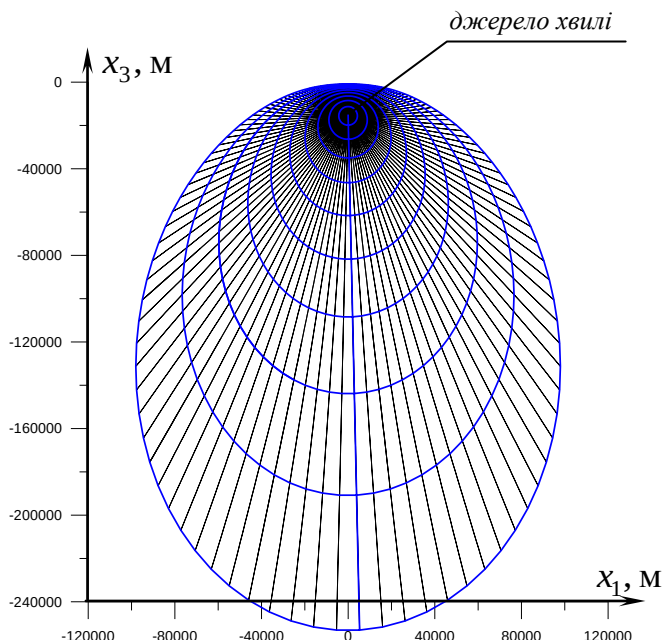


Рисунок 3 – Схема трансформування сітки променів та фронтів qP -хвилі для випадку $m = (0.1 - 5 \cdot 10^{-6} x_3^2) \mu$, $l_0 = 0.3$, $p_0 = 0.5$

Сітка променів і фронтів для цього випадку зображена на рис. 3. Як бачимо, в середовищі такого типу хвильові промені викривляються, змінюють свою орієнтацію у від'ємному напрямі координати x_3 . Завдяки цьому хвильові фронти практично не переміщуються в додатному напрямі цієї координати, що може бути інтерпретовано як ефект екранування цієї хвилі масивом середовища. Таким чином, можемо зробити висновок, що в цьому випадку при поширенні квазіпоздовжньої хвилі в напрямі збільшення параметра m хвильові промені відхиляються від поверхні $x_3 = 0$, що рівноцінно екрануванню хвилі від такої зони.

Вартий уваги випадок, коли середовище є шарувато-неоднорідним за рахунок зміни його густини при сталих значеннях λ , μ , m , l і p . Наприклад, при проходженні хвилею шару зниженої щільності (графік функції $\rho = \rho(x_3)$ для цього випадку зображений на рис. 4, а) промені квазіпоздовжньої хвилі помітно відхиляються, а фронти видовжуються вздовж площини $x_3 = 0$ (рис. 4, б). Що ж до qS -хвилі (рис. 4, в), то тут можемо спостерігати суттєву перебудову її променевої сітки: вона супроводжується зміною обрису фронтового контура та появою каустик.

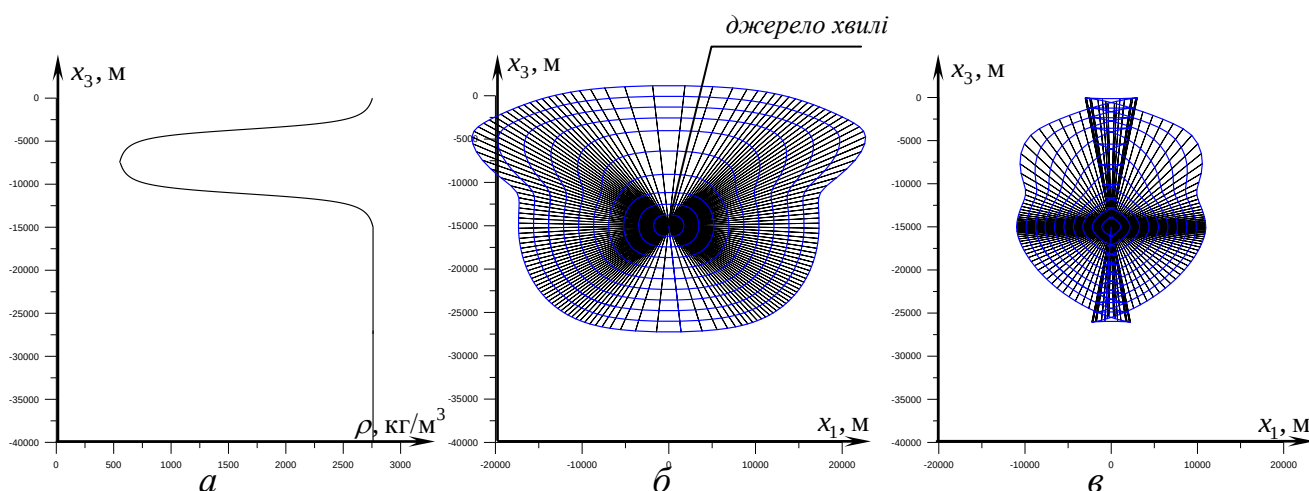


Рисунок 4 – Графік зміни функції густини $\rho(x_3)$ (а) та схеми перебудови променів і фронтів qP - (б) і qS -хвиль (в) в неоднорідному трансверсально-ізотропному середовищі при проходженні хвилею шару зниженої щільності та значеннях $m = 0.1\mu$, $l = 0.3\lambda$, $p = 0.5(\lambda + 2\mu)$

На відміну від попереднього прикладу, обравши тепер закон зміни функції густини $\rho(x_3)$ таким чином, щоб утворився проміжний шар підвищеної щільності (рис. 5, а), спостерігаємо значне зменшення швидкості поширення P - і S -хвиль вздовж додатного напрямку осі Ox_3 в зонах підвищеної густини середовища (рис. 5, б і в).

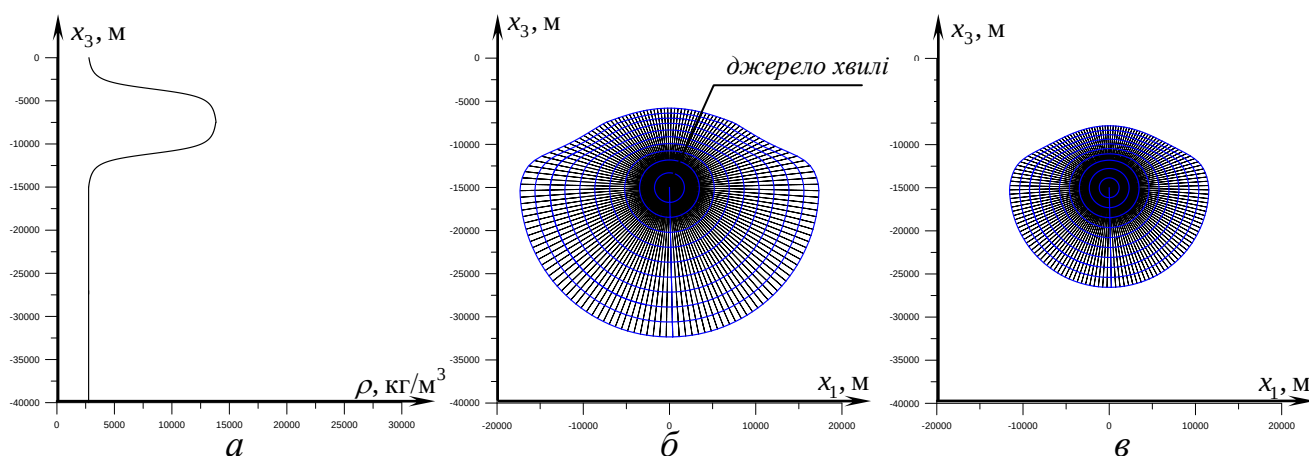


Рисунок 5 – Графік зміни функції густини $\rho(x_3)$ (а) та схеми перебудови променів і фронтів P - (б) і S -хвиль (в) в неоднорідному ізотропному середовищі при проходженні хвилею шару підвищеної щільності

Таким чином, можна зробити висновок, що довільний шар неоднорідності щільності пружного середовища (як підвищеної, так і зниженої порівняно з густиною основного масиву середовища) може відігравати роль екрана, який відхиляє хвильові промені. При цьому екрануючі властивості шару неоднорідності посилюються зі збільшенням різниці значень густини в масиві та шарі.

У **четвертому розділі** розглянуто випадки, коли пружні ізотропні середовища I і II розділені площинами G_1 і G_2 (рис. 6). Властивості середовищ визначаються такими механічними параметрами: $\lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2$ - пружні константи Ламе; ρ_1, ρ_2 - густини. В якості середовищ I і II вибрані найбільш поширені в природі гірські породи.

Нехай у середовищі I на площину G під кутом θ_{1-} падає плоска поздовжня P -хвиля з одиничним значенням розриву поздовжньої швидкості $\dot{u}_{1-}$. Прослідкуємо, як ця хвиля проникає в середовище II та які інтенсивності мають новосформовані хвилі.

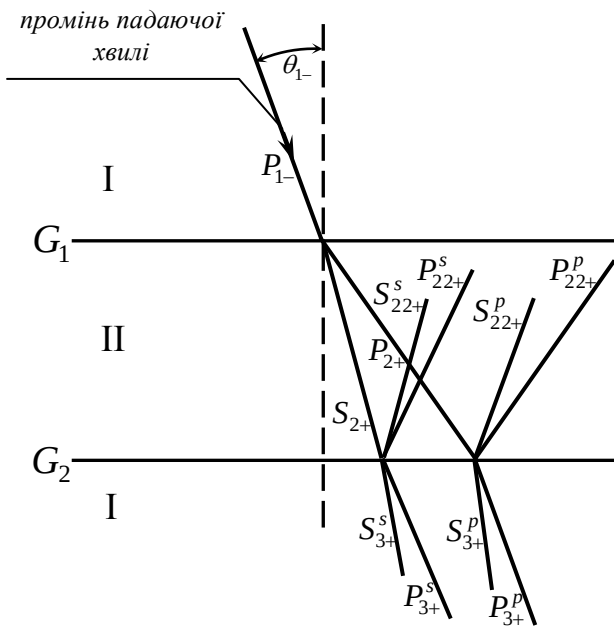


Рисунок 6 – Формування хвиль нової поляризації під час проходження шару пружного включення

Для виведення рівнянь динамічної взаємодії розривної хвилі з площиною G з'єднання двох середовищ можна скористатись двома еквівалентними підходами. За першим підходом разом з кінематичними рівняннями Снеліуса використовуються умови нерозривності на G переміщень $\mathbf{u}$

$$(\mathbf{u}^{(i)} + \mathbf{u}^{(r)})|_G = \mathbf{u}^{(t)}|_G$$

і напружень σ

$$(\hat{\sigma}^{(i)} \cdot \mathbf{n} + \hat{\sigma}^{(r)} \cdot \mathbf{n})|_G = \hat{\sigma}^{(t)} \cdot \mathbf{n}|_G,$$

де індексами i, r і t позначені параметри падаючої, відбитої та заломленої хвиль, відповідно; $\mathbf{n}$ - вектор одиничної нормалі до площини G .

В іншому підході використовуються умови збереження імпульсу та нерозривності швидкостей частинок. У цьому випадку, оскільки відбувається розгляд динамічної задачі про швидкість переміщень, зручніше використати другий підхід. На його основі отримуємо систему рівнянь для знаходження чотирьох невідомих величин швидкостей $\dot{u}_{1+}, \dot{v}_{1+}, \dot{u}_{2+}, \dot{v}_{2+}$.

$$\begin{aligned} & \xi_{1+}^1 \rho_1 \cos \theta_{1+} A_{1(1+)}^1 \dot{u}_{1+} + \xi_{1+}^2 \rho_1 \cos \psi_{1+} A_{1(1+)}^2 \dot{v}_{1+} + \xi_{2+}^1 \rho_2 \cos \theta_{2+} A_{1(2+)}^1 \dot{u}_{2+} + \\ & + \xi_{2+}^2 \rho_2 \cos \psi_{2+} A_{1(2+)}^2 \dot{v}_{2+} = \xi_{1-}^1 \rho_1 \cos \theta_{1-} A_{1(1-)}^1 \dot{u}_{1-}; \\ & \xi_{1+}^1 \rho_1 \cos \theta_{1+} A_{2(1+)}^1 \dot{u}_{1+} + \xi_{1+}^2 \rho_1 \cos \psi_{1+} A_{2(1+)}^2 \dot{v}_{1+} + \xi_{2+}^1 \rho_2 \cos \theta_{2+} A_{2(2+)}^1 \dot{u}_{2+} + \\ & + \xi_{2+}^2 \rho_2 \cos \psi_{2+} A_{2(2+)}^2 \dot{v}_{2+} = \xi_{1-}^1 \rho_1 \cos \theta_{1-} A_{2(1-)}^1 \dot{u}_{1-}; \\ & - A_{1(1+)}^1 \dot{u}_{1+} - A_{1(1+)}^2 \dot{v}_{1+} + A_{1(2+)}^1 \dot{u}_{2+} + A_{1(2+)}^2 \dot{v}_{2+} = A_{1(1-)}^1 \dot{u}_{1-}; \\ & - A_{2(1+)}^1 \dot{u}_{1+} - A_{2(1+)}^2 \dot{v}_{1+} + A_{2(2+)}^1 \dot{u}_{2+} + A_{2(2+)}^2 \dot{v}_{2+} = A_{2(1-)}^1 \dot{u}_{1-}, \end{aligned} \quad (7)$$

де $A_{j(k+)}^i$ - компоненти векторів поляризації заломлених qP_{2+} , qS_{2+} та відбитих qP_{1+} , qS_{1+} хвиль, відповідно, ξ_{k+}^i - відповідні променеві швидкості заломлених та відбитих хвиль.

Проводились дослідження явищ перетворення розривних P - та qP -хвиль під час їх проходження через площину розділу G середовищ з відмінними фізичними властивостями. На рис. 7, а проілюстровано графіки залежності від кута падіння θ_{1-} функцій інтенсивностей швидкостей відбитих $(\dot{u}_{1+}, \dot{v}_{1+})$ і заломлених $(\dot{u}_{2+}, \dot{v}_{2+})$ хвиль, які сформувались на площині G між доломітом (середовище I) і діабазом (середовище II). Ефект екранування розривної P -хвилі для такої комбінації середовищ стає помітним приблизно при $\theta_{1-} > 50^\circ$, коли функція $\dot{u}_{2+}(\theta_{1-})$ починає помітно спадати, при цьому інтенсивність відбитої P_{1+} -хвилі починає зростати лише при $\theta_{1-} > 75^\circ$.

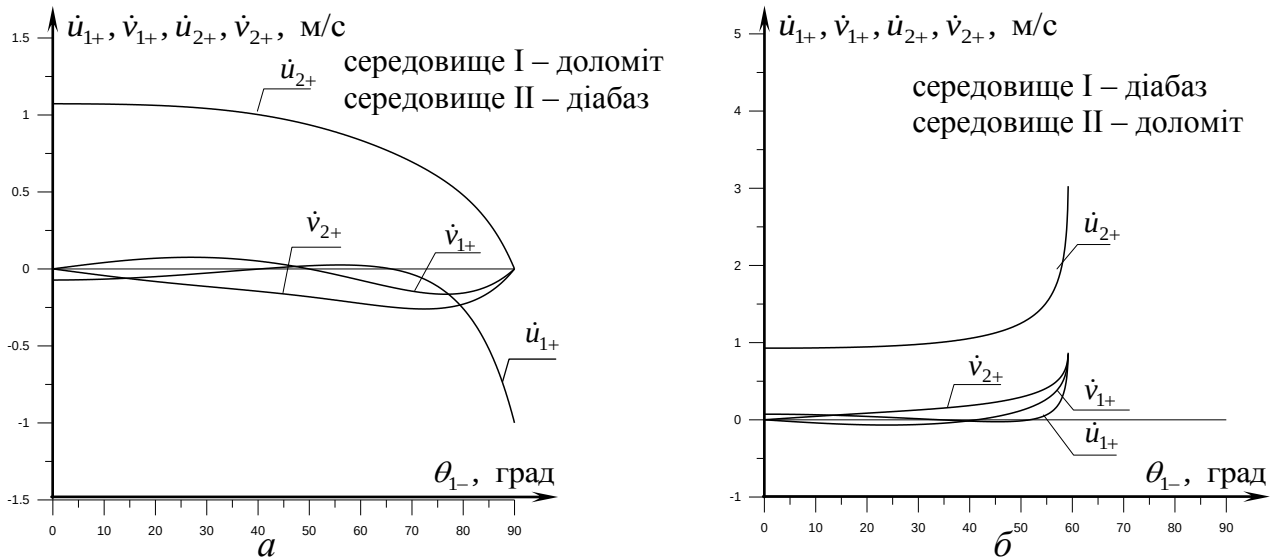


Рисунок 7 – Графіки функцій інтенсивностей розривних відбитих $(\dot{u}_{1+}, \dot{v}_{1+})$ і заломлених $(\dot{u}_{2+}, \dot{v}_{2+})$ хвиль, які сформувалися в результаті взаємодії з площиною G поздовжньої хвилі $\dot{u}_{1-} = 1 \text{ м/с}$

Оскільки $\alpha_1 \rho_1 > \alpha_2 \rho_2$, то критичний стан у цій системі, пов'язаний з ефектом квазіповного внутрішнього відбиття, не реалізовувався. Однак, якщо середовища I і II поміняти місцями, то при $\theta_{1-} = 59^\circ$ цей ефект буде мати місце і при наближенні θ_{1-} до критичного значення шукані змінні $\dot{u}_{1+}$, $\dot{v}_{1+}$, $\dot{u}_{2+}$, $\dot{v}_{2+}$ будуть прямувати до нескінченності (рис. 7, б). Тому можемо зробити висновок, що екранування площиною розділу G розривної хвилі P_{1-} при її похилому падінні залежить не лише від механічних властивостей середовищ, але й від порядку їх проходження.

Були проведені також дослідження перетворення хвиль для випадку контакту середовищ з умовою можливого проковзування вздовж площини G (рис. 8). При цьому перше та третє рівняння системи (7) замінюються умовами

рівності нулю дотичних напружень на граничних поверхнях контактуючих тіл. У ролі середовища I і II були обрані доломіт та діабаз, відповідно.

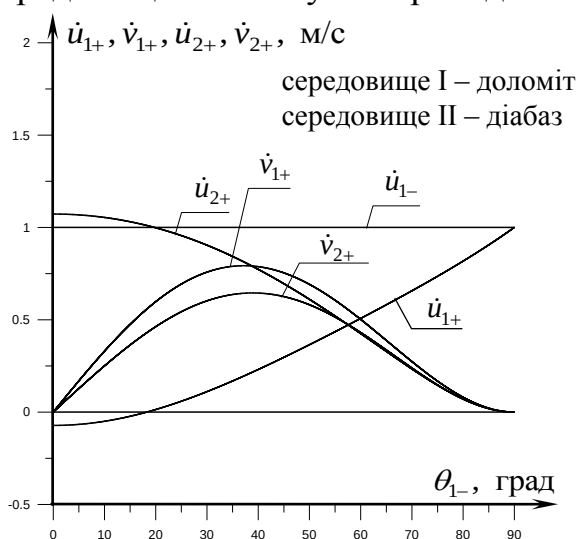


Рисунок 8 – Графіки інтенсивності розривних хвиль, заломлених ($\dot{u}_{2+}$, $\dot{v}_{2+}$) і відбитих ($\dot{u}_{1+}$, $\dot{v}_{1+}$), які сформувалися в результаті взаємодії поздовжньої хвилі $\dot{u}_{1-}=1$ м/с з площиною розділу (тріщиною) G

Також на основі запропонованої методики досліджено випадки взаємодії падаючої qP_{1-} -хвилі з площиною розділу G контакту двох трансверсально-ізотропних середовищ з різними фізичними властивостями при можливості вільного проковзування по G (рис. 9) (середовище I - доломіт з параметрами пружності $l_1 = 0.1\lambda_1$, $m_1 = 0.3\mu_1$, $p_1 = 0.5(\lambda_1 + 2\mu_1)$, II - вапняк з $l_2 = 0.1\lambda_2$, $m_2 = 0.3\mu_2$, $p_2 = 0.5(\lambda_2 + 2\mu_2)$).

Для цього випадку відмічаємо, що інтенсивність відбитої квазіпоперечної qS_{1+} -хвилі стала значно більшою тому, що виконується умова збереження кількості руху вздовж осі Ox . Водночас на всьому інтервалі зміни θ_{1-} відзначаємо спадання графіка функції $\dot{u}_{2+}(\theta_{1-})$ та набуття змінною $\dot{u}_{2+}$ менших значень, ніж у випадку такої ж взаємодії, але ізотропних середовищ.

Порівнюючи графіки функцій $\dot{u}_{1+}(\theta_{1-})$, $\dot{v}_{1+}(\theta_{1-})$, $\dot{u}_{2+}(\theta_{1-})$, $\dot{v}_{2+}(\theta_{1-})$ з розв'язком, представленим на рис. 7, а для цих же середовищ, що контактують на G без можливості проковзування, відзначаємо, що розділ двох середовищ площиною G , на якій така можливість допускається, дає змогу ефективніше здійснювати екранування розривної хвилі, оскільки при такому контакті інтенсивність заломленої P_{2+} -хвилі вже при $\theta_{1-}=10^0$ починає різко зменшуватись.

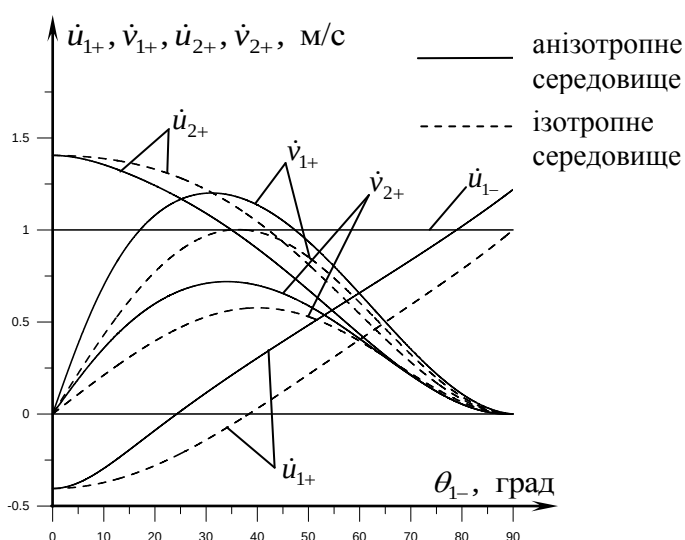


Рисунок 9 – Графіки інтенсивностей відбитих ($\dot{u}_{1+}$, $\dot{v}_{1+}$) і заломлених ($\dot{u}_{2+}$, $\dot{v}_{2+}$) хвиль при падінні qP_{1-} -хвилі на площину розділу G з

Розв'язуючи систему рівнянь (7) на кожній із площин розділу G_1 і G_2 , можемо простежити за перетворенням розривної хвилі під час її проходження через плоскопаралельний та клиноподібний шари пружного середовища з відмінними механічними властивостями. Дослідження показали, що при наявності в середовищі таких шарів відбувається двократне відбиття падаючої хвилі, яке сприяє зменшенню інтенсивності заломлених хвиль та підсиленню екрануючих ефектів. Зокрема, такі особливості яскравіше проявляються при комбінації двох середовищ з різко відмінними значеннями акустичних жорсткостей $\alpha_1\rho_1$ і $\alpha_2\rho_2$.

У додатку наведені довідки про впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена постановці і розв'язанню нової актуальної наукової задачі про дифракцію розривних (слабких ударних) хвиль на неперервних та розривних неоднорідностях ізотропних та анізотропних середовищ з метою вивчення ефекту їх екранування та гасіння. Отримано такі наукові результати:

1. На базі аналізу публікацій з проблем поширення біжучих хвиль у пружних однорідних і неоднорідних, ізотропних і анізотропних середовищах, обговорено хвильові сейсмічні процеси, які генеруються в тектонічних структурах з неперервними та розривними неоднорідностями.

Виявлено, що питанням поширення і перетворення фронтів розривних (слабких ударних) хвиль присвячена порівняно невелика кількість праць, причому явища екранування хвиль за рахунок відхилення їхніх променів та відбиття від неоднорідностей, залишились поза увагою дослідників.

Зроблено висновок, що дисертаційна робота, у якій здійснено теоретичне моделювання сейсмічних явищ з метою визначення можливостей зниження їх інтенсивності за рахунок перетворення та екранування сейсмічних хвиль на неперервних та розривних неоднорідностях механічних властивостей середовищ, є актуальною.

2. На основі променевого методу розроблено математичну модель і побудовано основні співвідношення кінематики та динаміки поширення розривних хвиль в ізотропних та трансверсально-ізотропних пружних середовищах із неперервними та шарувато-розривними неоднорідностями їх механічних параметрів.

3. Запропоновано методику комп'ютерної реалізації розробленого підходу. Показано, що завдяки використанню променевого методу поверхні геометричних фронтів, які трансформуються, збігаються з поверхнями розривів полів деформацій та напружень пружного середовища, тому цей метод є найефективнішим засобом моделювання перетворення таких хвиль у неоднорідних структурах.

4. Досліджено питання перебудови систем променів і фронтів розривних хвиль у пружних середовищах, механічні параметри яких є неперервними елементарними функціями просторових координат або мають умовно шарувату структуру. Показано, що ці процеси можуть супроводжуватись явищами розбіжності променів, їх викривленням, відхиленням від певної зони середовища та зміною напряду розповсюдження, а також збільшенням або зменшенням інтенсивності хвилі.

Встановлено, що у всіх розглянутих випадках трансформування хвилі супроводжується лише поворотом вектора поляризації без зміни його типу та без появи хвиль нової поляризації.

5. Поставлена і розв'язана задача поширення слабких ударних хвиль у шарувато-неоднорідних пружних середовищах з розривними функціями механічних властивостей. Показано, що поширення хвиль у таких середовищах, на відміну від випадків у неперервно-неоднорідних середовищах, супроводжується виникненням хвиль нової поляризації.

6. Досліджено випадки сполучення середовищ із можливістю їх проковзування на площині розділу, а також без такої можливості. З'ясовано, що в обох випадках наявність у середовищі площини розділу дає змогу розкласти падаючу хвилю на чотири розривні хвилі різної поляризації і тим самим екранувати її та зменшити її інтенсивність. Відзначено, що у випадку контакту середовищ із можливістю проковзування ефект екранування є більш помітним і при деяких значеннях кутів падіння квазіпоздовжні хвилі можуть повністю відбиватись від поверхні розділу.

7. Встановлено також, що ефект екранування посилюється зі збільшенням різниці акустичних жорсткостей контактуючих середовищ і при деяких сполученнях середовищ заломлені хвилі можуть втрачати свою інтенсивність більше ніж в два рази.

8. Отримані результати є новими, вони можуть бути використані для моделювання ефектів захисту об'єктів та споруд від дії ударних (зокрема і сейсмічних) хвиль шляхом їх екранування природними або штучно створеними неоднорідностями середовища.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Монографія

1. Механика горных выработок при действии гравитационных и динамических нагрузок : монография / [В. И. Гуляев, П. З. Луговой, Ю. А. Заец и др.]. – Ивано-Франковск : Изд-во Прикарпат. нац. ун-та им. В. Стефаника, 2014. – 438 с.

**Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав
або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз**

2. Transformation of seismic discontinuous waves by hyperboloid interfaces in anisotropic elastic media / [N.W. Musa, V.I. Gulyayev, Yu.A. Zaets et al.] //

International Journal of Scientific and Engineering Research. – 2014. – Vol. 5, № 12. – P. 962–977.

3. Заец Ю.А. Экранирование упругих разрывных волн плоскостями раздела сред / В.И. Гуляев, П.З. Луговой, Ю.А. Заец // Прикладная механика. – 2012. – Т. 48, № 4. – С. 67–77. Перекладено видавництвом «Springer» англійською мовою [Zayets Yu.A. Shielding of elastic nonstationary waves by interfaces / V.I. Gulyaev, P.Z. Lugovoi, Yu.A. Zayets // International Applied Mechanics. – 2012. – Vol. 48, № 4. – P. 414–422].

4. Заец Ю.А. Перестройка фронтов квазипродольных и квазипоперечных разрывных волн в неоднородных трансверсально-изотропных упругих средах / В.И. Гуляев, П.З. Луговой, Ю.А. Заец, М. Набиль // Прикладная механика. – 2011. – Т. 47, № 1. – С. 73–80. Перекладено видавництвом «Springer» англійською мовою [Zaets Yu.A. Evolution of the fronts of quasi-compressional and quasi-shear discontinuous waves in inhomogeneous transversely isotropic elastic media / V.I. Gulyaev, P.Z. Lugovoi, Yu.A. Zaets, M. Nabil // International Applied Mechanics. – 2011. – Vol. 47, № 1. – P. 55–61].

Статті у фахових виданнях

5. Заєць Ю.О. Екранування розривних хвиль клиноподібним пружним включенням / В.І. Гуляев, П.З. Луговий, Ю.О. Заєць // Доповіді Національної академії наук України. – 2011. – № 6. – С. 66–71.

6. Заєць Ю.О. Розповсюдження фронтів розривних хвиль в неоднорідних трансверсально-ізотропних пружних середовищах / В.І. Гуляев, Ю.О. Заєць // Акустичний вісник. – 2009. – Т. 12, № 3. – С. 20–26.

7. Заєць Ю.О. Екранування розривних хвиль шаром зниженої щільності / О.В. Ващіліна, Ю.О. Заєць // Вісник НТУ. – 2012. – Вип. 26. – С. 402–410.

8. Заєць Ю.О. Екранування розривних хвиль шаруватим пружним анізотропним середовищем / О.В. Ващіліна, Ю.О. Заєць // Вісник НТУ. – 2013. – № 28. – С. 80–87.

9. Заєць Ю.О. Перебудова фронтів розривних хвиль в трансверсально-ізотропних пружних середовищах зі змінними властивостями / О.В. Ващіліна, Ю.О. Заєць // Вісник НТУ. – 2011. – Вип. 24. – С. 264–269.

10. Заєць Ю.О. Екранування розривних хвиль шаром пружного середовища / Ю.О. Заєць // Вісник НТУ. – 2010. – Вип. 21. – С. 366–371.

11. Заєць Ю.О. Теоретичне моделювання розповсюдження розривних хвиль в неоднорідних анізотропних пружних середовищах / Ю.О. Заєць // Вісник НТУ. – 2009. – № 19. – С. 216–220.

12. Заєць Ю.О. Перебудова фронтів розривних хвиль в неоднорідних трансверсально-ізотропних пружних середовищах / Г.М. Іванченко, О.В. Ващіліна, Ю.О. Заєць // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2007. – Вип. 81. – С. 135–141.

13. Заєць Ю.О. Перетворення фронтів розривних хвиль в трансверсально-ізотропних середовищах зі змінними параметрами пружності / Г.М. Іванченко, Ю.О. Заєць // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2009. – Вип. 83. – С. 119–125.

14. Заєць Ю.О. Розповсюдження розривних хвиль в неоднорідних трансверсально-ізотропних пружних середовищах / Г.М. Іванченко, О.В. Ващіліна, Ю.О. Заєць // Вісник НТУ. – 2007. – № 15. – С. 372–375.

15. Заєць Ю.О. Перетворення фронтів розривних хвиль у неоднорідних трансверсально-ізотропних середовищах / І.В. Лебедева, О.В. Ващіліна, Ю.О. Заєць // Вісник Київського національного університету ім. Т.Г. Шевченка. Серія: фізико-математичні науки. – 2008. – Вип. № 2. – С. 54–57.

Опубліковані праці апробаційного характеру

16. Заєць Ю.О. Фокусування та екранування хвиль деформацій, ініційованих в ґрунтах наземним транспортом / В.І. Гуляєв, О.В. Ващіліна, Ю.О. Заєць // 14-та Міжнародна науково-практична конференція «Ринок послуг комплексних транспортних систем та прикладні проблеми логістики». – К., 2012. – С. 200–204.

17. Заєць Ю.О. Динаміка взаємодії розривної хвилі з клиноподібним пружним шаром при умовах можливого проковзування між граничними площинами / Ю.О. Заєць // Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів». 19–22 лютого 2015. – Рівне : РВВ РДГУ, 2015. – С. 77.

18. Заєць Ю.О. Екранування розривних хвиль неоднорідностями в пружних середовищах / Ю.О. Заєць // LXVII науково-практична конференція НТУ. – К., 2011.

19. Заєць Ю.О. Екранування ударних хвиль в шарувато-неоднорідних пружних середовищах / Ю.О. Заєць // XII Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. – Львів, 2015. – С. 57.

20. Заєць Ю.О. Розподіл інтенсивностей розривних хвиль при проходженні шару пружного середовища зі змінними фізичними властивостями / Ю.О. Заєць // LXX Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету / Національний транспортний університет. – К., 2014. – С. 420.

21. Заєць Ю.О. Біфуркація фронтів розривних хвиль в трансверсально-ізотропних пружних середовищах / Г.М. Іванченко, Ю.О. Заєць // International Conference. Dynamical system modelling and stability investigation. – К., 2009. – С. 212.

22. Заєць Ю.О. Екранування розривних хвиль шаром з відмінними фізичними властивостями / Л.В. Левківська, Ю.О. Заєць // XVI International Conference. Dynamical system modelling and stability investigation – К., 2013. – С. 293.

23. Напряженное состояние около горных выработок, содержащих пласт полезного ископаемого / [М. Chudek, П.З. Луговой, Ю.А. Заец и др.] // Miedzynarodowa Konferencja «IX Szkoła Geomechaniki 2009» Materiały Naukowe. – Gliwice ; Ustroń, 2009. – С. 213–225.

АНОТАЦІЇ

Заєць Ю.О. Екранування розривних хвиль в неоднорідних трансверсально-ізотропних пружних середовищах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка. – Національний транспортний університет, Київ, 2015.

У дисертації на основі променевого методу розроблена математична модель і побудовані основні співвідношення кінематики та динаміки поширення розривних хвиль в пружних середовищах з неперервними та шарувато-розривними неоднорідностями їхніх механічних параметрів.

Досліджені питання перебудови систем променів і фронтів розривних хвиль у пружних середовищах, механічні параметри яких є неперервними елементарними функціями просторових координат або мають умовно шарувату структуру. Показано, що ці процеси можуть супроводжуватись явищами розбіжності променів, їх викривленням, відхиленням від певної зони середовища та зміною напрямку розповсюдження, а також збільшенням або зменшенням інтенсивності хвилі за рахунок їх перетворення та екранування.

Поставлена і розв'язана задача поширення слабких ударних хвиль у середовищах з розривними функціями механічних властивостей. Досліджені випадки проходження хвилею однієї площини розділу, плоскопаралельного та клиноподібного шарів пружного середовища.

Ключові слова: розривна хвиля, променевий метод, неоднорідне пружне середовище, трансверсально-ізотропне середовище, екранування хвиль.

Заец Ю.А. Экранирование разрывных волн в неоднородных трансверсально-изотропных упругих средах. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 – строительная механика. – Национальный транспортный университет, Киев, 2015.

Диссертационная работа посвящена постановке и решению новой актуальной научной задачи о дифракции разрывных (слабых ударных) волн на непрерывных и разрывных неоднородностях изотропных и анизотропных сред с целью изучения эффекта их экранирования и гашения. В ней на базе анализа публикаций исследуются волновые сейсмические процессы, генерируемые в тектонических структурах с непрерывными и разрывными неоднородностями. Сделан вывод об актуальности проблемы моделирования явлений снижения интенсивности волн за счет их преобразования и экранирования.

С помощью лучевого метода разработана математическая модель и построены основные соотношения кинематики и динамики распространения разрывных волн в неоднородных трансверсально-изотропных средах. Предложена методика компьютерной реализации разработанного подхода.

Исследованы вопросы перестройки систем лучей и фронтов разрывных волн в упругих средах, механические параметры которых являются

непрерывными элементарными функциями пространственных координат или имеют условно слоистую структуру. Показано, что эти процессы могут сопровождаться расхождениями лучей, их искривлением, отклонением от определенной зоны среды и изменением направления распространения, а также увеличением или уменьшением интенсивности волны. Установлено, что во всех рассмотренных случаях трансформирование волны сопровождается только поворотом вектора поляризации без изменения его типа и без добавления новополяризованных волн.

Поставлена и решена задача распространения слабых ударных волн в средах с разрывными функциями механических свойств. Показано, что распространение волн в таких средах сопровождается возникновением волн новой поляризации.

Исследованы случаи сообщения сред с возможностью их проскальзывания по плоскости раздела, а также без такой возможности. Определено, что в обоих случаях наличие в среде плоскости раздела позволяет разложить падающую квазипродольную (квазипоперечную) волну на четыре разрывные волны различной поляризации и тем самым экранировать ее и уменьшить ее интенсивность. Отмечено, что в случае контакта сред с возможностью проскальзывания экранирующий эффект проявляется более заметно. Установлено также, что эффект экранирования усиливается с увеличением разницы акустических жесткостей контактирующих сред.

Ключевые слова: разрывная волна, лучевой метод, неоднородная упругая среда, трансверсально-изотропная среда, экранирование волн.

Zaets Yu.O. Shielding of discontinuous waves in inhomogeneous transversally isotropic elastic media. - Manuscript.

The thesis for the candidate of technical science degree in specialty 05.23.17 – Mechanics of Structures. – National Transport University, Kyiv, 2015.

In the thesis, the mathematic model and constitutive equations of kinematics and dynamics of discontinuous wave propagation in elastic media with continuous and discontinuous nonhomogeneities of mechanical parameters are elaborated on the basic of the ray method. The questions of transformation of the front-ray net of the wave in the elastic media with parameters varying by the laws of elementary functions or having conditionally layer structure are studied. It is demonstrated that these process can be accompanied by the phenomena of the ray divergence, their curving, deflection from the prescribed zone of the medium, change of the propagation direction, as well as by enlargement or decrease of the wave intensity through its reconstruction and screening.

The problems on propagation of weak shock waves in the media with discontinuous function of their mechanical properties are stated and solved. The cases of the wave passing through one interface and parallel or wedgelike layers are studied.

Key words: discontinuous wave, ray method, heterogeneous medium, anisotropic medium, wave screening.