

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка

На правах рукопису  
УДК 539.3:534.1

МЕЛЬНИК Світлана Іванівна

ПОШИРЕННЯ АКУСТОЕЛЕКТРИЧНИХ ХВИЛЬ  
В П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ЦИЛІНДРАХ  
ПРИ ВЗАЄМОДІЇ З ЗОВНІШНІМ СЕРЕДОВИЩЕМ

01.02.04 - механіка деформівного твердого тіла

*Мельник*

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на одбуття вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ 1995

Д.В. 33.600

Роботу виконано в Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка  
НАН України

Науковий керівник - чл.-кор. НАН України,  
доктор фізико-математичних наук,  
професор Шульга М.О.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук,  
професор Сторожев В.І.  
- кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
Багно О.М.

Провідна установа - Національний університет  
ім.Тараса Шевченка

Захист відбудеться "26" чудне 1995 р. о \_\_\_\_ годині  
на засіданні спеціалізованої ради D 01.03.03 Інституту  
механіки НАН України (252057, Київ-57, вул. Нестерова, 3).

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці  
Інституту механіки НАН України ( вул. Нестерова, 3)

Автореферат роіслано "25" листо 1995 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради  
доктор фізико-математичних наук,  
професор Чернишченко І.С.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00754953 (X)

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Серед багатьох напрямків, по яких розвиваються дослідження в області динамічного деформування твердого тіла, до числа актуальних належать проблеми аналізу закономірностей поширення електропружних хвиль в п'єзоелектричних тілах. Це обумовлено своєрідністю хвильових процесів в п'єзоелектричних середовищах, їх недостатньою вивченістю, а також безпосереднім впровадженням та використанням в різноманітних галузях техніки конструкційних елементів з п'єзоелектричних матеріалів. Врахування воасмовпливу механічних рухів і електромагнітного поля при дослідженні динамічних процесів в п'єзоелектриках дозволяє глибше і повніше описати рух суцільних середовищ з різними властивостями, виявити нові явища та закономірності поширення хвиль і сприяє створенню нових твердотільних елементів електроніки та багатьох інших функціональних пристроїв.

Численні дослідження поширення електропружних хвиль в п'єзоелектричних тілах дозволили сформуувати досить широкі уявлення про перебіг в них динамічних процесів. Вагомий вклад в розвиток теорії електропружності внесли М.К. Балакірев, О.М. Болкісев, І.А. Гілінський, В.Т. Грінченко, У. Кеді, М.Р. Короткіна, О.С. Космодаміанський, В.О. Красильников, В.В. Крилов, Б.О. Кудрявцев, Л.Д. Ландау, Є.М. Ліфшиц, У. Мезон, В. Новацький, В.З. Партон, Ю.І. Сиротін, В.І. Сторожев, А.Ф.Улітко, М.П. Шаскольська, М.О. Шульга, В.А. Auld, Н.Ф. Tiersten та інші вчені.

Найбільш дослідженим є клас задач про поширення поверхневих акустоелектричних хвиль Релея, Гуляєва-Блюстейна, Стоунлі; детальний перелік публікацій, присвячений висвітленню цих проблем, наводиться в монографіях М.К. Балакірева, І.А. Гілінського; Є.Д. Д'елесана, Д. Руаїе і в оглядах Б.О. Кудрявцева, В.А. Партона, М.О. Сеніка, В.Є. Лямова, С.Х. Сулейманова, А. Олівера, Г. Кайно та Дж. Шоу.

Проблеми поширення акустоелектричних хвиль розглядали І.П. Гетман, Ю.А. Устінов, О.С. Космодаміанський, В.Н. Ложкін (хвилі типу Лемба в плоских шарах) М.О. Шульга, О.М. Підлипенець, Л.П. Зінчук (багатопарові періодичні структури) та інші дослідники.

В літературі існує достатньо велике число окремих робіт та монографій різних авторів (зокрема роботи О.М. Гузя, А.М. Багно, А.П. Жука, В.Т. Грінченка, Г.Л. Комісарової), в яких розглянуто

проблеми поширення пружних хвиль в хвилеводах з акустичним середовищем всередині як в рамках наближеної теорії оболонки, так і в тривимірній постановці. Що стосується п'єзоелектричних хвилеводів заповнених акустичним середовищем, задача поширення хвиль в них ускладнюється врахуванням впливу зв'язаного електричного поля як в п'єзоелектрику, так і в рідині. Дослідженню задач поширення електропружних хвиль в традиційно використовуваних п'єзоелектричних хвилеводах - циліндрах, порожнистих циліндрах, порожнистих шаруватих циліндрах з рідиною і без рідини присвячено роботи М.О. Шульги, О.Я. Григоренка, І.А. Лози; І.А. Лози, М.О. Шульги; М.О. Шульги, К.В. Медведева; І.П. Гетмана, О.А. Матросова, Ю.А. Устінова; М.О. Шульги, Н.А. Яригіної. Не дивлячись на суттєві досягнення в цій області, в науковій літературі відсутні роботи, в яких досліджуються не тільки дисперсійні, а й кінематичні та енергетичні характеристики руху при поширенні осесиметричних акустоелектричних хвиль в п'єзоелектричних циліндрах заповнених ідеальною непровідною стисливою рідиною, а також роботи, в яких розглядається питання впливу зовнішнього середовища та електричних умов спряження на дисперсійні властивості хвилеводних структур.

Мета роботи полягає в розробці способу розв'язку осесиметричної задачі про поширення акустоелектричних хвиль в заповненому ідеальною стисливою рідиною циліндрі, виготовленому з п'єзоелектричного матеріалу класу  $6mm$ ; побудові обчислювальних алгоритмів і їх реалізації на ЕОМ; дослідженні впливу структури та властивостей хвилеводів на кінематичні та енергетичні характеристики руху; вивченні питання впливу зовнішнього середовища та електричних умов спряження на дисперсійні властивості хвилеводів.

Наукова новизна роботи полягає в розвитку на основі тривимірних рівнянь електропружності методу розв'язання задач динаміки циліндричних хвилеводів, що містять акустичне середовище; реалізації на ЕОМ алгоритму чисельного аналізу задач означеного класу; дослідженні впливу структури та властивостей хвилеводів і умов спряження на закономірності поширення акустоелектричних хвиль в зв'язаних хвилеводних системах; дослідженні енергетичних характеристик руху.

Достовірність отриманих в дисертації результатів забезпечується коректністю постановки задачі в межах лінійної теорії електро-

пружності, використанням обґрунтованих методів розв'язання, контрольованою точністю чисельних обчислень, угодженістю результатів з загальними фізичними закономірностями перебігу динамічних процесів в деформованих тілах і співпаданням їх в окремих випадках з відомими в літературі.

Практична цінність результатів дисертації полягає в можливості їх застосування в практиці конструювання перспективних елементів хвилеводів та використанні при оцінці точності прикладних способів роорахунку кінематичних, динамічних та дисперсійних характеристик хвилеводів.

Апробація роботи. Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на семінарах відділу електропружності Інституту механіки НАН України (1992-1995); 56 науково-практичній конференції КДТУ (18 - 20 квітня 1995р.), Українській конференції "Моделювання і дослідження стійкості систем" (травень 1995).

Матеріали дисертації опубліковано в роботах (1-3).

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, трьох глав та висновку, викладених на 80 сторінках основного тексту. Робота вміщує 15 рисунків, список літератури в 117 найменувань.

## ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обґрунтовується актуальність розглянутих в роботі питань, проведено короткий огляд монографій, в яких викладено основні положення та отримано основні рівняння і співвідношення механіки зв'язаних полів, означено наукову новизну, практичну значимість роботи, сформульовано мету досліджень, коротко викладено зміст дисертації за главами.

В першій главі приводяться основні рівняння та співвідношення теорії електропружності п'єзоелектричних матеріалів та акустичних середовищ, що описують зв'язані коливання, проведено аналіз сучасного стану досліджень, що стосуються теми дисертації.

В перших трьох параграфах цієї глави викладено основні співвідношення лінійної теорії акустоелектричних хвиль. Повна система рівнянь руху п'єзоелектричного середовища складається з рівнянь малих усталених коливань при відсутності масових сил, квазістатичного наближення рівнянь Максвелла при відсутності токів та па-

рядів, і має вигляд:

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = \text{div } T, \quad \text{div } \vec{D}_e = 0, \quad \text{rot } \vec{E}_e = 0, \quad (1)$$

де  $\vec{u}$  - вектор переміщення,  $T$  - тензор напруги,  $\rho$  - густина матеріалу,  $\vec{D}_e$  і  $\vec{E}_e$  відповідно вектори електричної індукції та електричної напруженості,  $\varphi_e$  - електричний потенціал. Разом з цим мають місце співвідношення Коші:

$$2\varepsilon_{ij} = \text{grad } \bar{u} + (\text{grad } \bar{u})^*, \quad (2)$$

де  $*$  - символ транспонування.

У випадку адіабатичних процесів закон збереження енергії для п'єзоелектричних та діелектричних середовищ може бути записаний

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \left( \frac{1}{2} \rho \vec{u}^2 + \frac{1}{2} T S + \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{D} \right) d\tau = \oint_{\Sigma} T \vec{u} \cdot \vec{n} d\Sigma - \oint_{\Sigma} \varphi \vec{D} \cdot \vec{n} d\Sigma. \quad (3)$$

де  $S$  - тензор деформації,  $\vec{n}$  - одиничний вектор зовнішньої до поверхні  $\Sigma$  нормалі. Ввівши згідно (3) вектор густини потоку механічної  $\vec{W}_m = -T \vec{u}$  енергії та вектор густини потоку електричної  $\vec{W}_e = -\varphi \vec{D}$  енергії, у випадку гармонічних коливань середні за період величини відповідно густини потоку механічної та густини потоку електричної енергії знаходяться за формулами

$$\vec{W}_m = -\frac{i\omega}{4} (T \vec{u}^* - T^* \vec{u}), \quad \vec{W}_e = -\frac{i\omega}{4} (\varphi \vec{D}^* - \varphi^* \vec{D}), \quad (4)$$

де  $\omega$  - кругова частота. Замикається система рівнянь, що описує зв'язані електропружні процеси, матеріальними співвідношеннями

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}^p u_{kl} - e_{kij} E_k, \quad D_i = \epsilon_{ik}^s E_k + e_{ikl} u_{kl}, \quad (5)$$

конкретний вигляд яких залежить від напрямку попередньої поляризації для п'єзокерамічних матеріалів та класу симетрії для кристалічних матеріалів.

В четвертому параграфі приводиться повна система рівнянь руху, що описує акустичні збурення діелектричного середовища - ідеальної стисливої рідини всередині циліндру:

$$\frac{1}{\rho_0 a_0^2} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \text{div } \vec{v} = 0, \quad \rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \text{grad } p = 0, \\ \text{div } \vec{D}_f = 0, \quad \text{rot } \vec{E}_f = 0, \quad \vec{D}_f = \epsilon_f \vec{E}_f, \quad (6)$$

де  $a_0 = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_0}$  - швидкість поширення малих обурень,  $p, \vec{v}, \rho_f$  - відповідно тиск, швидкість та густина рідини,  $\vec{D}_f$  і  $\vec{E}_f$  вектори електричної індукції та електричної напруженості в рідині,  $\epsilon_f$  - діелектрична проникність рідини.

В п'ятому параграфі обговорюється питання постановки початкових та граничних умов. Оскільки в роботі розглядаються лише усталені гармонічні процеси, для однозначного розв'язку системи рівнянь руху п'єзоелектричного середовища (1) достатньо задати лише граничні та контактні умови:

$$\begin{aligned} \vec{u}|_{\Sigma} &= \vec{u}_z \quad (\vec{u}|_{\Sigma} = \vec{v}_z), & T|_{\Sigma} \vec{n} &= \vec{F}_z, \\ \vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) &= 0 \quad (\vec{D} \cdot \vec{n} = 0), & \varphi_1 &= \varphi_2. \end{aligned} \quad (7)$$

В шостому параграфі цієї глави проведено аналіз сучасного стану проблеми поширення акустоелектричних хвиль в тілах циліндричної форми.

В другій главі досліджується поширення осесиметричних акустоелектричних хвиль в порожнистому циліндрі ( $R$  - внутрішній радіус,  $R + h$  - зовнішній радіус), виготовленому з п'єзоелектричного матеріалу класу бтп і заповненому ідеальною непровідною стисливою рідиною.

В першому та другому параграфі цієї глави, виходячи з основних рівнянь наведених в першій главі, поставлена та розв'язана замкнена гранична задача поширення малих обурень в циліндрі з рідиною. На поверхні контакту з рідиною виконуються умови неперервності:

- для механічних величин

$$\sigma_{rr}|_{R+0} = -p|_{R-0}, \quad \sigma_{rz}|_{R+0} = 0, \quad \frac{\partial u_r}{\partial t}|_{R+0} = v_r|_{R-0}, \quad (8)$$

- для електричних величин

$$\varphi_s|_{R+0} = \varphi_f|_{R-0}, \quad D_{rs}|_{R+0} = D_{rf}|_{R-0}. \quad (9)$$

На зовнішній бічній поверхні циліндра мають місце вимоги:

- для механічних складових

$$\sigma_{rr}|_{R+h-0} = 0, \quad \sigma_{rz}|_{R+h-0} = 0, \quad (10)$$

- для складових електричного поля

$$\varphi_s|_{R+h-0} = \varphi_v|_{R+h+0}, \quad D_{rs}|_{R+h-0} = D_{rv}|_{R+h+0}. \quad (11)$$

Вонні циліндра виконуються квазістатичні рівняння Максвела та співвідношення проперційності між  $\vec{D}_v$  та  $\vec{E}_v$

$$\operatorname{div} \vec{D}_v = 0, \quad \operatorname{rot} \vec{E}_v = 0, \quad \vec{D}_v = \epsilon_v \vec{E}_v, \quad (12)$$

Розв'язок задачі (1), (2), (5), (6) у відповідності до умов спряження (8) - (11) шукаємо у вигляді хвиль, що поширюються вздовж вісі *oz*

$$\begin{aligned} \{\varphi_s, u_r, u_z\} &= h \operatorname{Re} \left\{ i \sqrt{\frac{c_{00}}{\epsilon_{00}}} \Phi_s \left( \frac{r}{h} \right), U_r \left( \frac{r}{h} \right), i U_z \left( \frac{r}{h} \right) \right\} e^{i(kz - \omega t)}, \\ \{\varphi_f, D_{rf}, v_f, p\} &= \operatorname{Re} \left\{ i h \sqrt{\frac{c_{00}}{\epsilon_{00}}} \Phi_f \left( \frac{r}{h} \right), \frac{1}{\sqrt{c_{00} \epsilon_{00}}} i D_{rf} \left( \frac{r}{h} \right), \right. \\ &\quad \left. i \sqrt{\frac{c_{00}}{\rho_{00}}} V_r \left( \frac{r}{h} \right), c_{00} P \left( \frac{r}{h} \right) \right\} e^{i(kz - \omega t)}, \end{aligned} \quad (13)$$

де  $c_{00}, \epsilon_{00}, \rho_{00}$  - параметри, що мають розмірність, відповідно, пружних модулів, діелектричних проникностей та густини,  $k$  - хвильове число,  $\omega$  - кругова частота.

Функції  $R_j(\frac{r}{h})$  амплітуд механічних переміщень та електричного потенціалу на основі методу розкладу їх в степеневі ряди по лінійних функціях радіальної координати представляються у вигляді

$$R_j(x) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n^j x^n, \quad x = \frac{r-R}{h}. \quad (14)$$

Враховуючи (13), (14), системи рівнянь руху (1), (6), матеріальні співвідношення (5) та граничні умови на внутрішній бічній поверхні (8), (9) дозволяють виразити всі коефіцієнти  $B_n^j$  в (13) через три незалежні  $X_0^1, Y_0^2, B_0^3$ , а граничні умови на зовнішній бічній поверхні (10), (11) та квазістатичні рівняння Максвела в зовнішньому середовищі (12) дають систему трьох лінійних алгебраїчних рівнянь відносно  $X_0^1, Y_0^2, B_0^3$ ,

$$m_{lp}(c_{ij}, e_{ij}, \epsilon_{ij}, \rho_s, \rho_f, \epsilon_f, c_f, \epsilon, k, \omega) \operatorname{col}(X_0^1, Y_0^2, B_0^3) = 0. \quad (15)$$

З умови існування нетривіального розв'язку (15) отримуємо дисперсійне співвідношення

$$\det |m_{lp}(c_{ij}, e_{ij}, \epsilon_{ij}, \rho_s, \rho_f, \epsilon_f, c_f, \epsilon, k, \omega)| = 0, \quad (16)$$

яке при відомих фізико-механічних сталих  $c_{ij}, e_{ij}, \epsilon_{ij}, \rho_s, \rho_f, \epsilon_f, c_f$  і геометричному параметрі  $\epsilon$  зв'язує кругову частоту  $\omega$  з хвильовим числом  $k$ .

Третій параграф цієї глави присвячено обчисленню середніх за період величин векторів потоків механічної та електричної енергії. Приймаючи до уваги (5), (13), (14), в співвідношень (4) отримано формули для визначення середніх за період потоків густини механічної та електричної енергії, відповідно, в циліндрі і в рідині

$$\begin{aligned}\overline{W}_{ms}^s &= \frac{\omega}{2} ((c_{55}(kU_r + U_s') + e_{51}\Phi_s')U_r - \\ &\quad - (c_{13}(U_r' + \frac{U_r}{r}) - c_{33}kU_s - e_{33}k\Phi_s)U_s), \\ \overline{W}_{os}^s &= \frac{\omega}{2} \Phi_s (e_{33}'k\Phi_s + e_{31}(U_r' + \frac{U_r}{r}) - e_{33}kU_s), \\ \overline{W}_{mj}^s &= \frac{1}{2} \frac{k}{\rho_j \omega} P^2, \overline{W}_{sj}^s = \frac{\omega}{2} \epsilon_j k \Phi_j^2, \overline{W}_{ij}^r = 0, i = m, e, j = s, f,\end{aligned}\quad (17)$$

Згідно закону збереження енергії (3), використовуючи (17), отримано вирази для визначення величин повних середніх за період потоків енергії вдовж вісі  $oz$ , відповідно, для циліндра та рідини

$$\begin{aligned}\overline{Q}_s^s &= -(\oint_{\Sigma_s} \overline{W}_{ms}^s d\sigma - \oint_{\Sigma_s} \overline{W}_{os}^s d\sigma), \\ \overline{Q}_f^s &= -(\oint_{\Sigma_f} \overline{W}_{mj}^s d\sigma - \oint_{\Sigma_f} \overline{W}_{sj}^s d\sigma).\end{aligned}\quad (18)$$

де

$$\begin{aligned}\oint_{\Sigma_s} \overline{W}_{ms}^s d\sigma &= \pi\omega \sum_{n=0}^{\infty} (L_n (\frac{1}{n+2} + \frac{1}{\epsilon} \frac{1}{n+1}) - c_{13} K_n \frac{1}{n+1}), \\ \oint_{\Sigma_s} \overline{W}_{os}^s d\sigma &= \pi\omega \sum_{n=0}^{\infty} (F_n (\frac{1}{n+2} + \frac{1}{\epsilon} \frac{1}{n+1}) + e_{31} G_n \frac{1}{n+1}), \\ \oint_{\Sigma_f} \overline{W}_{mj}^s d\sigma &= \frac{\pi k}{\rho_j \omega} \sum_{n=0}^{\infty} N_n \frac{1}{n+2} (\frac{1}{\epsilon})^{n+2}, \\ \oint_{\Sigma_f} \overline{W}_{sj}^s d\sigma &= \pi\omega k \epsilon_j \sum_{n=1}^{\infty} E_n \frac{1}{n+2} (\frac{1}{\epsilon})^{n+2},\end{aligned}$$

при цьому

$$L_n = \sum_{j=0}^n ((c_{55}(kB_{n-j}^1 + (n+1-j)B_{n+1-j}^3) + e_{31}(n+1-j)B_{n+1-j}^0)B_j^1 - (c_{13}(n+1-j)B_{n+1-j}^1 - c_{33}kB_{n-j}^3 - e_{33}kB_{n-j}^0)B_j^3),$$

$$K_n = \sum_{j=0}^n B_{n-j}^1 B_j^3,$$

$$F_n = \sum_{j=0}^n (e_{33}^2 kB_{n-j}^0 + e_{31}(n+1-j)B_{n+1-j}^1 - e_{33}kB_{n-j}^3)B_j^0,$$

$$G_n = \sum_{j=0}^n B_{n-j}^1 B_j^0, \quad N_n = \sum_{j=0}^n X_{n-j}^1 X_j^1, \quad E_n = \sum_{j=0}^n Y_{n-j}^2 X_j^2.$$

В третій главі приводяться та аналізуються результати чисельних досліджень роглянутої в главі 2 задачі поширення осесиметричних акустoeлектричних хвиль в порожнистому п'єзоелектричному циліндрі, заповненому ідеальною непровідною стисливою рідиною. Перший параграф глави присвячено аналізу дисперсійного співвідношення (16). Задача роглядалась як для циліндра виготовленого з сильного п'єзоелектричного матеріалу, а саме п'єзокераміки PZT-4, так і для циліндрів виготовлених із слабких п'єзоелектричних матеріалів ZnO, CdS. Заповнюючою рідиною були вода та етиловий спирт. Дослідження проводились для циліндрів рівної товщини. Як граничні випадки було роглянуто задачу поширення осесиметричних акустoeлектричних хвиль в порожнистому п'єзоелектричному циліндрі без рідини та задачу поширення малих обурень в жорсткому циліндрі з рідиною.

Результати чисельного аналізу дисперсійних співвідношень вказаних задач показали, що взаємодія хвильових рухів в циліндрі і в рідині при утворенні хвилі має місце тільки в околах точок, в яких фазові швидкості акустoeлектричних хвиль в порожнистому без рідини та малих обурень в жорсткому з рідиною циліндрах співпадають. На віддалі від таких точок спостерігаються чисто електропружні або чисто рідинні хвилі. Суттєвою особливістю для циліндру з рідиною є наявність двох дисперсійних кривих, що існують при всіх значеннях  $\omega$  в роглядуваного діапазону частоти. Разом з тим, як і у випадку поширення акустoeлектричних хвиль в порожнистому п'єзоелектричному циліндрі без рідини, у випадку порожнистого

п'єзоелектричного циліндру в рідиню, хвилі народжуються або як зв'язані електропружні, або як чисто пружні.

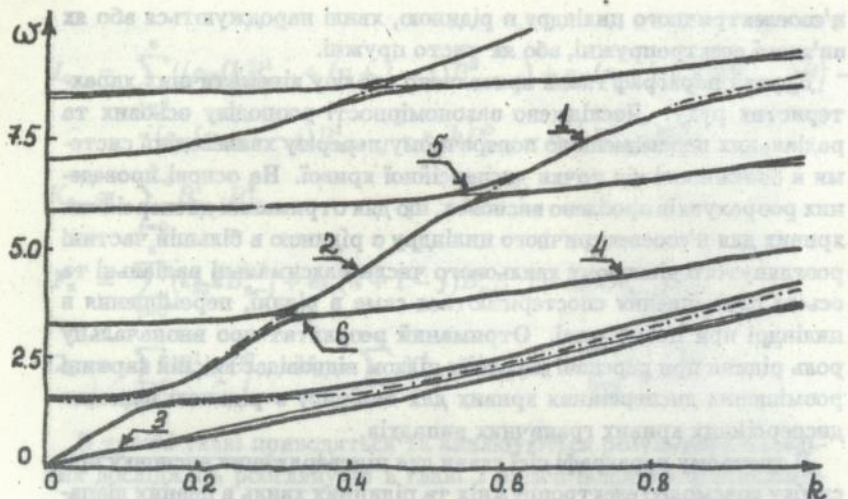
Другий параграф глави присвячено аналізу кінематичних характеристик руху. Досліджено закономірності розподілу осевих та радіальних переміщень по поперечному перерізу хвилеводної системи в залежності від точки дисперсійної кривої. На основі проведених розрахунків зроблено висновок, що для отриманих дисперсійних кривих для п'єзоелектричного циліндру в рідиню в більшій частині розглянутого діапазону хвильового числа максимальні радіальні та осеві переміщення спостерігаються саме в рідині, переміщення в циліндрі при цьому малі. Отриманий результат про визначальну роль рідини при передачі обурення цілком відповідає якісній картині розміщення дисперсійних кривих для циліндру в рідиню відносно дисперсійних кривих граничних випадків.

В третьому параграфі цієї глави для підтвердження висновку про слабку взаємодію електропружних та рідинних хвиль в певних діапазонах частоти проведено аналіз енергетичних характеристик руху. Для кожної дисперсійної кривої, що відповідає циліндру в рідиню рис.1 (штрих-пунктирними лініями позначено дисперсійні криві, що відповідають порожньому п'єзоелектричному циліндру без рідини, тонкими суцільними лініями позначено дисперсійні криві, що відповідають жорсткому циліндру в рідиню), на рис.2 представлено графік залежності коефіцієнта

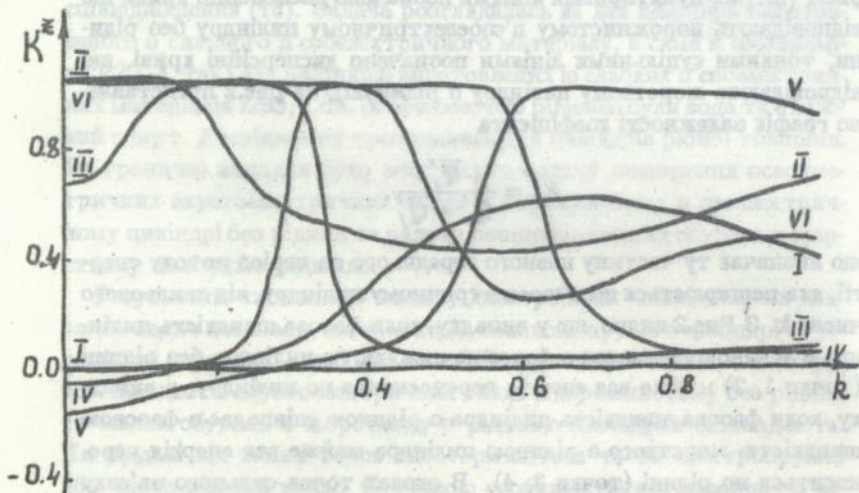
$$K^2 = \frac{\bar{Q}_1^2}{Q_1^2 + Q_2^2},$$

що визначає ту частину повного середнього за період потоку енергії, яка поширюється по п'єзоелектричному циліндру, від хвильового числа  $k$ . З Рис.2 видно, що у випадку, коли фазова швидкість циліндра в рідиню співпадає з фазовою швидкістю циліндра без рідини (точки 1, 2) майже вся енергія переноситься по циліндру, у випадку, коли фазова швидкість циліндра в рідиню співпадає з фазовою швидкістю жорсткого в рідиню циліндра майже вся енергія переноситься по рідині (точки 3, 4). В околах точок сильного зв'язку (точки 5, 6) має місце практично рівноправний розподіл енергії по складовим хвилеводам.

Для пояснення існування областей від'ємних значень  $K^2$  була розглянута задача поширення асиметричних хвиль в гіпотетичному



Малюнок 1. Графік функції  $\omega = \omega(k)$  для системи РЗТ-4 - вода,  $\epsilon = 2/3$ .



Малюнок 2. Графік функції  $K^* = K^*(k)$  для системи РЗТ-4 - вода,  $\epsilon = 2/3$ .

пружньому циліндрі в рідиню. Це даю можливість зробити висновок, що наявність вказаних областей пов'язана не з врахуванням п'єзовластивостей матеріалу циліндру, а з наявністю рідини в ньому.

При дослідженні впливу товщини циліндра на області взаємодії хвильових рухів в циліндрі та в рідині встановлено, що з обільшенням товщини циліндра, не дивлячись на те, що при цьому обільшується його огинна жорсткість, а тому здавалось би і ступінь взаємодії між рухами в циліндрі і в рідині повинен зменьшуватись, області взаємодії рідини та циліндра обільшуються.

В четвертому параграфі розглядається питання впливу рідини на вибір електричних умов спряження на зовнішній бічній поверхні циліндра при дослідженні дисперсійних властивостей хвилеводних систем - циліндр в рідиню. На основі чисельного аналізу зроблено висновок про те, що наявність води в циліндрі приводить до підвищення точності обчислень дисперсійних кривих за наближеними граничними умовами для електричних величин, відносно точних, до  $10^{-3}$  -  $10^{-8}$  в залежності від ділянки кривої, що є, принаймні, на порядок менше за величину розходження, яку матимемо при обчисленні дисперсійних кривих для циліндрів виготовлених з слабких п'єзоелектричних матеріалів враховуючи та не враховуючи п'єзоластивості.

В заключенні формулюються основні результати, отримані в роботі:

- розвинуто аналітичний спосіб розв'язання задач про поширення акустоелектричних хвиль в порожнистих п'єзоелектричних циліндрах в рідиню на основі тривимірної теорії електропружності і акустичного наближення для рідини;

- в заповнених ідеальною непровідною стисливою рідиню п'єзоелектричних циліндрах, виготовлених з матеріалу класу  $6mm$ , досліджено осесиметричні хвилі, при чому розроблений чисельний алгоритм побудови дисперсійних кривих дозволяє проводити відповідні розрахунки і для граничних випадків;

- проведено аналіз кінематичних характеристик руху: досліджено розподіл величин осьових та радіальних переміщень по поперечному перерізу циліндра в залежності від точки дисперсійної кривої;

- проведено аналіз енергетичних характеристик руху: досліджено залежність розподілу потоків енергії між складовими хвилевода;

виявлено закономірність розподілу потоків енергії по поперечному перерізу системи в залежності від величини фазової швидкості;

- проведено аналіз впливу рідини на вибір електричних умов спряження на зовнішній бічній поверхні циліндра при дослідженні дисперсійних властивостей розглянутих хвильоводних структур.

Основні положення дисертації викладено в публікаціях:

1. До питання поширення акустoeлектричних хвиль в заповненому рідиною п'єзоелектричному циліндрі//Українська конференція "Моделювання і дослідження стійкості систем", Тез. доп., Київ, 1995, с.86.

2. Анализ энергетических характеристик осесимметричных акустoeлектрических волн в полом пьезоэлектрическом цилиндре с жидкостью//Деп. в ДНТБ України 01.06.95. 1365-Ук95.

3. Про вплив зовнішнього середовища на поширення акустoeлектричних хвиль в порожнистому п'єзоелектричному циліндрі в рідині//Доп. НАН України, - 1995, No.11. - С. 54 - 56.

Мельник С.И. Распространение акустoeлектрических волн в пьезоэлектрических цилиндрах при взаимодействии со внешней средой.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела. Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины, Киев, 1995.

Исследуются закономерности распространения осесимметричных акустoeлектрических волн в заполненном идеальной сжимаемой жидкостью полом пьезоэлектрическом цилиндре. Показано слабое взаимодействие волновых движений в жидкости и в цилиндре в определенных диапазонах частоты. Особое внимание уделено анализу энергетических характеристик. Выявлены закономерности распределения потоков энергии по поперечному сечению системы в зависимости от величины фазовой скорости. Изучено влияние жидкости на выбор электрических условий сопряжения на внешней боковой поверхности цилиндра при исследовании дисперсионных свойств рассматриваемых волноводных структур.

Mel'nyk S.I. The propagation of the acoustoelectric waves in piezoelectric cylinders under the interaction with the external medium.

The thesis on obtaining the academic degree of the candidate of physics & mathematics science on the speciality 01.02.04 - mechanics of deformable rigid body. Timoshenko Institute of mechanics of NAS of Ukraine, Kyiv, 1995.

The propagation regularities of axisymmetrical acoustoelectric waves in hollow piezoelectric cylinder filled with ideal compressible fluid are investigated. The weak interaction of the wave motions in fluid and in the cylinder in certain range of the frequency was shown. The main consideration to the analysis of the energy characteristics was given. The regularities of the energy flux distribution on system cross-section in dependence on phase velocity were detected. The fluid influence on the choice of the electric boundary conditions at the external surface of the cylinder under the investigation of the dispersion properties of the discussed waveguided structure were studied.

Ключові слова: акустоелектричні хвилі, п'єзоелектричний циліндр, потоки енергії.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

Підд. до друку 24.11.95      Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Папір  
друк. № 3      Друк офсетний. Умовн. друк. арк. 1,0  
Умовн. фарбо-відб. 1,0      Облік-вид. арк. 1,0  
Тираж 100      Зам. № 5-4950

AB 33.608

**AB 33.608**

*[Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page.]*

*[Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page.]*

*[Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page.]*