

расходоизмерительных систем // Оптимальное проектирование в задачах химического машиностроения: Межвуз. сб. науч. тр. М., 1983. С.86-90. 5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М., 1978. 6. Тарг С.М.

Основные задачи теории ламинарных течений. М.-Л., 1951. 7. Sparrow E.M., Lin E.H., Lundgren T.S. Flow Development in the Hydrodynamic Entrance Region of Tubes and Ducts // Phys. Fluids. 1964. Vol.7. P.338-347.

УДК 681.2+658.562

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОАКУСТИЧНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ВИТРАТИ ДВОФАЗОВИХ ПОТОКІВ

© 1997, П.М.Райтер, О.Б.Стовбенко

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

На підставі аналізу існуючих технологій видобутку нафти та газу свердловин промислів показано актуальність задачі контролю фазового складу та вимірювання витрати фаз двофазових сировинних нафтогазових потоків. Розроблено методикку обробки експериментальних даних двофакторних експериментів в умовах газорідинного стенду. За допомогою методу головних компонент оцінено масштаб зміни інтенсивності віброакустичного інформаційного сигналу датчика трубопроводу. На основі факторного аналізу експериментальних даних визначено частотні складові енергетичного спектру інформаційного сигналу, амплітуди яких найбільше корелюють з витратами окремих фаз двофазового потоку.

Розвиток економіки індустріальних суспільств в ХХ столітті показав, що у зв'язку з ростом продуктивності праці доля сировини та енерговитрат у вартості готової продукції зростає. Це обумовлює, з одного боку, необхідність впровадження енергозберігаючих технологій на всіх ділянках виробництва. З другого боку, необхідно зменшувати витрати при видобутку та переробці сировинних ресурсів шляхом забезпечення комплексної розробки газових та нафтових родовищ, дотримання оптимальних режимів видобутку та первинної переробки складних потоків свердловин.

У нафтовій та газовій промисловості значна частина сировинних потоків свердловин має двофазову структуру: суміш нафти та газу, або газу і конденсату. Це зумовлює необхідність контролю витрат кожної з фаз потоку з метою вирішення вищенаведених проблем забезпечення ефективності нафтогазових підприємств. Оперативна інформація про витрату фаз потоку кожної з свердловин промислу дозволяє оптимізувати завантаження технологічного обладнання установок первинної переробки нафти, газу і конденсату. Окрім того, що зокрема є більш суттєвим, наявність такої інформації дозволяє збільшити видобуток цінних компонентів сировинної суміші свердловини, забезпечивши оптимальні умови видобутку.

Для забезпечення контролю фазового складу нафтогазових та газоконденсатних свердловин пропонується віброакустичний метод та система контролю фазового складу двофазових сировинних потоків свердловин. Цей метод забезпечує технологічні вимірювання витрати газової та рідкої фази потоку в трубопроводі свердловини на підставі аналізу віброакустичних сигналів датчика трубопроводу. В пропонованій роботі наведено аналіз результатів дослідження впливу фазових витрат двофазового потоку на вид інформаційного віброакустичного сигналу.

Стенові дослідження віброакустичного методу контролю фазового складу газорідинного потоку, описані в [2], проводились на газоводо-нафтовому полігоні "Потік" Охтирського НГДУ. Дослідження методу проводились на технологічних режимах, максимально наближених до умов газового або нафтового промислу. Це полягало в тому, що в якості газу і рідини вибирались відповідно метан та різні сорти нафти, причому газові фактори досліджуваних двофазових потоків відповідали газовим факторам на промислі (0,6-0,9).

Реєстрація інформаційних сигналів на полігоні "Потік" проводилась на вимірювальній ділянці трубопроводу (Ду=100 мм). В якості первинного перетворювача використовувався акселерометер типу 4370 фірми Брюль і К'єр,

який за допомогою спеціального пристрою жорстко кріпився до трубопроводу вимірювальної ділянки трубопроводу після гідроопору (діафрагми) в напрямку руху потоку. Вимірювальна ділянка трубопроводу встановлена на опорах. На вході та виході потоку в трубопровід вимірювальної ділянки встановлені гідравлічні демпфери, з метою виключення впливу віброакустичних сигналів завад технологічного обладнання полігона на параметри інформаційного сигналу.

Потік нафти з технологічного резервуару подається в технологічну частину полігона центробіжним насосом. Регулювання витрати нафти здійснюється за допомогою регуляторів пневмоклапанами. В якості первинних вимірювальних перетворювачів витрати рідини використовувались тахометричні перетворювачі фірми "Турбоквант" (Угорщина) з класом точності 0,5.

Потік газу подавався з технологічного колектора на полігон. Вимірювання та регулювання витрати здійснювали за допомогою набору сопел критичного витікання. Виміряні потоки газу та рідини подавались у змішувач, де забезпечувалась гомогенність суміші. Витрати компонент потоку, перепад тиску на гідроопорі та температура потоку ресструвалась синхронно з ресстрацією віброакустичних сигналів трубопроводу. Ресстрація віброакустичних сигналів датчика вібрації трубопроводу проводилась за допомогою підсилювача заряду та вимірювального магнітофона. Методика проведення експериментальних досліджень така.

1. У трубопровід вимірювальної ділянки з технологічного колектора через вузол вимірювання (набір сопел критичного витікання) та змішувач подається газ. За допомогою системи кранів набору сопел встановлюється необхідна витрата газової компоненти потоку.

2. Після робіт, пов'язаних з пуском насоса, за допомогою відсікаючої арматури здійснюється подавання рідини в одну з трьох ліній вимірювання витрати. Вибір вимірювальної лінії здійснюється залежно від необхідності забезпеченням потрібної витрати рідкої фази газорідного потоку.

3. Після проходження перехідних процесів при виведенні установки на необхідний режим руху потоку, ресструються значення витрат газової та рідкої фаз потоку, статичний тиск потоку. Дослідження показали, що для зменшення похибок вимірювання витрат необхідна ресстрація температури газу та густини нафти, які подаються на вимірювальну ділянку.

4. Синхронно з роботами, вказаними в пункті 3 здійснюється ресстрація віброакустичних сигналів датчика на магнітну стрічку вимірювального магнітофона. Термін однієї реалізації 3 хвилини.

5. Для проведення повного двофакторного експерименту за допомогою вимірювально-регулювальної апаратури полігона встановлювались режими руху потоку з різним співвідношенням витрати газу (перший фактор) і витрати рідини (другий фактор). Задавались такі режими руху потоку, щоб в результаті експериментів одержати групи режимних точок, для яких характерна постійність одного фактора та зміна від точки до точки другого фактора. Доцільно відмітити, що для виключення систематичної похибки вимірювання витрати компонент потоку режимні точки вибирались на підставі рандомізації. В результаті такого встановлення режимів одержано поле експериментальних точок, які характеризують потік при різних співвідношеннях компонент газорідного потоку. Кожній з точок відповідає визначений магнітний запис реалізації віброакустичного сигналу трубопроводу.

На підставі обробки інформаційних сигналів за допомогою спектроаналізатора типу 2134 фірми Брюль і К'єр одержано амплітудно-частотні спектри експериментальних реалізацій віброакустичних сигналів. На рис.1 наведено один з таких енергетичних спектрів в діапазоні частот 0...6400Гц.

Для визначення впливу фактора рідини і фактора газу на характеристики віброакустичного сигналу, енергетичний спектр щільності потужності останнього розділено на сім частотних діапазонів (смуг), які приведені в табл.1.

Таблиця 1

Межі інформаційних діапазонів частот

Смуга	в1	в2	в3	в4	в5	в6	в7
Діапазон частот, Гц	8 - 104	104 - 504	504 - 1000	1000 - 2000	2000 - 3000	3000 - 4384	4384 - 6400

За допомогою аналізатора сигналів т.2134 та підключеної до нього персональної ЕОМ розраховані інтегровані інтенсивності віброакустичного сигналу в кожній із семи смуг для кожного режиму вимірювання. Отже, для кожного і-го режиму вимірювання спектральна щільність потужності реалізації сигналу терміном 180 секунд дорівнює:

$$S_i = S^{b1_i} + S^{b2_i} + S^{b3_i} + S^{b4_i} + S^{b5_i} + S^{b6_i} + S^{b7_i}, \quad (1)$$

де $i=0,1...28$ - номер режиму; S_i - сумарна спектральна щільність сигналу для і-го режиму; $S^{b1_i}...S^{b7_i}$ - спектральна щільність сигналу в кожній з семи смуг спектру для і-го режиму.

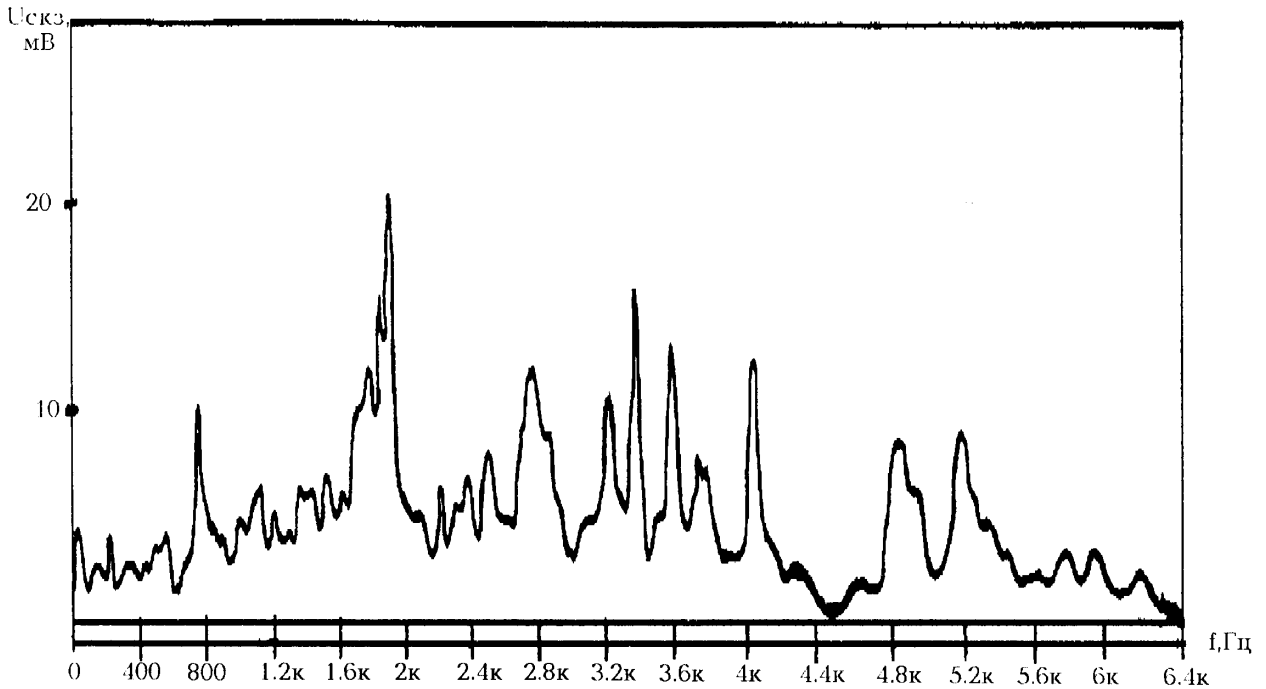


Рис.1. Енергетичний спектр віброакустичного інформаційного сигналу.

Вихідними даними для аналізу головних компонент та факторного аналізу є кореляційна матриця 7×7 , яка характеризує взаємозв'язок інтенсивностей сигналу в різних частотних

смугах при різних співвідношеннях кількості рідини і газу в потоці. В табл.2 наведена така кореляційна матриця, розрахована для семи смуг спектра за даними експериментів.

Таблица 2

Кореляційна матриця

1	0.89	0.91	0.91	0.90	0.86	0.86
0.89	1	0.97	0.93	0.91	0.88	0.87
0.91	0.97	1	0.97	0.95	0.93	0.91
0.91	0.93	0.97	1	0.99	0.98	0.97
0.90	0.91	0.95	0.99	1	0.99	0.98
0.86	0.88	0.93	0.98	0.99	1	0.99
0.96	0.87	0.91	0.97	0.98	0.99	1

При умові, що значення спектральної щільності потужності сигналу в кожній із смуг його спектра ($S^{b1} \dots S^{b7}$) приймаються як лінійно незалежні, то алгебраїчно, головні компоненти є прямокутною лінійною комбінацією семи випадкових змінних $S^{b1} \dots S^{b7}$. Геометрично, ця лінійна комбінація є вибором нової координатної системи, одержаної пертворенням оригінальної системи, з $S^{b1} \dots S^{b7}$ як координатними осями.

Нові осі є напрямками з максимальною змінованістю і забезпечують найбільш простий опис коваріаційної структури. Нехай випадковий вектор $\vec{S}_i = [S^{b1}, S^{b2}, S^{b3}, S^{b4}, S^{b5}, S^{b6}, S^{b7}]$ має кореляційну матрицю (табл.2) з характеристичними значеннями $L_1 > L_2 > \dots > L_7 = 0$. Тоді дисперсію інформаційного сигналу можна задати головними компонентами [4]:

$$Y_1 = \vec{l}_1 \cdot \vec{S} = l_{11} \cdot S^{b1} + l_{21} \cdot S^{b2} + \dots + l_{71} \cdot S^{b7}$$

$$Y_7 = \vec{l}_7 \cdot \vec{S} = l_{17} \cdot S^{b1} + l_{27} \cdot S^{b2} + \dots + l_{77} \cdot S^{b7}, \quad (2)$$

де $Y_1 \dots Y_7$ - головні компоненти; $\vec{l}_1 \dots \vec{l}_7$ - вектори вагових коефіцієнтів.

Де коваріація:

$$Cov(Y_i, Y_k) = \vec{l}_i \cdot \vec{l}_k, \quad (3)$$

де $k, i = 1, 2, \dots, 7$; $Cov(Y_i, Y_k)$ - елементи коваріаційної матриці.

Головні компоненти некорельовані. Перший головний компонент є лінійною комбінацією з максимальною дисперсією. Другий головний компонент покриває максимум дисперсії остачі і так далі до останнього компонента. Результати розрахунків показали, що перший головний компонент покриває 99,305 % дисперсії випадкової величини, другий - 0,6179 %, і відповідно наступні з третього по сьомий: 0,0509 %; 0,0204 %; 0,0046 %; 0,001 %; 0,0036 %.

В табл.3 наведено розраховані вагові коефіцієнти системи рівнянь (2).

Таблиця 3

Вагові коефіцієнти l_{ij} системи рівнянь головних компонент

0,0101	0,0379	-0,081	0,2095	-0,092	0,8711	-0,425
0,0136	0,0582	0,0364	0,1597	0,5453	0,3757	0,7287
0,0426	0,1581	0,1606	0,4127	0,6849	-0,259	-0,491
0,3428	0,65837	0,3729	0,3707	-0,389	-0,051	0,1585
0,3951	0,4702	-0,714	-0,290	0,1611	-0,030	-0,051
0,6681	-0,209	0,4685	-0,486	0,1648	0,1289	-0,103
0,5272	-0,527	-0,314	0,5504	-0,145	-0,114	0,0942

Отже, лінійна комбінація середньоквадратичних значень сигналу в семи частотних смугах, одержана для першого головного компонента, практично повністю (99 %) описує дисперсію інформаційного сигналу при проведенні досліджень. Тому розглянемо тільки вагові коефіцієнти першого головного компонента:

$$Y_1 = 0.0101 \cdot S^{b1} + 0.0379 \cdot S^{b2} - 0.0806 \cdot S^{b3} + 0.2094 \cdot S^{b4} - 0.0923 \cdot S^{b5} + 0.8711 \cdot S^{b6} - 0.4251 \cdot S^{b7}. \quad (4)$$

Аналізуючи наведені вирази, можна відмітити таке:

1. Максимальна змінність сигналу - в частотній смузі - в6 (3000...4384 Гц). Дисперсія в цій частотній смузі найбільше впливає на дисперсію всього досліджуваного сигналу, тобто можна вважати, що чутливість методу у вказаній смузі частот є максимальною.

2. При зміні параметра двофазного потоку (витрати фаз) знак зміни інтенсивності сигналу в смугах в1, в2, в4 та в6 протилежний знаку зміни інтенсивності сигналу в смугах в3, в5, в7. Іншими словами, наприклад, при зміні (збільшенні): або витрати однієї з фаз, або загальної витрати, або співвідношення фаз, інтенсивність віброакустич-

ного сигналу в смугах в1, в2, в4, в6 збільшується, а в смугах в3, в5, в7 - зменшується.

3. Враховуючи сказане в пункті 2, можна зробити висновок, що при зміні режиму руху двофазового потоку відбувається перерозподіл енергії в енергетичному спектрі віброакустичного сигналу. Тому є можливість, аналізуючи ці зміни, одержати інформацію про зміну витрати потоку.

На підставі кореляційної матриці (табл.2) виконано факторний аналіз реалізацій досліджуваних сигналів з метою:

- визначення кількості факторів, які впливають на інтенсивність та зміну інформаційного сигналу;

- визначення масштабу впливу кожного з факторів на інтенсивність інформаційного сигналу в різних смугах спектра останнього.

Оскільки режимні точки під час проведення досліджень вибирались методом рандомізації та витрати фаз потоку при цьому були лінійно незалежні, то для аналізу використана ортогональна факторна модель. Досліджуваний випадковий вектор \bar{S} спектральної щільності сигналу з сімома компонентами має середнє значення та кореляційну матрицю (табл.2). Факторна модель приймає як постулат [4], що \bar{S} є лінійно незалежною від кількох "непримітних" випадкових змінних F_1, F_2, \dots, F_7 які називаються узагальненими факторами. Тоді моделлю факторного аналізу є структура [1]:

$$S_{b1} - \mu_1 = l_{11} \cdot F_1 + l_{12} \cdot F_2 + \dots + l_{17} \cdot F_7 + E_1; \quad (5)$$

$$S_{b7} - \mu_7 = l_{71} \cdot F_1 + l_{72} \cdot F_2 + \dots + l_{77} \cdot F_7 + E_7,$$

де μ - математичне очікування спектральної щільності сигналу в полосі i ; F_i - фактор, $i=1, 2, \dots, 7$; l_{ij} - ваговий коефіцієнт; E_i - величина дисперсії, що не описується факторами, або в матричному вигляді:

$$\bar{S} - \bar{\mu} = \bar{L}\bar{F} + \bar{E}; \quad (6)$$

(7x1) (7x1) (7x7) (7x1) (7x1).

Коефіцієнти l_{ik} будемо називати вагою i -ї змінної (інтенсивності в i -й смузі) на k -й фактор, тобто матриця L є матрицею факторних ваг. Умови ортогональності моделі, яких дотримувались при виборі та задаванні режимів течії двофазового потоку на стенді такі [4]:

$$E(\bar{F}) = 0; \quad \text{Cov}(\bar{F}) = E(\bar{F}\bar{F}') = \bar{I};$$

$$E(\bar{E}) = 0; \quad \text{Cov}(\bar{E}) = E(\bar{E}\bar{E}') = \bar{U}; \quad (7)$$

$$\text{Cov}(\bar{E}\bar{F}) = \text{Cov}(\bar{E}\bar{F}') = 0,$$

де \bar{I} - одинична факторна матриця; $E(\bar{F})$ - математичне очікування вектора \bar{F} ; $E(\bar{E})$ - математичне очікування вектора \bar{E} ; $\text{Cov}(\bar{E})$ і $\text{Cov}(\bar{F}) = 0$ - коваріація відповідно векторів \bar{E} і \bar{F} .

Факторний аналіз досліджуваних даних проводився методом головних факторів вибіркової кореляційної матриці (табл.2) з VARIMAX-обертанням факторної матриці [4]. В табл.4 і табл.5 наведено результати факторного аналізу досліджуваних даних. Якщо загальну дисперсію інтенсивності інформаційного сигналу в i -й смузі частот взяти за одиницю, то в графі "сумарна спільність" наведені значення долей цієї дисперсії, які покривають вплив загальних факторів. Наприклад, в першій смузі частот - в1 за допомогою загальних факторів описується 0,9528 від повної дисперсії сигналу в цій смузі, а на вплив специфічного фактору приходиться 0,04718 від загальної дисперсії сигналу в розглянутій смузі.

Аналізуючи характеристичні значення різних факторів, можна відмітити, що на перші три фактори припадає 99,5% всієї дисперсії сигналів.

В таблиці 6 наведено результати розрахунків факторної матриці, оберненої факторної матриці та сумарні оцінки спільності для двофакторного аналізу.

Аналогічні результати розрахунків, але вже для трифакторного аналізу стендових даних подані в табл.7.

Таблиця 4

Факторний аналіз досліджуваних даних

Діапазон частот, Гц	Назва частотної смуги	Сумарна спільність	Специфічний фактор
8 - 104	S_{b1}	0,95282	0,04718
104 - 504	S_{b2}	0,97081	0,02919
504 - 1000	S_{b3}	0,99403	0,0597
1000 - 2000	S_{b4}	0,9994	0,0006
2000 - 3000	S_{b5}	0,99776	0,00224
3000 - 4384	S_{b6}	0,99974	0,00026
4384 - 6400	S_{b7}	0,99951	0,00049

Таблиця 5

Розподіл дисперсії по факторах

Фактор	Власне значення	Процент дисперсії	Сумарний процент
1	6,62009	94,6	94,6
2	0,2282	3,3	97,8
3	0,11758	1,7	99,5
4	0,02448	0,3	99,9
5	0,00798	0,1	100
6	0,00154	0,001	100
7	0,00014	0,0001	100

Таблиця 6

Результати розрахунків при двофакторному аналізі

Зміни (інтенсивності сигналу в частотних смугах)	Факторна матриця		Оцінка спільності за двома факторами	Факторна матриця після VARIMAX-обертання	
	ФАКТОРИ			фактор1	фактор2
	1	2			
S _{b1}	0,93327	-0,2339	0,92855	0,50812	0,81876
S _{b2}	0,95203	-0,2344	0,96129	0,52552	0,82772
S _{b3}	0,98083	-0,1195	0,97629	0,6258	0,76464
S _{b4}	0,99546	0,05393	0,99386	0,75629	0,64953
S _{b5}	0,9925	0,10312	0,99568	0,78816	0,61195
S _{b6}	0,98011	0,1958	0,99896	0,84332	0,53645
S _{b7}	0,97164	0,22261	0,99365	0,85574	0,51122

Таблиця 7

Результати розрахунків при трьохфакторному аналізі

Зміни	Факторна матриця			Оцінка спільності за трьома факторами	Факторна матриця після VARIMAX-обертання		
	ФАКТОРИ				ФАКТОРИ		
	1	2	3		1	2	3
S _{b1}	0,93327	-0,2399	0,26718	0,99994	0,473	0,46537	0,7481
S _{b2}	0,95203	-0,2344	-0,1754	0,99206	0,48097	0,76392	0,42089
S _{b3}	0,98083	-0,1195	-0,1163	0,98981	0,58539	0,68262	0,42564
S _{b4}	0,99546	0,05393	-0,0198	0,99425	0,72324	0,53915	0,42483
S _{b5}	0,9925	0,10312	0,01193	0,99583	0,75754	0,49166	0,42453
S _{b6}	0,98011	0,1958	0,00375	0,99897	0,81513	0,44301	0,36966
S _{b7}	0,97164	0,22261	0,03688	0,99501	0,83043	0,40289	0,37824

Аналізуючи результати, наведені в табл.4 - 7 та факторні ваги можна зробити такі висновки:

- при проведенні двофакторного експерименту змінювалась витрата рідкої фази, витрата газової фази і відповідно співвідношення між цими витратами. Результати факторного аналізу інтенсивності сигналу показують, що 99,5 % всієї дисперсії досліджуваних сигналів покривають три фактори. Причому на перший фактор припадає 94,6 %, на другий 3,3 % і на третій 1,7 % дисперсії досліджуваного сигналу;

- з табл.6 і 7 видно, що протягом руху з низькочастотного діапазону енергетичного спектра у високочастотний при двофакторному аналізі вплив першого фактора збільшується, а другого зменшується. При трифакторному аналізі, вплив першого фактора максимальний в високочастотній області (смуги в6, в7), другого фактора в середньому діапазоні (в2, в3), а третього фактора в низькочастотному діапазоні (смуга в1).

Аналізуючи характер змін власного спектру віброакустичного сигналу при постійній витраті однієї з фаз і зміні витрати другої фази, а також вище наведені твердження, можна зробити висновок, що максимальна кореляція між витратою рідкої фази потоку та інтенсивністю віброакустичного сигналу відмічається в низькочастот-

ному діапазоні: 8...104 Гц. У діапазонах 104...504 Гц та 504...1000 Гц, інтенсивність сигналу порівняно невисока і тут існує найбільша кореляція між загальною витратою суміші та інтенсивністю сигналу. У високочастотному діапазоні 3000...6400 Гц існує найбільша кореляція між витратою газової фази потоку та інтенсивністю віброакустичного сигналу.

Результати факторного аналізу та аналізу головних компонент показують значну чутливість методу для вимірювання сумарної витрати та витрати газової фази двофазового потоку при високих газових факторах.

1. Райтер П.М. Розробка та дослідження віброакустичного методу та системи контролю фазового складу газоконденсатного потоку // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Івано-Франківськ, 1995.
2. Разработка бесконтактных методов и средств измерения дебита газоконденсатных скважин. Отчет по НИР / Тема N 329-896: N гос. рег. 01900002986, МИНГ им. И.М.Губкина, М., 1990, 104с. (Научн. руков. Браго Е.И.).
3. Райтер П.М. Віброакустичний метод контролю фазового складу газоконденсатного потоку // Вимірювальна техніка та метрологія. 1995. N51. С.85.
4. Richard A. Johnson, Dean W. Wichern. Applied Multivariate Statistical Analysis. New Jersey, 1988.

УДК 5393

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ГАРМОНІЙНИХ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ, РОЗПОВСЮДЖЕНИХ У БАГАТОШАРОВИХ СТРУКТУРАХ

© 1997, М.А.Конonenко, О.М.Карпаш, Ю.К.Рубцов

У цій статті розглянутий метод, який дає змогу обчислювати проходження пружних хвиль крізь шаровидні, з достатньо великою кількістю шарів, структури за допомогою матричного аналізу. Однак, збільшити кількість шарів у багатошаровій структурі вдасться за рахунок спрощення в геометрії: метод застосовують тільки для пружних хвиль і плоских багатошарових плит.

Проходженню звуку крізь багатошарові структури приділяють значну увагу в акустиці [1,2]. Одержані результати дають можливість оцінювати такі важливі характеристики шарових структур, як коефіцієнти проходження та відбиття звуку.

Розглянемо проходження плоских звукових хвиль крізь окремих плоский пружний шар, який знаходиться у воді. Схема проходження звуку матиме вигляд, зображений на рис.1. Кут θ_1 відповідає поздовжній хвилі, кут θ_t - поперечній, при цьому

$$\frac{\sin \theta_1}{C_1} = \frac{\sin \theta_t}{C_t} = \frac{\sin \theta}{C}, \quad (1)$$

де C_1 , C_t і C - відповідно швидкості поздовжньої і поперечної пружних хвиль і звукової хвилі.

Звукові тиски в воді запишемо у вигляді (А, В - коефіцієнти відповідно відбиття й проходження)

$$\begin{aligned} P_0 &= e^{ik_1(x \sin \theta + z \cos \theta)}, \\ P_{\text{відб}} &= A e^{ik_1(x \sin \theta - z \cos \theta)}, \\ P_{\text{пр}} &= B e^{ik_1(x \sin \theta + z \cos \theta)}. \end{aligned} \quad (2)$$