

Прецизійне ультразвукове вимірювання рівня рідини через «товсту» сталеву стінку

Богушевич В. К., н.с., ORCID [0000-0001-5875-2801](https://orcid.org/0000-0001-5875-2801)

Замаренова Л. М., н.с., ORCID [0000-0003-1538-0176](https://orcid.org/0000-0003-1538-0176)

Котов Г. М., пров.інж., ORCID [0000-0002-1655-744X](https://orcid.org/0000-0002-1655-744X)

Скіпа М. І., к.т.н. с.н.с., ORCID [0000-0002-8360-0065](https://orcid.org/0000-0002-8360-0065)

Державна установа «Відділення гідроакустики Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України»
Одеса, Україна

Анотація—Розглядаються питання вимірювання рівня рідини через «товсту» сталеву стінку. При вимірюванні рівня за часом поширення сигналу найкращу точність забезпечує кореляційно-фазовий прийом складних сигналів. Але при проходженні таких сигналів через «товсту» стінку руйнується їх фазова структура, що пов'язано з хвилями Лемба вищого порядку. При вирішенні задачі сигнал, що приймається, представляється як сума сигналу, який пройшов через стінку та шар рідини, сигналів коливань товщинних резонансів поздовжніх і поперечних хвиль і сигналу нерезонансних коливань, що поширюються в стінці. Запропоновано оцінювання спотворень сигналу, що приймається, за його спектрами та методика формування оптимальних зондуючих сигналів. Експерименти на «товстій», 14,5 мм, сталевій стінці показали, що при використанні оптимальних сигналів для трьох діапазонів частот, 593–790, 395–593 і 197–395 кГц, похибка вимірювання часу не перевищила 1 мкс, а значення коефіцієнта фазової кореляції склали 0,84–0,92, 0,78–0,90 і 0,45–0,65, відповідно.

Ключові слова — вимірювання рівня через стінку; акустичний метод; хвилі Лемба; кореляційно-фазовий прийом; поширення хвиль; спотворення фази сигналу.

I. ВСТУП

В роботі [1] було розглянуто питання прецизійного вимірювання ультразвуковими пристроями рівня та характеристик рідини в сталевих резервуарах через дно. Було показано, що для оперативних вимірювань рівня найбільш придатними є часоімпульсні (часопролітні, TOF) методи і найбільша ефективність і точність досягаються за використанням кореляційно-фазового прийому ширококутових (складних) сигналів. Проте відомі нам рівнеміри [2–6] використовують прості сигнали та неоптимальні методи прийому. Кореляційно-фазовий прийом теж може використовуватися для вимірювань часу та рівня [7]. Але для вимірювань в товстостінних сталевих резервуарах він звичайно не використовується. Причиною тому є спотворення фазової структури сигналу, що приймається. У цих випадках можливості застосування кореляційно-фазового прийому будуть визначатися можливостями вибору зондуючих сигналів, спотворення фазової структури яких, при проходженні через сталеву стінку, будуть малими.

В роботі [1] розглядалося вимірювання рівня через «тонке», $h = 0,8$ мм, дно сталеві бочки. У цій задачі при частоті зондуючого сигналу $f_c = 250$ – 750 кГц спотворення фазової структури сигналу були незначними і досягалася висока точність вимірювання часу, $0,15$ мкс ($\sim 0,1$ мм рівня). Вимірювання рівня через «товсту» стінку являється більш складною задачею. Якщо в разі «тонкого» дна в діапазоні

частот, який розглядається, збуджуються тільки хвилі Лемба нульового порядку, S_0 і A_0 , то в разі «товстих» стінок будуть збуджуватися і хвилі Лемба вищого порядку, S_i і A_i . Останнє супроводжується появою множинних товщинних резонансів поздовжніх і поперечних хвиль, сигнали коливань яких будуть спотворювати фазову структуру вихідного зондуючого сигналу. Тому для «правильного» вибору характеристик зондуючого сигналу необхідно встановити закономірності збудження та поширення хвиль Лемба і передачі звуку, як через стінку, так і в стінці, отримати оцінки спотворень сигналу, що приймається, і точності вимірювань, що досягається.

Метою роботи є визначення механізмів формування сигналу, що приймається, розробка методів формування оптимальних зондуючих сигналів і визначення можливостей використання кореляційно-фазового прийому. Значимість досліджень визначається можливостями багаторазового збільшення точності вимірювань.

Нижче розглядаються питання вимірювання рівня через «товсту», $h = 14,5$ мм, сталеву пластину та «товсте», $h = 20$ мм, дно сталевого бака.

II. ХВИЛІ ЛЕМБА

Хвилі Лемба – це пружні хвилі, рух частинок яких еліптичний і лежить в площині, що містить напрям



поширення (уздовж пластини) x і нормаль до пластини (поперек пластини) z . Це і визначає передачу звуку цими хвилями як через пластину, так і вздовж пластини. Співвідношення компонент зміщення x і z залежить від типу хвилі, глибини всередині пластини та частоти. Хвилі Лемба можна представити як систему поздовжніх і поперечних хвиль (хвилі зсуву вертикальної поляризації), що поширюються під певними кутами поперек і вздовж пластини [8]. При цьому для збудження хвиль Лемба треба збудити поздовжні та зсувні хвилі. Поздовжні хвилі збудити легко, збудити хвилі зсуву складніше. При нормальному падінні звуку на пластину хвилі зсуву не збуджуються. Але при нормальній зосередженій дії на пластину і малому розмірі площинки навантаження, $d \rightarrow 0$, розподіл потужності за типами хвиль, що збуджуються, становить 49 % для релеївської (поверхневої) хвилі, 22 % – для поздовжньої і 29 % для зсувної [9]. При збільшенні розміру площинки навантаження до $d=25,4$ мм (діаметр перетворювача, що використовується) на частоті $f=500$ кГц відношення потужностей зазначених хвиль буде 3 %, 90 % і 7 % відповідно [9].

Хвилі Лемба мають дисперсію швидкості, тобто їх швидкість поширення c залежить від частоти (або довжини хвилі). Фізично ключовим параметром є відношення товщини пластини h до довжини хвилі λ . Це відношення визначає ефективну жорсткість пластини і, отже, швидкість хвилі. Найчастіше використовують добуток частоти на товщину, fh , що отримується з цього відношення. Залежності фазової швидкості від добутку fh (МГц·мм) для різних типів хвиль наведені на рис. 1 [10]. Хвилі Лемба з індексами i відповідають або симетричним, S_i , або антисиметричним, A_i , зміщенням пластини. А хвилі Лемба нульового порядку, S_0 та A_0 , являють собою поздовжню та згинальну хвилі в пластині.

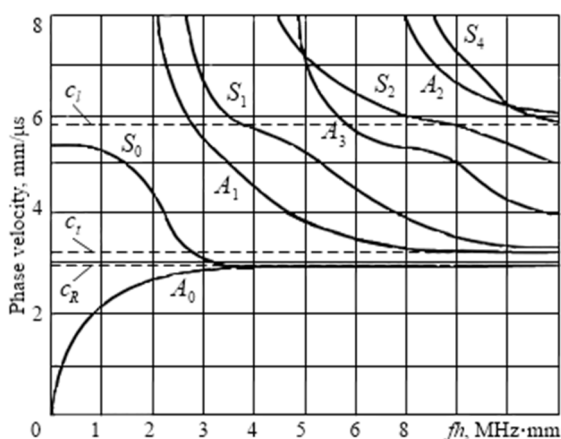


Рис. 1 Криві дисперсії фазової швидкості хвиль в сталевій пластині [10]

Хвилі A_0 і S_0 демонструють вільне поширення від нульової частоти. Хвилі Лемба вищого порядку з'являються лише при частотах, що дорівнюють частоті запирання f_b (частота зародження хвилі), при деяких критичних значеннях $f_b h$ ($2\pi h / \lambda$), при яких по товщині пластини укладається парне або непарне число поздовжніх або поперечних півхвиль [8, 11]. При частотах запирання багаторазові відбиття хвиль між верхньою і нижньою поверхнями пластини призводять до появи товщинних резонансів поперечних f_t або поздовжніх f_l хвиль. У разі пластини $h=14,5$ мм і значень швидкості $c_l=3,2$ мм/мкс, $c_t=5,8$ мм/мкс для симетричних, антисиметричних, парних і непарних мод добутки $f_b \cdot h$ і частоти запирання f_b (резонансні частоти) матимуть значення ($n \geq 1, m \geq 0$) [11]:

- моди S_{2n} : $f_b \cdot h = 3,2; 6,4; 9,6; \dots$ МГц·мм, $f_b = 220; 440; 660; \dots$ кГц;
- моди S_{2m+1} : $f_b \cdot h = 2,9; 8,7; 14,5; \dots$ МГц·мм, $f_b = 200; 600; 1000; \dots$ кГц;
- моди A_{2n} : $f_b \cdot h = 5,8; 11,6; 17,4; \dots$ МГц·мм, $f_b = 400; 800; 1200; \dots$ кГц;
- моди A_{2m+1} : $f_b \cdot h = 1,6; 4,8; 8,0; \dots$ МГц·мм, $f_b = 110; 330; 550; \dots$ кГц.

Значення частот запирання $f_b = f_l = 200, 400, 600, \dots$ кГц відповідають модам поздовжніх хвиль, при яких рух точок поверхні радіальний, поперек площини пластини. У цих випадках забезпечуються ефективне випромінювання звуку пластинною в рідину і ефективний його прийом з рідини. Значення частот запирання $f_b = f_t = 110, 220, 330, 440, \dots$ кГц відповідають модам поперечних хвиль, при яких рух точок поверхні аксіальний, в площині пластини. У цих випадках випромінювання звуку пластинною не відбувається. Але поперечні хвилі будуть поширюватися в пластині і прийматися електроакустичним перетворювачем. При розмірі перетворювача $d=25,4$ мм рівень збудження поперечних хвиль [9] і їх резонансних коливань буде істотно меншим, ніж для поздовжніх хвиль. Цей рівень також залежить від характеру рухів хвиль на різних частотах і падає зі збільшенням fh [8], зменшується зі збільшенням частоти сигналу та хвильового розміру перетворювача d/λ [9], може зменшуватися через пригнічення резонансу поперечної хвилі резонансом поздовжньої хвилі (при близьких значеннях частот, наприклад, $f_l = 200$ кГц і $f_t = 220$ кГц).

Число хвиль Лемба, які можуть поширюватися в пластині товщиною h при частоті f , тим більше, чим більше величина fh [8] (рис. 1). При «малих» товщинах пластини, $fh < 1$, в ній можуть поширюватися тільки хвилі Лемба нульового порядку, S_0 і A_0 .

При «великих» товщинах пластини, $fh > 10$, може збуджуватися велике число хвиль Лемба вищого порядку. Але рівень випромінювання звуку поверхнею пластини при цьому буде низьким. У цих хвиль при великих добутках fh амплітуда зміщення на поверхні наближується до нуля на відміну від амплітуди в товщі пластини. Для хвиль S_0 і A_0 , навпаки, рухи частинок локалізуються в поверхневому шарі (товщина якого $\sim 1/f$ [12]), має місце своєрідний скін-ефект і зміщення на поверхні максимальні [8].

Рівень випромінювання звуку пластиною визначається відношенням радіальної (поперек пластини) і аксіальної (уздовж пластини) компонент зміщень у пружній хвилі на її поверхні V_{\perp} і V_{\parallel} та значеннями цих зміщень. Для кожної моди рівень випромінювання змінюється з частотою. Рівні випромінювання і втрат на випромінювання визначають загасання пружної хвилі, що поширюється в пластині (рис. 2, б). Відношення зміщень V_{\perp} до V_{\parallel} визначається виразами [12]. Згідно з цими виразами максимум відношення V_{\perp} до V_{\parallel} досягається при фазовій швидкості хвилі Лемба, що дорівнює $\sqrt{2}c_t$. Для мод A_1 , S_1 , A_2 добутки fh , при яких ці відношення будуть максимальні, мають значення 4,55, 6,83 і 9,1 (рис. 2, а, б), що при товщині пластини $h = 14,5$ мм відповідає частотам 314, 471 і 628 кГц відповідно. Таким чином, в діапазоні частот $f = 250\text{--}750$ кГц ($fh = 3,6\text{--}10,8$) випромінювання звуку буде забезпечуватися, в першу чергу, на частотах товщинних резонансів $f_l = 400, 600$ кГц завдяки модам S_0 і A_0 та, певною мірою, модам, A_1 , S_1 і A_2 (рис. 2).

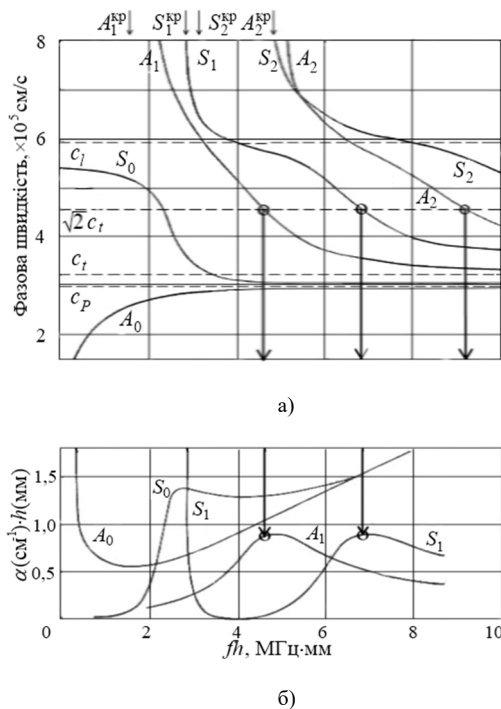


Рис. 2 Криві дисперсії фазової швидкості хвиль (а) і їх загасання (б) для сталеві пластини в воді [12]

В широкому діапазоні частот звук поширюється як поперек пластини, так і в пластині, і сигнал, що приймається перетворювачем, представляється сумою сигналу, що проходить через пластину і шар рідини (корисний сигнал), сигналів коливань товщинних резонансів поздовжніх і поперечних хвиль, що поширюються через пластину і в пластині, і сигналу нерезонансних коливань, що поширюються в пластині (перешкоди). При цьому максимальний рівень сигналу, що приймається, повинен спостерігатися на частотах товщинних резонансів поздовжніх хвиль, $f_l = 200, 400, 600$ і 800 кГц, підвищений рівень сигналу – на частотах товщинних резонансів поперечних хвиль, $f_l = 220, 330, 440, 550, 660$ і 770 кГц, і більш високий рівень – в області частот 314, 471 і 628 кГц. Ці закономірності і будуть визначати характер спектрів сигналів, що приймаються.

III. ВИБІР ЗОНДУЮЧИХ СИГНАЛІВ

При вимірюванні рівня рідини через «товсту» сталеву стінку використовувалися сигнали з лінійним законом змінювання частоти – ЛЧМ-сигнали. При цьому частота сигналів зменшувалася – змінювалася від більшої до меншої.

А. Вибір смуги частот сигналів

У разі «товстої» стінки при широкій смузі частот зондуючого сигналу, $f_c = 750\text{--}250$ кГц, в межах цієї смуги виявляються множинні частоти товщинних резонансів поздовжніх і поперечних хвиль, а в спектрі сигналу абсолютно переважаючими будуть спектральні складові цих резонансів. Внаслідок цього сигнал, що приймається, буде мати сильні спотворення амплітудної і фазової структур, тим більше, чим більша тривалість сигналу T_c (при $T_c \leq 2h/c_l$ спотворення малі). При цьому використання широкосмугових сигналів великої тривалості, бажаних у випадках залізничних цистерн, буде багаторазово зменшувати енергетичну ефективність прийому. У таких випадках в якості зондуючих сигналів, що забезпечують малі спотворення сигналу, повинні використовуватися сигнали, діапазон частот яких знаходиться в інтервалі між частотами товщинних резонансів стінки.

Початкова та кінцева частоти сигналу повинні бути на віддалі від частот товщинних резонансів. І чим більше віддаль, тим менше вплив останніх на сигнал, що приймається, менше його спотворення. У цьому разі спотворення фазової структури сигналів, що приймаються, мають бути малими, а коефіцієнти їх кореляції – високими. Недоліком підходу є вузька смуга частот сигналу. Деякого розширення смуги частот можна досягти при допустимості частот товщинних резонансів поперечних хвиль. Але це буде призводити до зменшення коефіцієнтів кореляції сигналу, що приймається.

Збільшення смуги частот сигналу і точності вимірювання часу (рівня) можна досягти при використанні одночасно декількох інтервалів частот, які знаходяться між частотами товщинних резонансів стінки. Але використання сигналів, що складаються



з декількох частин, при проходженні через стінку ускладнюється зсувом фаз і часів між цими частинами. Вирішити проблему в певній мірі можна за рахунок попередньої корекції опорного сигналу взаємо-кореляційного пристрою (часового зсуву його частин) і забезпечення суміщення піків кореляції опорних частин сигналу.

В. Спотворення сигналу при проходженні через «товсту» стінку

У випадках «товстої» стінки основними причинами спотворень фазової структури сигналу, що приймається, будуть нерівномірність фазочастотної характеристики стінки, вплив сигналів частот товщинних резонансів поздовжніх хвиль f_l , що поширюються через стінку і рідину, вплив сигналів частот товщинних резонансів поперечних хвиль f_t , що поширюються в стінці, і вплив сигналів інших коливань, що поширюються в стінці.

Відхилення фазочастотної характеристики стінки від ідеальної в інтервалі між частотами товщинних резонансів поздовжніх хвиль найбільші на границях інтервалу, поблизу резонансних частот. При цьому діапазон частот, що використовується, повинен вибиратися виходячи з компромісу між більшою смугою частот сигналу і більшою точністю прийому і меншими спотвореннями його фазової структури і більшим коефіцієнтом його кореляції. Аналіз показує, що досить високий коефіцієнт кореляції, $R \sim 0,8$, досягається при смузі частот сигналу, що дорівнює 75–80 % від інтервалу між частотами товщинних резонансів.

Колівання товщинних резонансів f_l в силу своєї великої енергетичності завжди, в більшій чи меншій мірі, впливають на форму і фазову структуру ЛЧМ-сигналу, що проходить через сталеву стінку. Будь-яка акустична або механічна дія на пружну стінку викликає появу в ній коливань властивих (резонансних) частот, в тому числі коливань частот товщинних резонансів f_l . Збудження резонансних коливань відбувається в першу чергу завдяки ударному збудженню переднім (і заднім) фронтом акустичного сигналу або механічної дії і акустичним сигналам або механічним діям, які мають частоти, близькі до частоти резонансу. У міру збільшення різниці між цими частотами збудження резонансних коливань буде зменшуватися; зменшення крутизни фронту акустичного сигналу теж буде призводити до зменшення збудження резонансних коливань.

Вплив коливань товщинного резонансу f_l на сигнал, що приймається, відбувається завдяки їх взаємодії з коливаннями стінки, обумовленими зондуючим сигналом. Якщо рівень частотної складової товщинного резонансу більше рівнів частотних складових сигналу, то в його початковій частині спостерігаються биття цих частот. У міру збільшення різниці цих частот період і амплітуда биття та похибка фази зменшуються. Фазові зсуви в початковій частині сигналу призводять до зменшення коефіцієнта кореляції і змінювання часу його приходу. Якщо рівень частотної складової товщинного резонансу буде значно

більше рівнів частотних складових сигналу, то ефекти биття, розкореляції і похибки часу будуть більшими.

Колівання товщинних резонансів поперечних хвиль високого рівня, що поширюються в пластині і приймаються разом з сигналом, відбитим від поверхні рідини, впливають на його фазову структуру подібним чином – спостерігаються биття, що супроводжуються флуктуаціями фази сигналу, розкореляцією сигналу та похибками часу його приходу.

На фазову структуру сигналу впливають і інші, нерезонансні коливання, що поширюються в пластині. В області високих частот рівень таких коливань досить малий, в області середніх частот він значно вище, а в області низьких частот цей рівень стає великим і визначає спотворення сигналу, що приймається (див. Розділ V).

IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РОБОТИ

А. Опис експериментальної установки

Схема установки для експериментальних досліджень проходження звуку через сталеву пластину (1) показана на рис. 3, а. Пластина – квадратна, зі стороною 275 мм, товщиною $h=14,5$ мм. Бочка (2) – сталевая, з товщинами стінки та дна 0,8 мм, висотою 87 см, діаметром 56 см, – заповнена водою. Одна сторона пластини (1) заглиблена в воду і вільно спирається кутовими площадками на пристрій підвіски (3), закріпленій у верхній частині бочки. Оборотної електроакустичний перетворювач (4) з металевим протектором, V 101–RB фірми OLYMPUS з центральною частотою 500 кГц і діаметром активного елемента 25,4 мм, встановлювався на верхній стороні пластини; його частотна характеристика наведена на рис. 3, б. Сигнал випромінювався перетворювачем (4), проходив через пластину (1) і шар води, відбивався від дна бочки (2) і, проходячи в зворотному напрямку, приймався цим же перетворювачем (4). У режимі випромінювання на вхід 1 діючого комутатора (5) подавалися сигнали з цифрового генератора сигналів довільної форми (6) AG2052F фірми OWON, посилені підсилювачем потужності (7) APEX A107DP до рівня $u_s = 30$ В. У режимі прийому сигнали через вихід 2 комутатора (5) надходили на 12-розрядний АЦП (8) E20–10 фірми L–CARD і далі – в ноутбук (9), де записувалися й оброблялися. Перетворювач розміщувався на поверхні пластини і фіксувався в 25-ти вічках сітки (рис. 3, з) – притискувався до неї пружиною, встановленою в корпусі з магнітами.

Схема установки для експериментальних досліджень проходження звуку через дно сталевого бака показана на рис. 3, в. Бак (2) висотою 91 см, з зовнішнім діаметром 84 см, з товщиною дна $h=20$ мм, заповнений водою. У цій вимірjuвальній схемі застосовувалися ті ж пристрої, що і на рис. 3, а. Сигнали випромінювалися перетворювачем (4), проходили через дно бака (2), шар води, відбивалися від поверхні цього шару і, проходячи в зворотному напрямку,



приймалися цим же перетворювачем, надходили на АЦП (8) і в ноутбук (9).

В. Проходження сигналів через пластину

Типовий спектр сигналу тривалістю $T_c = 500$ мкс з частотами $f_c = 850\text{--}150$ кГц, що приймається перетворювачем після його дворазового проходження через сталеву пластину завтовшки $h = 14,5$ мм і шар води, наведено на рис. 4. Спектр сигналу, в основному, відповідає наведеним вище теоретичним оцінкам. Максимальний рівень спектральних складових сигналу спостерігається на частотах товщинних резонансів поздовжніх хвиль $f_l = 395$ і 593 кГц, на частотах 197 і 790 кГц рівень істотно менше. Спостерігається товщинний резонанс попере-

чних хвиль, $f_t = 325$ кГц, і підйом рівня спектра сигналу на частоті 435 кГц, пов'язаний зі збільшеним рівнем випромінювання моди S_1 (рис. 2). Ці підйоми рівня більш помітні у випадках більш вузькосмугових сигналів $f_c = 375\text{--}225$ кГц і $575\text{--}405$ кГц (рис. 6, 7), що не мають частот товщинних резонансів поздовжніх хвиль. Аналогічний характер має спектр і в разі сигналу $f_c = 850\text{--}50$ кГц тривалістю $T_c = 750$ мкс при проходженні через «товсте», $h = 20$ мм, дно сталевого бака і рідину (рис. 5). Тут частоти товщинних резонансів поздовжніх хвиль, відповідно до більшої товщини дна, мали менші значення, $f_l = 150, 300, 450, 600, \dots$ кГц, частота товщинного резонансу поперечних хвиль мала значення $f_t = 245$ кГц.

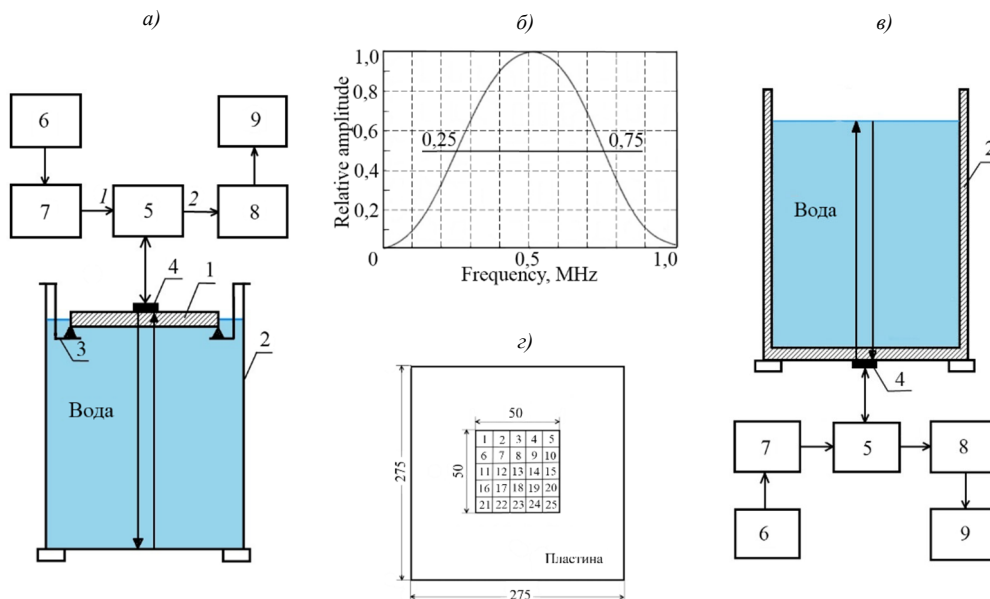


Рис. 3 Схема експериментальних досліджень: для пластини (а) і дна бака (е); частотна характеристика перетворювача (б); сітка вимірювань на пластині (з)

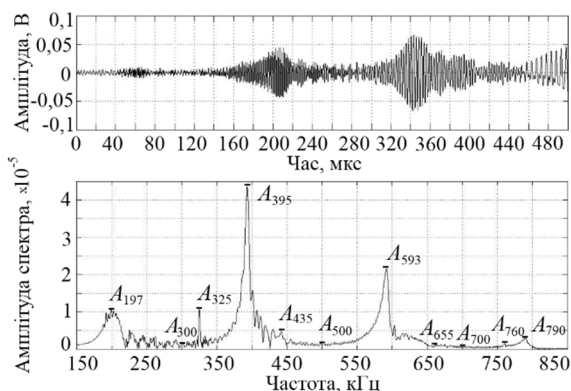


Рис. 4 Сигнал, що приймається, (вгорі) і його спектр ($f_c = 850\text{--}150$ кГц, $T_c = 500$ мкс), пластинка, $h = 14,5$ мм

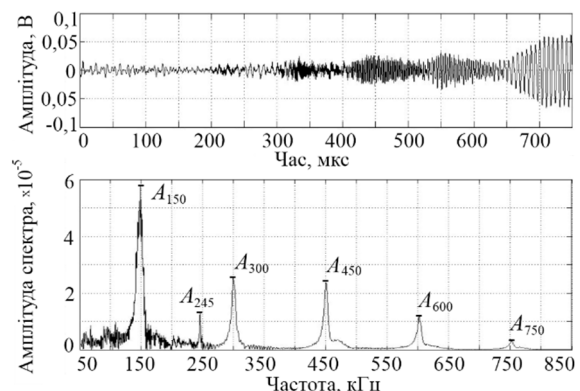


Рис. 5 Сигнал, що приймається, (вгорі) і його спектр ($f_c = 850\text{--}50$ кГц, $T_c = 750$ мкс), дно бака, $h = 20$ мм

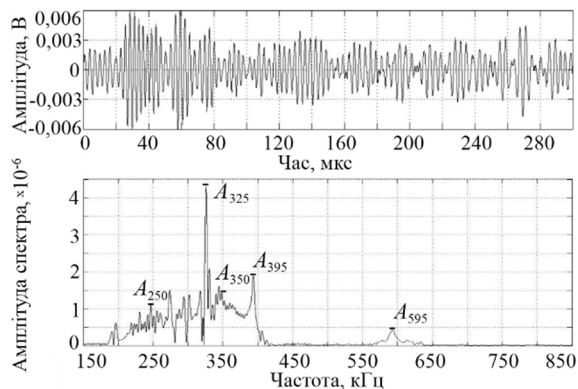


Рис. 6 Сигнал, що приймається, (вгорі) і його спектр ($f_c = 375\text{--}225$ кГц, $T_c = 300$ мкс), пластина, $h = 14,5$ мм

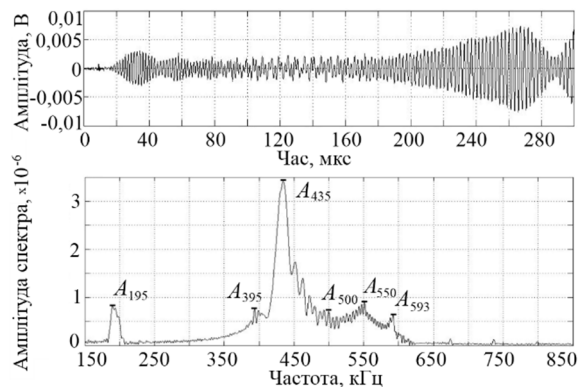


Рис. 7 Сигнал, що приймається, (вгорі) і його спектр ($f_c = 575\text{--}405$ кГц, $T_c = 300$ мкс), пластина, $h = 14,5$ мм

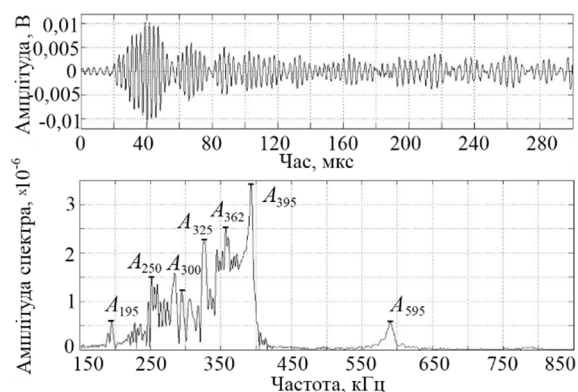


Рис. 8 Сигнал, що приймається, (вгорі) і його спектр ($f_c = 380\text{--}230$ кГц, $T_c = 300$ мкс), пластина, $h = 14,5$ мм

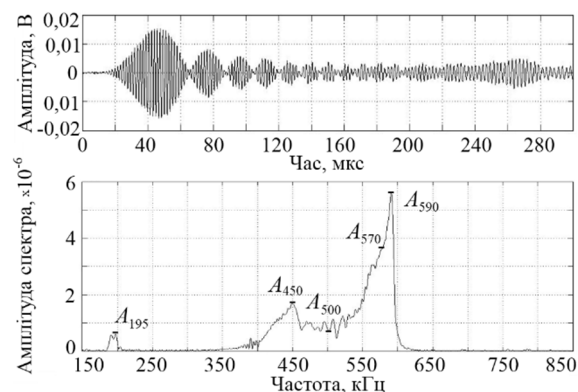


Рис. 9 Сигнал, що приймається, (вгорі) і його спектр ($f_c = 590\text{--}420$ кГц, $T_c = 300$ мкс), пластина, $h = 14,5$ мм

Переважають в спектрах широкопоздовжніх сигналів, що приймаються (рис. 4, 5), спектральних складових товщинних резонансів призводить до сильних спотворень амплітудних і фазових структур цих сигналів. При проходженні ЛЧМ-сигналу $f_c = 850\text{--}150$ кГц через сталеві стінки завтовшки 9,0, 14,5 і 20,0 мм і збільшенні його тривалості з 6,3 до 500 мкс коефіцієнти фазової кореляції сигналів, які випромінюються і приймаються, зменшуються в 3–5 разів, що зменшує енергетичну ефективність прийому в 9–25 разів.

При використанні сигналів, діапазони частот яких знаходяться в інтервалах між частотами товщинних резонансів стінки (рис. 4), спотворення сигналів, що приймаються, виявляються значно меншими (рис. 6–9), а коефіцієнти їх кореляції – більшими.

Коливання товщинних резонансів поздовжніх хвиль, що знаходяться за межами смуги частот сигналу (рис. 8, 9), впливають на сигнал, що приймається, таким чином – відбуваються биття частот, спотворення амплітудної і фазової структур сигналу, зменшення коефіцієнта його кореляції і похибка часу приходу. Причому чим більше відношення рівня частотної складової товщинного резонансу до рівнів частотних складових сигналу (рис. 8, 7), тим більші

биття в початковій частині сигналу, більші фазові зсуви та більші змінювання часу його приходу.

Вплив на форму і фазову структуру сигналу коливань товщинних резонансів поперечних хвиль, що поширюються в пластині (рис. 6), подібний – відбуваються биття частот, флуктуації фази, його розкореляція і похибка часу його приходу. Відмінності полягають в тому, що тут значні биття спостерігаються протягом всієї тривалості сигналу (рис. 6 і рис. 7–9).

С. Мінливість форми сигналу при проходженні через «товсту» пластину

Спотворення форми та фазової структур сигналу, що приймається, визначаються співвідношенням його спектральних складових, що включають корисний сигнал і перешкоди. Рівні цих спектральних складових мають велику мінливість, що і визначає мінливість коефіцієнта кореляції сигналу, що приймається, (відношення сигнал/перешкода) і моменту приходу сигналу (точності вимірювання рівня).

Мінливість спектральних складових сигналу визначається умовами передачі звуку від електроакустичного перетворювача через пластину та в пластині і залежить від його положення. Інтегральний характер нерівностей пластини в першу чергу визначає передачу звуку по площині перетворювача і в значній

мірі визначає рівень спектральних складових сигналу, пов'язаних з проходженням звуку через пластину і шар рідини. У свою чергу, локальний характер її нерівностей в точках механічного контакту пластини і перетворювача впливає на рівень збудження хвиль, що поширюються в пластині. Крім цього, віддалення перетворювача від границь пластини визначає характер і рівень перешкод, що поширюються в пластині і приймаються ним. Тому для визначення мінливості коефіцієнта кореляції сигналу та часу його приходу необхідно провести їх вимірювання при різних положеннях перетворювача на пластині. Нижче наводяться результати вимірювань через «товсту», $h = 14,5$ мм, пластину і «товсте», $h = 20$ мм, дно бака. Ці результати в основному подібні. В силу більшої зручності розміщення перетворювача зверху більша частина результатів отримана для пластини.

Співвідношення спектральних складових характерних частот сигналу (рис. 4–9) в значній мірі змінюються в залежності від нерівності пластини та положення на ній перетворювача. Для оцінки впливу положення перетворювача на ці співвідношення, була проведена серія експериментів на сталевій пластині з сигналами «низькочастотного», $f_c = 380–230$ кГц (рис. 8), і «середньочастотного», $f_c = 590–420$ кГц (рис. 9), діапазонів і широкосмуговим сигналом $f_c = 850–150$ кГц (рис. 4). Перетворювач встановлювався в центральній частині пластини – 25 положень, відстань установки 10 мм, точність установки ± 1 мм (рис. 3, з). У кожному положенні сигнали, що приймаються, реєструвалися, обчислювалися їх спектри,

визначалися рівні їх частотних складових, обчислювалися їх функції кореляції, визначалися моменти приходу. Результати цих експериментів наведено на рис. 10.

На рис. 10, а наведені залежності від положення перетворювача рівнів спектральних складових характерних частот сигналів частотного діапазону $f_c = 380–230$ кГц: A_{325} (частота товщинного резонансу поперечної хвилі), A_{362} (частота максимального рівня сигналу, що відбився від поверхні рідини), A_{395} (частота товщинного резонансу поздовжньої хвилі); на рис. 10, б – залежності від цього положення рівнів спектральних складових характерних частот сигналу $f_c = 590–420$ кГц: A_{450} (частота сигналу, близька до частоти $f = 435$ кГц підйому рівня випромінювання), A_{500} (частота, на якій рівень спектра близький до мінімального), A_{570} (частота максимального рівня сигналу, що відбився від поверхні) і A_{590} (частота, близька до частоти товщинного резонансу поздовжньої хвилі); на рис. 10, в, г – залежності рівнів спектральних складових характерних частот сигналу $f_c = 850–150$ кГц: A_{325} (частота товщинного резонансу поперечної хвилі), A_{395} і A_{593} (частоти товщинних резонансів поздовжніх хвиль), A_{300} , A_{500} і A_{700} (частоти середин діапазонів між частотами товщинних резонансів поздовжніх хвиль).

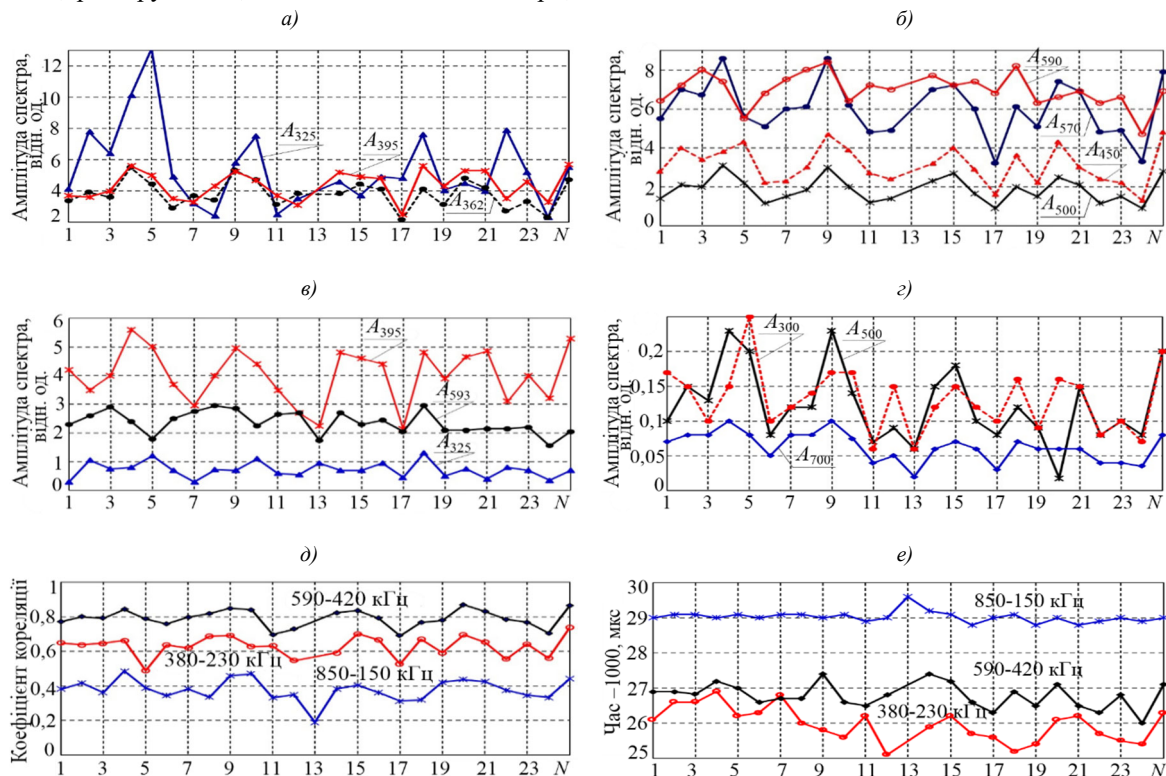


Рис. 10 Залежності рівнів спектральних складових сигналів $f_c = 380–230$ кГц (а), $f_c = 590–420$ кГц (б), $f_c = 850–150$ кГц (в, г), значень коефіцієнтів кореляції (д) і часів їх поширення (е) від положення N перетворювача (експеримент 17.10.2018)



Залежності від положення перетворювача значень коефіцієнтів фазової кореляції R для трьох зазначених сигналів наведені на рис. 10, *д*. Значення і характер змінювання коефіцієнтів кореляції сигналів, в першу чергу, визначаються співвідношенням рівнів характерних частотних складових їх спектрів, що визначають рівні корисного сигналу і перешкод (рис. 10, *а, б, в, з*). Для сигналів діапазону $f_c = 590\text{--}420$ кГц значення коефіцієнта кореляції високі, його середнє значення приблизно 0,78. Найбільші значення коефіцієнта кореляції (рис. 10, *д*) має в положеннях перетворювача, в яких значення спектральних складових, що належать корисному сигналу, A_{450} , A_{500} і A_{570} , максимальні (рис. 10, *б*). Значення рівня спектральної складової A_{593} , що представляє собою перешкоду, впливають на значення коефіцієнта кореляції менше, так як діапазон їх змінювань менший – 1,8 рази в порівнянні з 2,7, 3,4 і 3,7 рази для складових, A_{570} , A_{500} і A_{450} (рис. 10, *б*).

Мінливість рівнів різних частотних складових виявилася різною, від 1,8–1,9 і 2,3–2,6 для A_{593} і A_{395} до 5,0–6,0 для A_{325} .

Для сигналів частотного діапазону $f_c = 380\text{--}230$ кГц значення коефіцієнта кореляції нижчі, його середнє значення приблизно 0,62 (рис. 10, *д*). Такі значення коефіцієнта кореляції визначаються наявністю в спектрі відразу двох частотних складових A_{325} і A_{395} , що представляють собою перешкоду високого рівня. Найбільші значення коефіцієнта кореляції (рис. 10, *д*) має в положеннях перетворювача, в яких максимальні значення спектральної складової A_{362} (рис. 10, *а*), що характеризує рівень корисного сигналу, і не дуже великі значення складової A_{325} , яка є перешкодою.

Для сигналів частотного діапазону $f_c = 850\text{--}150$ кГц значення коефіцієнта кореляції найнижчі, його середнє значення близько 0,38 (рис. 10, *д*). Такі значення коефіцієнта кореляції визначаються дуже великим рівнем частотних складових, A_{395} , A_{593} і A_{325} , що представляють собою перешкоду, і малим рівнем частотних складових, A_{300} , A_{500} і A_{700} , що визначають корисний сигнал (рис. 3, 10, *в, з*). Вплив складових, A_{300} , A_{500} і A_{700} та складової A_{325} на значення коефіцієнта кореляції сигналів найбільший, так як найбільшим є діапазон змінювання їх рівня – 4,2, 3,8, 4,3 і 5,0 рази, відповідно, в порівнянні з мінливістю рівнів A_{395} (2,6 рази) і A_{593} (1,9 рази) (рис. 10, *в, з*).

Залежності від положення перетворювача часу поширення сигналів t для трьох частотних діапазонів наведено на рис. 10, *е*. Найменший час поширення та найбільше розсіювання значень часу спостерігаються у випадку сигналів частотного діапазону $f_c = 380\text{--}230$ кГц – середній час $t_p = 1026,0$ мкс, розсіювання

значень $\pm 0,8$ мкс. Наступними за часом приходять сигнали частотного діапазону $f_c = 590\text{--}420$ кГц. Їх середній час поширення 1026,75 мкс і вони відстають, в середньому, від низькочастотних сигналів на 0,75 мкс; розсіювання значень становить $\pm 0,55$ мкс (рис. 10, *е*). Останніми за часом приходять сигнали частотного діапазону $f_c = 850\text{--}150$ кГц (рис. 10, *е*). Їх середній час поширення 1029,0 мкс і вони відстають, в середньому, від низькочастотних сигналів на 3,0 мкс; розсіювання їх значень (рис. 10, *е*) складає $\pm 0,4$ мкс. Аномальне значення часу $t = 1029,6$ мкс в положенні 13 відрізняється від середнього значення на 0,6 мкс. Така велика відмінність часу, як і аномально низьке значення коефіцієнта кореляції (рис. 10, *д*), пояснюється мінімальними значеннями рівнів складових сигналу A_{300} , A_{500} і A_{700} та відносно високим рівнем складової A_{325} (рис. 10, *в, з*).

У великій мірі співвідношення рівнів частотних складових спектра сигналу залежить від конкретних значень його частот. В іншій серії експериментів використовувалися дещо інші сигнали – $f_c = 375\text{--}225$ кГц, $f_c = 575\text{--}405$ кГц і $f_c = 850\text{--}150$ кГц (рис. 11, *а, б, в, з, д, е*). У разі сигналу $f_c = 575\text{--}405$ кГц (рис. 7) в порівнянні з сигналом $f_c = 590\text{--}420$ кГц (рис. 9) віддаль верхньої частоти сигналу від частоти резонансу $f_l = 593$ кГц була значно більшою і збудження коливань на цій частоті було значно меншим. Зменшення рівня перешкоди призвело до збільшення середнього значення коефіцієнта кореляції сигналу, що приймається, з 0,78 до 0,85 (рис. 11, *д* та 10, *д*) і деякого зменшення розсіювання часу його приходу (рис. 11, *е* і 10, *е*). У разі сигналу $f_c = 375\text{--}225$ кГц його відмінність за частотами від сигналу $f_c = 380\text{--}230$ кГц (рис. 6, 8) мала, що і визначає малі відмінності значень коефіцієнтів кореляції і розсіювання часу приходу для цих сигналів (рис. 11, *д* та 10, *д, 11, е* і 10, *е*).

Підводячи підсумки розгляду результатів експериментальних вимірювань, можна зробити висновок, що в інтервалі частот $f = 395\text{--}593$ кГц мінливість рівнів спектральних складових сигналу менше, спотворення його фазової структури малі, значення коефіцієнта кореляції високі, $R \sim 0,85$, і висока точність вимірювання часу поширення, $\pm 0,6$ мкс. В інтервалі більш низьких частот, $f = 197\text{--}395$ кГц, мінливість рівнів спектральних складових сигналу більше, спотворення його фазової структури більше, розсіювання часу його приходу більше, $\pm 1,0$ мкс, а значення коефіцієнта кореляції – менше, $R \sim 0,60$.



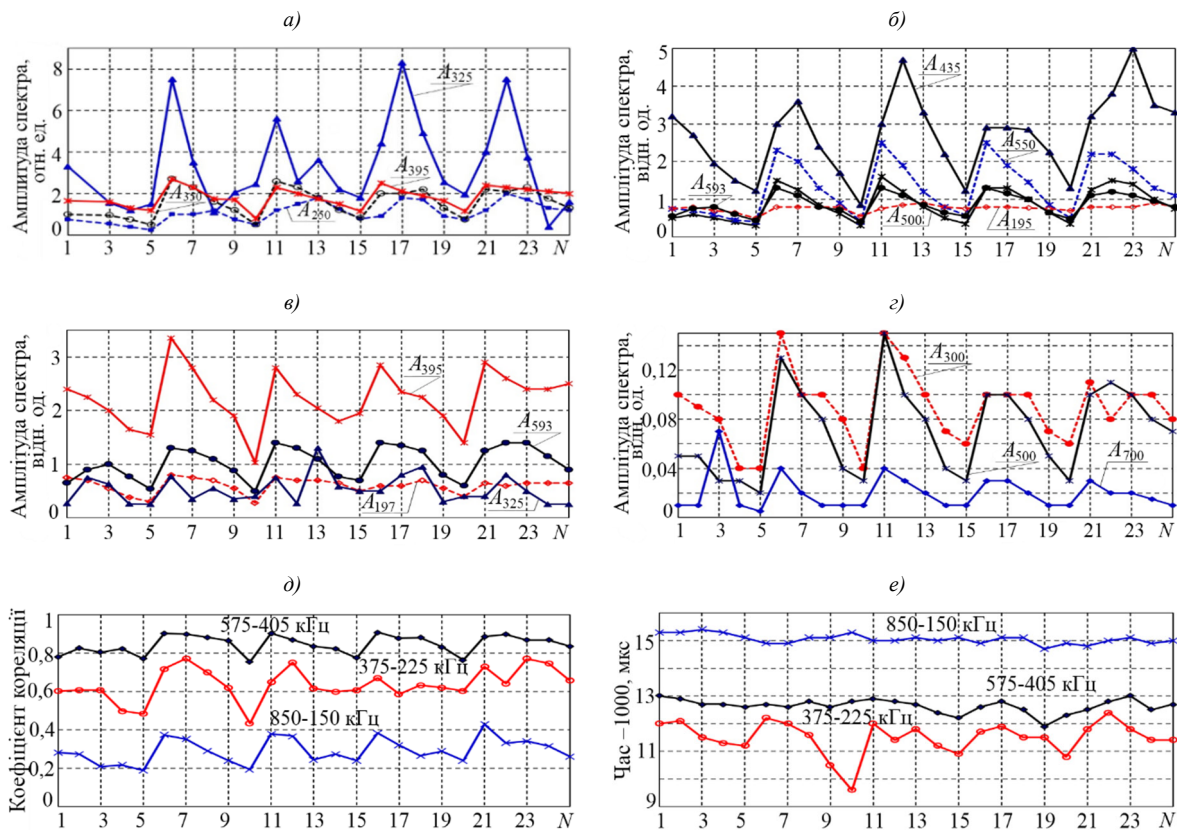


Рис. 11 Залежності рівнів спектральних складових сигналів $f_c = 375\text{--}225$ кГц (а), $f_c = 575\text{--}405$ кГц (б), $f_c = 850\text{--}150$ кГц (в, г), значень коефіцієнтів кореляції (д) і часів їх поширення (е) від положення N перетворювача (експеримент 08.07.2019)

V. МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИХ ДІАПАЗОНІВ ЧАСТОТ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИНИ ЧЕРЕЗ «ТОВСТУ» СТАЛЕВУ СТІНКУ

Можливості роботи кореляційно-фазового рівнеміра в різних діапазонах частот різні. Ці діапазони в разі сталеві пластина, $h = 14,5$ мм, можуть вибиратися в інтервалах між частотами товщинних резонансів поздовжніх хвиль, $f_l = 197, 395, 593$ і 790 кГц. У міру переходу від більш високих частот до більш низьких, $f = 620\text{--}780, 420\text{--}580, 220\text{--}380, 220\text{--}320$ та $50\text{--}180$ кГц ($fh = 9,0\text{--}11,3, 6,1\text{--}8,4, 3,2\text{--}5,5, 3,2\text{--}4,6$ та $0,7\text{--}2,6$), рівень корисного сигналу, що пройшов через пластину, в першу чергу завдяки модам S_0 і A_0 , буде зменшуватися (рис. 2), рівень сигналів частот товщинних резонансів поперечних хвиль, що поширюються в пластині, буде збільшуватися, рівень сигналу нерезонансних частот, що поширюються в пластині, в першу чергу завдяки модам, S_1 , A_1 і S_0 , буде збільшуватися. При цьому відношення сигнал/перешкода зі зменшенням частоти буде зменшуватися, досягаючи свого мінімуму в інтервалі значень $fh = 1,0\text{--}2,0$ ($f = 70\text{--}140$ кГц). Однак зі зменшенням частоти буде зменшуватися поглинання звуку в рідині, що дозволяє підвищити її максимальний рівень, що вимірюється, або допустиму в'язкість. Тому важливо встановити значення відношень сиг-

нал/перешкода і можливості роботи рівнеміра в різних частотних діапазонах. Для цього була проведена ще одна серія експериментів.

Відношення сигнал/перешкода на вході та виході фазового корелятора. Результати експериментів

Наведені нижче результати отримані у випадку слабо поглинаючої рідини – води. У випадках більш поглинаючих рідин результати роботи при використанні високих частот будуть гіршими.

В інтервалі частот $f = 593\text{--}790$ кГц (наприклад, сигнал $f_c = 800\text{--}590$ кГц, положення № 13) проходження корисного сигналу через пластину і шар води хороше, середній рівень сигналу $u_s = 5\text{--}6$ мВ, підйом рівня спектра в області частот товщинних резонансів $f_l = 593$ і 790 кГц невеликий, спостерігаються підйом рівня спектра на частоті $f \sim 622$ кГц, невеликий підйоми рівня спектра на частотах товщинних резонансів $f_l = 657$ і 758 кГц, рівень сигналу, який поширюється по пластині і приймається, малий, $\sim 0,6$ мВ (рис. 12). Це і визначає малі спотворення фазової структури сигналу, що приймається, високі значення коефіцієнта його фазової кореляції, $R \sim 0,883$, і низький рівень кореляційного шуму. При цьому відношення на виході кореляційного пристрою корисного сигналу (значення коефіцієнта кореляції в момент приходу сигналу) до середнього значення шуму (значення коефіцієнта кореляції в інші моменти часу)

можна оцінити величиною $\sim 13,0$, а відношення сигналу до максимальних значень шуму – величиною $\sim 6,0$ (рис. 12).

В інтервалі частот $f = 395\text{--}593$ кГц (наприклад, сигнал $f_c = 590\text{--}393$ кГц, положення № 13) проходження корисного сигналу через пластину добре, середній рівень сигналу $u_s = 8\text{--}10$ мВ, підйом рівня спектра в області частот товщинних резонансів $f_l = 395$ і 593 кГц невеликий, підйом рівня спектра в області частот товщинних резонансів $f_t = 440$ і 550 кГц не виражений яскраво, рівень сигналу, який поширюється по пластині і приймається, малий, менше $0,5$ мВ (рис. 13). Це і визначає малі спотворення фазової структури сигналу, що приймається, високі значення коефіцієнта його фазової кореляції, $R \sim 0,90$, і низький рівень кореляційного шуму. При цьому відношення корисного сигналу до середнього і максимального рівнів шуму на виході кореляційного пристрою можна оцінити величинами $\sim 13,0$ і $\sim 5,5$ (рис. 13).

В інтервалі частот $f = 197\text{--}395$ кГц (наприклад, сигнал $f_c = 375\text{--}225$ кГц, положення № 13) проходження корисного сигналу через пластину погане, його рівень можна порівняти з рівнем завад, його часова структура в сигналі, що приймається, проявляється слабо (рис. 14). Рівень завад, що поширюються в пластині і приймаються перетворювачем, становить $\sim 2\text{--}3$ мВ і ці завади в першу чергу пов'язані з товщинним резонансом $f_t = 325$ кГц. У часовій області сигнал, що приймається, має значні флуктуації рівня і фази, тому значення коефіцієнта його фазової кореляції низькі, $R = 0,316$.

Для цього ж сигналу в іншому положенні перетворювача, № 5, відносний рівень спектральної складової $f_t = 325$ кГц значно менше і значення коефіцієнта кореляції більше, $R = 0,679$ (рис. 15). Для цього сигналу в різних положеннях перетворювача відношення на виході кореляційного пристрою корисного сигналу до середнього і максимального рівнів шуму

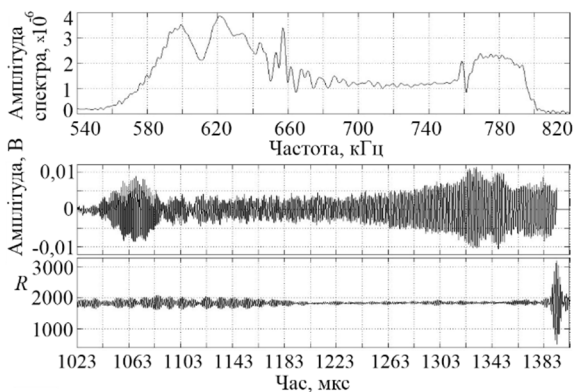


Рис. 12 Сигнал, що приймається, (в центрі), його спектр (вгорі) і функція фазової кореляції (внизу) ($f_c = 800\text{--}590$ кГц, $T_c = 370$ мкс), пластина, $h = 14,5$ мм

можна оцінювати величинами від $2,0$ до $5,0$ і від $1,5$ до $3,5$.

У разі сигналу $f_c = 320\text{--}220$ кГц, інтервал частот якого знаходиться між частотами товщинних резонансів $f_t = 325$ кГц і $f_l = 197$ кГц, проходження корисного сигналу через пластину теж погане, $u_s = 2$ мВ. Але і рівень перешкод, завдяки пригніченню частотних складових $f_l = 395$ кГц і $f_t = 325$ кГц, значно нижче, ~ 1 мВ (рис. 16). Часова структура сигналу, що приймається, в значній мірі відповідає структурі сигналу, що випромінюється, значення коефіцієнта фазової кореляції істотно вищі, ніж в разі попереднього сигналу, $R = 0,65\text{--}0,73$, відношення значення піку кореляції корисного сигналу до середнього і максимального рівнів кореляційного шуму становить $4\text{--}5$ і $2\text{--}2,5$.

У разі сигналу $f_c = 160\text{--}40$ кГц, частоти якого менше частоти товщинного резонансу $f_l = 197$ кГц, проходження корисного сигналу через пластину погане і його рівень низький. У той же час рівень сигналу, який поширюється по пластині і приймається, високий, рівень результуючого сигналу становить $5\text{--}8$ мВ (рис. 17). У спектрі сигналу, що приймається, спостерігаються складові підвищеного рівня, пов'язані з частотами $f = 66$ кГц і $f_l = 197$ кГц, і складова високого рівня, пов'язана з частотою товщинного резонансу $f_t = 110$ кГц. Остання і визначає характер сигналу у часовій області. У момент приходу сигналу, відбитого від поверхні рідини, значення коефіцієнта фазової кореляції для серії сигналів становили від $0,22$ до $0,28$, в той час як в деякі інші моменти часу значення коефіцієнта кореляції досягали $0,38\text{--}0,48$ (рис. 17). Це дозволяє припускати, що в пластині завдяки багаторазовим відбиттям від її границь «досить» довго поширюється сигнал, який подібний випроміненому. Відношення сигнал/перешкода в даному випадку виявляється менше одиниці і використання такого сигналу для задач вимірювання рівня рідини є досить проблематичним.

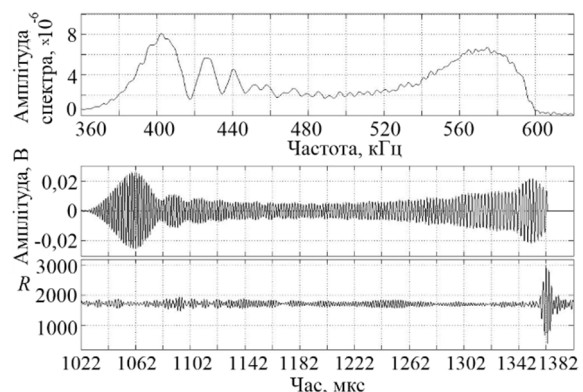


Рис. 13 Сигнал, що приймається, (в центрі), його спектр (вгорі) і функція фазової кореляції (внизу) ($f_c = 590\text{--}393$ кГц, $T_c = 341$ мкс), пластина, $h = 14,5$ мм

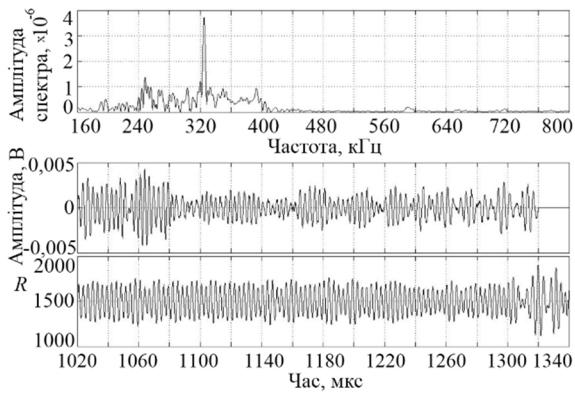


Рис. 14 Сигнал, що приймається, (в центрі), його спектр (вгорі) і функція фазової кореляції (внизу) ($f_c = 375\text{--}225$ кГц, $T_c = 300$ мкс), пластина, $h = 14,5$ мм, положення № 13

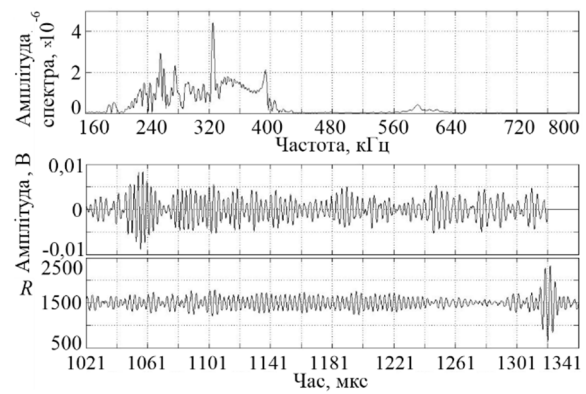


Рис. 15 Сигнал, що приймається, (в центрі), його спектр (вгорі) і функція фазової кореляції (внизу) ($f_c = 375\text{--}225$ кГц, $T_c = 300$ мкс), пластина, $h = 14,5$ мм, положення № 5

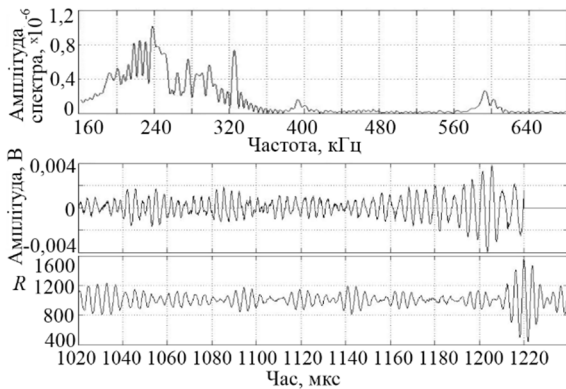


Рис. 16 Сигнал, що приймається, (в центрі), його спектр (вгорі) і функція фазової кореляції (внизу) ($f_c = 320\text{--}220$ кГц, $T_c = 200$ мкс), пластина, $h = 14,5$ мм

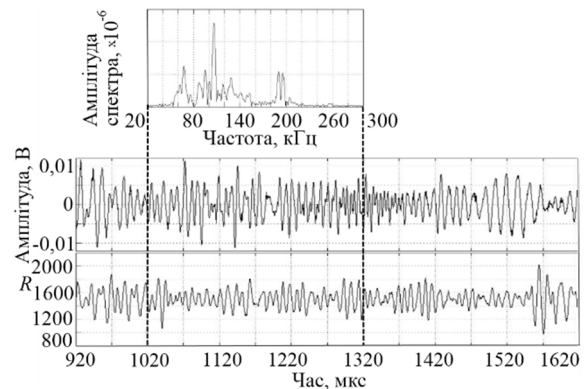


Рис. 17 Сигнал, що приймається, (в центрі), його спектр (вгорі) і функція фазової кореляції (внизу) ($f_c = 160\text{--}40$ кГц, $T_c = 300$ мкс), пластина, $h = 14,5$ мм

У разі «товстого» дна бака, $h = 20$ мм, частоти товщинних резонансів поздовжніх хвиль матимуть значення $f_l = 150, 300, 450, \dots$ кГц. При цьому за аналогією з пластиною найменш сприятливим для роботи буде діапазон частот $f = 30\text{--}150$ кГц, в якому високий рівень перешкод. Діапазони частот $f = 150\text{--}300$ кГц і $300\text{--}450$ кГц через мале поглинання звуку в рідині будуть досить сприятливими для роботи. Але в цих випадках більш вузька, в порівнянні з пластиною, смуга частот сигналу буде погіршувати точність вимірювань.

ВИСНОВКИ

В роботі представлено теоретичні оцінки спектрів сигналів для різних діапазонів частот в задачі вимірювання рівня рідини через сталеву стінку, отримано результати експериментальних вимірювань цих спектрів, що опинилися близькими до теоретичних оцінок.

Для теоретичних оцінок параметрів зондуючих сигналів, що забезпечують малі спотворення фазової

структури сигналів, що приймаються, при проходженні через сталеву стінку, отримано експериментальне підтвердження правильності таких оцінок.

Для сталевієї пластини товщиною 14,5 мм для різних діапазонів частот отримано експериментальні дані про змінювання рівнів частотних складових сигналу, що приймається, значень коефіцієнта його фазової кореляції і часу поширення при змінюванні положення перетворювача. Показано високу точність вимірювання часу, в межах ± 1 мкс. Для високочастотного, 593–790 кГц, і середньочастотного, 395–593 кГц, діапазонів частот значення коефіцієнта кореляції високі, 0,80–0,92 і 0,70–0,90, для низькочастотного діапазону, 197–395 кГц, ці значення нижче, 0,42–0,75.

Отримано теоретичні оцінки відношення корисного сигналу до перешкод і можливостей роботи вимірювача в різних діапазонах частот. Експериментальні дані показують, що в високочастотному і середньочастотному діапазонах це відношення велике і забезпечується якісна робота вимірювача, в низько-

частотному діапазоні це відношення нижче, але працездатність зберігається, при більш низьких частотах, $f < 197$ кГц, відношення мале і збереження працездатності проблематично.

Результати робіт показали, що застосування кореляційно-фазового прийому складних сигналів для вимірювання часу (рівня) через «товсту» сталеву стінку можливо і забезпечує більш ефективну роботу і більшу точність вимірювань в порівнянні з іншими відомими методами.

ПОДЯКА

Автори висловлюють подяку своїм колегам Жаворонкову Ю. К. і Вороніну О. Ю. за надану допомогу в підготовці апаратурного забезпечення і сприяння в проведенні експериментальних робіт.

ВНЕСОК АВТОРІВ

Роботи розділів I, II та III виконані спільно Богушевичем В. К., Замареновою Л. М., Скіпою М. І. Роботи розділу IV виконані спільно Богушевичем В. К., Замареновою Л. М., Котовим Г. М.. Роботи розділу V виконані спільно Богушевичем В. К., Котовим Г. М..

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] V. K. Bohushevych, L. M. Zamarenova, G. M. Kotov, M. I. Skipa, "Precizionnye ul'trazvukovye izmeriteli urovnya zhidkosti v zakrytyh rezervuarah [Precision Ultrasonic Meters of Fluid Level in Sealed Containers]", *Mikrosistemy, elektronika ta akustyka.*, vol. 24, no. 1, pp. 61–69, 2019, DOI: [10.20535/2523-4455.2019.24.1.160991](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.1.160991).
- [2] Urovnemer ul'trazvukovoj portativnyj UUP1-P1. Rukovodstvo po ekspluatacii, Kyiv OOO ND Ltd [Portable ultrasonic level gauge UUP1-P1. Operations manual, Kyiv, ND, Ltd], [Online]. Available: <http://www.eriskip.ru/disc/pdf/UUP1P1.pdf>. Accessed on: April 18, 2017.
- [3] Urovnemer ul'trazvukovoj perenosnoj UZUM-2-P. Rukovodstvo po ekspluatacii, S.-Peterburg, ZAO "SPEK" [Portable ultrasonic

level gauge UZUM-2-P. Operations manual, S.-Peterburg, "SPEK", JSC], [Online]. Available: <http://spec.ru/files/catalog/files/846079.pdf>. Accessed on: May 30, 2017.

- [4] Texas Instruments. TDC 1000, [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tdc1000.pdf>. Accessed on: July 7, 2017.
- [5] Avtomatizirovannyj ul'trazvukovoj urovnemer AUZUR-02, N. Novgorod [Automated ultrasonic level gauge AUZUR-02, N. Novgorod], [Online]. Available: <http://www.vvgnn.com/data/pages/files/file.1323775818.pdf>. Accessed on: May 30, 2017.
- [6] Urovnemer-analizator Analik-M. Rukovodstvo po ekspluatacii, Kyiv, OOO "NPF "UAT" [Level meter-analyzer Analik-M. Operations manual, Kyiv, "NPF "UAT", Ltd], [Online]. Available: http://npfuet.com.ua/Analik_manual.pdf. Accessed on: May 17, 2013.
- [7] B. J. Tucker, A. A. Diaz, and B. A. Eckenrode, "Advanced ultrasonic measurement methodology for non-invasive interrogation and identification of fluids in sealed containers", in *Proc. of SPIE*, vol. 6178, pp. 61780K-1–61780K-12, 2006. DOI: [10.1117/12.660439](https://doi.org/10.1117/12.660439).
- [8] I. A. Viktorov, *Zvukovye poverhnostnye volny v tverdyh telah [Sound Surface Waves in Solids]*, Moscow, USSR, Nauka, 1981.
- [9] V. T. Grinchenko, V. V. Meleshko, *Garmonicheskie kolebaniya i volny v uprugih telah [Harmonic Vibrations and Waves in Elastic Solids]*, Kyiv, Naukova dumka, 1981.
- [10] Z. Nazarchuk, V. Skalskyi, O. Serhiyenko, *Acoustic Emission: Methodology and application*, Springer International Publishing AG 2017, ISBN: 978-3-319-49348-0, DOI: [10.1007/978-3-319-49350-3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49350-3).
- [11] C. Prada, D. Clorennec, D. Royer, "Local vibration of an elastic plate and zero-group velocity Lamb modes", *Journ. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 124, no. 1, pp. 203–212, 2008, DOI: [10.1121/1/2918543](https://doi.org/10.1121/1.2918543).
- [12] L. G. Merkulov, "Zatuhanie normal'nyh voln v plastinah, nahodyashchihysya v zhidkosti [Attenuation of Normal Waves in Plates Situated in Fluid]", *Akust. Zhurn.*, vol. 10, no. 2, pp. 206–212, 1964.

Надійшла до редакції 10 серпня 2020 року



Precision Ultrasonic Measurement of Fluid Level through a “Thick” Steel Wall

V. K. Bohushevych, Researcher, ORCID [0000-0001-5875-2801](https://orcid.org/0000-0001-5875-2801)

L. M. Zamarenova, Researcher, ORCID [0000-0003-1538-0176](https://orcid.org/0000-0003-1538-0176)

H. M. Kotov, Leading Engineer, ORCID [0000-0002-1655-744X](https://orcid.org/0000-0002-1655-744X)

M. I. Skipa, PhD Senior Researcher, ORCID [0000-0002-8360-0065](https://orcid.org/0000-0002-8360-0065)

State Institution “Hydroacoustic Branch of Institution of Geophysics by S. I. Subbotin name of NAS of Ukraine”
Odesa, Ukraine

Abstract—Issues of the fluid level measurement through a steel wall are considered. When level measuring by signal propagation time, correlation-phase reception of complex signals provides the best accuracy. However, when such signals pass through an elastic wall, distortions of their phase structure occur. These distortions are associated with vibrations of the thickness resonances of longitudinal and transverse waves and with propagation of other nonresonance vibrations in the wall, which are interferences for the useful signal passing through the wall and the fluid layer. Herewith, to ensure the small distortions of the received signal, it is necessary to choose the characteristics of the probing signal “correctly”. Therefore it is necessary to determine regularities of wave propagation of different frequencies through the wall and in the wall. The aim of this study is to determine the mechanisms of the received signal forming, to develop the methods for the optimal probing signal forming, and to determine a possibility of correlation-phase reception using and an achievable measurement accuracy.

A scheme for received signal forming is proposed. It considers a signal passing through the wall and the fluid layer; the signals of the thickness resonance vibrations of the longitudinal waves propagating through the wall and the fluid layer; the signals of the thickness resonance vibrations of the transverse waves propagating in the wall, and the signals of the nonresonance vibrations propagating in the wall. The methods for the level estimation of the referred above vibrations (and their signals) based on Lamb’ wave theory are suggested. These methods permit to predict the characteristics and spectra of the received signals. A technique for estimation of the phase structure distortions and correlation coefficient of received signal in accordance with spectral component relationship is proposed. A technique for the forming of the optimal probing signal that provides small distortions of the received signal and high correlation coefficient is proposed.

The theoretical estimates of the received signal spectra in different frequency ranges are given. Experimental proof of these spectra found. The theoretical estimates of the probing signal parameters providing small phase structure distortions of the received signals are given. Experimental proof of the effectiveness of such signal using found. The theoretical estimates of the ratio of the useful signal to interference in different frequency ranges are given. It is shown experimentally for a plate of 14.5 mm thick that this ratio is large in high- and mid-frequency range (597–791, 395–593 kHz), in that case a qualitative operation of a meter is ensured. This ratio is fewer in low-frequency range (197–395 kHz), but the meter’s operability is hold true. The ratio is small at lower frequencies and operability ensuring is problematic. Experimental measurements show that in the case of optimal signal using the time measurement error for all frequency ranges do not exceed 1 μ s, the correlation coefficient is ~ 0.84 – 0.92 at high-frequency range, ~ 0.78 – 0.90 at mid-frequency range, and ~ 0.45 – 0.65 at low-frequency one.

Application of correlation-phase reception the complex signals for time (level) measurement through a “thick” steel wall is possible at optimal probing signal parameters; it provides more effective operation and greater measurement accuracy compared to other known methods and devices. One can expect that such high indicators of accuracy and operational efficiency will hold true for a wide range of wall thicknesses, level of fluid and its characteristics.

Keywords — level measurement through wall; acoustic method; Lamb’ waves; phase-correlation reception; wave propagation; signal phase distortion.

