

УДК 627.762

О.І. Хоменко, Г.А. Баглюк

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АКУСТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМУ ПОРОШКОВИХ ДЕТАЛЕЙ ДОВІЛЬНОЇ ФОРМИ

У статті розглянуто методи вимірювання об'єму пористих порошкових деталей, основані на пружних властивостях стовпа повітря у замкненому об'ємі. Ці методи принципово не потребують занурення деталей у рідину, як при гідростатичному зваженні. Проаналізовані причини малого розповсюдження таких методів та типові помилки при практичній реалізації пристроїв, що базуються на таких методах. Наведені результати лабораторних випробувань робочого макету пристрою для вимірювання об'єму порошкових деталей.

Ключові слова: порошкова металургія, гідростатичне зважування, пористість, акустичний резонанс, амплітудно-частотна характеристика, фазочастотна характеристика.

Форм. 6. Рис. 4. Літ. 2.

А.И. Хоменко, Г.А. Баглюк

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА ПОРОШКОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

В статье рассмотрены методы определения объема пористых порошковых деталей, основанные на упругих свойствах столба воздуха. Эти методы принципиально не требуют погружения деталей в жидкость, как при гидростатическом взвешивании. Проанализированы причины малого распространения таких методов и типичные ошибки при практической реализации устройств, базирующихся на них. Приведены результаты лабораторных испытаний рабочего макета устройства для измерения объема порошковых деталей.

Ключевые слова: порошковая металлургия, гидростатическое взвешивание, пористость, акустический резонанс, амплитудно-частотная характеристика, фазочастотная характеристика.

A. Khomenko, G. Baglyuk

FEATURES OF ACOUSTIC METHODS USAGE FOR ARBITRARY SHAPE POWDER DETAILS VOLUME MEASUREMENT

This paper deals with porous powder details volume measurement based upon the column of air elastic properties. These methods in principle don't expect immersing details into liquid like hydrostatic weighting do. The reasons of low propagation of such methods as well as typical faults of their practical realization are analysed. Results of volume measuring device model laboratory tests are done.

Keywords: powder metallurgy, hydrostatic weighting, porosity, acoustic resonance, gain-frequency characteristics, phase-frequency variation.

Постановка проблеми. Густина тіла є базовою характеристикою матеріалу, яку, в свою чергу, неможливо визначити без вимірювання об'єму деталі, виробу чи дослідного зразку. Стандартним методом визначення об'єму тіл довільної або неправильної форми є гідростатичне зважування. Недоліками цього методу є складність, копіткість та необхідність занурювати тіло у рідину. Останній недолік є дуже суттєвим і принципово неусувним, особливо якщо з якихось причин занурювати зразок, деталь чи виріб у рідину не можна. Геометричний метод є прийнятним тільки тоді, коли тіло можна розподілити на деяку кількість геометричних примітивів, але навіть у такому випадку він дає суттєву похибку, особливо у разі використання пористих матеріалів. Це ж саме зауваження стосується стереологічної реконструкції. Бажано мати методи та пристрої для вимірювання об'єму, які не пов'язані з зануренням тіл у рідину.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Акустичні методи вимірювання об'єму посудин, що базуються на пружних властивостях стовпа повітря, широко відомі з літератури, у тому числі патентної, але пропозицій використання цих методів для вимірювання об'єму твердих тіл відомо не так багато. Зокрема, використання акустичного методу для визначення об'єму тіла, що розташоване у посудині, запропоновано у праці [1]. Схема пристрою для визначення об'єму зображена на рис. 1а. Пристрій містить пневмоциліндр 1 для надійного піджиму піддонів 2 та 12 відповідно до вимірювальної камери 4, у яку вміщено зразок 3, об'єм якого треба виміряти, та компенсаційної камери 11. До камер 4 та 11 приєднані горловини 5 і 10, на інших кінцях яких розміщені акустичні приймачі 6, 9 та акустичні збудники 7, 8. До вказаних збудників та приймачів приєднано електронний блок (на схемі не показаний), який живить акустичні збудники синусоїдальним сигналом, а також містить підсилювачі сигналів акустичних приймачів та детектори. Різниця вихідних сигналів детекторів подається на вольтметр. Сукупність горловини та камери являє собою коливальну систему, частота резонансу якої, згідно [1], становить

$$f_p = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{F_T}{V l_T}}, \quad (1)$$

де f_p - частота резонансу системи, Гц, c - швидкість звуку в повітрі, м/с F_T і l_T - переріз та довжина горловини, m^2 і м, відповідно, V - об'єм посудини, m^3 .

Амплітудно-частотні характеристики вимірювальної (крива 1) та еталонної (крива 2) коливальних систем наведені на рис. 1б.

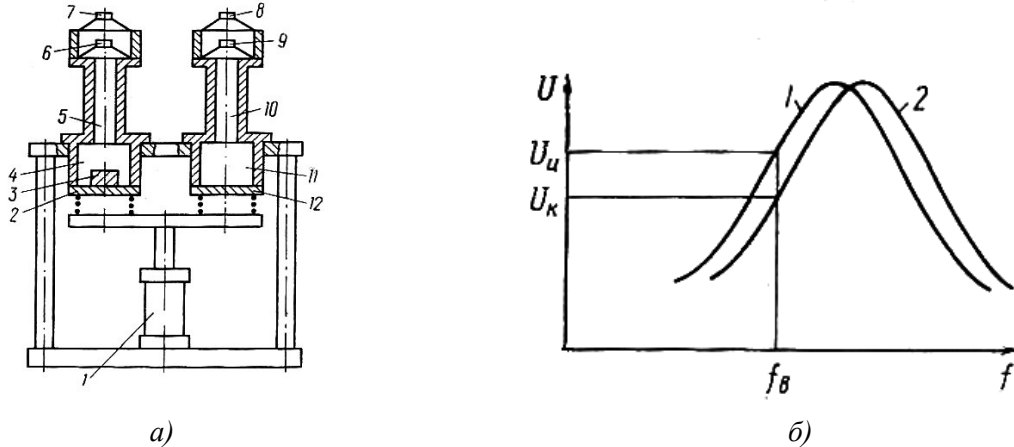


Рис. 1. Прилад для вимірювання об'єму акустичним методом: а) схема, б) амплітудно-частотні характеристики коливальних систем

Ідея побудови пристрою полягає в тому, що в обох коливальних системах збуджуються звукові коливання однакової частоти. За рахунок наявності у вимірювальній камері зразку, об'єм повітря у ній буде меншим, ніж в еталонній, тож, згідно (1), частота власного резонансу вимірювальної системи буде дещо вищою за еталонну. Тому амплітуда сигналу на виході акустичного приймача вимірювальної коливальної системи буде відрізнятися від амплітуди сигналу на виході акустичного приймача еталонної коливальної системи, і ця різниця буде тим більшою, чим більша різниця об'ємів повітря у вимірювальній та еталонній камерах, тобто, чим більший об'єм зразку.

Невирішені частини проблеми. При розгляданні запропонованого приладу одразу виникає низка запитань. По-перше, якщо вираз (1) є справедливим для розглянутої коливальної системи, то будь-яке зменшення об'єму повітря у вимірювальній камері призведе до підвищення частоти власного резонансу системи. З рис. 1б, наведеного у [1], випливає протилежна картина. З цього ж рисунку виходить, що вимірювання відбуваються чи мають відбуватися не на частоті резонансу еталонної камери, а на схилі амплітудно-частотної характеристики коливальної системи, тобто відношення сигнал/завада при вимірюванні свідомо погіршують. З іншого боку, стабільність вказаних амплітудно-частотних характеристик, а значить і сталість різниці вихідних напруг детекторів при фіксованому об'ємі зразку ніяк не обговорюється. По-друге, у якості основного джерела похибок у запропонованому приладі автори вказують різницю температур у коливальних системах, зумовлену внесенням зразку у вимірювальну камеру. Дійсно, загальновідомо, що швидкість звуку у повітрі збільшується лінійно на 0,6 м/с при підвищенні температури на $1^\circ C$. Але це джерело похибок, на наш погляд, є суттєвим тільки при дослідженні зразків та деталей з температурою, що значно відрізняється від кімнатної. Крім того, температурна похибка може бути легко врахована. Набагато більш суттєвим здається вплив низькочастотних акустичних та електричних завод. Адже автори статті [1] вказують робочу частоту приладу 100 ... 160 Гц, а саме у цьому діапазоні зосереджені акустичні шуми побутового та технологічного обладнання, транспорту, гармоніки індустриальних електричних завод, тощо. Ці фактори авторами згаданої статті навіть не розглядаються як потенційне джерело похибок. По-третє, з опису принципу дії приладу зрозуміло, що він реєструє не об'єм зразку, як такий, а об'єм повітря у вимірювальній камері, тим менший, чим більший об'єм зразку, що міститься в цій камері. Такий підхід залишає відкритим питання про вплив співвідношення об'ємів камери та зразку на точність вимірювання та про межу чутливості приладу. По-четверте, незрозуміло, чи обов'язковим елементом коливальної системи є камера, адже сама горловина вже є коливальною системою, причому умови резонансу в ній є значно простішими, ніж співвідношення (1). І, нарешті, не обгрунтовано доцільність ускладнення

приладу за рахунок використання диференційної схеми. Тож незважаючи на згадування деяких особливостей технічної реалізації приладу, праця [1] не може претендувати на повноту вирішення проблеми та сприяти широкому втіленню акустичних методів вимірювання об'єму у науку і виробництво.

Метою дослідження є вибір та обґрунтування акустичного метода вимірювання об'єму тіла довільної форми та створення працездатного пристрою, що реалізує такий метод.

Основні результати дослідження. Для оцінки можливостей акустичного вимірювання об'єму тіл довільної форми було створено лабораторний макет, структурну схему та зовнішній вигляд якого представлено на рис.2. Компромісу між невіправданими затратами на виготовлення та можливою непрацездатністю пристрою, пов'язаною з недостатньою точністю виготовлення деталей, було досягнуто за рахунок використання у якості елементів коливальної системи відрізків типових пластмасових труб діаметром 50 мм у якості горловин та перехідників діаметром 72 мм у якості камер. Матеріал труб є достатньо жорстким та міцним, труби виготовлено з технологічними допусками, що забезпечують їх легкий монтаж та надійне з'єднання. Таке рішення виявилось виправданим ще й з точки зору використання головок навушників "Солінг" вітчизняного виробництва у якості акустичного оформлення випромінювачів (динамічні гучномовці 05ГД-54) та приймачів (електретні мікрофони), бо внутрішній діаметр вказаної головки точно дорівнює зовнішньому діаметру труби. З'єднання має бути додатково герметизоване.

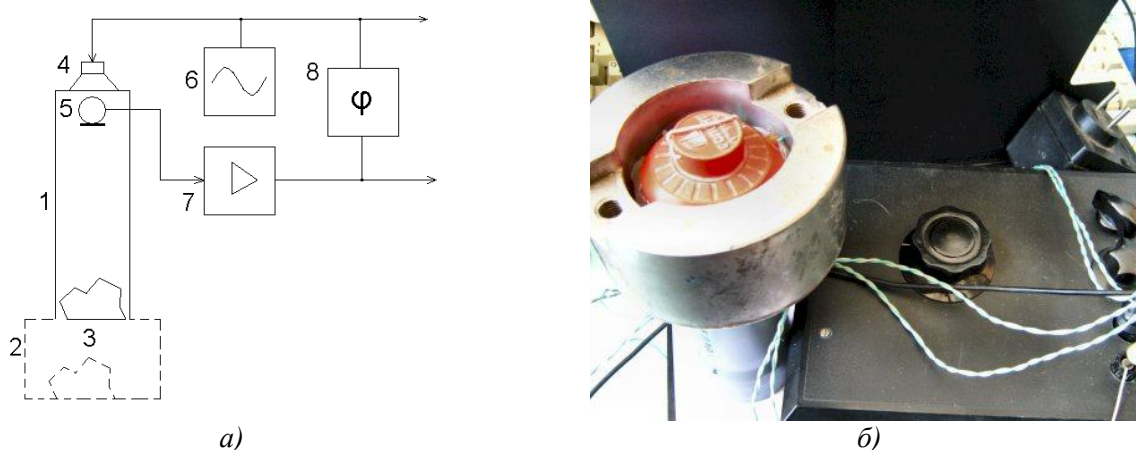


Рис. 2. Лабораторний макет для дослідження акустичних методів вимірювання об'єму, а) структурна схема, б) зовнішній вигляд [авторська розробка]

Макет складається з горловини 1, до якої може бути під'єднана вимірювальна камера 2. Зразок матеріалу 3, об'єм якого треба виміряти, розміщується або у вимірювальній камері, або безпосередньо у головині. В останньому випадку кінець горловини, на якому розміщено зразок, герметично закривається. На іншому кінці труби розташовано акустичну головку, що містить випромінювач 4 та приймач 5. Синусоїдальний сигнал на акустичний випромінювач подається з універсального генератора коливань звукової частоти 6 [2], а сигнал з акустичного приймача подається на підсилювач 7, виготовлений на мікросхемах 140УД7 за схемою неінвертуючого підсилювача змінної напруги з закритим входом. Ємність роздільного конденсатора вибрано таким чином, щоб сигнал з частотою резонансу коливальної системи проходив практично без ослаблення, а сигнал з частотою індустриальних завод - з ослабленням не менше 20 дБ за напругою. Сигнали з виходів генератора та підсилювача підключено до входів двоканального осцилографа С1-93 (на схемі не показаний) та до фазометра 8, що разом з генератором та підсилювачем входить до єдиного електронного блоку макета (рис. 2б). Наявність фазометра зумовлена потребою чітко фіксувати момент настання резонансу, бо, як буде показано нижче, амплітудно-частотна характеристика системи в області резонансу є майже пласкою. Частота генератора контролюється цифровим частотоміром (на схемі не показаний).

Перш за все було знято амплітудно- (АЧХ) та фазочастотну (ФЧХ) характеристики самої горловини. Відомо, що у закритій трубі при резонансі вміщується чверть періоду стоячої хвилі, тож довжина звукової хвилі $\lambda_p = 4l_{\Gamma}$ або резонанс має виникати на частоті:

$$f_p = \frac{c}{4l_{\Gamma}}, \quad (2)$$

При довжині відрізка труби 150 мм та швидкості звуку 344 м/с при температурі 20°C розрахункова резонансна частота складає 573,33 Гц. Експериментально виміряна частота резонансу коливальної системи, що складається з відрізка пластикової труби, один кінець якої заглушено прокладкою з жорсткої вакуумної гуми, а на другому розміщено акустичну головку, описану вище, дорівнює 997 Гц. Це означає, що цю резонансну систему не можна розглядати, як класичну закриту трубу. Експериментально визначене значення суттєво відрізняється також від розрахункової частоти резонансу відкритої труби, для якої:

$$f_p = \frac{c}{2l_T}, \quad (3)$$

або для вказаної довжини горловини 1146,67 Гц. Середнє значення частот резонансу, розрахованих згідно (2) і (3), складає 860 Гц і виявляється меншим за експериментально визначене приблизно в 1,16 рази. Для того, щоб визначити, чи можна користуватися цим значенням у якості емпіричного коефіцієнту, потрібні додаткові експерименти.

Якщо вважати початкову фазу сигналу збудження звукових коливань нулевою, то вихідний сигнал з підсилювача акустичного приймача можна уявити у вигляді

$$U_g = a(f)U_a \sin(2\pi ft + k(f)\pi), \quad (4)$$

де $a(f)$ і $k(f)$ - коефіцієнти, що враховують залежність відповідно амплітуди та початкової фази коливання від частоти f . Введення цих коефіцієнтів дає змогу побудувати АЧХ і ФЧХ наскрізного каналу "акустичний випромінювач - коливальна система - акустичний приймач - підсилювач" у відносних одиницях. На рис. 3 наведені ці характеристики, отримані експериментально для описаної вище горловини.

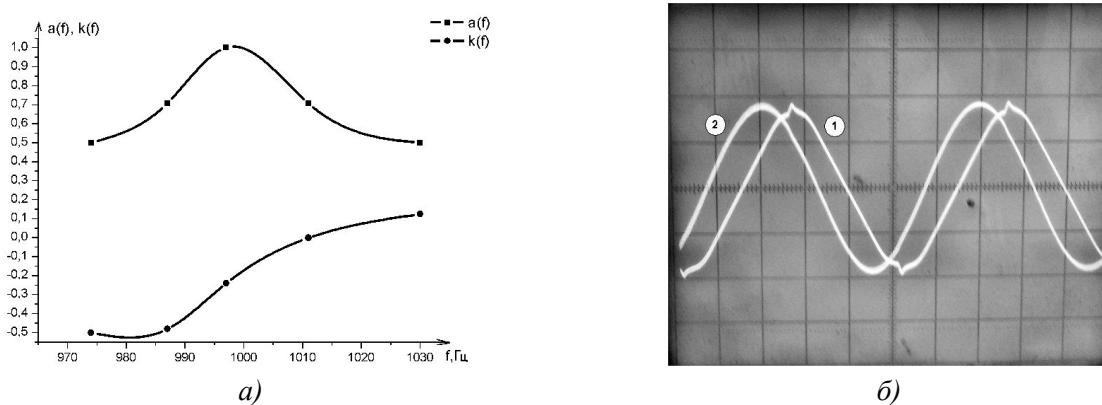


Рис. 3. а) амплітудно-частотна та фазочастотна характеристики наскрізного акустичного каналу, б) осцилограма сигналів на акустичному випромінювачі (1) і виході підсилювача (2) [авторська розробка]

Якщо отримана експериментально АЧХ виявляється типовою для вузькосмугової коливальної системи, то ФЧХ дещо відрізняється від класичної. Звертає на себе увагу ненульовий зсув фаз на частоті резонансу. Закритий вхід підсилювача, тобто наявність конденсатора на його вході, не може привести до такого зсуву фаз: при обраному значенні ємності конденсатора він може дорівнювати одиницям градусів, тоді як експериментально отримане значення досягає $-\pi/4$, тобто десятків градусів. Цей зсув може бути зумовлений або акустичним випромінювачем, бо фазові характеристики стандартних гучномовців не нормуються у зв'язку з особливостями людського вуха, або особливостями акустичного оформлення випромінювача і приймача, або особливостями електричної схеми акустичного приймача: відомо, що електретні мікрофони містять вбудований каскад попереднього підсилення на польовому транзисторі. Для подальших експериментів суттєво те, що цей постійний фазовий зсув не залежить помітно ні від частоти, ні від коливань температури навколишнього середовища у межах 5 ... 10°C.

Такий самий експеримент, проведений для коливальної системи, що складається з горловини та вимірювальної камери, дає дещо несподіваний результат. На частоті 327,7 Гц, розрахованій згідно (1) при об'ємі вимірювальної камери $2,89 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, резонанс не зафіксований, але його знайдено на частоті 610 Гц, що не є гармонікою розрахункової частоти резонансу системи. АЧХ і ФЧХ наскрізного каналу подібні наведеним на рис. 3 з шириною смуги пропускання на рівні 0,707 (3 дБ) від 605 до 624 Гц. Фазовий зсув на резонансній частоті, як у

попередньому випадку, складав близько $-\pi/4$. Залишається припустити, що формула (1), отримана для ідеалізованого випадку акустичного резонансу у системі горловина - камера, не є прийнятною для кожної конкретної реалізації приладу.

Для дослідження залежності частоти акустичного резонансу від об'єму тіла, розміщеного у горловині чи вимірювальній камері, було виготовлено шість випробувальних зразків з порошку заліза, що мали об'єм 4, 8, 12, 16, 20 та 25 cm^3 і відносну пористість у межах 12,54 ... 14,85 %. При розташуванні цих зразків безпосередньо у горловині були відзначені зміни амплітуди та фазового зсуву вихідного сигналу відносно сигналу на акустичному випромінювачі тим більші, чим більший об'єм зразку. Це дало підстави сподіватися на існування залежності частоти акустичного резонансу у горловині та/або зсуву фаз сигналів від маси зразку, розміщеного у ній. Експеримент показав, що така залежність дійсно існує, а зміна зсуву фаз виявилася зумовленою зміною частоти акустичного резонансу у горловині, причому на резонансній частоті горловини зі зразком зсув фаз залишався таким самим, як у горловині без зразку. Таким чином, постійне значення зсуву фаз, зафіксоване при акустичному резонансі у пустій горловині, виявилось надійним критерієм акустичного резонансу при наявності зразку. Амплітуда вихідного сигналу при резонансі зі зростанням об'єму зразку у горловині від найменшого до найбільшого слабо зменшується (у експерименті до 10 ... 15 %), що, можливо, пов'язано зі зменшенням добротності коливальної системи по мірі збільшення об'єму зразку у ній. Залежність частоти резонансу від об'єму зразку у горловині наведено на рис. 4. Ця залежність в інтервалі об'ємів 4 ... 25 cm^3 досить добре апроксимується квадратичною параболою (максимальна похибка не перевищує 0,025%).

$$f = -0,04506V^2 + 3,5697V + 994,2887. \quad (5)$$

З рис. 4 помітно, що в інтервалі 0 – 4 cm^3 залежність відрізняється від параболічної, наближаючись до лінійної. Спроба параболічної апроксимації всієї кривої приводить до зростання максимальної похибки апроксимації до 0,086% , і тоді апроксимуючий поліном матиме наступний вигляд

$$f = -0,03565V^2 + 3,2670V + 996,3302. \quad (6)$$

Спроба визначити об'єм зразку форми, близької до циліндричної, за допомогою макета пристрою з використанням наведеної залежності призвела до наступних результатів. Об'єм зразку, визначений геометричним методом, склав 1,1431 cm^3 , об'єм, визначений методом гідростатичного зважування, склав 1,12 cm^3 . Скориставшись лінійною інтерполяцією залежності частоти акустичного резонансу від об'єму зразку на ділянці від 0 до 4 cm^3 , отримали значення 1,0932 cm^3 , а, скориставшись залежністю (6) – 1.137411 cm^3 . Приймавши за дійсне значення об'єму середнє між виміряним геометричним методом та виміряним методом гідростатичного зважування, тобто 1,13155 cm^3 , отримуємо відносну похибку вимірювання акустичним методом 3,4% у разі лінійної інтерполяції початкової ділянки кривої та 0,52% у разі параболічної апроксимації усієї кривої. Ці значення задовольняють вимогам технічної точності, але, ймовірно, їх можна поліпшити за рахунок більш точної апроксимації залежності частоти резонансу при малих значеннях об'єму.

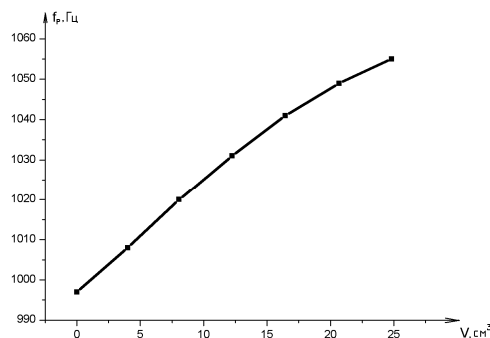


Рис. 4. Залежність частоти акустичного резонансу від об'єму зразку у горловині
[авторська розробка]

Проте, незважаючи на обнадійливі результати, залежність частоти акустичного резонансу від об'єму має суттєвий недолік, бо вона змінюється зі зміною температури навколишнього середовища. Саме залежність акустичних резонансних явищ від температури намагаються компенсувати застосуванням диференціальних схем вимірювання. Проте невелике ускладнення

методики вимірювання дає змогу компенсувати вплив температури. Незважаючи на те, що частота акустичного резонансу у розглянутій горловині не підпорядковується ні співвідношенню (2), ні співвідношенню (3), вона має залежати від швидкості звуку у повітрі. Тоді температура зоанішнього середовища має впливати однаково як на пусту горловину, так і на горловину зі зразком. Якщо побудувати залежність абсолютної чи відносної різниці резонансних частот пустої горловини та горловини зі зразком від об'єму зразка, така залежність повинна бути менше схильною, а в ідеалі зовсім нечутливою до змін температури. Саме в цьому полягає основна ідея використання диференційних схем, але за рахунок різниць у характеристиках акустичних випромінювачів, приймачів і коливальних систем може з'явитися додаткова похибка. Питання про можливість її повної компенсації лишається відкритим, тоді як два вимірювання у сталих умовах ненабагато ускладнює процес визначення об'єму.

Спроба знайти залежність резонансної частоти системи горловина – вимірювальна камера наштовхнулася на неможливість встановити помітні відхилення для випробувальних зразків об'ємом 4, 8 і 12 см³, взятих поодиноці, хоча такі відхилення чітко фіксуються для зразків об'ємом 16, 20 і 25 см³ та їх сполучень. Логічно припустити, що у цьому випадку має місце вплив співвідношення об'ємів зразку та вимірювальної камери на чутливість пристрою. Не виключено, що при більш чутливій вимірювальній апаратурі або більш ретельному виготовленні елементів коливальної системи бажану залежність можна отримати, але у будь-якому разі використання коливальної системи з горловини та вимірювальної камери для визначення об'єму акустичним методом потребує додаткових досліджень, між тим резонансні явища у самій горловині вже дають змогу отримати практичний результат принаймні для зразків і деталей об'ємом до 25 см³.

Висновки:

1. Експериментально встановлено, що частота акустичного резонансу у коливальній системі, що складається з труби круглого перерізу, на одному кінці якої розташовано акустичний випромінювач з акустичним приймачем, а інший кінець закрито наглухо, не підпорядковується ні класичній залежності для закритої труби, ні класичній залежності для відкритої труби, а знаходиться у проміжку між значеннями, розрахованими згідно цим залежностям.

2. Фазовий зсув між напругою збудження звукових коливань і підсиленою напругою з виходу акустичного приймача може бути використаний як критерій настання акустичного резонансу.

3. Встановлено існування залежності частоти акустичного резонансу в коливальній системі у вигляді труби з круглим перерізом від об'єму розміщеного в ній зразку або деталі. Така залежність може бути апроксимована квадратичною параболою з максимальною похибкою 0,025%.

4. Встановлено, що вказана частота акустичного резонансу не залежить від способу розташування зразку: він може бути повернутий до акустичного випромінювача будь-якою стороною.

5. Встановлено, що при розміщенні всередині коливальної системи декількох зразків частота акустичного резонансу визначається сумарним об'ємом зразків і не залежить від способу їх розташування.

6. Виявлено, що зразок, який займає до 10% внутрішнього об'єму вказаної коливальної системи, знижує добротність резонатора не більш, ніж на 10%. Визначення верхньої межі об'єму, що може бути виміряний потребує подальших експериментів.

7. Встановлено, що частота резонансу у коливальній системі, що складається з вимірювальної камери, приєднаної до труби круглого перерізу суттєво відрізняється від розрахованої згідно співвідношення (1).

8. Виявлено, що ускладнення коливальної системи за рахунок додавання вимірювальної камери зменшує чутливість пристрою для вимірювання об'єму і може бути виправдане лише бажанням використовувати одну і ту ж саму горловину з акустичними випромінювачем і приймачем для визначення об'єму зразків, що не можуть бути розміщені у горловині.

9. Аналіз експериментальних результатів привів до висновку про технічну недоцільність використання диференційних схем вимірювання при визначенні об'єму акустичним методом.

1. *Мирюк Ю.П.* Прибор для измерения объема образцов / Ю.П.Мирюк, С.М.Монастырский, Ю.Л.Полунов, Р.И.Янбулатов // Порошковая металлургия. – 1985. - №5. – С. 100 – 102.
2. *Алексенко А.Г.* Применение прецизионных аналоговых микросхем / А.Г. Алексенко, Е.А.Коломбет, Г.И.Стародуб. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2013.