

Державний університет "Львівська політехніка"

На правах рукопису  
УДК 536.5:534.8

ЛУЦИК Ярослав Теодорович

**УЛЬТРАЗВУКОВА ТЕРМОМЕТРИЯ – КОНЦЕПЦІЯ,  
СИНТЕЗ, РЕАЛІЗАЦІЯ**

*Спеціальність 05.11.04- прилади та методи вимірювання  
теплових величин*

АВТОРЕФЕРАТ ДИСЕРТАЦІЇ НА ЗДОБУТТЯ НАУКОВОГО СТУПЕНЯ  
ДОКТОРА ТЕХНІЧНИХ НАУК

ЛЬВІВ – 1996

521.18.08

В. 36, 404

Дисертацією є рукопис  
Робота виконана у  
політехніка"

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00760662 (R)

Доктор технічних наук, професор,  
академік АІН України,

Науковий консультант -

Заслужений винахідник України Стадник Б.І.

Офіційні опоненти :

1. Доктор технічних наук, професор,  
академік РАТН Федик І.І.
2. Доктор технічних наук,  
професор Назаренко Л.А.
3. Доктор технічних наук ,  
с.н.с. Грищенко Т.Г.

Провідна організація - НВО "Електротермометрія" (м.Луцьк)

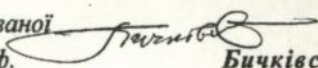
Захист відбудеться "24" січня 1997 р. о 14 год. в ауд.226  
головного корпусу на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 04.06.11 у  
Державному університеті "Львівська політехніка" (290646, Львів-13,  
вул.С.Бандери, 12).

Відгуки на автореферат у двох примірниках, завірені печаткою,  
просимо надсилати за адресою: 290646, Львів-13, вул.С.Бандери,12,  
Державний університет "Львівська політехніка", вченому секретарю ради  
Д 04.06.11.

3 дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного  
університету "Львівська політехніка" (290013, Львів-13,  
вул.Професорська,1).

Автореферат розісланий "9" грудня 1996 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради, д.т.н., проф.



Бичківський Р.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Важливість та необхідність температурних вимірювань для подальшого прогресу наукових досліджень та розвитку сучасних галузей народного господарства, таких як енергетика, ядерна та космічна техніка, металургія, хімічна промисловість та ін., підтверджується великою кількістю науково-дослідних та дослідницько- конструкторських робіт, направлених на покращення параметрів відомих та створення нових засобів вимірювання температури. Точність та надійність вимірювань температури в промисловості, як відомо, визначає якісні параметри технологічних процесів та забезпечує гарантовану інтерпретацію кінцевих результатів.

Незважаючи на широку номенклатуру термометрів, які випускаються серійно, не вдається задовільнити всі вимоги, які висувають наука і промисловість. Це пов'язано з ускладненням умов експлуатації в об'єктах нової техніки, необхідністю більш жорсткого температурного контролю технологічних процесів, підвищенням вимог в питаннях безпеки та ін. Тому увагу дослідників привертають перспективні шляхи розвитку термометрії на нових засадах.

Один з таких напрямків - ультразвукова (УЗ) термометрія, яка базується на використанні температурної залежності параметрів поширення акустичного сигналу. Перші кроки по створенню ультразвукових термометрів (УЗТ) були зроблені в 60-х роках при вирішенні проблем вимірювання температури в активній зоні реакторів. Роботи Белла (Англія), Ліннвуса (США), Тасмана (Європейська комісія по атомній енергії) та ін. показали, що УЗТ мають певні переваги перед традиційними засобами вимірювання (термоелектричними та терморезистивними термометрами, пірометрами), а саме:

- потенційно більш широкий вибір матеріалів для чутливих елементів (ЧЕ) УЗТ, перелік яких включає, окрім металів і металічних сплавів, кераміку, рідини, газу;

- можливість використання окремих компонентів і вузлів контрольованого об'єкту, як ЧЕ УЗТ;

- відсутність електричних ланок в зоні високих температур і, відповідно, відмова від застосування високотемпературних електричних ізоляторів;

- можливість створення на базі одного ЧЕ багатозонного УЗТ для вимірювання розподілу температур;

- можливість вимірювання температури в об'єкті без розгерметизації;

- можливість заміни матеріалу ЧЕ (газового або рідинного) в процесі експлуатації;

- можливість реконструкції профілю температурного поля в об'єкті за результатами сканування акустичними сигналами.

Враховуючи вищезазначене, перспективність УЗ термометрії є очевидною, особливо в таких галузях, як реакторна термометрія, металургія, енергетика, а тема роботи - актуальною, що підтверджується тим, що вони проводилися в рамках директивних документів ГКНТ при Раді Міністрів СРСР (постанова №466/242 від 9.12.80 р., №515/271 від 29.12.1981 р.), Ради Міністрів СРСР (наказ №64 від 19.01.88 р.), Союзпромприладу (накази №2/2-15п-187 від 16.02.81р., №2/3-55-567 від 13.05.81 р.) та інших, які стосувалися спеціальних досліджень.

Активізації досліджень в галузі УЗ термометрії в певній мірі сприяє ситуація в промисловості України, яка вимагає, по-перше шукати альтернативу термометрам на основі металів платинової групи і, по-друге, покращити ситуацію в галузі енергоспоживання.

Але для того, щоб перейти від загальної ідеї створення УЗТ до

інженерної реалізації, необхідно було розглянути і вирішити цілу гаму завдань, пов'язаних зі специфікою напрямку.

**Загальний стан проблеми.** За останні десятиліття проведені значні роботи з розвитку загальної теорії і техніки температурних вимірювань, аналізу джерел методичних похибок. Але, не дивлячись на певні успіхи в розвитку теорії і техніки термометрії, стан цієї проблеми як в існуючих засобах, так і в області наукового доробку, націленого на подальший розвиток термометрії, не завжди відповідає вимогам дня. Не дивлячись на різноманітність конструктивних виконань засобів вимірювання температури і нагромадженій значний досвід їх експлуатації, нові умови застосування і підвищення вимог до метрологічних характеристик заставляють переглянути принципи їх побудови та створення нових методів. До таких перспективних методів слід віднести і УЗ термометрію.

Загальна проблематичність питання створення сучасних конкурентноспроможних УЗТ для середніх і високих температур полягає у відсутності достатнього наукового доробку теоретичних, технологічних та метрологічних основ проектування і структурної побудови таких приладів.

Незважаючи на певні поступи і успіхи в окремих напрямках, наприклад, в імпульсній акустичній термометрії, загальна платформа для створення УЗТ з прогнозованими характеристиками відсутня. Якщо деякі питання конструювання первинних термоперетворювачів для різних умов експлуатації і можна вважати проробленими, то такі проблеми, як розрахунок і конструювання багатозонних чутливих елементів, методологія розрахунку і прогнозу метрологічних параметрів імпульсних і резонансних УЗТ, критерії вибору матеріалів для ЧЕ і звукопроводів та деякі інші опрацьовані явно недостатньо.

**Мета роботи.** Створення теоретичних, технологічних і метрологічних основ проектування прецизійних УЗТ для різних

умов експлуатації та вирішення наукової проблеми створення комплексу розрахункових, експериментальних і апаратних засобів для реалізації переваг УЗ методів в області термометрії.

**Завдання досліджень.** У відповідності до поставленої мети завданнями досліджень були:

- аналіз шляхів побудови термометрів на основі УЗ методів і формулювання методології створення згаданих термометрів ;

- синтез та критичний аналіз структурних схем імпульсних та резонансних УЗТ;

- якісний та кількісний аналіз взаємозв'язків між впливаючими факторами та зміною вихідних параметрів УЗТ;

- проведення теоретичних та експериментальних досліджень різних конструкцій ПП;

- розробка рекомендацій по кожному з відповідальних вузлів УЗТ для оптимізації його характеристик та інженерної реалізації;

- експериментальні дослідження низки матеріалів з метою їх використання в УЗ термометрії;

- теоретичний аналіз та експериментальна перевірка метрологічних параметрів модифікацій УЗТ і визначення шляхів їх покращення;

- узагальнення отриманих результатів та розробка рекомендацій для практичного створення УЗТ для діапазонів середніх та високих температур.

**Методи досліджень.** Методологічну основу дисертаційної роботи складає системний підхід до проектування новостворених технічних засобів вимірювання температури -УЗТ.

Для теоретичних узагальнень і досліджень математичних моделей окремих складових УЗТ, їх побудови і оптимізації використовувались теоретичні та експериментальні методи досліджень, базовані на загальній теорії теплофізики та акустики, низки розділів теорії

електромеханічних аналогій, теорії радіотехнічних кіл та загальної електротехніки, фізики твердого тіла, а саме розділів, які стосуються теорії дефектів кристалічної ґратки та їх зв'язку з внутрішнім тертям (ВТ) при ініціюванні акустичних коливань. Окрім того, застосовувались інші експериментальні методи, а саме рентгеноструктурний, мікрорентгеноспектральний та металографічний аналізи.

**Наукова новизна.** Основні наукові результати, висунуті на захист, полягають в тому, що:

- 1) розвинуті системні аспекти проектування УЗТ, що дозволило:
  - запропонувати процедуру розробки УЗТ від формування вимог до них до оцінки їх метрологічних параметрів;
  - створити засади методології і теорії вирішення окремих задач проектування УЗТ або окремих їх вузлів;
- 2) досліджені питання побудови оптимальних структур та алгоритмів з оцінкою похибки і вибору елементної бази, які відповідають конкретним критеріям якості;
- 3) розроблені принципи побудови та схемної реалізації різних типів УЗТ;
- 4) сформульовані критерії та рекомендації для коректного вибору матеріалів ЧЕ УЗТ;
- 5) досліджені пружно-в'язкі характеристики низки матеріалів з перспективою їх застосування для виготовлення конструкційних елементів давачів УЗТ;
- 6) експериментально встановлені залежності пружно-в'язких характеристик від дії зовнішніх факторів (деформацій, термоцикловання та ін.);
- 7) досліджено кореляцію між пружно-в'язкими та електрофізичними характеристиками матеріалів з врахуванням дислокаційних та вакансійних механізмів релаксації;

8) розглянуті метрологічні аспекти створення імпульсних та резонансних УЗТ з формулюванням виразів для розрахунку похибки вимірювання.

Автор захищає:

- принципи побудови засобів вимірювання температури на основі УЗ методів;
- теоретичні та практичні рекомендації по конструюванню електроакустичних перетворювачів для УЗТ;
- результати розрахунків параметрів ЧЕ і пропозиції по корекції розкиду їх початкових параметрів;
- пропозиції по схемотехнічній реалізації вимірювальних пристроїв УЗТ;
- принципи створення приладів з розширеними функціональними можливостями;
- теоретичний підхід до розрахунку та розрахункові результати по оцінці метрологічних параметрів УЗТ;
- експериментально встановлені температурні залежності пружно-в'язких характеристик вольфраму, ренію, молібдену, ірідію, корунду, карбиду кремнію та низки сплавів в широкому температурному інтервалі;
- експериментально встановлені залежності пружно-в'язких характеристик від дії зовнішніх факторів ( деформацій, термоцикловання та ін.);
- комплекс рекомендацій для інженерної реалізації УЗТ з прогнозованими метрологічними характеристиками;
- новостворені багатозонні УЗТ для вимірювання температури в декількох зонах або її розподілу;
- новостворений прилад для вимірювання пружно-в'язких характеристик твердосплавних матеріалів на зразках з малими габаритними розмірами;

- принципи верифікації УЗТ при випуску з виробництва та експлуатації.

Достовірність результатів. Достовірність отриманих результатів обумовлена коректністю виконаних експериментів і розрахунків і підтверджується малими значеннями розбіжностей між результатами теоретичного аналізу та експериментальних досліджень.

Практична цінність роботи. Результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили вирішити проблему створення УЗТ з високими і прогнозованими метрологічними характеристиками.

Розроблено декілька модифікацій резонансних та імпульсних УЗТ для вимірювання середніх і високих температур.

Розроблено багатозонні (при числі зон до 15-ти) УЗТ для вимірювання розподілу температур, експериментальні зразки приладів для безінерційного контролю аварійних ситуацій, які супроводжуються швидким наростанням температури.

Розроблено прилад для вимірювання динамічного модуля пружності малогабаритних зразків тврдосплавних матеріалів.

Реалізація роботи. На основі отриманих теоретичних та експериментальних результатів були створені УЗТ, які пройшли широку програму випробувань та використовувались для вимірювання середніх і високих температур в промисловості. При безпосередній участі автора були сконструйовані, апробовані в лабораторній практиці та промислових умовах різні модифікації УЗТ.

Наукові положення і висновки дисертації використовувались і використовуються при виконанні НДР та ДКР по створенні та виготовленні термоперетворювачів в НВО "Термоприлад" (м. Львів), ЕТМ "Електротермометрія" (м. Луцьк), Державному університеті

"Львівська політехніка".

Теоретичні результати роботи використовуються у навчальному процесі в ДУ "Львівська політехніка" при підготовці студентів за спеціальністю "Вимірювальні перетворювачі для автоматизованих систем" в курсах "Первинні вимірювальні перетворювачі", "Технологія первинних вимірювальних перетворювачів", "Основи термометрії", "Неруйнівний контроль".

Апробація роботи. Основні положення роботи доповідались на 5 міжнародних конференціях, на 7 всесоюзних науково-технічних конференціях і симпозіумах, 2 республіканських науково-технічних конференціях та семінарах.

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 65 робіт, із них одна монографія, один навчальний посібник, один довідник і 12 авторських свідоцтв на винаходи.

Структура роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти глав, висновків, списку цитованої літератури та додатків.

## 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ДОПОМОГОЮ УЛЬТРАЗВУКУ

В основі створення УЗТ лежить використання температурних залежностей параметрів, які описують процес поширення УЗ хвиль в певному середовищі. В першу чергу, це залежність фазової швидкості поздовжніх, крутильних або іншого виду коливань. Загальні аспекти генерації і поширення акустичних хвиль викладені у відповідних наукових виданнях, але в них розглядається поверхово вплив температури на параметри, які описують акустичні процеси.

Відомі і відносно прості теоретичні співвідношення для поздовжніх та крутильних коливань в твердих матеріалах обумовили на попередніх етапах їх переважне і успішне застосування в експериментах при створенні перших модифікацій УЗТ. Згинні хвилі застосовувались при експериментах з камертонними



високотемпературних УЗТ з твердотільними ЧЕ особливе значення мають релаксаційні процеси, зв'язані із зернограничним прослизанням, яке контролюється дифузією.

В високотемпературній УЗ термометрії широко використовується явище відбивання від перешкоди, якою в необмеженому однорідному середовищі може бути тверда стінка, межування з іншим середовищем або з вакуумом. В стрижнях та пластинах відбивання відбувається при різкій зміні значення площини перерізу, наявності згинів та механічних контактів. Співвідношення, які визначають напрямки відбитих і заломлених хвиль, отримуються з міркувань симетрії, за якими дотичні до поверхні розділу компоненти хвильового вектору  $k$  не повинні мінятися.

Для створення в середовищі УЗ коливань та їх ресстрації в УЗ термометрії є доцільним застосування магнітострикційних (МС) та п'єзоелектричних (ПЕ) електроакустичних перетворювачів (ЕАП). МС ЕАП, забезпечують перетворення електричних сигналів в акустичні до частот  $\cong 200$  кГц. ПЕ ЕАП використовуються, як правило, для перетворення сигналів з частотою, вищою за 100 кГц.

В резонансних УЗТ для розширення діапазону робочих частот ЕАП використовують демпфування неробочого торця. У випадку вузькосмугових перетворювачів доцільно закріплювати неробочий торець на масивній опорі, а розташування котушки збудження відрегулювати таким чином, щоб забезпечити синфазне сумування сигналів. Акустичну ізоляцію випромінюючих та приймаючих елементів від несучої конструкції можна здійснити, застосовуючи опори у вузлових площинах хвилеводної системи, або використовуючи чвертьхвильові ізолятори і півхвильові розв'язки.

В високотемпературних УЗТ необхідно передавати сигнал від ЕАП до ЧЕ на порівняно велику відстань, тому велике значення має узгодження імпедансів окремих ланок акустичного тракту. Доцільно

застосовувати чверть- та півхвильові прошарки (ланки), а для трансляції сигналу - тонкі звукопроводи у вигляді стрижнів або дротів. При виконанні умови  $d \leq 0,2\lambda$  ( $d$ -діаметр,  $\lambda$ -довжина хвилі) для поздовжніх коливань (для крутильних коливань:  $d \leq 1,2\lambda$ ) звукопровід забезпечує якісну передачу сигналів без помітних спотворень.

В основі імпульсних УЗТ лежить використання температурної залежності часового інтервалу між акустичними імпульсами. Якщо використовувати розділені ЕАП, то УЗТ може функціонувати по принципу синхрокільця.

У високотемпературних УЗТ ефективним є варіант імпульсного УЗТ, який функціонує в режимі відбивання та використовує в ролі ЧЕ відрізок тонкого дроту з тугоплавкого матеріалу. В УЗТ здійснюється вимірювання часового інтервалу  $\tau$  між імпульсами, відбитими від початку та кінця ЧЕ (рис. 1, б).



Чутливість такого УЗТ  $\Delta\tau/\tau\Delta T = -0,5(\alpha_l + \alpha_E)$ , де  $\alpha_l$  - температурний coefficient розширення;  $\alpha_E$  - температурний coefficient модуля Юнга (для поздовжніх хвиль). Якщо створити в ЧЕ декілька площин відбивання внесенням акустичних неоднорідностей (канавок, отворів, згинів та ін.), то імпульсний УЗТ

дозволяє проводити вимірювання температури або її розподілу в декількох зонах одним ЧЕ (рис.1,б-д). При цьому проводиться послідовне вимірювання часових інтервалів попарно між ехоімпульсами, відбитими від відповідних площин, що відповідає середнім значенням температури на ділянках між згаданими площинами. Окремий напрямок становить можливість створення багатозонних імпульсних УЗТ зі спільним використанням поздовжніх та крутильних коливань. Більш, як півторакратна різниця в швидкості поширення цих коливань полегшує завдання селекції ехоімпульсів різних видів. Значення коефіцієнту відбивання для поздовжніх хвиль визначається площиною перерізу, а для крутильних коливань - значенням моменту інерції, що дозволяє забезпечити різні коефіцієнти відбивання в одному і тому ж перерізі.

В резонансних УЗТ первинним перетворювачем є механічний резонатор, частота коливань якого залежить від температури. В залежності від того, який тип хвилі використовується, резонатори можуть бути різноманітними за формою та конструктивними особливостями. Найпростішими за розрахунками і конструкцією є резонатори на поздовжніх і крутильних хвилях.

Найбільш відомий варіант реалізації резонансних УЗТ - це кварцові термометри, які будуються на ВЧ резонаторах  $Y$ -зрізів. За своїми метрологічними характеристиками (точності, інерційності, чутливості, роздільчій здатності) ці термометри переважають більшість інших, але мають недоліки: обмежений температурний діапазон вимірювань, гістерезис показів.

Розширити можливості резонансних УЗТ можна застосуванням дискових резонаторів згинових коливань. Роздільча здатність таких УЗТ лежить на рівні 0,01 К. На дискових резонаторах можна створювати багатозонні УЗТ, а використання двомодових резонаторів з контролем різниці значень резонансних частот

дозволяє виключити помилкові результати при наявності паразитних резонансів.

Для вимірювання температур вище за  $1000^{\circ}\text{C}$  необхідно застосовувати ЧЕ у вигляді чверть- або півхвильових резонаторів, збудження яких здійснюється пакетом (цугом) хвиль (рис.2). При співпадінні значень частоти заповнення пакету та резонансної частоти ехосигнал має характерну форму огинаючої з вираженим мінімумом в центрі (рис.2,б). При падінні сигналу з амплітудою  $A=1$  із звукопроводу з площею перерізу  $S_1$  на півхвильовий резонатор з площею перерізу  $S_2$  зміна амплітуди ехосигналу відповідає виразу:  $A_n = r - tt'(1+r+r^2+\dots+r^{k-1})$ ;  $k=1,2,3,\dots,n-1$  ( $t'$  - коефіцієнт проходження для сигналу, який переходить із резонатора у звукопровід), а вираз для  $A_n$  буде:

$$A_n = \frac{2}{1+\varepsilon} \cdot \left( \frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon} \right)^{n-1} - 1, \quad (\varepsilon - \text{відношення імпедансів}) \quad [1,14].$$

Ехосигнал на ділянках I-II (рис.2,б) можна розглядати, як різницю двох сигналів: сигналу з амплітудою  $r$ , який відбивається від

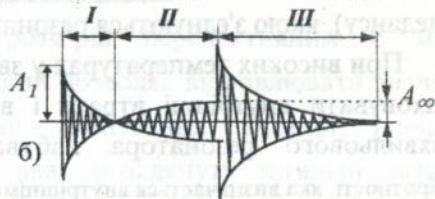
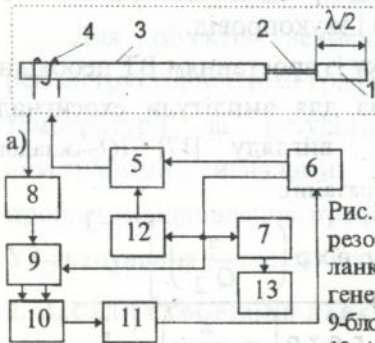


Рис.2. Структурна схема (а) та ехосигнал (б) резонансного УЗТ: 1-резонатор; 2-узгоджуюча ланка; 3- лінія зв'язку; 4-ЕАП; 5-модулятор; 6-генератор; 7-частотомір; 8-підсилювач-обмежувач; 9-блок формування груп; 10-інтегратор; 11-схема управління; 12-лічильник; 13-переворювач "частота-температура"

резонатора, та сигналу випромінення резонатора, які при тотожності значень частот збудження і резонансу є протифазними. Резонансний УЗТ, побудований на аналізі різниці фаз на ділянках I і II ехосигналу, показаний на рис.2,а [16]. В 9 здійснюється порівняння сигналів з виходів 8 та 6 на ділянках I і II. В результаті на виході маємо дві групи імпульсів, вольтсекундні сумарні площі яких рівні між собою

при різниці фаз на ділянках I і II, рівній  $\Delta\varphi=\pi$ . Вищезгадані групи інтегруються в  $I_0$  з протилежними знаками. Якщо  $\Delta\varphi\neq\pi$ , то з'являється сигнал неузгодження  $u_p\neq 0$ , який використовується в II для зміни частоти генератора б.

Розглядаючи відбивання сигналу всередині півхвильового резонатора, амплітуду сигналу в місці з'єднання із звукопроводом можна представити у вигляді  $a_m = r^m$ , із чого випливає

$$r^{Q_1} = \left[ \frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon} \right]^{Q_1} = e^{-\pi} \quad \text{і далі для } \varepsilon \ll 1 \text{ отримуємо: } Q \approx \pi/(2\varepsilon), \text{ з}$$

якого зрозуміло, що добротність резонатора задається вибором співвідношення площин перерізів звукопроводу та резонатора. Оскільки тривалість сигналу збудження вибирається в межах  $(30 + 40)t_0$ , де  $t_0$ -період коливачь, оптимальні значення добротності, які забезпечують фазовий аналіз ехосигналу, лежать в межах 45-100. Розрахунки показали, що найбільш ефективними слід вважати конструкції із застосуванням ланки узгодження (трансформатора імпедансу), якою з'єднуються резонатор і звукопровід.

При високих температурах у зв'язку із зростанням ВТ необхідно враховувати внутрішні втрати і вираз для амплітуди ехосигналу півхвильового резонатора набуває вигляду [17] ( $Q_2$ -складова добротності, яка визначається внутрішніми втратами):

$$A_n = r - tt' \exp\left(-\frac{\pi}{Q_2}\right) \cdot \frac{\left[ r \exp\left(-\frac{\pi}{Q_2}\right) \right]^{n-1}}{r \exp\left(-\frac{\pi}{Q_2}\right) - 1}$$

Із відношення  $\frac{A_\infty}{A_1} \approx \frac{(Q_1 - Q_2)}{(Q_1 + Q_2)}$  (рис.2) видно, що, якщо  $Q_2 > Q_1$ , то  $(A_\infty / A_1) < 0$  і в процесі відбивання відбувається переверот фази (рис.3,а,з). При  $Q_2 = Q_1$  ( $A_\infty / A_1 = 0$ ) або при  $Q_2 < Q_1$  ( $A_\infty / A_1 > 0$ ) мінімум амплітуди, який би відповідав фазовому перевероту, у відбитому сигналі відсутній (рис.3,б,в,д).

Окрім фазового, можна застосувати варіант аналізу ехосигналу, який полягає у вимірюванні тривалості одного або кількох періодів затухаючих коливань резонатора (ділянка III на рис.2,б), що лягло в основу створеного приладу для вимірювання модуля пружності зразків металокерамічних матеріалів.

УЗТ на неперервних коливаннях ефективні при вимірюваннях швидкозмінної температури газового середовища. При цьому відбувається частотна модуляція сигналу, а девіація оцінюється із

співвідношення  $\frac{\Delta f}{f} = \frac{l}{v^2} \cdot \frac{dv}{dt}$ , де  $l$ -відстань між ЕАП.

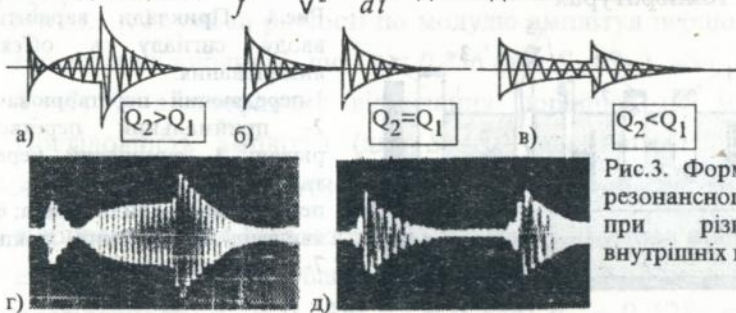


Рис.3. Форма ехосигналу резонансного термометра при різних рівнях внутрішніх втрат

Для об'єктів великих розмірів перспективним є метод реконструктивної томографії, який дозволяє відновлювати значення температури за результатами сканування заданої площини акустичними сигналами. В главі розглянуті загальні аспекти проблеми відновлення профілю температурного поля за допомогою УЗ-сканування та шляхи її вирішення.

## 2. ЗАСАДИ СТВОРЕННЯ ДАВАЧІВ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ТЕРМОМЕТРІВ

При використанні конструкційних елементів об'єкту в ролі ЧЕ УЗТ ЕАП закріплюється безпосередньо або через буферний перехід до такого елемента. Можливість застосування ЕАП певної конструкції визначається ступенем неузгодженості акустичних імпедансів на границі межуючих середовищ, а також рівнем втрат в матеріалах, які прозвучуються. Ефективне введення УЗ сигналів без пошкодження оболонки об'єкту можливе у випадках вимірювання

температури рідин (рис.4) або у твердому тілі.

У випадку високотемпературних об'єктів ЕАП розташовують на певній дистанції від зони, в якій необхідно вимірювати температуру, для чого застосовують буферні хвилеводи та тонкі звукопроводи. При роботі в режимі неперервних коливань використовуються розділені передаючий та приймальний ЕАП, у випадках використання імпульсних сигналів, пакетів коливань, при роботі на відбивання - суміщені або розділено-суміщені ЕАП. При підвищених температурах

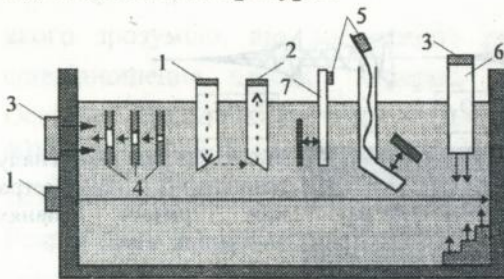


Рис.4. Приклади варіантів вводу сигналу в об'єкт вимірювання:

- 1-передаючий перетворювач;
- 2- приймальний перетворювач;
- 3- суміщений перетворювач;
- 4-рефлектор;
- 5-перетворювач хвиль Лемба;
- 6-хвилевід поздовжних хвиль;
- 7- хвилевід хвиль Лемба.

експлуатації доцільно використовувати ПЕ ЕАП на основі ніобату літію (до 1330 К), МС ЕАП з котушками, намотаними на керамічному або металічному каркасі анодованим алюмінієвим або танталовим дротом, нікелевим дротом з окисним або керамічним покриттям, мідним дротом в силіконовій ізоляції. Для осердя МС ЕАП доцільно застосовувати розрізані по довжині нікелеві трубки, пакети із штампованих пластин, пластинки пермендюрю, спірально скручені по довжині. Нами запропоновано використовувати стрижень, виготовлений намоткою на тонку оправку попередньо окисленої фольги, що забезпечило малі втрати на вихрові струми та спростило акустичне узгодження із звукопроводом, а для покращення якості демпфування хвостова частина осердя була сформована у вигляді пластини [35]. Для комбінованих багатозонних УЗТ осердя ЕАП доцільно виконувати із прокатаного між валками

дроту, що формує гелікоїдальну орієнтацію структури матеріалу і забезпечує генерацію як поздовжніх, так і крутильних коливань.

В главі представлені і детально описані конструкції МС ЕАП, розроблені для імпульсних та резонансних УЗТ.

ЧЕ імпульсних УЗТ. Конструктивно ЧЕ можуть мати велику кількість різновидів, що пов'язано з вибором виду коливань, особливостями об'єкту вимірювання, кількістю зон та інше.

При відбиванні сигналу з амплітудою  $A=1$  від ЧЕ однозонного УЗТ послідовність амплітуд ехоімпульсів (рис.1,а):  $r$ ;  $-tt'$ ;  $-rtt'$ ;  $-r^2tt'$ ;..... Із умови рівності по модулю амплітуд першого та другого ехосигналів випливає, що  $\varepsilon = 0,236$  (для  $S_1 < S_2$ ), або  $\varepsilon = 4,236$  (для  $S_1 > S_2$ ), а коефіцієнт відбивання дорівнює по модулю 0,618. Послідовність амплітуд (для  $S_1 < S_2$ ) має вигляд:  $A_1=A_2=0,618$ ;  $A_3=0,618^2$ ;  $A_4= - 0,618^3$  ( $A_3, A_4, \dots, A_n$  - імпульси багатократного відбивання). Для багатозонного ЧЕ (рис.1,б) умова рівності амплітуд ехосигналів без врахування багатократних відбивань приводить до послідовності:  $\varepsilon_{12} = 0,236$ ;  $\varepsilon_{23} = 0,354$ ;  $\varepsilon_{34} = 0,428$ ;  $\varepsilon_{45} = 0,481$ ,  $\varepsilon_{ij} = S_i/S_j$ ;  $r_{21} = -0,618$ ;  $r_{32} = -0,477$ ;  $r_{43} = -0,4$ ;  $r_{54} = -0,35$ , де  $r_{ji}$  - коефіцієнт відбивання для сигналу, що проходить із  $j$ -зони в  $i$ -зону. Найбільш ефективним, на наш погляд, є створення багатозонних ЧЕ на основі формування в стрижні елементів відбивання (ЕВ) у вигляді "пошкоджень" невеликих лінійних розмірів. Розрахунок коефіцієнта відбивання  $r$  проводиться за співвідношенням:

$$r = (\varepsilon^2 - 1) / \sqrt{(\varepsilon^2 + 1) + 4\varepsilon^2 \operatorname{ctg}^2(2\pi l / \lambda)}.$$

Аналіз амплітудних характеристик відбитих сигналів проводився за схемою рис.5, де  $EB_1 - EB_5$  - елементи відбивання 5- тизонного ЧЕ. При однаковій довжині зон послідовність амплітуд відбитих сигналів:  $A_0=r$ ;  $A_1=rt^2$ ;  $A_2=rt^4+r^3t^2$ ;  $A_3=rt^6+3r^3t^4$ ;  $A_4=rt^8+6r^3t^6$ ;  $A_5=-t^{10}+10r^3t^8$ . Перші складові в рівняннях - це основні ехосигнали, другі - сигнали, які утворюються за рахунок однократного відбивання всередині зони (показано пунктиром). Розрахунки показали, що для

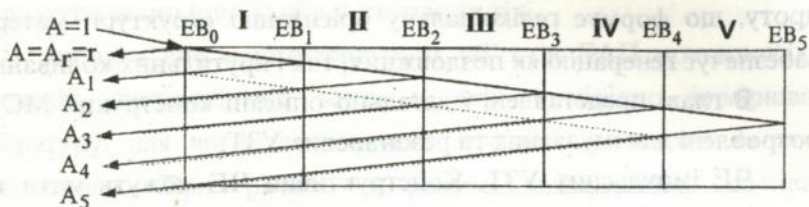


Рис.5. Відбивання сигналів в багатозонному ЧЕ

ефективного функціонування багатозонного ЧЕ необхідно вибрати малі значення коефіцієнту відбивання  $r$  (в межах  $0,05 \div 0,2$ ), а найбільш ефективне конструктивне рішення - це ЕВ у вигляді вирізаного сегменту. Було проведено також аналіз впливу параметрів ЕВ на частотну залежність коефіцієнту відбивання.

Сумісне використання поздовжних та крутильних коливань розширює кількість варіантів виконання ЧЕ [23]. Наприклад, у двозонному ЧЕ на рис.6 зона 2 забезпечує відбивання крутильних коливань, зона 3 - поздовжних. Якщо  $d_1=d_2=1$ ;  $r_l=0$  в перерізі I, тоді  $D_2 \approx 1,41$ , і для крутильних коливань  $\varepsilon_r=3$ ,  $r_r=0,5$ . Для перерізу II при  $r_l=0,6$ ;  $D_2=d_3$  отримуємо  $D_3 \approx 2,45$ ;  $r_r=0,83$ . При падінні на ЧЕ імпульсів з амплітудою  $A=1$  отримуємо ехосигнали крутильних хвиль з амплітудами 0,5; 0,6; 0,2 і ехосигнали поздовжних хвиль з амплітудами 0; 0,6; 0,6. Розділення ехосигналів на вході приймача можна здійснювати як за полярністю, так і за часом надходження.

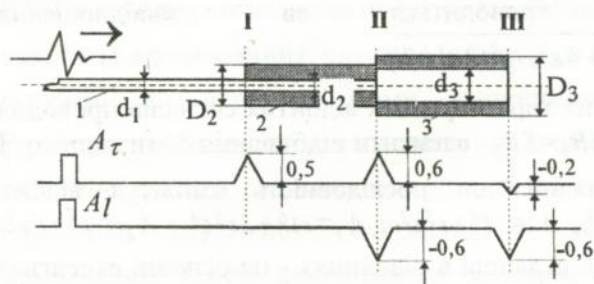


Рис.6. Приклад комбінованого ЧЕ імпульсного термометра: I - звукопровід; 2,3 - циліндричні зони ЧЕ

ЧЕ резонансних УЗТ. Базові конструкції ЧЕ резонансних УЗТ і порядок їх розрахунку частково висвітлені у главі 1. Можливі

виконання ЧЕ, як резонаторів згинувих коливань у вигляді камертону, який з'єднується із звукопроводом через ділянку з малим перерізом (рис.7,в). Деяку складність являє собою прогнозування характеристик таких резонаторів на етапі проектування та підгонки початкових параметрів, але їх перевагою є менші розміри порівняно із стрижневими резонаторами, що забезпечує кращу локальність вимірювання температури.

Детальний аналіз процесів в чверть- і півхвильових стрижневих резонаторах було проведено, виходячи з рівняння :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + H \frac{\partial U}{\partial t} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$$

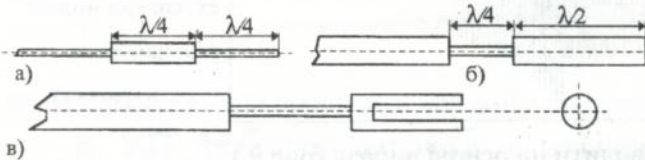


Рис.7. Варіанти реалізації ЧЕ резонансних термометрів

де  $U$ -швидкість зміщення,  $H$  -параметр втрат. Загальний розв'язок шукався, як корені характеристичного рівняння в  $s$  перетворенні Лапласа у вигляді  $\bar{U}(x,s) = A(s) \cdot e^{-\gamma x} + B(s) \cdot e^{\gamma x}$ . З врахуванням умов  $\bar{F}_p(x_1,s) = \bar{F}_\Lambda(x_1,s)$  і  $\bar{U}_p(x_1,s) = \bar{U}_\Lambda(x_1,s)$  ( $F_\Lambda$  і  $F_p$ - сили зміщення) для резонатора була складена система рівнянь

$$\bar{F}_p(x) = -\rho_p S_p \frac{H_p \cdot s + v_p^2}{s} \cdot \frac{\partial \bar{U}_p(x,s)}{\partial x}; \bar{U}_p(x,s) = -\frac{1}{\rho_p S_p} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{\partial \bar{F}_p(x,s)}{\partial x}$$

Розв'язок рівняння для першого відбиття:

$$\bar{R}(x,s) = \frac{Z_\Lambda(s) - Z_p(s) \cdot \text{th}(\gamma_p x_2)}{Z_\Lambda(s) \cdot Z_p(s) \cdot \text{th}(\gamma_p x_2)} \cdot a \cdot \frac{\omega F}{s^2 + \omega_F^2} \cdot e^{\gamma_\Lambda(x - 2x_1)}$$

Після зворотнього перетворення Лапласа кінцевий розв'язок був зведений до вигляду:

$$R(x,\tau) = \alpha e^{-\frac{H_\Lambda \omega_F^2}{2c_\Lambda^3} (2x_1 - x)} \left( 2 \frac{\omega F}{\omega_n} \frac{2\beta \sqrt{\beta^2 + \omega_n^2}}{G_+} \sin(\omega_n \tau + \varphi) e^{-\tau(\beta + n^2 \alpha)} + \frac{G_-}{G_+} \sin(\omega_F \tau + \psi) \right)$$

$$\text{де } G_{\pm} = (\beta \pm n^2 \alpha) \sqrt{(\beta + n^2 \alpha)^2 + 2\omega \frac{\omega}{n} + 2\omega \frac{\omega}{F} + (\omega \frac{\omega}{n} - \omega \frac{\omega}{F})^2},$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega n + \omega F}{\beta + n^2 \alpha} + \arctg \frac{\omega n - \omega F}{\beta + n^2 \alpha} - \arctg \frac{\omega n}{\beta}$$

$$\psi = \arctg \frac{\omega n - \omega F}{\beta + n^2 \alpha} + \arctg \frac{\omega n - \omega F}{\beta - n^2 \alpha} - \arctg \frac{\omega n + \omega F}{\beta + n^2 \alpha} - \arctg \frac{\omega n + \omega F}{\beta - n^2 \alpha}.$$

На рис.8 представлений вигляд ехо-сигналу, отриманий на основі наведеного виразу за допомогою пакету MathCAD.

Використання подібності процесів в ЧЕ процесам в резонансному електричному колі при дії фазоманіпульованого сигналу дозволяють спростити процедуру попередніх розрахунків,

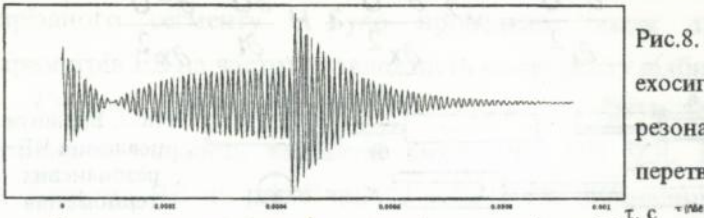


Рис.8. Обчислений ехосигнал моделі резонансного перетворювача.

які можна проводити на основі виразу (рис.9):

$$u_{вих} = A_m \left\{ e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}} + \left( 1 - e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}} \right) \cos \varphi \right\}^2 + \left( 1 - e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}} \right)^2 \sin^2 \varphi \left\}^{\frac{1}{2}}.$$

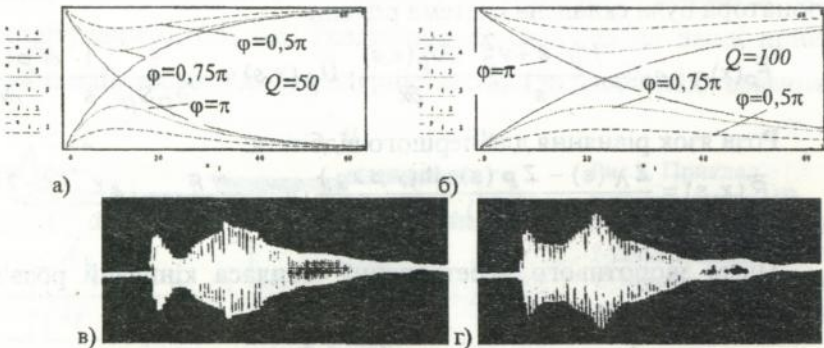


Рис.9. Форма ехосигналів при різних рівнях розстройки ( $n_i$  - номер періоду ехосигналу;  $u_i, y_i$  - амплітуда ехосигналу).

При створенні поодиноких зразків або малих партій імпульсних та резонансних УЗТ допустиме виконання індивідуального

градування кожного УЗТ. При збільшенні об'ємів випуску це недоцільно. Уніфікації досягнути можна, якщо використовувати відношення абсолютних значень. В імпульсних УЗТ - це відношення  $\tau_f/\tau_{oi}$ , де  $\tau_{oi}$  - базове значення інтервалу часу, яке визначається при певному значенні температури, в резонансних УЗТ - відношення частот  $f_f/f_{oi}$ .

В багатозонних імпульсних УЗТ можна скористатись фактором, що внесення локальних неоднорідностей, менших за довжину хвилі приводить до локальних змін пружних властивостей. Розгляд впливу вузької проточки на характер поширення УЗ привів до наближеного виразу[25]:

$$v^2 = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{L^2}{\left(\frac{l_1}{d_1^2} + \frac{l_2}{d_2^2}\right) \cdot (l_1 d_1^2 + l_2 d_2^2)} = k \frac{E}{\rho} = kv_0^2,$$

на базі якого можна проводити корекцію початкових параметрів ЧЕ.

В УЗТ складним питанням є кріплення і герметизація звукопроводу, оскільки опори та ущільнення можуть бути джерелами додаткових відбивань. На практиці доцільно є система кріплення короткими дротами, які виготовляються U, S або Г- подібної форми (рис.10,в). В останньому випадку дріт є одночасно трансформатором форми коливань. В імпульсних УЗТ наявність системи кріплення

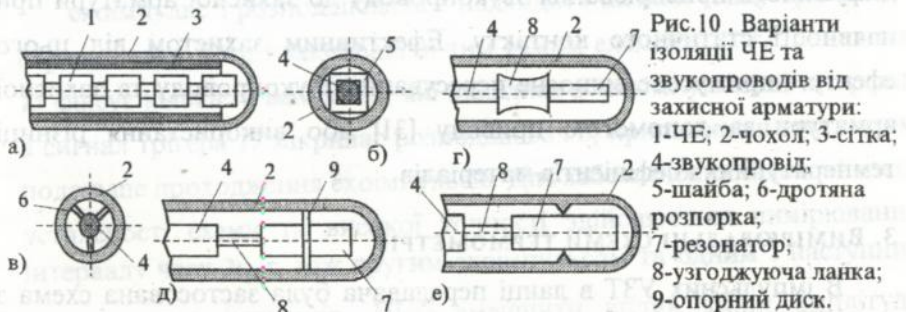


Рис.10. Варіанти ізоляції ЧЕ та звукопроводів від захисної арматури:  
1-ЧЕ; 2-чохол; 3-сітка;  
4-звукопровід;  
5-шайба; 6-дротяна розпорка;  
7-резонатор;  
8-узгоджуюча ланка;  
9-опорний диск.

приводить до появи додаткових відбитих сигналів від місця з'єднання, але можна обернути цю обставину на користь, використовуючи кріплення, як ЕВ. Задовільна акустична ізоляція може бути

досягнута встановленням шайб із гуми, графіту, фторопласту, прокладанням дротяної сітки або спіралі з тонкого дроту або фольги, нанесенням покриття на внутрішню стінку захисної арматури. Для ізоляції можна застосовувати металічні, графітові або керамічні квадратні шайби з отворами трикутної або квадратної форми, які забезпечують малу площину та кількість механічних контактів (рис.10,б). Створення прокладок між чохлам та звукопроводом може здійснюватись осадженням в заданому місці звукопроводу дрібних кристалів металу. Задовільні результати були отримані нами при неплотній засипці простору між чохлам та звукопроводом порошком кераміки, при застосуванні графіту у вигляді шайб або гвинтів, пористої кераміки на основі окису берилію, з якої були виготовлені ізолюючі прокладки необхідної форми, кремнійорганічної нитки, яка з великим кроком намотувалася на звукопровід. У деяких випадках, зокрема у резонансних УЗТ, можна забезпечити ізоляцію конструкторськими методами, надаючи певну форму узгоджуючій ланці (рис.10,з) [29], або забезпечуючи опору резонатора у вузловій площині (рис.10,д,е).

Для високотемпературних УЗТ треба враховувати небезпеку дифузійного приварювання звукопроводу до захисної арматури при наявності статичного контакту. Ефективним захистом від цього ефекту є примусове відносне пересування звукопроводу та захисної арматури за допомогою приводу [31] або використання різниці температурних коефіцієнтів матеріалів.

### 3. ВИМІРЮВАЛЬНІ СХЕМИ ТЕРМОМЕТРІВ

В імпульсних УЗТ в ланці передавача була застосована схема з тірісторним виходом, яка забезпечила амплітудне значення струму до 60 А при тривалості імпульсу на рівні 0,5 амплітуди  $\approx 3$  мкс. Для каналу приймача нами розроблена схема імпульсного УЗТ, в якому

вимірювання часового інтервалу здійснюється в два етапи (рис.11) [36]. На першому здійснюється грубий відлік міжімпульсного інтервалу, а на другому-вимірюється рештка часового інтервалу між другим ехоісигналом і наступним за ним імпульсом заповнення. Канал передачі складається з генератора 6, схеми запуску 20 і первинного перетворювача в складі ЧЕ 1, звукопроводу 2, МС ЕАПЗ з котушками 4 і 5. Одновібратор 10 забезпечує захист вхідних кіл. Підсилені та сформовані в 7 ехоімпульси надходять на розподільвач 8. Перший імпульс запускає імпульсний генератор 11. Заповнюючі імпульси з періодом  $t_0$  з 11 через відкритий елемент "I" 12 надходять на вхід лічильника 15 до моменту надходження другого ехоімпульсу, який відповідає закінченню вимірюваного інтервалу часу. Другий

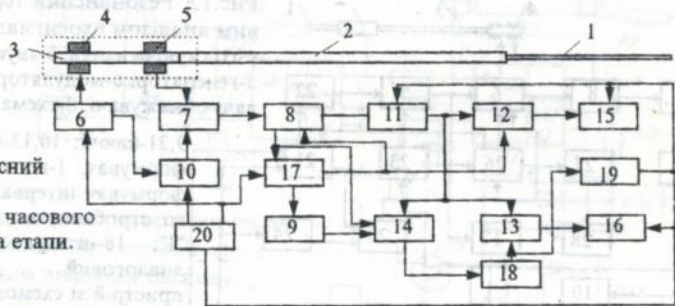


Рис.11. Імпульсний термометр з вимірюванням часового інтервалу в два етапи.

ехоімпульс з розподільвача 8 надходить на вхід скиду тригера 17, перекидаючи його і закриваючи тим самим елемент "I" 12. Лічильник 15 фіксує кількість імпульсів, які вклалися в міжімпульсний інтервал, а сигнал тригера 17 закриває розподільвач 8, припиняючи тим самим подальше проходження ехоімпульсів. Для забезпечення більш високої усталеності схеми та високої точності здійснюється вимірювання інтервалу часу  $2t_0 - \tau$  між другим ехоімпульсом та одним з наступних заповнюючих імпульсів. Щоб зменшити вплив зміни амплітуди ехоімпульсів під дією температури на зміни рівня втрат та тривалість сформованих імпульсів, у подальшому було додатково застосоване управління амплітудою за рахунок корекції струму підмагнічування.

Для високотемпературних резонансних УЗТ з ЧЕ на основі пів-та чвертьхвильових резонаторів нами були розроблені спеціальні схеми, які забезпечували необхідний алгоритм обробки інформаційних сигналів. Схема УЗТ на рис.12 автоматично забезпечує виконання вимірювальних операцій при надходженні ехосигналу на вхід приймального каналу [32]. Блоки 8-10 виключають помилковий запуск. Виділення груп імпульсів здійснюється елементами "І" 15 та 16, а їх інтегрування-інтегратором 18. Між модулятором та підсилювачем потужності встановлена ланка блокування входу підсилювача на час паузи між послідовними зондуєчими сигналами. Блоки 11-14 забезпечують стробування двох груп імпульсів до і після мінімуму ехосигналу, які

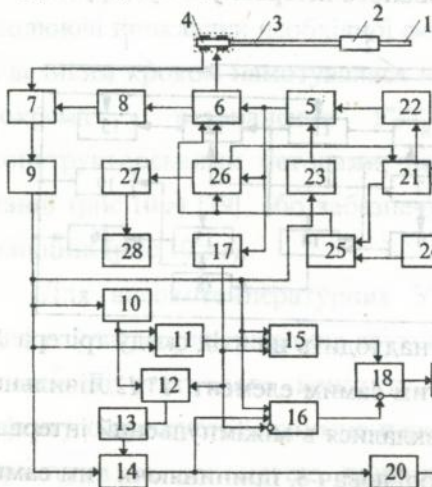


Рис. 12. Резонансний термометр з фазовим аналізом ехосигналу: 1-резонатор; 2-узгоджуюча ланка; 3-звукопровід; 4-ЕАП; 5-генератор; 6-модулятор; 7,17-підсилювачі-обмежувачі; 8-схема захисту;

9,21-ключі; 10,13-схеми запуску; 11-формувач 1-го стробімпульсу; 12-формувач інтервалу; 14-формувач 2-го стробімпульсу; 15,16,25-елементи "І"; 18-інтегратор імпульсів; 19-аналоговий запам'ятовуючий пристрій зі схемою керування 20; 22-керуючий інтегратор; 23-схема встановлення початкової фази; 24-ланка керування частотоміром; 26-частотомір; 27-перетворювач коду; 28-реєструючий пристрій.

формується на виходах елементів "І" 15 та 16. На входи цих елементів подається підсилений та обмежений на рівні ТТЛ-логіки ехосигнал сумісно з прямим (15) та інвертованим (16) сигналами генератора. Для зменшення впливу рівня відтину шумів на вході на площу імпульсів передбачено скид рівня відтину на нуль при надходженні першого півперіоду ехосигналу.

Найбільш відповідальною ланкою УЗТ є інтегратор імпульсів 18,

приклад реалізації якого представлено на рис.13. Для компенсації дрейфу напруги зміщення з виходів DA1 і DA2 передбачено коло компенсації на DA3, яке усуває зміщення в паузах між циклами інтегрування. Вихідний сигнал інтегратора є інформативним параметром про ступінь неузгодженості частоти опорного генератора та резонансної частоти ЧЕ і використовується в системі управління частотою опорного генератора, основою якої є цифроаналоговий перетворювач. Щоб зменшити вплив нестабільності схеми УЗТ із-за коливання сумарної вольтсекундної площі в динамічному режимі нагріву або охолодження ЧЕ, в схемі передбачена ланка примусового встановлення фази 23 (рис.12). Для



Рис.13. Схема інтегратора імпульсів для резонансного термометра з фазовим аналізом сигналу.

усунення інваріантності схеми УЗТ по відношенню до умов  $\Delta\varphi = \pi$  і  $\Delta\varphi = 0$  УЗТ був доповнений каналом для початкового пошуку резонансної частоти [34], в якому використовується зростання амплітуди сигналу випромінювання ЧЕ при наближенні частоти збудження до резонансного значення (ділянка III на рис.2).

Узагальнені технічні характеристики розроблених експериментальних зразків резонансних УЗТ наведені нижче:

- діапазон вимірюваних температур.....визначається властивостями матеріалу ЧЕ (Mo-до 2000 K, W, Re-до 2500 K і т.д.);
- тривалість сигналу передаючого каналу, мкс.....біля 250 (або  $(30\pm 40)T_0$ , де  $T_0$ -період коливань сигналу генератора);

-діапазон частот, кГц.....	50-300;
-частота слідування пакетів коливальних, с <sup>-1</sup> .....	100-120;
-максимальна температура ЕАП, К.....	приблизно 600;
-допустиме затухання у звукопроводі, дБ.....	приблизно 30;
-добротність.....	приблизно 50;
-похибка вимірювання температури, %.....	0,1-1,5.

В главі розглянуто загальні принципи побудови структурної схеми багатозонного УЗТ на прикладі створення УЗТ для вимірювання температури в 5-ти зонах за одноканальною схемою (рис.14). В ній більшість операцій керування та всі операції обробки інформації забезпечуються центральним процесором. Інтегратор та компаратор 1 служать для розпізнавання корисних ехосигналів. Аналізатор розташування ехосигналів забезпечує автоматичну корекцію стробів при нагріві чи охолодженні ЧЕ.

Особливістю УЗТ є:

-наявність схеми початкового пошуку ехосигналів, яка забезпечує їх розпізнавання при вмиканні або випадковому збої;

-застосування для операції вимірювання часових інтервалів двох групи лічильників, які при кожному наступному циклі вимірювання міняються місцями;

-наявність схеми слідування за ехосигналами, яка постійно коректує розташування стробімпульсів на осі часу.

Створений експериментальний зразок 5-тизонного УЗТ характеризувався наступними параметрами:

- діапазон вимірюваних температур.....	20-1500 <sup>0</sup> С;
- кількість зон, в яких вимірюється температура.....	5;
- похибка вимірювання.....	<1%;
- довжина однієї зони, мм.....	150;
- відстань від ЕАП до першої зони, мм.....	900;
- тип ЕАП.....	магнітострикційний стержневий;
- матеріал захисного чохла.....	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ;
- макс. відстань від головки до вимірювальної частини термометра, м.....	15;
- виконання.....	стаціонарне;
- живлення.....	220 V; 50 Hz;
- вивід інформації.....	в цифровій формі, додатково- лінійний індикатор.



Зразок УЗТ був випробуваний в лабораторних умовах та в умовах ливарного виробництва (в мартенівській печі) Дніпровського металургійного комбінату (м.Дніпродзержинськ).

Використання обчислювальної машини або мікропроцесора дозволяє забезпечити введення додаткової інформації та проведення ряду вимірювальних операцій по визначенню таких характеристик матеріалів, як модуль Юнга і модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона, анізотропію монокристалічних матеріалів та ін. Нами були створені прилади для вимірювання модуля Юнга зразків малих розмірів з керамічних та металокерамічних матеріалів, один з яких успішно функціонує в Інституті надтвердих матеріалів НАН України. Крім того, була проведена робота по доповненню контактних варіантів УЗТ, які характеризуються кінцевим значенням показника теплової інерції, безінерційним сигналізатором аварійного наростання (зниження) температури в газовому або рідинному об'єкті.

#### 4. МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ТЕРМОМЕТРІВ.

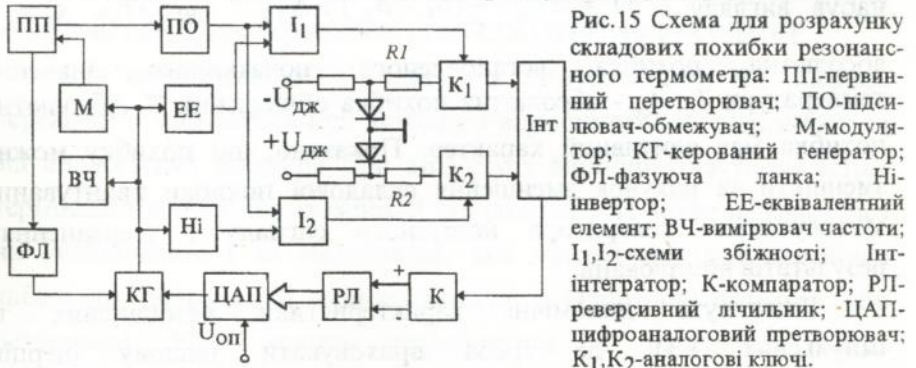
При застосуванні в ролі ЧЕ елементів конструкції об'єкту діапазон вимірювання температури визначається фактично межами температури експлуатації. При використанні спеціальних ЧЕ згаданий діапазон визначається властивостями матеріалу ЧЕ. Верхня границя вимірювання обмежена температурою плавлення матеріалу ЧЕ, ростом затухання при високих температурах і наявністю релаксаційних процесів.

В главі виконане детальне структурування складових похибки вимірювання температури імпульсними та резонансними УЗТ, їх розрахунок та показані шляхи зменшення.

Складові похибки, що обумовлені умовами теплообміну та теплофізичними характеристиками ЧЕ, визначаються конструктивними особливостями високотемпературного вузла і

рахуються за відомими методиками, як і для інших контактних ЧЕ. Ряд складових похибки (наприклад, за рахунок зміни затухання, структурних змін, дисперсії швидкості у звукопроводі, накладання сигналів у ЕАП та ін.) можна усунути або звести до мінімуму на стадії проектування правильним вибором розмірів звукопроводу та засобів його фіксації, конструкції ЕАП, технологічного режиму стабілізації структури матеріалу ЧЕ. Ряд складових похибки можна зменшити схемотехнічними засобами.

Розрахунок складових похибки резонансних УЗТ проводився за схемою рис.15 [28]. Виділені наступні джерела складових похибки: зміна тривалості імпульсів  $\Delta\tau_1$  у групах на виході ППО із-за зміни амплітуди ехосигналу на вході; розкид  $\Delta\tau_2$  часу затримки сигналів в інверторі та ЕЕ затримки; розкид затримок  $\Delta\tau_3$  сигналів в схемах "I<sub>1</sub>", "I<sub>2</sub>" формувача груп імпульсів; неідентичність каналів інтегратора (розкиди  $\Delta U_1$ ,  $\Delta U_2$  для входних напруг та  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$  для опорів струмозадаючих резисторів, розкид  $\Delta\tau_4$  затримок у ключах  $K_1, K_2$ ; зміна напруги зміщення  $U_3$  компаратора в паузі між групами імпульсів; похибка  $\Delta_{кв}$  квантування тракту "компаратор-РЛ-ЦАП".



Розрахунки показали, що результуюча похибка включає адитивну, мультиплікативну та квадратичну складові і описується виразом:

$$\Delta f = \Delta f_{кв} + \Delta f_{ад} + (\delta_{U_2} \delta_{U_1} + \delta_{R_1} \delta_{R_2} + \delta_{T_0}) f + 4(\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3 + \Delta\tau_4) f^2 = \Delta_0 + \delta_3 f + \epsilon f^2,$$

де  $\Delta_0$ ,  $\delta_S$ ,  $\varepsilon$  - коефіцієнти багаточленної похибки.

Був проведений розрахунок похибки вимірювання температури в газі резонансним УЗТ з різними конструкціями ЧЕ, який привів до

виразу [15]  $\bar{t}_3 = \frac{k_1 k_2}{l_3 k_3 D} \text{sh} A_3$ , де:

$$D = k_1 k_2 \text{ch} A_1 \text{ch} A_2 \text{ch} A_3 + \phi_1 k_2^2 \text{sh} A_1 \text{sh} A_2 \text{ch} A_3 + \phi_2 k_1 k_3 \text{ch} A_1 \text{sh} A_2 \text{sh} A_3 + \\ + \phi_1 \phi_2 k_2 k_3 \text{sh} A_1 \text{ch} A_2 \text{sh} A_3; A_j = \frac{k_j l_j}{l}; \phi_j = \frac{d_{i+1}^2}{d_i^2}.$$

Аналіз був виконаний чисельними розрахунками для різних конструкцій ЧЕ.

Розрахунок похибки вимірювання імпульсним УЗТ проводився

на основі виразу  $\frac{dT}{t} = -\frac{1}{2} \cdot (\alpha_I + \alpha_E) dT$ . З врахуванням того, що коефіцієнти  $\alpha_I$  і  $\alpha_E$  для більшості матеріалів, які застосовуються в УЗ термометрії, слабо залежать від температури і позначивши  $\alpha_I + \alpha_E =$

$c(T)$  отримуємо  $T = T_0 - \frac{2}{c} \ln \frac{t}{t_0}$ . В результаті, вираз для похибки

набув вигляду  $\Delta T = \Delta T_0 - \frac{2}{c} (\delta_t - \delta_{t_0}) + \Delta_{об}$ , де  $\Delta T_0 = \delta_{T_0} T_0 -$

абсолютна похибка встановленого початкового значення температури  $T_0$ ;  $\Delta_{об}$  - абсолютна похибка обчислення  $T$ . Абсолютна похибка має адитивний характер. Показано, що похибку можна зменшити за рахунок зменшення складової похибки квантування застосуванням генератора ноніусного сигналу і усередненням результатів вимірювань.

Розглянуто динамічні характеристики резонансних та імпульсних УЗТ, де треба враховувати теплову інерцію високотемпературного вузла, час поширення УЗ сигналу по звукопроводу і час, який витрачається на вимірювання частоти або часового інтервалу. При довжині звукопроводу з ЧЕ 2,5 м та швидкості  $v=5000$  м/с мінімально допустимий час між послідами

сигналу - 1 мс. Час, затрачений на одно вимірювання імпульсним УЗТ, складає 0,5-1,5 с і зростає при збільшенні довжини звукопроводу, а також довжини та кількості зон. Якщо ЧЕ - це об'єкт вимірювання, цей час скорочується за рахунок виключення впливу теплової інерції ЧЕ.

На основі результатів розрахунків глави 2 розглянуто вплив механічних пошкоджень ЧЕ імпульсних УЗТ на похибку вимірювання. Наявність пошкодження довжиною 0,1 мм та глибиною, яка відповідає зміні діаметру від  $d_1=2$  мм до  $d_2=1,8$  мм приводить до добавки до вимірюваного інтервалу часу, яка буде складати  $4,4 \cdot 10^{-10}$  с при фазовій швидкості 5000 м/с, що при базовому інтервалі  $40 \cdot 10^{-6}$  с дає відносне значення  $1,1 \cdot 10^{-5}$ , що є на порядок меншим, ніж інші складові похибки.

Для багатозонних варіантів УЗТ була промодельована ситуація, коли УЗТ використовується для вимірювання температури в каналі при пересічному обтіканні газовим потоком. Поставлена задача вирішена у вигляді програми, яка виконана у діалоговому режимі. В ній передбачені такі матеріали, як вольфрам, реній, молібден, корунд та нержавіючі сталі 12X18H9T та 12X18H10T.

Для контактних УЗТ з одно- та багатозонними ЧЕ операції перевірки їх параметрів при випуску з виробництва не відрізняються від аналогічних операцій при випуску з виробництва термометрів термоелектричних. Багатозонний імпульсний УЗТ може перевірятися на устаткуванні і за методикою, яка призначена для перевірки кабельних термометрів термоелектричних. Однозонні імпульсні або резонансні УЗТ можуть перевірятися в реперних точках затвердіння металів високої чистоти. Для перевірки НСХ та досліджень стабільності параметрів імпульсних та резонансних УЗТ нами була створена спеціальна конструкція для визначення їх параметрів в реперній точці затвердіння нікелю. Проводився

комплекс досліджень по вирішенню проблеми верифікації контактних УЗТ під час експлуатації, причому акцент ставився на процедуру верифікації без демонтажу.

Якщо ЧЕ являється елементом об'єкту, температура якого вимірюється, то з методичної точки зору верифікація таких УЗТ представляє собою набагато складнішу задачу, ніж для контактних варіантів. Це визначається різноманітністю об'єктів за конструкцією, розмірами, складом середовища. На практиці бажано передбачати можливість тимчасового встановлення на об'єкті контрольних термометрів для початкової прив'язки НСХ до реального значення температури, а також для періодичної перевірки параметрів УЗТ в процесі експлуатації. Особливо це стосується об'єктів зі змінними параметрами середовища (зміна хімічного складу, забруднення, швидкості руху та ін.). Якщо на об'єкті передбачене встановлення контрольної-вимірювальної апаратури для контролю параметрів середовища, то цю інформацію доцільно використовувати для автоматичної корекції показів УЗТ.

##### 5. ПРИНЦИПИ ВИБОРУ ТА ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ПРИ СТВОРЕННІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ТЕРМОМЕТРІВ.

В главі розглянуті критерії, за якими необхідно вибирати матеріали для УЗТ, та представлені результати експериментальних досліджень перспективних матеріалів.

В газових ЧЕ доцільно застосовувати гази, що по своїх властивостях наближаються до ідеального. В реальних газах в більшості випадків зміна швидкості з температурою складає 0,3...0,8 м/с·К при 273-293 К. В рідинних УЗТ застосовують рідини, для яких температурна залежність швидкості близька до лінійної. До них можна віднести ряд органічних сполук та рідкі метали (натрій, калій, їх суміші). Для твердих матеріалів рекомендовано по можливості притримуватись умови  $T_{max} < 0,5T_{пл}$ , де  $T_{max}$ -максимальна вимірювана

температура,  $T_{пл}$  - температура плавлення матеріалу ЧЕ.

На рис.16 показані температурні залежності резонансної частоти ЧЕ з різних металів в складі резонансних УЗТ, на рис.17- температурні залежності модуля Юнга ряду матеріалів, отримані за результатами градування імпульсних УЗТ. Як видно, монокристалічному вольфраму притаманна анізотропія пружних властивостей при високих температурах, а залежність "частота - температура" ділиться на дві майже прямолінійні ділянки.

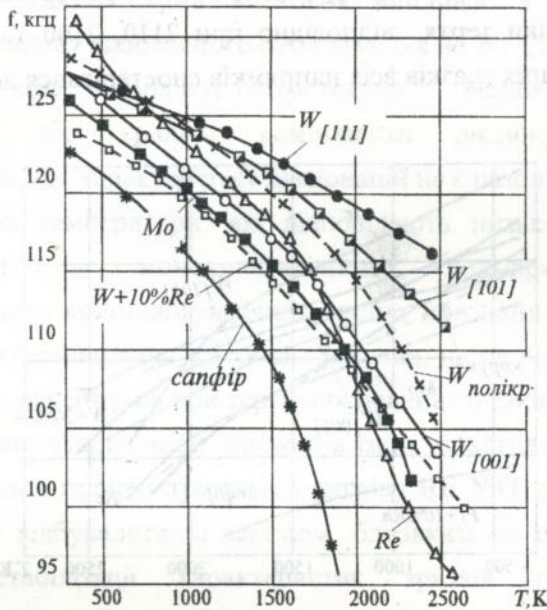


Рис.16. Температурні залежності резонансної частоти ультразвукових термометрів з ЧЕ з різних матеріалів.

За кристалографічними напрямками [001], [101] та [111] усереднене значення для зміни частоти з температурою відповідно складає на низькотемпературній ділянці 9,4; 5 і 4,5 Гц/К, на високотемпературній -14,8; 7,8 і 6,5 Гц/К. Значення температури, які відповідають переходам між ділянками, складають 1840, 1470, 1350 К

відповідно для напрямків [001], [101], [111]. Характерним для більшості наведених на рис.16,17 кривих є зростання чутливості з ростом температури та злами кривих, які відповідають переходу від нерелаксованого модуля пружності до релаксованого і різкому зростанню внутрішнього тертя (ВТ). Порівняння значень температур, які відповідають згаданим зламам, з температурою плавлення  $T_{пл}$  показало, що вони корелюють із значенням  $0,5T_{пл}$  дещо перевищуючи його.

У полікристалічних вольфраму, ірідію та ренію спостерігалися релаксаційні піки тертя відповідно при 2110, 2100 та 2330 К. У монокристалічних зразків всіх напрямків спостерігався деякий ріст

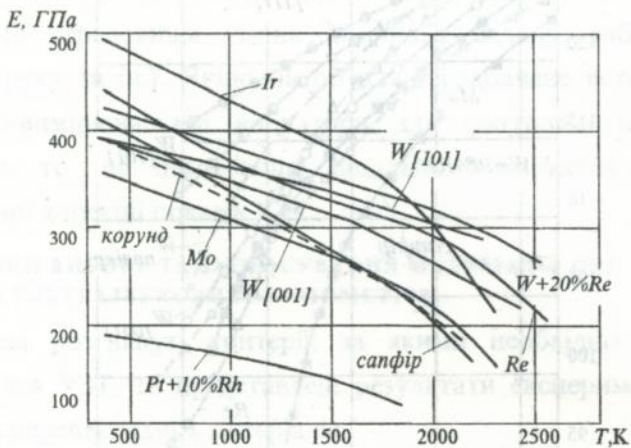


Рис.17. Температурні залежності модуля пружності металів та сплавів, отримані за результатами досліджень імпульсних УЗТ.

рівня ВТ в діапазоні температур 600 -1500 К. Для напрямків [101], [111] можна зауважити окремі слабо виражені піки ВТ відповідно при 820 і 1120 К. Для напрямку [001] це наростання займає більш широкий температурний діапазон. При термоцилюванні монокристалів згаданого напрямку спостерігається роздвоєння широкого піку тертя. Із збільшенням кількості термоциклів амплітуда

максимумів зростає, а після 50 циклів з'являється додатковий пік тертя при 2110 К. Це вказує на те, що новоутворені в монокристалі дислокаційні петлі та стінки поводять себе по відношенню до зернограничної релаксації так само, як границі зерен в полікристалічних матеріалах. Низькотемпературні піки ВТ у монокристалічному вольфрамі, за нашим припущенням, зв'язані з розсіянням енергії при русі дислокацій, що підтверджується меншим рівнем тертя в цьому діапазоні температур в полікристалічному вольфрамі. Такий самий висновок випливає з результатів по вивченню впливу швидкісного охолодження на ВТ. Допускається, що за деформацію в області мікротекучості відповідальні крайові дислокації або крайові компоненти дислокацій, причому встановлено, що характер руху дислокацій не є резонансний. Різниця в значеннях температури, які відповідають низькотемпературним максимумам в монокристалічному вольфрамі, пояснена дезорієнтацією кристалографічних систем ковзання по відношенню до напрямку поширення УЗ хвилі. Зокрема, на це вказує факт появи додаткових максимумів при термоциклованні зразків напрямку [001].

Вивчення стабільності пружно-в'язких властивостей матеріалів проводилось в процесі тривалого нагріву ЧЕ УЗТ до 2100 К. Зміни параметрів відбувалися за законом, близьким до експоненційного. Процес стабілізації характеристик зразків полікристалічних вольфраму і молібдену фактично завершувався за 4 год., сплаву  $W+10\%Re$ , монокристалічного вольфраму, полікристалічного ренію та ірідію - за 2 год. Порівняння стабільності зразків ЧЕ з монокристалічного вольфраму різних кристалографічних напрямків показало, що кращі властивості притаманні зразкам напрямків [001] та [111]. Високу стабільність при дослідженнях проявили ЧЕ із сплава  $W+10\%Re$ . Додаткові дослідження показали, що вміст легуючого елемента та фазовий стан сплаву при нагріві не змінився, але

змінився розподіл ренію. Якщо перед нагрівом коливання вмісту ренію не перевищувало  $\pm 3\%$ , то після нагріву на протязі 25 год.  $\pm 15\%$  з утворенням сегрегацій з підвищеним вмістом ренію, які характеризувалися підвищеною мікротвердістю. Дослідження електронної мікроструктури сплаву  $W+10\%Re$  показали наявність невеликих виділень, які коагулюють при гомогенізуючому відпалі і зростають у розмірах після 5 год. нагріву, що супроводжується відносним зростанням залишкових мікронапружень.

Вплив механічної деформації на характеристики ЧЕ УЗТ досліджувався створенням деформації кручення, ступінь якої визначався із співвідношення  $D = \frac{nd}{l} \cdot 100\%$ , де  $n$ - число обертів на закручування,  $d$ - діаметр,  $l$ - довжина. Деформація ЧЕ із полікристалічних вольфраму та ренію викликає зменшення значення модуля пружності та зростання ВТ (рис. 18). З врахуванням даних

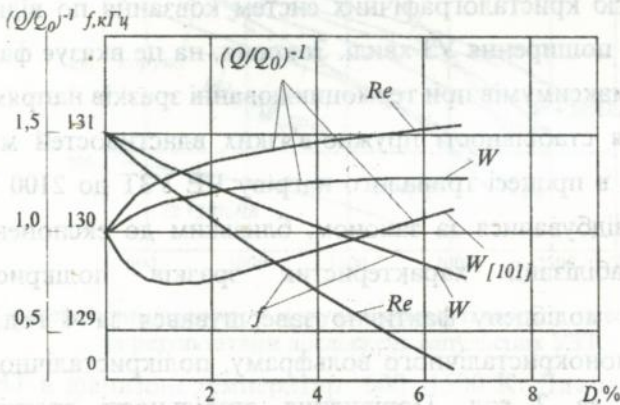


Рис. 18. Вплив деформації на резонансну частоту і внутрішнє тертя в ЧЕ УЗТ

інших авторів можна вважати, що основною причиною зниження модуля при деформуванні обумовлено процесами відриву та розмноження дислокацій. Як видно з рис.18, ВТ при деформуванні плавно наростає, що може бути зв'язано із збільшенням довжини

дислокаційних петель, обумовлених зривом дислокацій з місць закріплення. Неперервний характер зміни  $(Q/Q_0)^{-1}$  дозволяє припустити, що лінії дислокації в матеріалі закріплюються з різним ступенем жорсткості, так що із збільшенням  $D$  різні дислокації зриваються поступово. Деформація полікристалічного вольфраму викликала підвищення рівня ВТ, збільшення висоти релаксаційного піку тертя і зменшення модуля пружності, але відносні зміни останнього були менші, ніж аналогічні зміни в ренії. Що стосується монокристалічних матеріалів, то як відомо, їх деформування приводить до збільшення густини лінійних та точкових дефектів та збільшення локальних внутрішніх напружень. Очевидно, одночасний вплив декількох факторів, кожний з яких по різному залежить від ступеня деформації, визначає більш складний характер змін ВТ у монокристалічних зразках. При охолодженні зі швидкістю 1200-1500 К/с від температури 2700-2800 К у монокристалічних ЧЕ спостерігалось зниження висоти низькотемпературних максимумів і збільшення модуля пружності у відповідному діапазоні температур. Мікроскопічний аналіз шліфів показав часткове розчинення карбідів. Про утворення перенасиченого твердого розчину свідчило також підвищення мікротвердості.

Оцінка енергії активації за результатами досліджень температурних залежностей ВТ для полікристалічного вольфраму дала значення 380 кДж/моль, для ренію- 410 кДж/моль. Енергія активації низькотемпературних максимумів ВТ в монокристалічному вольфрамі становила 134 і 184 кДж/моль відповідно для напрямків [101] і [111].

Для забезпечення стабільності пружних властивостей ЧЕ рекомендовано вжити заходів для стабілізації структури матеріалу відпалом при максимальній температурі майбутньої експлуатації, або створенням псевдобінарних систем за типом "вольфрам-дисперсна

фаза впровадження", в яких згадана фаза знаходиться у рівновазі з нелегованим вольфрамом. При цьому дисперсна фаза має бути термодинамічно стабільна в умовах сплавоутворення, утворюючи при цьому дисперсні частинки діаметром 300-500 Å, яким не притаманне укрупнення при нагріві. На прикладі вольфраму до таких систем можна віднести системи:  $W-Me_xO_y$  ( $Y_2O_3$ ,  $ThO_2$ ,  $HfO_2$ );  $W-MeC$  ( $HfC$ ,  $ZrC$ );  $W-MeN$  ( $ZrN$ ,  $HfN$ );  $W-MeB_2$  ( $HfB_2$ ,  $ZrB_2$ ).

З врахуванням результатів проведених досліджень та даних інших авторів зроблено висновок, що із металічних матеріалів в інертному середовищі (або у вакуумі) для ЧЕ можна застосовувати алюміній (до 810 К), нержавіючі сталі (1350 К), рутеній та молібден (2640 К), тантал (2730 К), реній (3340 К), у водні -тантал, реній, вольфрам, в окислювальному середовищі-нержавіючі сталі, ірідій (2400 К), в рідкому натрії-нержавіючі сталі, у вуглецевому середовищі-реній (1800 К), тантал (2700 К). В резонансних УЗТ ефективні ЧЕ з платини (1520 К), рутенію, вольфраму, ренію, сплавів вольфраму з ренієм.

УЗ методи та реалізовані на їх принципах УЗТ мають широкі потенційні можливості саме тому, що в номенклатуру матеріалів для ЧЕ можна включити керамічні матеріали, оксиди, карбіди, нітриди. Певні утруднення при застосуванні цих матеріалів на сучасному етапі зв'язані з сильним впливом технологічного режиму виготовлення на їх фізичні властивості. Були проведені експерименти з сапфіровим ЧЕ  $\varnothing 4$  мм  $\times$  85 мм в складі імпульсного однозонного УЗТ, які дали позитивні результати, та з ЧЕ із зразків низькопористого корунду вітчизняного виробництва. Останні характеризувалися великим розкидом результатів від зразка до зразка ( $>3$  %). Складним питанням виявилось з'єднання сапфірових та корундових ЧЕ із звукопроводом, тому рекомендовано виготовлення ЧЕ і звукопроводу із одного стержня, а з'єднання здійснювати в

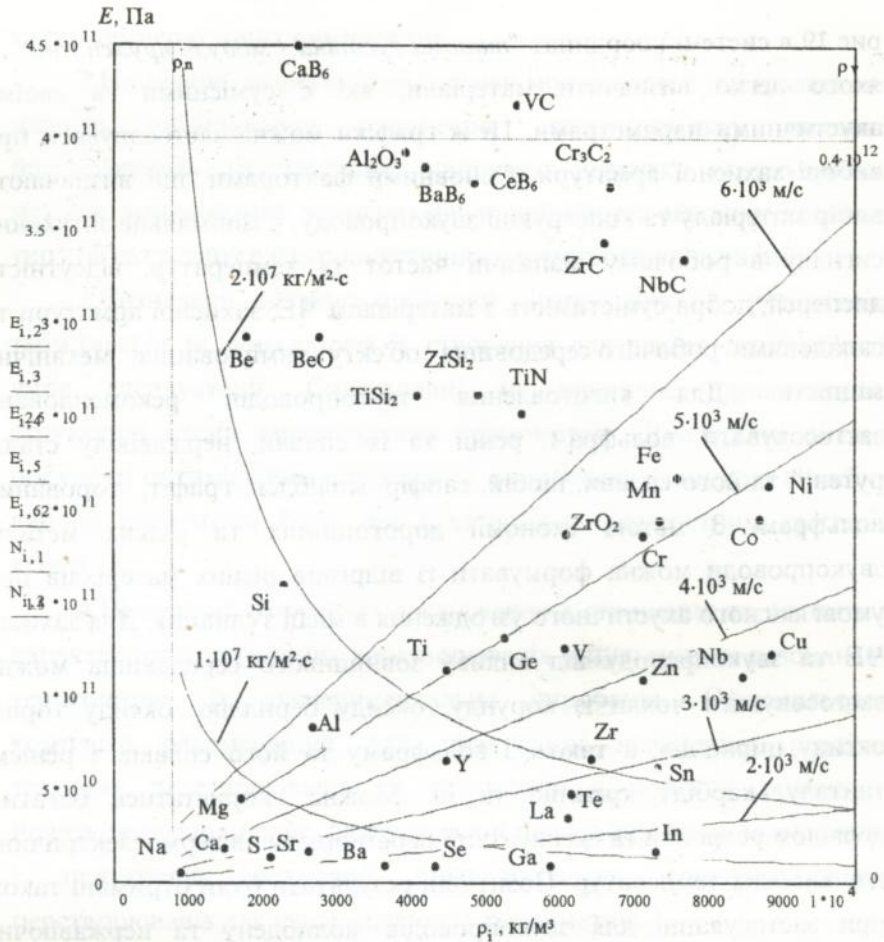


Рис.19. Представлення характеристик матеріалів в координатах "густина-модуль пружності" (показані лінії рівних швидкостей і імпедансів)

низькотемпературній частині.

Отримані температурні залежності дозволяють представити у наглядній формі взаємозв'язки теплофізичних та акустичних властивостей матеріалів, що має велике значення для процедури розробки УЗТ, полегшуючи процедуру вибору матеріалів для ЧЕ та звукопроводів, узгодження імпедансів в місцях з'єднання.

Значення швидкостей та хвильових опорів представлені на

рис. 19 в системі координат "питома густина - модуль пружності", з якого легко визначити матеріали, які є сумісними за своїми акустичними параметрами. Ці ж графіки можна застосовувати при виборі захисної арматури. Основними факторами, що визначають вибір матеріалу та конструкції звукопроводу, є мінімальне затухання сигналу в робочому діапазоні частот та температур, відсутність дисперсії, добра сумістимість з матеріалом ЧЕ, захисної арматури та складовими робочого середовища об'єкту вимірювання, механічна міцність. Для виготовлення звукопроводів рекомендовано застосовувати: вольфрам, реній та їх сплави, нержавіючу сталь, рутеній та його сплави, ніобій, сапфір, молібден, графіт, торований вольфрам. З метою економії дорогоцінних та рідких металів звукопроводи можна формувати із відрізків різних матеріалів при умові якісного акустичного узгодження в місці з'єднання. Для захисту ЧЕ та звукопроводу від впливу зовнішнього середовища можна застосовувати чохла із корунду, оксиду берилію, оксиду торію, оксиду цирконію, а також з вольфраму та його сплавів з ренієм, танталу, карбиду кремнію та ін. Можна скористатись багатим досвідом розробки та експлуатації перетворювачів термоелектричних для високих температур. Позитивні результати були отримані також при застосуванні для звукопроводів молибдену та нержавіючих сталей 12X18H9T і 12X18H10T, а для захисної арматури - вольфрамівих трубчатих чохлів, виготовлених методами порошкової металургії.

## В И С Н О В К И

1. На основі критичного аналізу існуючої номенклатури методів та засобів вимірювання середніх і високих температур та попередньої теоретичної оцінки можливостей ультразвукових методів вимірювання зроблені висновки про перспективність останніх в

галузі температурних вимірювань.

2. На основі теоретичного аналізу можливостей ультразвукових методів вимірювання параметрів стану об'єкту виконано прогнозування перспективних напрямків розвитку ультразвукових методів вимірювання температури в залежності від виду коливань, типу об'єкту, типу електроакустичного перетворювача та ін.

3. Визначені шляхи побудови імпульсних і резонансних термометрів та методологія їх створення для різних типів об'єктів, умов експлуатації. Синтезовані та критично проаналізовані структурні схеми вищезгаданих термометрів. Досліджені питання побудови оптимальних структур та алгоритмів з оцінкою похибки і вибору елементної бази, які відповідають конкретним критеріям якості.

4. Проведені теоретичні дослідження з створення та оптимізації характеристик первинних перетворювачів імпульсних та резонансних термометрів, їх експериментальна апробація. Сформульовано комплекс рекомендацій для практичної інженерної реалізації згаданих перетворювачів та пропозиції з корекції розкиду їх початкових параметрів. Обґрунтовані пропозиції по конструюванню і практичній реалізації спеціалізованих електроакустичних перетворювачів для ультразвукових термометрів.

5. Розроблені принципи побудови та схемної реалізації різних типів термометрів, сформульовані пропозиції по схемотехнічній реалізації найбільш відповідальних ланок імпульсних та резонансних термометрів, рекомендації з оптимізації їх характеристик із застосуванням сучасної елементної бази.

6. Проведено комплексні експериментальні дослідження низки матеріалів, попередньо оцінених, як перспективних для виготовлення конструкційних елементів давачів термометрів, і зроблені висновки про доцільність їх застосування в ультразвуковій термометрії.

Визначені умови найбільш ефективного застосування того чи іншого матеріалу (діапазон температур, середовище об'єкту). Сформульовані критерії та рекомендації для коректного вибору матеріалів чутливих елементів термометрів. Досліджено кореляцію між пружно-в'язкими та електрофізичними характеристиками матеріалів з врахуванням дислокаційних та вакансійних механізмів релаксації.

7. Проведено детальний теоретичний аналіз метрологічних параметрів імпульсних та резонансних термометрів, запропоновані порядок розрахунку як окремих складових похибки, так і вирази для розрахунку сумарної похибки вимірювання. Виконана їх експериментальна перевірка та зазначені шляхи покращення метрологічних характеристик ультразвукових термометрів.

Сформульовані принципи верифікації термометрів при випуску з виробництва та експлуатації.

8. Проведено узагальнення отриманих результатів і на його основі розвинуті системні аспекти проектування ультразвукових термометрів, що дозволило запропонувати процедуру розробки термометрів з прогнозованими метрологічними характеристиками від формування вимог до оцінки їх метрологічних параметрів. Розроблені рекомендації для практичного створення одно- та багатозонних термометрів для діапазонів середніх та високих температур, а також зазначено принципи створення приладів з розширеними функціональними можливостями для фізичних досліджень, зокрема, для визначення динамічного модуля пружності зразків з малими габаритними розмірами із твердосплавних матеріалів в широкому діапазоні температур, а також створені експериментальні зразки приладів для безінерційного контролю аварійних ситуацій, які супроводжуються швидким наростанням температури.

**РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ВИСВІТЛЕНІ У 65 НАУКОВИХ ПРАЦЯХ, ОСНОВНИМИ З ЯКИХ Є:**

- 1.Луцик Я.Т., Стаднык Б.И. Ультразвуковая термометрия. М.: Энергоатомиздат, 1992, 112 с.
- 2.Температурные измерения/О.А.Герашенко, А.Н.Гордов, В.И.Лах, Я.Т.Луцик и др. Справочник//Под ред.О.А.Герашенко.К.: Наукова думка, 1989.
- 3.Луцик Я.Т. Ультразвук в контрольно-измерительной технике и приборах. В кн.: Датчики и методы повышения их точности. Вып.4. Киев: Выща школа, 1989. С.165-215.
- 4.Стаднык Б.И., Луцик Я.Т., Лах В.И. Резонансный ультразвуковой метод измерения температуры// Измерительная техника. 1977. №2. С.64-65.
- 5.Луцик Я.Т. Теоретические и экспериментальные исследования высокотемпературных акустических термометров с вольфрамовыми резонаторами//Теплофизика высоких температур, т.15, 1978. №1. С.214-216.
- 6.Луцик Я.Т., Столярчук П.Г., Киц И.И. Акустические преобразователи температуры с резонаторами из тугоплавких металлов// Контрольно-измерительная техника. 1979. Вып.25. С.126-129.
- 7.Кислый П.С., Луцик Я.Т., Столярчук П.Г. Установка для исследования ультразвуковых преобразователей температуры//Заводская лаборатория, 1979, №8. С.738-739.
- 8.Луцик Я.Т., Кислый П.С., Стаднык Б.И., Столярчук П.Г. Исследование возможности использования монокристаллического вольфрама в ультразвуковой термометрии// Метрология, 1982, №7. С.35-40.
- 9.Луцик Я.Т., Тарнавская Р.Ю. Ультразвуковые термометры и перспективы их дальнейшего развития//Контрольно-измерительная техника, вып.35, 1984. С.79-85.
- 10.Луцик Я.Т. Особенности конструирования чувствительных элементов ультразвуковых резонансных термометров //Контрольно-измерительная техника, вып.36, 1984. С.82-85.
- 11.Мотало В.П., Луцик Я.Т. Методы измерения модулей упругости тугоплавких металлокерамических материалов при высоких температурах//Контрольно-измерительная техника, вып.38, 1985. С.50-54.

12.Бельпоков О.А., Киц И.И., Луцик Я.Т., Пристайко Р.А. Технологические аспекты проблемы изготовления гибких ультразвуковых термопреобразователей// Контрольно-измерительная техника, вып.39, 1986. С.38-40.

13.Луцик Я.Т., Столярчук П.Г. Влияние механической деформации и термической закалки на характеристики акустических термометров// Контрольно-измерительная техника, вып.41, 1987. С.57-61.

14.Луцик Я.Т. Конструктивные параметры чувствительных элементов резонансных акустических термометров//Метрология, 1987, №4. С.45-52.

15.Луцик Я.Т., Лозбин В.И., Лихновский И.С. Особенности применения акустических термометров для измерения температуры газовых потоков// Контрольно-измерительная техника, 1986, вып.40. С.54-57.

16.Луцик Я.Т., Чех Р.И. Особенности измерительных устройств ультразвуковых термометров// Измерительная техника, 1985, №10. С.31-33.

17.Чех Р.И., Луцик Я.Т. Влияние внутреннего трения и согласования с линией на эхо-сигнал ультразвукового термометра./ Контрольно-измерительная техника. 1987, вып.42. С.61-64.

18.Луцик Я.Т., Столярчук П.Г., Чех Р.И., Лихновский И.С. Погрешности ультразвуковых резонансных термометров с фазовым анализом эхо-сигнала // Измерительная техника. 1988, №7. С.35-37.

19.Лихновский И.С., Луцик Я.Т., Чех Р.И. Ультразвуковые импульсные тонкопроволочные термометры для высокотемпературных измерений// Контрольно-измерительная техника. 1988, вып.43. С.45-50.

20.Лихновский И.С., Луцик Я.Т., Левчук Н.Ю., Столярчук П.Г. Многозонные чувствительные элементы импульсных ультразвуковых термометров// Контрольно-измерительная техника, 1988, вып.44. С.77-80.

21.Луцик Я.Т., Столярчук П.Г. Исследование монокристаллического вольфрама с целью применения в высокотемпературной акустической термометрии// Высокочистые и монокристаллические металлические материалы/ Под ред. А.И.Манюхина. М.: Наука, 1987. С.213-216.

22.Лихновский И.С., Луцик Я.Т., Левчук Н.Ю. Устройство ввода-вывода

цифровой информации ультразвукового измерительного комплекса//Вестник Львовского политехн. ин-та "Технические средства автоматизации измерений и управления научными исследованиями", 1990, №248.

23. Левчук Н.Ю., Лихновский И.С., Луцки Я.Т. Использование крутильных колебаний в ультразвуковых импульсных термометрах// Контрольно-измерительная техника, 1990, вып.48. С.74-80.

24. Лихновський І.С., Луцки Я.Т., Герега Т.В. Формування чутливих елементів імпульсних акустичних термометрів// Вісник ЛПІ "Технічні засоби автоматизації вимірів та керування науковими дослідженнями", 1992, №267. С.70-73.

25. Лихновский И.С., Луцки Я.Т., Стаднык Б.И. Ультразвуковые многозонные термометры для контроля в технологических процессах. В кн.: Средства и системы управления в технике и технологии. Новочеркасск, 1990. С.49-54.

26. Луцки Я.Т., Дорожовец М.М., Лихновский И.С. Погрешности импульсных ультразвуковых термометров// Измерительная техника, 1992, №6. С.37-38.

27. Луцки Я.Т., Лихновський І.С. Чутливі елементи одно- та багатозонних імпульсних термометрів//Контрольно-вимірювальна техніка, 1993. С.59-63.

28. Луцки Я.Т., Дорожовець М.М., Лихновський І.С. Похибки ультразвукових резонансних термометрів//Вимірювальна техніка і метрологія, 1995, №51. С.24-27.

29. А.с. 877361 СССР, МКИ G01k11/26. Ультразвуковой преобразователь температуры/ Я.Т.Луцки, П.С.Кислый, Б.И.Стаднык, П.Г.Столярчук// Открытия, изобретения. 1981, №40.

30. А.с. 699000 СССР, МКИ G01k1/12. Огнеупорная замазка/ Я.Т.Луцки, Б.И.Стаднык, П.Г.Столярчук и др. // Открытия, изобретения. 1979, №43.

31. А.с. 1234732 СССР, МКИ G01k11/26. Ультразвуковой преобразователь температуры/ Я.Т.Луцки, Р.И.Чех, З.А.Колодий// Открытия. Изобретения. 1986. №20.

32. А.с. 1247685 СССР, МКИ G01k11/24. Ультразвуковой

термометр/Р.И.Чех, Я.Т.Луцки// Открытия. Изобретения. 1986. №28.

33.А.с. 1343341 СССР, МКИ G01k29/00. Устройство для определения температурной зависимости модуля упругости материалов/ Я.Т.Луцки, Р.И.Чех, И.С.Лихновский, В.П.Мотало, В.В.Паракуда// Открытия. Изобретения. 1987. №37.

34.А.с. 1415081 СССР, МКИ G01k11/24. Акустический термометр/ Я.Т.Луцки, Р.И.Чех, П.Г.Столярчук// Открытия. Изобретения. 1988. №29.

35.А.с. 1538063 СССР, МКИ G01k11/24. Ультразвуковой преобразователь температуры/ Я.Т.Луцки, Б.И.Гиль, П.Р.Гамула, И.С.Лихновский //Открытия. Изобретения. 1990.№3.

36.А.с. 1397751 СССР. МКИ G01k11/24. Ультразвуковой измеритель температуры/ Б.И.Стаднык, Я.Т.Луцки, И.С.Лихновский, Р.И.Чех, М.П.Ковальская// Открытия. Изобретения. 1988. №19.

37.А.с. 1456867 СССР, МКИ G01N 29/00. Способ определения модуля упругости материалов/ Я.Т.Луцки, В.П.Мотало, Б.И.Стаднык // Открытия. Изобретения. 1989. №5.

38.А.с. 1566231 СССР, МКИ G01k11/24. Ультразвуковой термометр/ Я.Т.Луцки, Н.Ю.Левчук, И.С.Лихновский, Б.И.Стаднык// Открытия. Изобретения. 1990. №19.

39.А.с. 1523998 СССР, МКИ G01N29/04. Устройство для определения модуля упругости материалов/ Б.И.Стаднык, Б.В.Дунец, Я.Т.Луцки, В.П.Мотало// Открытия. Изобретения. 1989. №43.

40.А.с. 1652899 СССР, МКИ G01N29/00. Устройство для определения температурной зависимости модуля упругости материалов/ Н.Ю.Левчук, И.С.Лихновский, Я.Т.Луцки, Б.И.Стаднык// Открытия. Изобретения. 1991. №20.

41.Луцки Я.Т., Лихновский И.С., Волков Е.Н. Принципы построения передающего устройства ультразвукового импульсного термометра//Тез.докл. VI Всесоюз. конф. "Электрические методы и средства измерения температуры "Электротермометрия-88", Луцк, 1988, ч.2. С.264.

42.Дорожовец М.М., Кузий А.И., Луцки Я.Т., Стаднык Б.И. Восстановление локальных температур газовых сред на основании

бесконтактного измерения интегральных значений температуры//Тез. докл.IV Всесоюз.конф. "Метрологическое обеспечение температурных и теплофизических измерений в области высоких температур", Харьков, 1990. С.355-356.

43.Луцик Я.Т., Столярчук П.Г., Чех Р.И. Принципы построения измерительных устройств ультразвуковых резонансно-интерференционных термометров// Тез.докл. Всесоюз.конф."Состояние и перспективы развития средств измерения температуры контактными и бесконтактными методами "Температура-84", Львов, 1984, т.2. С.163-164.

44.Луцик Я.Т., Колодий З.А., Чех Р.И. К вопросу определения динамических характеристик ультразвуковых термометров// Тез.докл. Всесоюз.конф."Состояние и перспективы развития средств измерения температуры контактными и бесконтактными методами "Температура-84", Львов, 1984, т.2. С.167.

45.Lutsyk Ja., Levchuk N., Lichnovskiy I., Stadnyk B. Microprocessor ultrasonic complex for temperature measurement// IMECO Symposium on Microprocessors in temperature and thermal measurement, Lodz, 1989.P.169-175.

46.Луцик Я.Т., Левчук Н.Ю., Лихновский И.С., Стаднык Б.И. Измерение температуры в промышленности ультразвуковыми методами// Тез.докл.международ. конф."Mereni teplot v prumyslu" Прага, 1989. С.33-40.

47.Lutsyk Ja., Levchuk N., Lichnovskiy I., Stadnyk B. Temperature measurement by resonance acoustic method// 4-th symposium on temperature and thermal measurement in Industry and Science "Tempmeko-90", Хельсинки, Финляндия, 1990. С.164-171.

48.Lutsyk Ja., Stadnyk B. Rezonansna metoda pomiaru sprzystych wlasosci wytrzymaosciowych na malogabarytowych probkach materialowych// Матеріали 20<sup>й</sup> конф. по неруйнівному контролю, Щирк, Польща, 1991. С.73-76.

49.Луцик Я.Т. Сенсори для вимірювання температури ультразвуковими методами// Тези міжнар. конф. "1-st International modelling school - Krym Autumn'96, September 12-17, 1996, Alushta, Ukraine. С.46.

Луцьк Я.Т. *Ультразвукова термометрія - концепція, синтез, реалізація.*

*Дисертація в виді рукопису на соискание ученої ступені доктора технічних наук по спеціальності 05.11.04-прибори і методи вимірювання теплових величин, Государственный университет "Львівська політехніка", Львів, 1996.*

Защищается 65 работ, в том числе монография и 12 авторских свидетельств, которые формулируют концепцию создания ультразвуковых импульсных и резонансных термометров для измерений средних и высоких температур в объектах с особо сложными условиями эксплуатации. Представлены результаты комплекса теоретических и экспериментальных исследований по математическому моделированию, расчету характеристик и выбору материалов чувствительных элементов термометров, конструированию электроакустических преобразователей. Изложены принципы схемотехнических решений модификаций термометров, проиллюстрированные примерами. Выполнен анализ составляющих погрешности измерения, показаны пути их уменьшения и представлены выражения для расчета суммарной погрешности. Изложены принципы верификации термометров при выпуске из производства. Созданы модификации резонансных и импульсных (в том числе многозонных) термометров, а также прибор для исследований упруго-вязких свойств металлокерамических материалов.

Lutsyk Ja.T. *Ultrasonics thermometry - conception, synthesis, realization.*

*Dissertation as manuskript for obtaining of the degree of doctor of technical sciences, speciality 05.11.04-Devices and methods for measuring thermal values, State University "Lviv Polytechnic", Lviv, 1996.*

Ultrasonics impulse and rezonance thermometres for mean and high temperature measuring in the object complex exploitation medium design conception is represented in 65 papers, i.e. one monograph and 12 patents. Theoretical and mathematic simulation experimental investigation rezults, characteristics calculation and sensor material choosing, electroacoustic transducer constructions are considered. The schemotechnic thermometre modification decision principles are illustrated by concrete examples. The measurement errors analisis is made, the error decreasing ways are shown and the summary error calculation expression are found. The thermometre varification principles during their manufacturing are presented. The impulse (i.e. multizones) and rezonance thermometre modifications and metalceramic material tension-velocity properties investigation device are designed.

**Ключові слова:** температура, вимірювання, термометр, ультразвук, акустичний.

Підп. до друку 3.12.96. Формат 60x84<sup>1</sup>/16  
Папір друк. № 2. Офс. друк. Умов. друк. арк. 3  
Умов. фарб.-відб. 3 Умовно-видав. арк. 2,79  
Тираж 100 прим. Зам. 471. Безплатно

ДУЛП 290646 Львів-13, Ст. Бандери, 12

Дільниця оперативного друку ДУЛП  
Львів, вул. Городоцька, 286

1888

438945

Faint, illegible text at the top of the page, possibly a header or introductory paragraph.

Main body of faint, illegible text, appearing to be several paragraphs of a document.

Section of faint, illegible text, possibly a sub-section or a specific clause.

Section of faint, illegible text, continuing the document's content.

Section of faint, illegible text, possibly a concluding paragraph or signature area.

Bottom section of faint, illegible text, including what might be a footer or additional notes.