

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

На правах рукопису

Лупина Борис Іванович

УДК 621.382

**МІКРОМЕХАНІЧНІ ТЕРМОРЕЗИСТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ**

Спеціальність 05.27.01 – твердотільна електроніка

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник  
Борисов Олександр Васильович,  
кандидат технічних наук,  
професор

Київ – 2017

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ  | 4  |
| ВСТУП  | 7  |
| Розділ 1. ТЕРМОРЕЗИСТОРНІ ПЕРВИННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В ЕЛЕКТРОННІЙ ТЕХНІЦІ   | 17 |
| 1.1. Терморезисторні перетворювачі об'ємної геометрії, їх електрофізичні параметри та температурні характеристики  | 18 |
| 1.2. Тонкоплівкові терморезисторні перетворювачі   | 23 |
| 1.3. Первинні терморезисторні перетворювачі активного нагрівання, виготовлені за технологією мікроелектромеханічних систем.                                      | 27 |
| Висновки до Розділу 1.   | 34 |
| Розділ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ ТА РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОРЕЗИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ  | 36 |
| 2.1 Моделювання фізичних процесів енергообміну елементів теплоізованої структури з оточуючим середовищем і корпусом  | 36 |
| 2.2. Аналіз механізмів теплообміну чутливого елементу мікромеханічного терморезисторного перетворювача з середовищем   | 40 |
| 2.3. Аспекти виготовлення терморезисторного перетворювача за технологією мікроелектромеханічних систем на кремнії  | 46 |
| 2.4. Стаціонарний розподіл температури в мікромеханічному первинному перетворювачі та в потокоформуючому каналі  | 49 |
| 2.4.1. Містковий теплогенеруючий елемент в потокоформуючому каналі. Розрахунок теплового опору середовища  | 49 |
| 2.4.2. Електропровідний місток безпосереднього нагрівання на опорах сталої температури. Розрахунок коефіцієнту розсіювання потужності та аналіз впливних величин | 61 |
| 2.5. Алгоритм розрахунку базових характеристик мікромеханічного терморезисторного первинного перетворювача активного нагрівання                                  | 73 |
| Висновки до Розділу 2.   | 75 |

|   |     |
|---|-----|
| РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОРЕЗИСТОРНИХ ПЕРЕТВО-<br>РЮВАЧІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СЕРЕДОВИЩА.                                 | 77  |
| 3.1 Калориметричний перетворювач лінійної швидкості газу та рідини<br>з конструктивно керованою функцією перетворення.            | 78  |
| 3.1.1 Терморезисторний перетворювач занурюваного типу в каналі<br>прямокутного перетину.  | 84  |
| 3.1.2 Поверхневий терморезисторний перетворювач, вмонтований в<br>стінку потокоформуючого каналу.                                 | 100 |
| 3.2 Методи динамічного нагрівання для вимірювання теплофізичних<br>параметрів середовища.   | 106 |
| Висновки по розділу 3.  | 118 |
| РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРАКТИЧНІ<br>РЕЗУЛЬТАТИ   | 120 |
| 4.1. Стенди для вимірювання характеристик терморезисторних<br>перетворювачів  | 120 |
| 4.2. Перетворювач лінійної швидкості (об'ємних витрат) газу<br>для діагностики функції зовнішнього дихання людини.                | 130 |
| 4.3. Компенсація температурного дрейфу вихідного сигналу<br>терморезисторного перетворювача методом модуляції напруги<br>живлення | 135 |
| Висновки по розділу 4.  | 144 |
| ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ  | 145 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ  | 147 |
| ДОДАТОК   | 169 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

н.к.у. – нормальні кліматичні умови;

МЕМС – мікроелектромеханічна система – об'єкт, створений з використанням групових електронних технологій мікромеханіки;

МТВ – медико-технічні вимоги;

ПП – первинний перетворювач;

ТГЕ – теплогенеруючий елемент;

ТІС – теплоізована структура;

ТКО – температурний коефіцієнт опору;

ТРПП – терморезисторний первинний перетворювач;

ТЧЕ – термочутливий елемент;

$\alpha$  – коефіцієнт температуропровідності,  $[m^2/sec]$ ;

$b$  – ширина нагрівача місткового ТРПП  $[m]$ ;

$Bi$  – критерій Біо;

$C$  – питома теплоємність (теплоємність одиниці маси),  $[Дж/(кг \cdot ^\circ C)]$ ;

$C_T$  – теплоємність ТГЕ або ТЧЕ,  $[Дж/^\circ C]$ ;

$D_u$  – висота каналу термокондуктометричного перетворювача;

$D_d$  – відстань від поверхні ТГЕ чи ТЧЕ до корпусу або дна каналу термокондуктометричного перетворювача;

$G_{th}$  – коефіцієнт розсіювання потужності чутливого елементу терморезисторного перетворювача,  $[Вт/^\circ C]$ ;

$G_v$  – температурна чутливість первинного перетворювача до зміни лінійної швидкості середовища,  $[^\circ C / (m/sec.)]$ ;

$G_T$  – температурна чутливість первинного перетворювача до зміни температури навколишнього середовища,  $[^\circ C / ^\circ C]$ ;

$G_H$  – температурна чутливість первинного перетворювача до зміни коефіцієнту теплообміну,  $[^\circ C / (Вт / (m^2 \cdot ^\circ C))]$ ;

$Gr$  – критерій Грасгофа;

$H$  – коефіцієнт поверхневого теплообміну, [ Вт / (м<sup>2</sup> °С) ];

$I$  – струм, [А];

$k$  – теплопровідність, [Вт/(м °С)];

$L$  – довжина місткового ТРПП;

$L_x$  – характерний розмір тіла в теплообмінних процесах;

$Nu$  – критерій Нуссельта;

$Pr$  – критерій Прандтля;

$\Delta P$  – перепад тиску [Па];

$P$  – електрична потужність, [Вт];

$Q$  – об'ємні витрати рідини або газу, [м<sup>3</sup>/сек];

$Re$  – критерій Рейнольдса;

$R_T, R_0, R_{100}$  – електричні опори терморезистору відповідно при поточній температурі  $T$ , при 0 °С та при 100 °С, [Ом];

$Z_p$  – пневматичний опір потокоформуючого каналу, [Па·сек / м<sup>3</sup>];

$R_{th} = (G_{th})^{-1}$  – тепловий опір чутливого елемента, [°С/Вт] – величина, обернена до коефіцієнту розсіювання потужності  $G_{th}$ ;

$T, T_C, \Delta T = T - T_C$  – відповідно поточна температура ТГЕ чи ТЧЕ, температура оточуючого середовища та їх різниця – поточна температура перегріву, [°С];

$\Delta T_{dc}$  – температура перегріву теплогенеруючого (ТГЕ) або термочутливого (ТЧЕ) елемента відносно середовища на постійному сигналі, [°С];

$\Delta T_{2\omega}$  – температура перегріву теплогенеруючого (ТГЕ) або термочутливого (ТЧЕ) елемента відносно середовища на частоті  $2\omega$ , [°С];

$U$  – напруга, [В];

$V(x,y,z,t)$  – поле швидкостей середовища (рідини або газу) в потокоформуючому каналі [м/сек];

$t$  – час, [сек].

$\alpha$  – температурний коефіцієнт опору, ТКО, [1/°C];

$\beta$  – коефіцієнт лінійного розширення, [1/°C];

$\gamma$  – густина, [кг/м<sup>3</sup>];

$\eta = \nu \cdot \gamma$  – динамічна в'язкість рідини (газу) [кг/(м с)]=[Па с];

$\nu$  – кінематична в'язкість рідини (газу) [м<sup>2</sup>/сек];

$\rho$  – питомий електричний опір [Ом·м];

$\chi$  – енергетична ефективність нагрівача ТРПП із стороннім (посереднім, непрямим) нагріванням;

$\lambda_T = 2\pi \sqrt{2a/\omega_T}$  – довжина теплової хвилі в середовищі, [м];

$\omega_T$  – кругова частота коливання температури, [рад/сек];

$\varepsilon = \sqrt[2]{k C \gamma}$  – теплова активність, [Вт с<sup>1/2</sup>/(м<sup>2</sup> °C)] = [Дж/(м<sup>2</sup> с<sup>1/2</sup> °C)].

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Розвиток електронного приладобудування, і промислових технологій обумовлює зростаючу потребу у первинних перетворювачах (ПП) фізичних величин і одночасно вимагає оптимізації їх застосування у вимірювальних пристроях. Крім традиційних вимог (широкий вимірювальний діапазон, надійність, низька собівартість, можливість заміни без наступного калібрування вторинного перетворювача) до сучасних ПП висуваються вимоги сумісності з технологіями мікроелектроніки, низького енергоспоживання, малих габаритів та маси, можливості використання в автономних мобільних і імплантованих системах. Ефективний і якісно новий напрямок у розробці та виробництві ПП відкривають електронні технології виготовлення мікроелектромеханічних систем (МЕМС) вимірювально-виконавчих пристроїв на монокристалічному кремнії [1 - 6]. Використання анізотропного травлення монокристалічного кремнію дозволяє здійснити перехід від традиційної площинної конструкції твердотілого електронного елементу до об'ємної та отримати потрібну (за необхідності – тривимірну) геометричну форму ПП. Функція перетворення фізичної величини в електричний сигнал в таких пристроях реалізується як з використанням кремнію, так і інших традиційних для мікроелектроніки матеріалів, наприклад, металів – для створення термочутливих елементів (ТЧЕ) терморезисторних первинних перетворювачів (ТРПП) і діелектриків – для електричної та теплової ізоляції між окремими елементами і корпусом [7, 8]. Одночасно відкриваються перспективи об'єднання ТРПП, електронних схем формування та обробки сигналу, схем компенсації впливних величин, схем реалізації потрібного алгоритму управління виконавчим пристроєм на одному кристалі монокристалічного кремнію [9]. На сьогоднішній день розробка сенсорів та виконавчих пристроїв за технологією МЕМС – самостійна галузь мікроелектроніки [10 - 13].

Значна частина MEMC ТРПП функціонує на засадах електро-теплових перетворень і передбачає створення заданих температурних градієнтів в термоізовованій структурі (ТІС) ТРПП та контроль теплообміну між окремими його елементами і навколишнім середовищем [14 - 20]. Характерною ознакою ТРПП, виготовлених за технологією MEMC, є їх багатофункціональність: конструктивно досить прості об'єкти (мембранні, місткові або консольні ТІС) задовольняють потребу в контролі температури, тиску, складу газової суміші, лінійної швидкості чи об'ємних (масових) витрат рідини чи газу, електромагнітного випромінювання, тощо. Багатофункціональність має свої недоліки, оскільки процес вимірювального перетворення, перебуває під дією цілої низки впливних величин і тому вимагає міждисциплінарного аналізу.

Електротеплові процеси в твердотільних ТРПП, виготовлених за технологією MEMC, за характером протікання суттєво відрізняються від аналогічних процесів в ТРПП, створених у макроскопічному виконанні. Розробка електронних перетворювальних пристроїв на їх основі потребує комплексної постановки задачі з обов'язковим розглядом як електричних і теплофізичних процесів безпосередньо в ТІС, так і теплофізичних та гідродинамічних процесів в оточуючому середовищі [9, 14 - 20]. Наявність внутрішнього зворотного електротеплового зв'язку між процесами в первинному і вторинному перетворювачах вимагає аналізу проходження сигналу в електричних колах і специфіки енергетичного обміну між ТІС, елементами корпусу ТРПП і середовищем [18, 21-23]. Теоретичні засади розробки ТРПП у MEMC виконанні, оптимізації їх конструкцій та електронних схем вторинних перетворювачів є предметом активних досліджень в провідних наукових установах світу [16, 17]. Експериментальні дані щодо теплообміну об'єктів з характерними розмірами в діапазоні 1 мкм – 1 мм є неповними та досить часто – суперечливими. Складність їх отримання обумовлена потребою в реалізації спеціалізованих високотехнологічних інструментальних засобів та методик,



технологічно не доступних розробникові кінцевого пристрою. Теоретичне обґрунтування вимірювальних процесів в періодичній науково-технічній літературі часто має наближений якісний характер. Це стає на заваді можливості систематизації відомих експериментальних фактів, отриманих окремими науковцями та розробниками для специфічних конструкцій ТРПП, з метою моделювання новостворюваного перетворювача. При розв'язанні прикладних задач розробники кінцевого приладу зазвичай уникають аналізу фізичних процесів в ТРПП і їх аналітичного моделювання, та обмежуються використанням комерційних пакетів програмного забезпечення для чисельного моделювання проєктованих структур (ANSYS та COMSOL Multiphysics) [24-26].

Вищевказане підтверджує актуальність проведення наукових робіт у вибраному напрямку. Теоретичні та експериментальні дослідження ТРПП у MEMS виконанні, оптимізація їх вимірювальних характеристик є актуальними та визначають як наукову, так і практичну цінність роботи. Необхідність поглибленого дослідження ТРПП у виконанні MEMS викликана відсутністю простих і доступних для інженерного аналізу аналітичних розв'язків рівняння теплопровідності для реальних конструкцій ТІС, економічною виправданістю вдосконалення їх математичних моделей, перспективами масового застосування таких пристроїв. Поглиблення наукових фізико-технічних уявлень про зв'язок конструктивних характеристик ТРПП і їх параметрів перетворення з метою подальшого формування інженерних підходів до проєктування електронного пристрою на заданий вимірювальний діапазон – основне наукове завдання проведених досліджень.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Тема дисертаційної роботи пов'язана з науковою діяльністю колективу лабораторії медичної сенсорики факультету електроніки КПІ ім.

Ігоря Сікорського в області проектування твердотільних ТРПП за технологіями МЕМС та електронних схем вторинних перетворювачів для наступного застосування в приладах загальнотехнічного призначення. Принципи та методи розрахунку характеристик ТРПП, створених за технологіями МЕМС, використані при виконанні:

- державної науково-технічної програми “Розробка технологій та організація виробництва напівпровідникових мікросенсорів, електронних приладів та систем на їх основі для екологічного моніторингу та енергозбереження. Розробка та створення міждисциплінарних інтелектуальних продуктів: матеріалів, приладів, інформаційних систем для базових секторів економіки” (державний реєстраційний номер 0106U007388);

- науково-дослідної роботи «Розробка теорії ідентифікації параметрів біологічних об’єктів сільськогосподарського призначення та побудови інтелектуальних сенсорних систем для її визначення» (державний реєстраційний номер 0111U008208).

**Метою дисертаційної роботи** є розробка ТРПП за технологіями МЕМС і встановлення фізико-технічних і конструктивних закономірностей зв’язку їх електричних і температурних характеристик із параметрами оточуючого середовища.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було **розв’язати наступні задачі:**

- провести порівняльний аналіз існуючих конструкцій, метрологічних показників і методів первинного перетворення традиційних об’ємних ТРПП, сучасних тонкоплівкових і виготовлених за технологією МЕМС;
- обґрунтувати вибір напрямку розробки та запропонувати способи виготовлення ТРПП у МЕМС виконанні, що ефективно використовують їх конструктивно-топологічні переваги над об’ємними аналогами;
- дослідити фізико-технічні закономірності впливу конструктивних характеристик твердотільних ТІС на функції перетворення калори-

метричного занурювального та поверхневого ТРПП лінійної швидкості (об'ємних витрат) рідини та газу і абсолютного тиску газу типу Пірані;

- дослідити функції перетворення активних ТРПП динамічного нагрівання та запропонувати способи вимірювання тепло-фізичних параметрів середовища, що використовують специфіку в конструктивно-топологічних аспектах ТРПП, виготовлених за технологією МЕМС;
- виконати компенсацію температурної залежності характеристики перетворення на прикладі ТРПП вакууму типу Пірані;
- провести апробацію ТРПП лінійної швидкості (об'ємних витрат) газу в приладах діагностики функції зовнішнього дихання людини.

**Об'єктом дослідження** є терморезисторні первинні перетворювачі, виготовлені за технологією МЕМС, та вторинні перетворювачі для них (електронні схеми активного теплового збудження та реєстрації вимірювального сигналу).

**Предметом дослідження** є топологічна структура, електричні і теплові режими роботи твердотільних ТРПП, які визначають функціональні залежності їх електричних характеристики від параметрів оточуючого середовища.

Розв'язання поставлених задач виконувались з використанням наступних **методів досліджень**: аналітичного розв'язку лінійних диференціальних рівнянь; математичної фізики та чисельного моделювання; теорії електричних кіл; термоанемометричних, зондових, кондуктометричних і калориметричних методів експериментального визначення теплофізичних параметрів середовища і лінійної швидкості потоку.

**Наукова новизна одержаних результатів роботи** полягає у визначенні принципів розробки терморезисторних первинних перетворювачів за технологією МЕМС на кремнії і встановленні закономірностей впливу їх фізико - топологічних характеристик на метрологічні параметри. В дисертації одержані такі нові наукові результати:

1. Встановлено особливості протікання процесів теплообміну між елементами теплоізолюваної структури у МЕМС виконанні і навколишнім середовищем, на основі чого розроблено нові терморезисторні перетворювачі з удосконаленою конструкцією. Визначено закономірності впливу конструктивно-топологічних характеристик на метрологічні параметри для триелементного місткового перетворювача лінійної швидкості газу занурюваного і поверхневого типів. Аналітично конкретизовано та методами чисельного експерименту обґрунтовано перевагу в чутливості багатоеlementних калориметричних перетворювачів лінійної швидкості над одноelementними термоанометричними.
2. Набула подальшого розвитку модель поверхневого перетворювача лінійної швидкості рідини або газу, вмонтованого в стінку потокоформуючого каналу. Автором вперше проведено аналіз впливу на характеристику перетворення теплообміну зі зворотного боку мембранної теплоізолюваної структури, вмонтованої в стінку потокоформуючого каналу, що дозволяє розробити ТРПП на заданий діапазон чутливості.
3. Запропоновано та розроблено нові пристрої з вимірювання параметрів газового середовища з використанням методів динамічного нагрівання, які дозволяють використати переваги в конструктивно-технологічних особливостях перетворювачів, виготовлених за технологією МЕМС. Показано, що технології МЕМС надають переваги в конструкціях зондових елементів динамічного нагрівання, оскільки дозволяють реалізовувати активні теплоізолювані структури істотно виродженої геометрії з відношенням характерного розміру тіла теплообміну до сумарної товщини теплогенеруючого елемента понад 50.
4. Встановлено закономірності впливу зміни температури середовища на вимірювальну характеристику терморезисторного перетворювача активного нагрівання в самозбалансованих місткових схемах, що дало змогу розробити новий спосіб компенсації температурної чутливості за методом модуляції напруги живлення термогенеруючого елемента.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Результати роботи є теоретичною та експериментальною базою для розробки ТРПП за технологією МЕМС для контролю температури, лінійної швидкості, об'ємних витрат та теплофізичних параметрів газового середовища і рідини з конструктивно керованими характеристиками перетворення.

1. Конкретизовано зв'язок між топологією ТГЕ, геометрією корпусу, просторовим розподілом потужності та просторовим розподілом температури для триелементної місткової ТІС, що дозволило розробити інженерну методику розрахунку параметру розсіювання потужності і теплового опору мікромеханічного місткового ТРПП активного нагрівання в потокоформуючому каналі прямокутної геометрії.

2. Аналітично досліджено триелементний калориметричний перетворювач швидкості рідини або газу в каналі прямокутного перерізу та аналітично доведено конструктивну можливість регулювання діапазону лінійності його характеристики перетворення в нижній частині діапазону на противагу залежності  $\sim V^{1/2}$  у відповідності до закону Кінга для одноелементного термоанемометричного перетворювача. Діапазони монотонної лінійної залежності різниці температур ТЧЕ триелементного калориметричного ТРПП визначаються відношенням його ширини до висоти каналу, тобто є конструктивно керованими. Чутливість триелементного місткового занурювального перетворювача шириною 40 мкм в каналі висотою 300 мкм в 2,5 рази вищі за чутливість одноелементного анемометричного аналога за величини лінійної швидкості повітря в каналі 0,1 м/с.

3. В роботі практично доведено, що вимірювально-управляючі автоматизовані системи з гнучкою функціональністю, яка передбачає поєднання спеціальних технічних засобів вимірювання, прикладного програмного забезпечення та стандартних промислових комп'ютерних технологій, є ефективним інструментом дослідження статичних і

динамічних параметрів ТРПП, виготовлених за технологією MEMS. У роботі розроблено та реалізовано вимірювальні стенди за технологією віртуальних інструментів, які забезпечуються сучасними апаратними засобами (пристрій збору даних NI USB6009 та платформа для розробки віртуальних приладів ELVIS II) і програмним середовищем LabVIEW.

4. На основі теорії електричних кіл проведено аналіз функціонування ТРПП активного нагрівання в електричній схемі вторинного перетворювача і аналітично обґрунтовано наявність температурної чутливості характеристики перетворення. Запропоновано новий спосіб компенсації температурної залежності характеристики перетворення ТРПП в самозбалансованих місткових схемах методом модуляції напруги живлення і проведено експериментальні дослідження на його підтвердження на прикладі вимірювача вакууму типу Пірані.

*Практична реалізація результатів роботи.* Проведено впровадження розроблених ТРПП в діагностичні прилади медичного призначення “Комплекс автоматизований для дослідження функції зовнішнього дихання ПУЛЬМОВЕНТ”, ТУ У 19018095.001-96, виробник - ТОВ “Сенсорні системи” (Київ, Україна). Вимірювальний перетворювач об’ємних витрат повітря на основі розробленого ТРПП задовольняє сучасним медико-технічним вимогам до названих діагностичних приладів.

Також результати роботи використовуються в навчальному процесі на факультеті електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського за програмою підготовки фахівців кваліфікаційного рівня «Бакалавр» (6.05.08.01) та «Магістр» за спеціальністю 153: мікро- та наносистемна техніка.

**Особистий внесок здобувача.** В дисертаційній роботі узагальнено результати досліджень, що виконані автором особисто, а також спільно з колективом кафедри мікроелектроніки і лабораторії медичної сенсорики факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського та у співробітництві з ТОВ “Сенсорні системи” (Київ, Україна). Здобувач брав участь у розробці конструкцій ТРПП, методик визначення їх характеристик, розробці

математичних моделей та методик визначення параметрів середовища. В спільних наукових роботах здобувач особисто виконав наступні роботи:

- виконав аналіз конструкцій ТРПП, виготовлених за технологією MEMS, сучасних підходів до створення математичних моделей місткових і мембранних ТРПП, методів первинного перетворювання параметрів середовища, обґрунтував вибір напрямку наукових досліджень;
- отримав та проаналізував теплові та вольт-амперні характеристики мембранних MEMS ТРПП, розроблених в лабораторії медичної сенсорики факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського у співробітництві з ТОВ “Сенсорні системи”;
- методами аналітичного моделювання та чисельного експерименту удосконалив принципи керування параметрами перетворення MEMS ТРПП за рахунок топології ТІС та геометрії корпусу;
- запропонував новий спосіб компенсації температурної залежності характеристики перетворення ТРПП в самозбалансованих місткових схемах методом модуляції напруги живлення;
- розробив методику експериментальних досліджень макетних зразків ТРПП активного нагрівання з використанням сучасних апаратних і програмних засобів (промислових плат збору даних, середовища програмування LabVIEW);
- виконав теоретичні та експериментальні дослідження MEMS перетворювачів вакууму типу Пірані і лінійної швидкості (об’ємних витрат) газу для застосування в приладах діагностики функції зовнішнього дихання людини.

Інтерпретацію отриманих результатів, формулювання основних положень і висновків по роботі проведено спільно з науковим керівником.

Основні результати дисертації доповідалися й обговорювалися на наступних наукових конференціях:

1. ESSDERC '96, 26th European Solid State Device Research Conference, Bologna, Italy, 9-11 September 1996. The 2-nd Thermionic Workshop, September 25-27, 1996, Budapest, Hungary.
2. The 1996 International Mechanical Engineering congress and exposition, November 17-22, 1996, Atlanta, Georgia, USA.
3. Міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми фізичної та біомедичної електроніки”, 28-30 травня 1998р, Київ, Україна.
4. 5-я Международная конференция "Теория и техника передачи, приема и обработки информации", Харьков, 1999 г.
5. Workshop “Microtechniken und Mikrosensoren fur die Medizin, Biologie und Umwelt”, Jena 6- 7. Oktober 2000.
6. 2-й, 3-й и 5-й Международный радиоэлектронный форум “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития”. Харьков, Украина, 19-23 сентября 2005 г., Харьков-Судак, Украина, 22-24 октября 2008 г. и Харьков, Украина, 14-17 октября 2014 г.
7. Международная научно-техническая конференция “Датчики, Приборы и Системы - 2007”, Ялта, 16-22 Сентября 2007 г.
8. XXX та XXXI Міжнародна науково-технічна конференція ”Електроніка та нанотехнології”, м. Київ, Україна, 13-15 квітня 2010 р. і 12-14 квітня 2011 р.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 28 наукових праць, з них 9 - у фахових журналах, 13 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій, отримано 4 патенти на винахід та 2 патенти на корисну модель.

**Структура та об’єм дисертації.** Дисертація складається із вступу, 4 розділів із висновками, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 186 найменувань на 22 сторінках, додатку. Загальний обсяг дисертації становить 169 сторінок. Робота містить 52 рисунки та 8 таблиць.



# РОЗДІЛ 1

## ТЕРМОРЕЗИСТОРНІ ПЕРВИННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В ЕЛЕКТРОННІЙ ТЕХНІЦІ

Принцип роботи ТРПП заснований на залежності електричного опору його ТЧЕ від температури. Такою властивістю характеризується велика кількість матеріалів, однак лише деякі з металів і напівпровідників задовольняють одночасно метрологічним та експлуатаційним вимогам. Матеріали, які використовуються для виготовлення ТРПП, повинні мати якомога вищий температурний коефіцієнт опору (ТКО), високу температуру плавлення, стабільні фізичні властивості в широкому температурному діапазоні, відтворюваність характеристики перетворення, плавну (без гістерезису) залежність опору від температури та стійкість до корозії. Для виготовлення чутливих елементів ТРПП використовуються переважно метали: платина, мідь і нікель [27 - 30]. ТКО вказаних металів додатний і для об'ємних перетворювачів знаходиться в діапазоні значень від  $0,00385\ 1/^{\circ}\text{C}$  до  $0,00617\ 1/^{\circ}\text{C}$ . І хоча для напівпровідників цей параметр в середньому на порядок вищий та може бути як додатним (позистори) так і від'ємним (термістори) [31 - 33], метрологічним та експлуатаційним вимогам задовольняють на сьогоднішній день в основному металеві ТРПП.

Згідно з чинними нормативними документами [29, 30] ТРПП поділяють за матеріалом ТЧЕ: платинові, мідні або нікелеві; за способом контакту із середовищем: на занурювані та поверхневі; за способом вимірювання: на контактні та безконтактні; за кількістю зон вимірювання: на одно- та багатозонні. Діючі нормативні документи регламентують ряд номінальних значень опору при  $0\ ^{\circ}\text{C}$ , номінальну статичну характеристику (НСХ) у вигляді інтерполяційних рівнянь залежності електричного опору ТЧЕ від температури з наведенням коефіцієнтів в поліноміальних виразах, діапазони вимірюваних температур, класи допуску і гранично допустимі відхилення від НСХ, терміни та визначення, номенклатуру показників, що

мають бути використаними при розробці ТРПП конкретних типів, методики визначення основних метрологічних параметрів.

Міжнародна температурна шкала МТШ-90 наводить перелік ряду відтворюваних рівноважних станів середовища, яким відповідають певні значення температур (основні реперні точки). В [29, 30] регламентовано еталонні вимірювальні перетворювачі, градуйовані при наведених значеннях температур, реперні температурні точки та конструкції апаратури для їх відтворення, методи та засоби повірки ТРПП. В діапазонах між реперними точками виконують інтерполяцію згідно з формулами, які встановлюють зв'язок між показами еталонних приладів та значеннями температури. Для діапазону робочих температур переважної більшості ТРПП практично важливими та легко відтворюваними є стани фазової рівноваги води при тиску повітря  $10^5$  Па: потрійна точка  $T_0 = 0,01$  °C та точка кипіння  $T_{100} = 100$  °C. Еталонним ТРПП в діапазоні температур від мінус 260 °C до 630 °C є платиновий термометр опору.

### **1.1. Терморезисторні перетворювачі об'ємної геометрії, їх електрофізичні параметри та температурні характеристики**

Конструкція об'ємного ТРПП традиційно складається з ТЧЕ, захисної арматури і внутрішніх з'єднувальних провідників, комутованих за двох-, трьох- або чотирьох-провідною схемою. Параметри елементів конструкції регламентовані за довжиною монтажною, зовнішньою та занурюваною частин, відношенням опору з'єднувальних провідників до номінального опору ТРПП на рівні 0,1 %, термоелектричним ефектом на рівні  $\leq 20$  мкВ, стійкістю до впливу екстремальної температури та вологості, опором ізоляції та конструкцією корпусу. Конструкція типового ТРПП об'ємної геометрії і його основні елементи наведено на рис. 1.1 [28].

ТЧЕ платинового ТРПП виготовляється із вільної від внутрішніх напруг відпаленої та намотаної на каркас в спіраль платинової дротини

діаметром 0,05 мм – 0,2 мм. Ділянки з'єднувальних провідників також виконано із платини. Матеріал каркасу – слюдяні пластини або керамічні стержні із оксиду алюмінію; спіраль в отворах каркасу розміщується вільно. Тривалий час застосовувалась конструкція, запропонована Г. Л. Каллендаром, в якій на слюдяний хрест намотувалась платинова дротина діаметром 0,1...0,2 мм; пізніше став застосовуватись керамічний каркас, який показано на рис. 1.1. Для захисту ТЧЕ від механічних та хімічних впливів використовують інгібіторні наповнювачі із боратів лужних металів або галогенідів лужноземельних елементів [28].

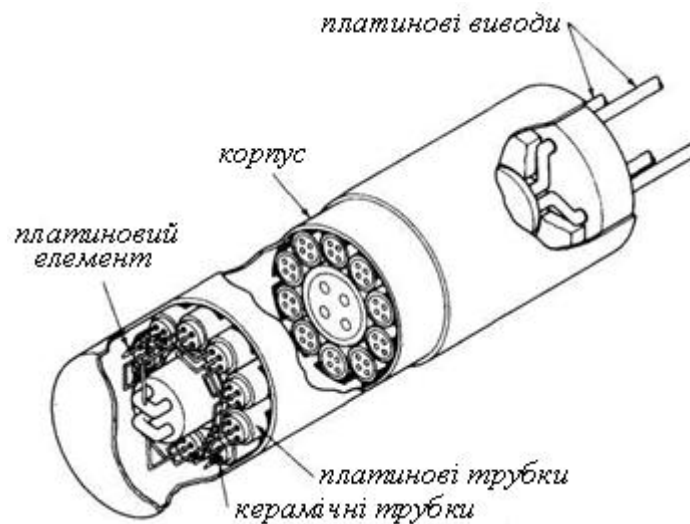


Рис. 1.1. Конструкція типового об'ємного платинового терморезисторного перетворювача [28]

В діапазоні температур від 0 °С до 600 °С функціональний зв'язок між електричним опором і температурою для платинового ТРПП визначається рівнянням Каллендара-ван-Дьюзена - поліноміальною залежністю, регламентованою міждержавним стандартом [29]:

$$R_{T_{Pt}} = R_0 (1 + A_{Pt} T + B_{Pt} T^2), \quad (1.1)$$

де  $R_{T_{Pt}}$  – опір платинового резистору при температурі  $T$ , [Ом];  $R_0$  – опір при температурі 0 °С (номінальний опір);  $A_{Pt} = 3,9692 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $T$  – температура, [°С];  $B_{Pt} = -5,8290 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ .

Відношення активних електричних опорів відповідно при 100 °С та при 0 °С має також регламентоване в [29] значення  $W_{100 \text{ Pt}} = 1,3910$ . Для відтворення наведених в (1.1) температурних характеристик ТЧЕ виготовляється із платинової дротини з питомим опором  $\rho_{\text{Pt}} \approx 11 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

Розв'язавши (1.1) відносно вимірюваного параметру середовища, отримуємо значення температури як функцію електричного опору ТРПП:

$$T(R_{\text{TPt}}) = \frac{A}{2B} \left( \sqrt{1 + \frac{4B}{A^2} (R_{\text{TPt}} - R_0)} - 1 \right). \quad (1.2)$$

Як видно із (1.1) і (1.2), між електричним опором ТЧЕ і його температурою існує взаємно однозначний зв'язок. Отже, вимірювання температури як теплофізичного параметру середовища з використанням ТРПП зводиться до вимірювання активного електричного опору ТЧЕ після встановлення термодинамічної рівноваги між ним і середовищем в локальній вимірювальній точці. Методи вимірювання активного електричного опору добре відпрацьовані, прості та досить точні [34 - 36].

У незначному діапазоні зміни робочих температур лінійне наближення залежності опору металів від температури часто задовольняє метрологічним вимогам і дозволяє отримати спрощені та в той же час достатньо точні аналітичні залежності. У цьому випадку рівняння (1.1) лінеаризується, а замість поліноміальних коефіцієнтів в [29, 30] рекомендовано користуватися температурним коефіцієнтом опору (ТКО)  $\alpha$  [1/°С], який визначається за співвідношенням:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} = 0,01(W_{100} - 1). \quad (1.3)$$

Згідно з [29, 30] ТКО платини в діапазоні температур від мінус 200 °С до 1100 °С можуть становити значення  $\alpha_{\text{Pt}} = (3,85 \pm 0,063) \cdot 10^{-3}$  1/°С або  $\alpha_{\text{П}} = 3,91 \cdot 10^{-3}$  1/°С незалежно від класу допуску ТРПП. В результаті з

врахуванням (1.3) залежність (1.2) в лінійному наближенні істотно спрощується:

$$T(R_{T\text{ Pt}}) = \frac{R_{T\text{ Pt}} - R_0}{\alpha \cdot R_0} . \quad (1.4)$$

Допустиме відхилення  $\delta R_0$  опору платиного перетворювача при 0 °С від номінального і відповідно похибка визначення поточного значення температури  $\delta T$  регламентується в [29] наступним чином:

- для перетворювачів класу А:  $\delta R_0 \leq \pm 0,06 \text{ Ом}$ ;  $\delta T \leq \pm (0,15 + 0,002|T|) \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- для перетворювачів класу В:  $\delta R_0 \leq \pm 0,12 \text{ Ом}$ ;  $\delta T \leq \pm (0,3 + 0,005|T|) \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- для перетворювачів класу С:  $\delta R_0 \leq \pm 0,24 \text{ Ом}$ ;  $\delta T \leq \pm (0,6 + 0,008|T|) \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Мідь характеризується практично лінійною залежністю електричного опору від температури із значенням коефіцієнту  $W_{100 \text{ Cu}} = 1,4280$ . В діапазоні температур від мінус 100 °С до 200 °С залежність її опору від температури визначається виразом [29]:

$$R_{T \text{ Cu}} = R_0 (1 + \alpha_{\text{Cu}} T), \quad (1.5)$$

де  $\alpha_{\text{Cu}} = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ .

Зазначимо, що мідь має низький питомий опір:  $\rho_{\text{Cu}} \approx 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . При температурі 300 °С мідь починає окислятися, а при низьких температурах (нижче мінус 200 °С) електричні параметри міді є нестабільними.

Опір нікелевих дротяних ТРПП з  $W_{100 \text{ Ni}} = 1,6170$  в діапазоні температур від мінус 60 °С до 100 °С характеризується близькою до лінійної залежністю від температури і описується аналогічним до (1.1) квадратичним поліномом з коефіцієнтами  $A_{\text{Ni}} = 5,4963 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ ,  $B_{\text{Ni}} = 6,7556 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}^2$ . В діапазоні температур від 100°С до 180°С аналітична залежність опору нікелю дещо складніша від (1.1) [29]:

$$R_{T \text{ Ni}} = R_0 \left( 1 + A_{\text{Ni}} T + B_{\text{Ni}} T^2 + C_{\text{Ni}} (T - 100) T^2 \right), \quad (1.6)$$

де  $C_{\text{Ni}} = 9,2004 \cdot 10^{-9} \text{ } 1/^\circ\text{C}^3$ .

Допуск нікелевого ТРПП регламентується в [29, 30] в діапазоні температур від мінус 60 °С до 180 °С; для єдиного класу допуску С він окремо встановлений для від'ємних і додатних температур:

- для діапазону від мінус 60 °С до 0 °С:  $\delta R_0 \leq \pm 0,37 \text{ Ом}; \delta T \leq \pm (0,6+0,0165|T|) \text{ } ^\circ\text{C};$

- для діапазону від 0 °С до 180 °С:  $\delta T \leq \pm (0,6+0,01|T|) \text{ } ^\circ\text{C}.$

Переваги нікелю над міддю і платиною – вищі ТКО ( $\alpha_{Ni} = 6,17 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ ) та питомий опір ( $\rho_{Ni} = 12,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), стійкість до хімічного впливу середовища. Недоліком є значний вплив домішок на ТКО, через що у технічній та науковій літературі наводяться значення вказаного параметру із значними розбіжностями. Зазначимо, що використання нікелю при температурах вищих за 300°С супроводжується внутрішніми структурними змінами (утворенням нових фаз, зростанням градієнту внутрішніх механічних напружень). Температурні залежності відносної зміни опору описаних металів представлені на рис. 1.2.

Нормативні документи для дротяних ТРПП визначають діапазони їх застосування у наступних межах: платинових ТРПП від мінус 260 °С до 850 °С (до 1100 °С для окремих ТРПП), мідних – від мінус 200 °С до 200°С, нікелевих - від мінус 60 °С до 180°С. Перелік та методики вимірювання метрологічних параметрів ТРПП визначають положення стандартів [29, 30], ГОСТ 28626-90 (МЕК 696-81), публікації МЕК 539 та 696 «Терморезистори безпосереднього та стороннього нагрівання».

Методика МИ 48-75, публікації МЕК 539 та 696 додатково до [29, 30] для ТРПП прямого та стороннього розігрівання вводять наступні терміни та визначення:

- сталу розсіювання ТГЕ та ТЧЕ  $G_{th} \text{ [Вт/}^\circ\text{C]}$ ; типові значення цього параметру для об'ємних перетворювачів загальнопромислового призначення  $G_{th} \approx 30 - 60 \text{ мВт/}^\circ\text{C};$

- теплову сталу часу  $\tau$  [сек] - час, необхідний для того, щоб температура ТЧЕ перетворювача змінилася на 63,2 % від різниці його початкової та кінцевої температур при ступінчастій зміні температури середовища та при відсутності електричного підігрівання;

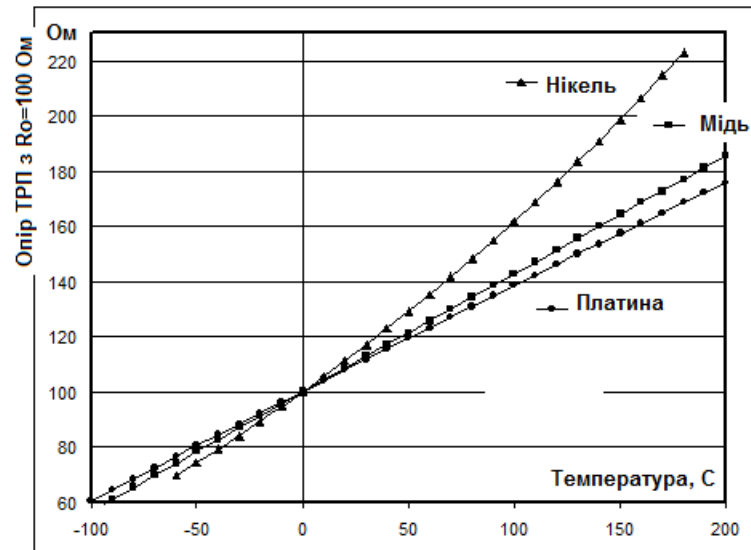


Рис. 1.2. Залежність електричного опору дрітних терморезисторних перетворювачів від температури для платини, міді та нікелю ( $R_0 = 100$  Ом)

- власну сталу часу  $\tau_{th1}$  і сталу часу нагрівача  $\tau_{th2}$  - визначають аналогічно до  $\tau$  при умові, що зміна температури ТЧЕ спричинена проходженням струму безпосередньо через ТЧЕ або ТГЕ;

- теплоємність  $C_{th}$  [Дж/°С] – розрахунковий параметр, який визначається як добуток сталої розсіювання на власну сталу часу:

$$C_{th} = G_{th} \cdot \tau_{th1}; \quad (1.7)$$

- теплову ефективність нагрівача  $\chi$  [%] – відношення електричних потужностей, які розсіюються відповідно на ТЧЕ та нагрівачі і призводять до однакового розігрівання ТЧЕ.

## 1.2 Тонкоплівкові терморезисторні перетворювачі.

Поряд з дрітними ТРПП об'ємної геометрії комерційно доступними є також тонкоплівкові платинові ТРПП [37, 38]. Такі прилади точні,

стабільні, їх габаритні розміри – порядку декількох міліметрів, відтворюваність номінального опору і похибка вимірювання температури відповідають стандарту DIN EN 60751 для об'ємних аналогів відповідних класів точності, що забезпечує їх взаємозамінність навіть в прецизійних вимірювальних пристроях. Діапазон робочих температур тонкоплівкових ПП становить від мінус 200 °С до 1000 °С, поліноміальні коефіцієнти в залежності (1.1) відповідають об'ємним дротяним аналогам.

Характерною ознакою тонкоплівкових ТРПП є технологія їх виготовлення – тонкий шар металу (зазвичай платини) товщиною близько 0,15 мкм наноситься методом напилення в вакуумі на керамічну підкладку із  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з наступним формуванням меандрових структур з використанням електронних технологій методами фотолітографії і хімічного травлення з кінцевими операціями лазерної підгонки номіналів електричних опорів. Характерний розмір елементу (ширина меандру) може досягати 4 мкм. Номенклатура виробів досить широка за номіналом електричного опору, призначенням, габаритними розмірами, типом корпусу (пропонуються спеціальні корпуси для жорстких умов експлуатації та корпуси для поверхневого монтажу). Поряд із пасивними резисторними вимірювачами температури фірмою Heraeus Sensor Technology пропонуються також сенсорні модулі багатофункціонального призначення на температурний діапазон від мінус 70 до 500 °С з інтегрованими активними нагрівачами для контролю параметрів середовища класу точності В відповідно до DIN EN 60751 (рис. 1.3). Область застосування таких структур – медицина, аналітичне приладобудування, системи кондиціонування повітря, хімічна і автомобільна промисловість. Варто зазначити, що чисельні значення їх енергетичних та часових характеристик проміжні між об'ємними дротяними ТРПП та функціональними аналогами у МЕМС виконанні: типова стала розсіювання потужності  $G_{th} = 2,5 \text{ мВт/}^\circ\text{С}$  в непорушному повітрі за нормальних умов і  $4 \text{ мВт/}^\circ\text{С}$  в повітряному потоці швидкістю 1 м/сек, а теплова стала часу в повітрі та воді, що рухаються зі швидкістю 2



м/сек, не перевищує відповідно 20 сек і 0,3 сек. Типовий мультисенсорний перетворювач фірми Heraeus включає інтегровані на одній підкладці із  $\text{Al}_2\text{O}_3$  вимірювальний платиновий ТРПП, активний електричний нагрівач для підтримання температури підкладки на потрібному рівні і центральну зону підкладки з групою контактів для нанесення чутливих шарів (наприклад, хімічних сенсорів) за потребою користувача.

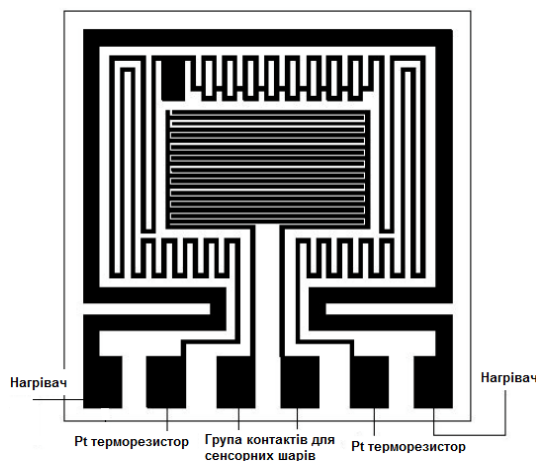


Рис. 1.3. Топологія мультисенсорного перетворювача виробництва Heraeus Sensor Technology [37]

Платинові тонкоплівкові ТРПП для вивідного і поверхневого SMD-монтажу пропонуються фірмою Honeywell (США) [13]. Вони відрізняються лінійністю (0,1% від повної шкали для діапазону від мінус 40 до 125  $^{\circ}\text{C}$  і 2% - для діапазону від -200 до 540  $^{\circ}\text{C}$ ), точністю лазерної підгонки номіналу  $\delta R_0 = 0,1\%$ . Стала розсіювання потужності для них є рекордно низькою для об'ємних перетворювачів в повітрі за нормальних умов:  $G_{th} = 0,3 \text{ мВт}/^{\circ}\text{C}$ . Тонкоплівкові нікелеві ТРПП пропонуються фірмою Advanced Thermal Products, США; значенням ТКО для них  $\alpha_{Ni} = 0,618 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$  в діапазоні від мінус 100  $^{\circ}\text{C}$  до 200  $^{\circ}\text{C}$ .

Відомі також роботи вітчизняних науковців із Чернівецького університету по проектуванню тонкоплівкових перетворювачів опору [39]. Мідні безкорпусні тонкоплівкові ТЧЕ товщиною 1,2 мкм – 1,5 мкм з адгезійним і захисним прошарками Ti-W товщиною 0,04 мкм – 0,06 мкм і

0,06 мкм – 0,08 мкм відповідно отримані методами магнетронного розпилення на ситалову підкладку розміром 4 мм х 6 мм з нанесенням додаткового захисного прошарку SiO<sub>2</sub>. ТКО таких структур помітно відрізняється від об'ємних аналогів і становить  $3,22 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

Полікристалічний кремній також є матеріалом для виготовлення ТРПП за мікроелектронними технологіями. Перевагами полікремнію є сумісність з КМОН технологією та можливість керування температурними характеристиками [16, 40], особливо в ТІС при кінцевих операціях [41]. Характеристики полікремнію за даними з [3, 5, 16, 40] наведено в Табл. 1.1; значення відповідають матеріалам, отриманим в стандартних КМОН процесах. ТКО і коефіцієнт Зеебека для стандартного полікремнію мають значну залежність від концентрації домішок та в діапазоні температур від 100 °С до 400 °С змінюються в наступних межах: ТКО від  $(-4,5 \cdot 10^{-3}) \text{ 1/}^\circ\text{C}$  до  $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , коефіцієнт Зеебека від  $(-5,2 \cdot 10^{-4}) \text{ В/}^\circ\text{C}$  до  $3,3 \cdot 10^{-5} \text{ В/}^\circ\text{C}$

Таблиця 1.1

Теплові та електричні характеристики полікремнію за даними з [3,5, 16, 40]

| Матеріал, тип легування, призначення | Питомий опір<br>$\rho \pm 2\%$ ,<br>[Ом·м] | Температурний коефіцієнт опору,<br>$10^{-3}, [1/^\circ\text{C}]$ | Концентрація основних носіїв,<br>$n(p) \pm 7\%$ ,<br>$10^{26} [1/\text{м}^3]$ | Коефіцієнт Зеебека,<br>$\alpha \pm 5\%$ , $10^{-6}$<br>[В/°C] | Коефіцієнт тепло-<br>провідності,<br>$k \pm 2,5\%$<br>[Вт / (м·°C)] |
|--------------------------------------|--|--|---|---|---|
| Gate-poly (n)                        | 2600                                       | - 4,4  | 0,04  | - 520   | 22  |
| Gate-poly (n <sup>+</sup> )          | 25...32                                    | 0,54...0,89  | 1,27...3,4  | -108...-120   | 16...28   |
| Сарас. poly (p <sup>+</sup> )        | 215  | - 0,14   | 1,6   | 190   | 19  |
| Gate-poly (p <sup>+</sup> )          | 425  | 0,59   | 0,33  | 330   | 20  |

Відомі також розробки напівпровідникових мікроелектронних перетворювачів на кремнієвій структурі з діелектричною ізоляцією, які виконуються на факультеті електроніки НТУУ «КПІ» та в інституті напівпровідників НАН України [42].

### **1.3. Терморезисторні первинні перетворювачі активного нагрівання, виготовлені за технологією мікроелектромеханічних систем на кремнії**

Сформованість метрологічних підходів до застосування дротяних металевих ТРПП, відсутність гістерезису, відпрацьованість вимірювальних схем обробки сигналу обумовили першочергову появу їх аналогів, виготовлених за технологією МЕМС [3, 5, 7, 14, 16, 19, 20]. Основним характерним конструктивним елементом МЕМС ТРПП активного нагрівання є термоізольована структура (ТІС), на якій розміщуються термогенеруючий (ТГЕ) і термочутливий (ТЧЕ) елементи. Фізичні принципи, покладені в основу функціонування МЕМС ТРПП, електронні схеми живлення і обробки вимірювального сигналу подібні до об'ємних аналогів. Науково обґрунтована класифікація теплових МЕМС за принципами функціонування і конструктивно-технологічними ознаками, аналіз ієрархії механічних, електричних і теплових зв'язків в їх конструкціях наведені в [18 - 20]. Відмінність МЕМС ТРПП активного нагрівання від об'ємних аналогів проявляється щонайменше в трьох факторах, а саме:

- в конструкції, яка обумовлює специфіку протікання теплових процесів вимірювального перетворення та забезпечує рекордні значення базових електро - теплових характеристик ТІС;
- в їх потенційній багатофункціональності, що ґрунтується на можливості реалізації нових способів вимірювання параметрів середовища методами статичного та динамічного теплового збудження;
- в прецизійності форми окремих елементів ТІС (діапазон характерних значень розмірів ТЧЕ і ТГЕ - від одиниць мікрон до міліметрів) та їх взаємного просторового розташування.

Блок-схему триелементного мембранного МЕМС ТРПП з активним тепловим збудженням ТГЕ та змінним теплообміном між ТГЕ і двома ТЧЕ

наведено на рис. 1.4. Потужність електричного струму живлення, що виділяється на ТГЕ, переважно розсіюється в оточуюче середовище шляхом теплопровідності та конвекції, частково передається кондуктивним шляхом по мембрані і електропровідному містку ТГЕ на корпус ТРПП. Процеси вимірювального перетворення включають контроль електричного опору  $R_{TGE}$ ,  $R_{TЧЕ1}$ ,  $R_{TЧЕ2}$  терморезисторних ТГЕ і ТЧЕ, який змінюється внаслідок зміни умов теплообміну між ТГЕ і оточуючим середовищем з одного боку, та між ТГЕ і ТЧЕ, корпусом і основою ТРПП – з іншого. За описаним принципом перетворення функціонують ТРПП параметрів рухомого потоку середовища [14, 16, 25, 41, 43 - 66]; теплові мікрофони [67, 68]; перетворювачі вакууму типу Пірані [16, 69 - 76]; калориметри [77 - 79]; кондуктометричні перетворювачі складу суміші оточуючого середовища: газу [80 - 84] або рідини [26, 85, 86]; болометри [87 - 90]; теплові акселерометри [91 - 93], первинні перетворювачі вологості [94 - 95], швидкості зміни тиску газу [96] тощо.

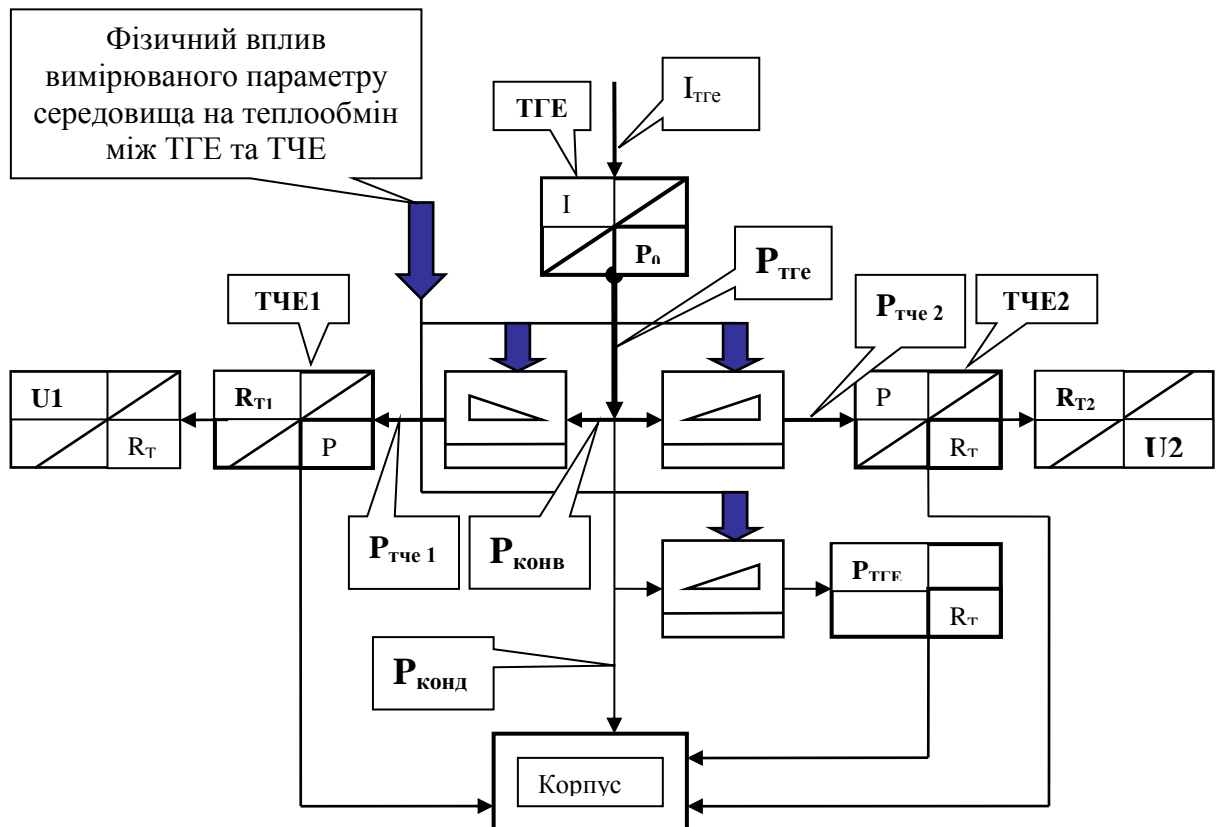


Рис. 1.4. Структурна схема триелементного ТРПП з активним тепловим збудженням ТГЕ та змінними тепловими потоками між ТГЕ та ТЧЕ1 і ТЧЕ2

ТІС включає прошарки діелектрику ( $\text{SiO}_2$  та  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) і з'єднувальні металеві провідники, які забезпечують передачу електричного сигналу від ТГЕ і ТЧЕ до контактів корпусу ТРПП. ТІС формується на монокристалічному кремнії орієнтації  $\langle 100 \rangle$  та класифікується за формою і способом кріплення до основи. Розрізняють місткову, консольну та мембранну геометрію ТРПП. Принциповим фактором вважається технологія отримання ТІС: травленням монокристалічного кремнію зі зворотного чи переднього боку пластини або травленням жертвовного прошарку [1 - 8, 14 - 20]. В результаті відстань від зворотного боку ТІС до основи істотно відрізняється для МЕМС ТРПП, отриманих в рамках вказаних технологій, і складає від кількох сотень мікрон у випадку травлення монокристалічного кремнію наскрізь зі зворотного боку до одиниць - десятків мікрон у випадку травлення жертвовного прошарку. Приклади типових ТІС різних конструкцій наведено на рис. 1.5.

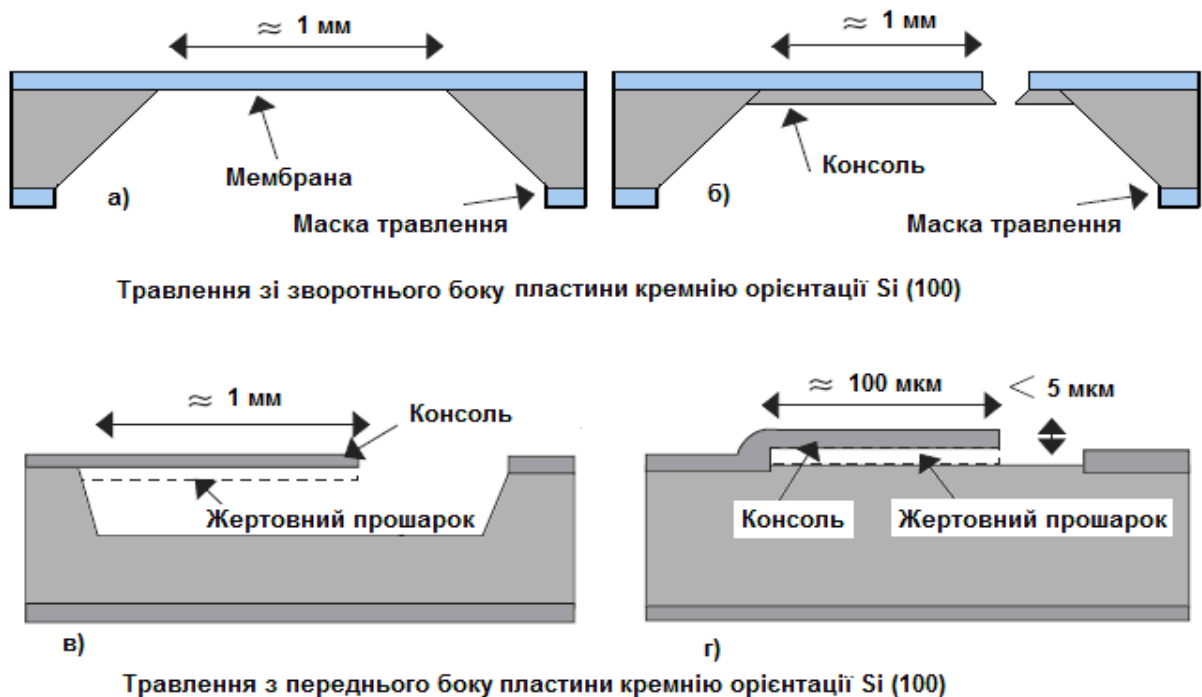


Рис. 1.5. Приклади мембранної, місткової та консольної конструкції термоізованих структур мікромеханічних перетворювачів, отриманих методом анізотропного травлення монокристалічного кремнію орієнтації Si (100) із зворотної (рис. а) і б)) та передньої (рис. в) і г)) сторін пластини

Незважаючи на незмінність основної функції перетворення ТРПП - залежності опору традиційно вживаних металів – платини, міді і нікелю від температури, за комплексом метрологічних характеристик ТРПП, виготовлені за технологією МЕМС, перевершили об'ємні і тонкоплівкові аналоги за габаритними, енергетичними та частотними характеристиками. Для них характерні рекордно малі значення сталої розсіювання  $G_{th}$  і теплоємності  $C_{th}$  ТГЕ та ТЧЕ, що забезпечують значення сталої часу на рівні одиниць – десятків мілісекунд [14, 16, 68, 78]. Тепловий опір між елементами ТІС та корпусом перетворювача у МЕМС виконанні при відсутності масопереносу становить десятки тисяч градусів на ват у повітрі за нормальних умов і тисячі градусів на ват у воді. В результаті споживана потужність ТГЕ на рівні міліват призводить до перегріву ТЧЕ відносно навколишнього середовища на десятки градусів. Вказані чисельні значення технічних параметрів стали основою для розробки конструктивно і методично нових первинних перетворювачів з активним тепловим збудженням, а також способів вимірювання фізичних величин на їх основі [19, 20, 22, 66]. Теплові мікрофони [67, 68], мікрокалориметри [77 - 79], акселерометри без гравітаційної маси [91 - 93], ТРПП вологості [94 - 95], швидкості зміни тиску газу [96] є прикладами таких перетворювачів.

Перспектива розвитку названих пристроїв ґрунтується на реалізації нових методів вимірювання фізичних величин, оскільки чисельні значення характеристик ТРПП у МЕМС виконанні рекордні:

- тепловий опір  $Z_T$  між ТГЕ і корпусом ТРПП становить від  $5 \cdot 10^3$  до  $50 \cdot 10^3$  °C/Вт в нерухомому повітрі за нормальних умов і від  $25 \cdot 10^3$  до  $180 \cdot 10^3$  °C/Вт у вакуумі [14, 16, 77, 78];

- градієнти температур в елементах ТРПП і в навколишньому середовищі досягають десятків градусів на мікрон [77];

- швидкість зміни температури ТГЕ і ТЧЕ на нагріванні в повітрі за нормальних умов досягає  $1,2 \cdot 10^6$  °C/сек [78];

- власна стала часу знаходиться в діапазоні від одиниць мілісекунд в повітрі за нормальних умов до десятків мілісекунд у вакуумі [77, 78];
- типова теплоємність ТІС становить  $2 \cdot 10^{-8} - 1,8 \cdot 10^{-7}$  Дж/°С [57, 58];
- частотний діапазон (за рівнем чутливості -3 дБ) - до 4 кГц [67, 68].

Однією з перших конструкцій ТРПП у MEMC-виконанні запропонована матриця металевих плівкових резисторів, розміщених на діелектричних містках  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  загальною товщиною близько 1 мкм та площею  $400 \times 500$  мкм<sup>2</sup> [14]. Теплова ізоляція ТІС забезпечується поглибленням під містком глибиною 125 мкм, отриманим шляхом анізотропного травлення кремнію через вікна з переднього боку пластини. В [14] описано конструкцію, технологія виготовлення і вимірювальні характеристики такого ТРПП, отримані R.G.Johnson та R.E.Higashi в Honeywell Physical Sciences Center, USA. Наведений на рис. 1.6 ТРПП використовується в перетворювачах диференційного тиску та об'ємних витрат газу фірми Honeywell серій AWM 2000/3000 [13].

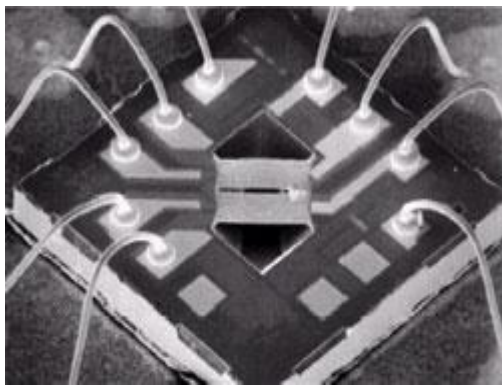


Рис. 1.6. Кристал чутливого елементу MEMC первинного перетворювача фірми Honeywell та його типова лінеаризована характеристика перетворення [14]

На протипагу мембранному терморезисторному MEMC елементу з металевими первинними ТРПП фірми Honeywell, в University of California, Berkeley, USA досліджено полікремнієві містки, розміщені на підвішених діелектричних підкладках на відстані 3 мкм від пластини

монокристалічного кремнію або над V-подібною канавкою в пластині кремнію [16]. Змонтований в корпус і підключений до спеціалізованої електронної схеми уніфікований містковий ТРПП досліджено у якості первинного перетворювача наступних вимірювачів:

- об'ємних витрат газу (місток розмірами  $270 \times 3 \times 1$  мкм<sup>3</sup> розміщують в каналі висотою 300 мкм; при об'ємних витратах азоту через канал на рівні  $100 \text{ см}^3/\text{хв.}$  вихідний сигнал складає 35 мВ при підтриманні робочої температури містка на рівні  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ );

- абсолютного тиску газового середовища в діапазоні  $10 - 10^4$  Па; захищений шаром  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  полікремнієвий місток розмірами  $400 \times 3 \times 1$  мкм<sup>3</sup> розміщено над V - канавкою в пластині кремнію; крутизна вихідного сигналу складає 2В на декаду зміни абсолютного тиску в діапазоні  $10 - 10^4$  Па при підтриманні робочої температури містка  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- джерела світла; сильнолегований полікремнієвий місток розмірами  $510 \times 5 \times 1$  мкм<sup>3</sup> також захищено шаром  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  та розміщено у вакуумований корпус; потужність вихідного оптичного сигналу складає 250 мкВт з максимумом довжини хвилі біля 2,5 мкм ( $T=1400 \text{ K}$ ) при споживаній електричній потужності 5 мВт.

Процеси теплообміну в конструкції консольної геометрії, що нависає над кремнієм на відстані порядку 100 мкм, досліджено в [15]. ТІС такого ТРПП фіксується до основи діелектричними балками; електричні контакти реалізуються алюмінієвими або полікремнієвими прошарками (рис 1.7). В [15] доведено, що орієнтація перетворювача в гравітаційному полі не впливає на його характеристики для перегріву до  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , коли число Грасгофа не перевищує 2000. Типовий тепловий опір  $Z_{\text{th}}$  ТІС в повітрі за нормальних кліматичних умов (н.к.у) складає від 25 000 до 50 000  $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ .

Теплові структури за MEMC технологією та вимірювальні схем на їх основі розробляються в Delft University of Technology, Netherlands.



Результати розробок B.W. van Oudheusden [44], A.W. van Herwaarden, P.M. Sarro [68 - 70, 77], комерційно доступні від XENSOR Integration [78].



Рис. 1.7. ТРПП консольної геометрії, виготовлених за технологією MEMC [16]

На основі мембранного елемента ТІС (рис. 1.8) розміром  $2,50 \times 3,33 \times 0,3 \text{ мм}^3$  реалізовано ПП для калориметрії (маса ТІС  $10^{-9} \text{ кг}$  і менше) із можливістю зміни температури на нагріванні до  $1,2 \cdot 10^6 \text{ }^\circ\text{C/с}$ ; ПП абсолютного тиску типу Пірані в діапазоні від  $10^{-2}$  до  $10^4 \text{ Па}$ ; ПП складу бінарних газових сумішей типу TCG-3880.

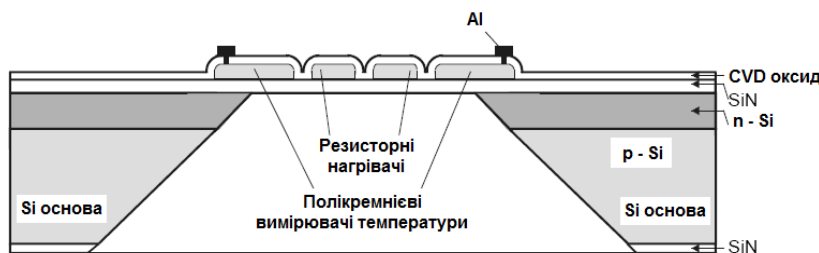


Рис. 1.8. Мембранний елемент перетворювача типу XEN-39\*\* виробництва фірми XENSOR Integration, Netherlands [18, 77, 78]

ТРПП для потокових мікрофонів ( $\mu$ -flow microphone – рис. 1.8) і ТРПП лінійної швидкості газового потоку на їх основі розроблено і досліджено в [67, 68]. В серії публікацій за період з 2000 по 2008 рік проведено теоретичні дослідження  $\mu$ -flow microphone і отримано експериментальні результати на їх підтвердження [48, 51, 57, 58].

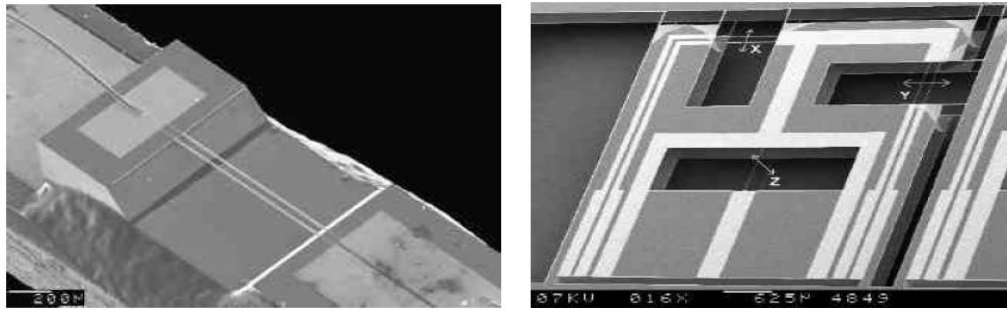


Рис. 1. 9. Терморезисторні первинні перетворювачі Microflow Technologies [67, 68]

## Висновки до розділу 1

Наведений в розділі 1 аналіз науково-технічної літератури показує наступне:

1. Металеві дріт'яні ТРПП об'ємної геометрії використовують однозначний взаємозв'язок між електричним опором і температурою ЧЕ. Для них характерні відпрацьованість метрологічних підходів, надійність принципу вимірювання, простота електронних схем обробки сигналу, наявність вичерпної нормативної бази. Недоліком є обмежена функціональність (комерційно доступними є переважно пасивні вимірювачі температури).

2. Сучасні тонкоплівкові ТРПП провідних світових виробників (Heraeus Sensor Technology (Німеччина), Honeywell (США)) за метрологічними показниками не поступаються об'ємним аналогам, а за набором експлуатаційних параметрів перевищують їх. До того ж тонкоплівкові ТРПП виготовляються за сучасними електронними технологіями напилення металевих прошарків у вакуумі і можуть бути багатфункціональними (мультисенсорні платформи).

3. Мікромеханічні ТРПП – сучасний перспективний напрямок розвитку сенсорної мікроелектроніки. Переваги МЕМС ТРПП перш за все полягають у їх багатфункціональності, рекордно малих розмірах ЧЕ, високій швидкодії (власна стала часу у нерухомому повітрі за н.к.у.

становить одиниці мілісекунд), споживана потужність активного ТРПП на рівні міліват. Це служить основою розробки конструктивно нових ТРПП та способів вимірювання, реалізація котрих в об'ємних структурах принципово неможлива.

Наведений в розділі 1 аналіз показує низку не розв'язаних на сьогоднішній день теоретичних і практичних задач з розробки ТРПП за технологією МЕМС. Серед актуальних наукових і інженерних проблем, що вимагають проведення комплексу додаткових робіт, виділимо наступні:

А. Відсутні бібліотеки математичних моделей елементів ТІС типової геометрії у МЕМС виконанні (консолі, містка, мембрани). Це вимагає від розробника електронного вимірювального пристрою проведення аналізу фізичних основ вимірювального процесу в рамках постановки та вирішення міждисциплінарних задач. Коректне включення ТРПП в склад вимірювальної схеми вимагає володіння інструментами створення його комплексної моделі з урахуванням електричних і теплових режимів.

Б. Відсутні достатньо прості інженерні методики реалізації електричних і теплових режимів багатoelementних ТРПП, виготовлених за технологією МЕМС. Практично важливими для реалізації нових методів вимірювання фізичних величин є методики реалізації заданих температурних градієнтів в межах ТІС, заданої швидкості зміни температури ТГЕ, підтримання сталої різниці температур окремих зон ТІС.

В. В нормативних технічних документах недостатньо чітко прописані номенклатура і метрологічно узгоджені методики експериментального визначення технічних параметрів ТІС багатoelementних ТРПП стороннього нагрівання.

Вищевказане є прямою вказівкою на актуальність проведення наукових робіт у вибраному напрямку з метою формування достатньо простих інженерних підходів до розробки електронних пристроїв на основі ТРПП, виготовлених за технологією МЕМС.

## **Розділ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ ТА РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОРЕЗИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА**

Дослідження характеру процесів теплообміну між елементами ТІС традиційно виконують на феноменологічних засадах з використанням теорії подібності. Під характером процесу розуміють закон залежності коефіцієнту теплообміну з поверхні елементу ТІС від параметрів середовища, конструкції ТРПП та температурного натиску. Визначальними чинниками теплообмінних процесів є не окремі фізичні параметри середовища чи об'єкту, а їх безрозмірнісні комбінації (комплекси) – критерії подібності (характеристичні числа перенесення теплоти [97]). Їх фізична сутність подається через відношення процесів, які входять в рівняння математичної моделі [98, 99]. Для визначення характеру процесу проводять обчислення комплексів та порівнюють результат з пороговим чисельним значенням характеристичного числа.

З метою визначення співвідношення механізмів теплообміну для розроблюваних конструкцій ТРПП, заданих температурних натисків, діапазонів зміни теплофізичних і механічних параметрів оточуючого середовища проведено аналіз чисельних значень критеріїв подібності [23, 99]. Оскільки вклад в результуючий процес окремих механізмів може істотно різнитися для конкретної конструкції ТІС і корпусу, деякі з механізмів можна виключити з розгляду у конкретній моделі ТРПП.

### **2.1. Моделювання фізичних процесів енергообміну елементів теплоізованої структури з оточуючим середовищем і корпусом**

Відповідно до запропонованої в [19, 20] класифікації за функціональними і конструктивними ознаками, розроблені перетворювачі відносяться до класу ТРПП з активним тепловим збудженням і керованими тепловими

потоками. Ескіз фрагменту типового ТРПП у MEMC виконанні з електропровідним шаром на діелектричній підкладці подано на рис. 2.1.

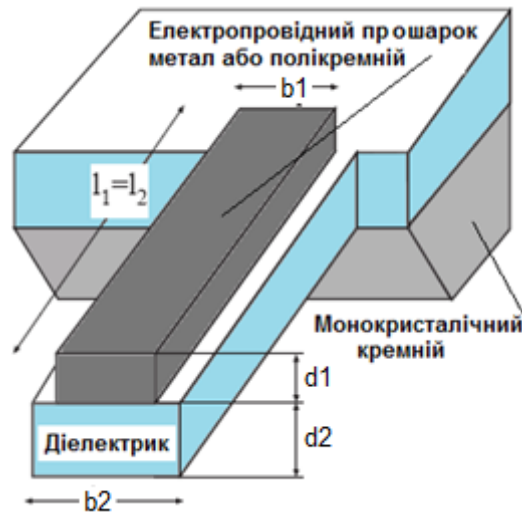


Рис. 2.1 Ескіз фрагменту типового терморезисторного перетворювача у мікромеханічному виконанні з електропровідним шаром на діелектричній підкладці.

Методи аналізу ТІС у MEMC виконанні ґрунтуються на його площинній геометрії і полягають у наступному [19, 20, 100, 101]:

1. Товщини  $d_i$  кожного з прошарків ЧЕ (характерні значення 0,1 мкм – 0,5 мкм) одного порядку, а їх сумарна товщина значно менша за довжину  $l_i$  (характерні значення 100 мкм – 1000 мкм) та ширину  $b_i$  (характерні значення 1 мкм – 50 мкм) області:

$$\sum_i d_i^{(j)} \leq l_j; \sum_i d_i^{(j)} \leq b_j \quad (2.1),$$

що дає підстави не брати до уваги розподіл температури по товщині прошарків і обмежитись двовимірною площинною постановкою задачі.

2. ТІС мембранного ТРПП умовно поділяють на області за характерними ознаками тепловиділення і теплообміну. До складу активного ТРПП входить теплогенеруюча область з відомою (заданою) об'ємною густиною теплової потужності. Прикладом такої області може

бути область резистивного елементу, де відбувається виділення джоулевого тепла внаслідок живлення ТРПП електричним струмом, поглинальна область приймача променевої енергії, тощо.

3. Для кожної з областей ТІС встановлено умови кондуктивно-конвективного і радіаційного теплообміну з навколишнім середовищем, а також умови теплообміну із суміжними областями або з корпусом перетворювача шляхом теплопровідності на загальних межах.

4. Механічна фіксація мембрани ТІС з корпусом із монокристалічного кремнію виконується переважно діелектричними планарними фрагментами, в яких відсутні джерела тепловиділення. Активна теплогенеруюча область мембранної, місткової або балочної геометрії також безпосередньо опирається на корпус перетворювача сталої температури. Протиріччя між умовою виділення тепла в активній області та відсутністю її нагрівання на межі з корпусом знімається припущенням про нескінченно велику теплоємність корпусу (модель «теплого стоку», «теплової раковини», в англійській літературі “heat sink”).

5. ТГЕ, ТЧЕ та пасивні області ТІС аналізуються як набір однорідних областей, геометричні та теплофізичні параметри яких (товщина, теплопровідність, теплоємність, густина) визначаються ефективними складовими шарами, виходячи із геометрії елементу та фізичних характеристик матеріалів. В розрахунках для кожної області  $j$  вводяться еквівалентні параметри товщини  $d_e^{(j)}$ , теплопровідності  $k_e^{(j)}$ , густини  $\gamma_e^{(j)}$  та питомої теплоємності  $C_e^{(j)}$  відповідно до наступних виразів [100]:

$$d_e^{(j)} = \sum_{i=1}^n s_i^{(j)} d_i^{(j)} ; \quad k_e^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i^{(j)} d_i^{(j)} k_i^{(j)}}{d_e^{(j)}} ;$$

$$\gamma_e^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i^{(j)} d_i^{(j)} \gamma_i^{(j)}}{d_e^{(j)}} ; \quad C_e^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i^{(j)} d_i^{(j)} C_i^{(j)}}{d_e^{(j)}} , \quad (2.2)$$

де коефіцієнт  $s_i^{(j)}$  – відношення площі прошарку  $i$  до загальної площі області  $j$  (бажано, щоб його величина не була меншою за 0,5; оптимальне значення  $s_i^{(j)} = 1$ ),  $k_i^{(j)}$ ,  $\gamma_i^{(j)}$ ,  $C_i^{(j)}$  – відповідно теплопровідність, густина і питома теплоємність прошарку  $i$ . Описані підходи до усереднення механічних і теплофізичних характеристик не розповсюджуються на електричні процеси; для електропровідних шарів МЕМС ТРПП в роботі використовуються не усереднені  $d_e^{(j)}$ , а їх реальні товщини.

Аналіз публікацій з розробки теплових первинних перетворювачів за технологіями МЕМС та літературних джерел, котрі можна вважати класичними, звертає увагу на суттєві розбіжності саме в моделюванні процесів теплообміну ТІС ТРПП з навколишнім середовищем. Спроба застосування відомих аналітичних розв'язків, отриманих для об'ємних макроструктур в [31, 33, 102], навіть для найпростіших конструкцій ТГЕ у МЕМС виконанні без аналізу механізмів теплообміну між ТІС, корпусом ТРПП і середовищем, призводить до хибних результатів.

Фізично та математично найбільш обґрунтований підхід до аналітичного моделювання теплових ПП та розрахунку стаціонарного і нестаціонарного розподілу температур у ТІС властивий роботам Козлова О.Г. [19, 20, 100, 101, 103 - 105]. Конструктивні особливості об'єктів, що моделюються (містка [16, 31, 33, 54, 67, 68], консольної балки [17, 81, 89, 90], мембрани [27, 30, 40, 87, 100, 101]) дозволяють для границі суміжних областей ТІС використати лише граничні умови другого роду, тобто прирівняти густину теплових потоків в кожній точці межі. В результаті задача зводиться до необхідності розв'язку системи рівнянь відносно інтегральних вагових коефіцієнтів, які визначають густину теплових потоків  $q^{(j,s)}$  [Вт/м<sup>2</sup>] на межі суміжних областей  $j$  та  $s$ . За умови використання підходу із [100, 101] отримано систему рівнянь для «вагових» коефіцієнтів  $(\delta^{j,s})_{m,k}$ , що визначають теплообмін між сусідніми областями  $j$  та  $s$  термоперетворювача. Основна математична складність

пропонованого методу полягає в необхідності розрахунку чисельних значень визначених інтегралів для «вагових» коефіцієнтів, що ставить під сумнів можливість інженерного використання отриманого результату моделювання.

### **Аналіз механізмів теплообміну чутливого елемента мікромеханічного терморезисторного перетворювача з середовищем**

Диференціальне рівняння теплового балансу, записане для кожної з виділених однорідних областей ТІС з ефективними параметрами матеріалів, встановлює зв'язок між швидкістю перебудови температури в часі та її розподілом в об'ємі і є математичним відображенням процесу енергообміну між ТІС і середовищем як окремий випадок закону збереження енергії. У двовимірній постановці задачі отримуємо:

$$k_e^{(j)} d_e^{(j)} \frac{\partial^2 T_j}{\partial x_j^2} + k_e^{(j)} d_e^{(j)} \frac{\partial^2 T_j}{\partial y_j^2} = -q_j + H_j (T_j - T_{н.с.}) + C_e^{(j)} \gamma_e^{(j)} d_e^{(j)} \frac{\partial T_j}{\partial t}, \quad (2.3)$$

де  $q_j(x, y)$  - площинна густина потужності теплових джерел в області  $j$ .

Граничні умови для рівняння (2.3) на межах областей ТІС та на поверхнях теплообміну формулюємо наступним чином:

- для областей, що межують з корпусом, використовуємо граничні умови першого роду, прирівнюючи температури корпусу і межі;
- для спільних границь суміжних областей використовуємо граничні умови другого роду, покладаючи рівність теплових потоків на межі;
- для поверхонь використовуємо граничні умови третього роду згідно з законом теплообміну Ньютона із використанням сумарного коефіцієнту теплообміну  $H$  з навколишнім середовищем;
- для кожної з активних областей ТІС наводимо густину генерованої в ній потужності  $q_j(x, y)$  і закон її розподілу по площі елемента.



В загальному випадку теплообмін між окремими елементами ТІС і оточуючим середовищем включає три основні фізичні механізми:

- кондуктивний теплообмін - за рахунок теплопровідності складових елементів ТІС та теплопровідності оточуючого середовища;
- радіаційний теплообмін - теплове випромінювання з поверхні ТГЕ та відповідно зворотне поглинання падаючої радіації ТЧЕ;
- конвективний теплообмін між ТГЕ, ТЧЕ і навколишнім середовищем за рахунок масопереносу, спричиненого зовнішнім джерелом перепаду тиску (вимушена конвекція) або переміщенням частин середовища різної густини в гравітаційному полі (природна конвекція).

### **Теплогенеруючий елемент в необмеженому середовищі**

Явище природної конвекції та характер його протікання визначається критеріями Нуссельта  $Nu$ , Грасгофа  $Gr$  та Прандтля  $Pr$  [97-99]:

$$\left( Nu = \frac{HL_x}{k}; Gr = g\beta \frac{L_x^3}{\nu^2} (T_n - T_c); Pr = \frac{\nu}{a} \right), \quad (2.4)$$

де  $H$  [Вт/(м<sup>2</sup>·°C)] – коефіцієнт теплообміну;  $L_x$  [м] – характерний розмір тіла теплообміну;  $k$  [Вт/(м·°C)] – коефіцієнт теплопровідності;  $g$  [м/с<sup>2</sup>] – гравітаційна стала;  $\beta$  [1/°C] – коефіцієнт температурного розширення;  $T_n$  і  $T_c$  [°C] – температура відповідно поверхні тіла і середовища;  $\nu = \frac{\eta}{\gamma}$  [м<sup>2</sup>/сек] – кінематична в'язкість;  $a$  [м<sup>2</sup>/сек] – коефіцієнт теплопровідності;  $\eta$  [кг/(м·сек)] – динамічна в'язкість;  $\gamma$  [кг/м<sup>3</sup>] – густина.

Згідно з теорією подібності, процеси теплообміну проходять за характером однаково в усіх геометрично подібних системах, для котрих добуток критеріїв Грасгофа  $Gr$  і Прандтля  $Pr$  лежить в певному діапазоні чисельних значень. Розрізняють випадки теплообміну з необмеженим

простором або з елементами зі сталою температурою - тепловим стоком. Критеріальне рівняння для теплообміну шляхом теплопровідності та природної конвекції з поверхні тіл з одним визначальним геометричним параметром (довгих провідників, вертикальних чи горизонтальних поверхонь, сфер) в необмеженому газовому середовищі має вигляд [99]:

$$Nu_m = C(Gr \cdot Pr)_m^n, \quad (2.5)$$

де  $m$  - індекс, що вказує на необхідність використання чисельних значень параметрів при середньому арифметичному значенні між  $T_n$  і  $T_c$ ,  $C$  – стала величина. Рівняння (2.5) є основним для визначення характеру теплообміну з поверхні. Режими теплообміну визначаються чисельним значенням сталих  $n$  і  $C$  із таблиці 2.1 відповідно до попередньо розрахованого значення добутку  $(Gr \cdot Pr)$  [99]:

1. Плівковий теплообмін, характерний для  $(Gr \cdot Pr) < 1 \cdot 10^{-3}$ . У цьому випадку із (2.2) отримуємо:  $Nu_m = 0,5$ . На поверхні тіла формується нерухома плівка нагрітої рідини чи газу, інтенсивність теплообміну обумовлена процесами теплопровідності. Режим характерний для тіл з плавними формами при невеликих температурних натисках, властивий для переважної більшості процесів теплообміну у МЕМС перетворювачах. Коефіцієнт теплообміну  $H$  набуває обернено пропорційної залежності від характерного розміру  $L_x$  перетворювача:

$$H = 0,5 \frac{k}{L_x}. \quad (2.6)$$

Режими теплообміну

Таблиця 2.1 [99]

| <b>Gr · Pr</b>                      | <b>C</b> | <b>n</b> |
|-------------------------------------|----------|----------|
| $< 1 \cdot 10^{-3}$                 | 0,50     | 0,00     |
| $1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$ | 1,18     | 1/8      |
| $5 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-7}$ | 0,54     | 1/4      |

2. Теплообмін ступеню  $1/8$  для значень добутку  $(Gr \cdot Pr)$  в діапазоні  $(1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^2)$  властивий теплообмінним процесам для перетворювача у МЕМС виконанні. В цьому випадку із (2.4) та (2.5) отримуємо:

$$H = 1,18 \frac{k}{L_x} (Gr Pr)^{1/8} = 1,18 (g \beta Pr)^{1/8} \frac{k}{\nu^{1/4}} \left( \frac{T_n - T_c}{L_x} \right)^{1/8}. \quad (2.7)$$

3. Теплообмін ступенів  $1/4$  та  $1/3$  характерний появою механічного переносу маси середовища в інтенсивних ламінарних та турбулентних потоках із значним зростанням інтенсивності процесу; для ТРПП у МЕМС виконанні такі режими не характерні.

Прийнявши за характерний розмір  $L_x$  прямокутної площадки теплообміну розміром  $l \cdot b = (40 \cdot 1000)$  мкм<sup>2</sup> відношення її площі до периметру, отримуємо  $L_x = [l \cdot b / 2(l+b)] = 20$  мкм. Для повітря, спирту етилового, води, гліцерину при  $T_n - T_c = 50$  °С розраховано наведені в табл. 2.2 чисельні значення добутку  $(Gr \cdot Pr)$  відповідно до (2.4) та (2.5):

$$(Gr \cdot Pr) = g \beta \frac{L_x^3}{\nu \cdot a} (T_n - T_c). \quad (2.8)$$

Таблиця 2.2

Добуток  $(Gr \cdot Pr)$  для поверхні теплообміну з характерним розміром 20 мкм при температурних натисках  $T_n - T_c = 50$  °С

| Середовище     | $\beta$ ,<br>[°C <sup>-1</sup> ] | $k$ ,<br>[Вт/(м·°C)] | $\nu$ ,<br>[м <sup>2</sup> /сек] | $a$ ,<br>[м <sup>2</sup> /сек] | $(Gr \cdot Pr)$<br>* |
|----------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| повітря        | 0,0037                           | 0,024                | $1,45 \cdot 10^{-5}$             | $2,15 \cdot 10^{-5}$           | $4,75 \cdot 10^{-5}$ |
| вода (T=25 °C) | 0,00025                          | 0,61                 | $1,14 \cdot 10^{-6}$             | $1,4 \cdot 10^{-7}$            | $0,63 \cdot 10^{-2}$ |
| спирт етиловий | 0,0011                           | 0,166                | $1,7 \cdot 10^{-6}$              | $9,9 \cdot 10^{-8}$            | $2,62 \cdot 10^{-2}$ |
| гліцерин       | 0,00053                          | 0,285                | $1,85 \cdot 10^{-3}$             | $9,8 \cdot 10^{-8}$            | $1,17 \cdot 10^{-5}$ |

\* - розраховано автором.

Як бачимо з табл. 2.2, в повітряному середовищі, воді та в'язких рідинах теплообмін в мікромеханічних ТРПП для вибраного температурного натиску відповідає режиму кондуктивної теплопровідності; для спирту етилового отримуємо закон теплообміну ступеню 1/8.

В [77, 78] наведено наступні порядкові значення коефіцієнтів теплообміну Н для ТІС з характерним розміром  $L_x \sim 500$  мкм:

- радіаційний теплообмін для чорних поверхонь:  $6 \text{ Вт}/(^{\circ}\text{С}\cdot\text{м}^2)$  для кімнатних температур і  $500 \text{ Вт}/(^{\circ}\text{С}\cdot\text{м}^2)$  для температур близько  $1000^{\circ}\text{С}$ ;
- теплообмін теплопровідністю через повітряний прошарок між двома плоскопаралельними площинами на відстані 500 мкм:  $50 \text{ Вт}/(^{\circ}\text{С}\cdot\text{м}^2)$  для атмосферного тиску і  $1 \text{ Вт}/(^{\circ}\text{С}\cdot\text{м}^2)$  для тиску 1 Па;
- теплообмін теплопровідністю через прошарок води між двома плоскопаралельними площинами на відстані 500 мкм:  $1200 \text{ Вт}/(^{\circ}\text{С}\cdot\text{м}^2)$ ;
- вимушена конвекція для перетворювача довжиною 500 мкм:  $150 \text{ Вт}/(^{\circ}\text{С}\cdot\text{м}^2)$  при обтіканні повітряним потоком зі швидкістю 1 м/сек і  $15000 \text{ Вт}/(^{\circ}\text{С}\cdot\text{м}^2)$  при обтіканні потоком води зі швидкістю 1 м/сек.

### **Теплогенеруючий елемент в обмеженому просторі**

Процеси в реальних ТРПП не завжди можна спрощувати до теплообміну нагрітого тіла з необмеженим простором, оскільки вони визначаються не тільки фізичними властивостями середовища і значенням температурного натиску, а й формою ТІС та відстанню до теплового стоку. Складні механізми конвективно-кондуктивного теплообміну можуть розглядатися в наближенні ефективної теплопровідності середовища з введенням еквівалентної теплопровідності  $k_e$  та коефіцієнтів конвекції  $\varepsilon_k$ . Критеріальні рівняння набувають вигляду [99, 102]:

$$k_e = \varepsilon_k k_m; \varepsilon_k = NA(Gr Pr)^n f\left(\frac{D}{\sqrt{l_1 l_2}}\right); Gr = \frac{g\beta(T_n - T_c)D^3}{\nu^2}, \quad (2.9)$$

де  $D$ ,  $l_1$  та  $l_2$  – товщина, ширина та довжина прошарку середовища (рідини чи газу) між чутливим елементом перетворювача та корпусом;  $k_m$  – теплопровідність середовища;  $N$  – параметр орієнтації нагрівача.

Коефіцієнти  $A$  і  $n$  та функція  $f$  визначаються експериментально. Для  $(Gr \cdot Pr) < 10^3$  приймається  $\epsilon_k = 1$ , теплообмін відбувається теплопровідністю, визначальним параметром процесу є товщина прошарку середовища  $D$ , так що коефіцієнт теплообміну визначиться виразом:

$$H \approx \frac{k_m}{D}. \quad (2.10)$$

Як бачимо, між (2.6) і (2.10) існує суттєва розбіжність: в першому випадку коефіцієнт теплообміну визначається характерним геометричним розміром елементу теплообміну, у другому – характерною відстанню до теплового стоку. Для розділених повітряним прошарком площин, що знаходяться на відстані 100 мкм, коефіцієнт теплообміну теплопровідністю становить близько 250 [Вт/(м<sup>2</sup>·°С)].

Коефіцієнти теплообміну елементів ТРПП з середовищем оцінюються в [14 - 18, 81, 89, 100 – 102, 106, 107] по-різному; розділяють процеси за фізичними механізмами і визначають їх характер для заданих температурних натисків та відомої геометрії ТГЕ. Для мембранного МЕМС ТРПП виділено наступні механізми теплообміну поверхонь:

1. Кондуктивну теплопровідність через прошарок газового середовища з нижньої по відношенню до підкладки поверхні ТІС.

2. Кондуктивну теплопровідність, вимушену чи природну конвекцію з верхньої поверхні ТІС. Наявність природної конвекції визначено за добутком критеріїв Грасгофа  $Gr$  і Прандтля  $Pr$  відповідно до (2.5) і табл. 2.1 і 2.2. Наявність вимушеної конвекції, обумовленої рухом середовища під дією зовнішнього градієнту тиску, та перехід від ламінарного режиму течії до турбулентного з визначено за числом Рейнольдса.

Вказані механізми надалі будуть характеризуватися інтегральним коефіцієнтом теплообміну  $H$ , сталою розсіювання  $G_{th}$  та тепловим опором  $R_{th}$  для певного середовища і механізму теплообміну.

### 2.3. Аспекти виготовлення терморезисторного перетворювача за технологією мікроелектромеханічних систем на кремнії

Основою ТРПП є пластина монокристалічного кремнію орієнтації  $\langle 100 \rangle$  з нанесеними тонкими шарами діелектриків: отриманим методом термічного окислення шаром  $SiO_2$  товщиною 0,05 - 0,1 мкм та нанесеним методом парогозового осадження шаром нітриду кремнію  $Si_3N_4$  товщиною 0,2 - 0,3 мкм [108]. З переднього боку пластини методами фотолітографії та травлення формуються плівкові нікелеві резистори, топологія яких визначається функціональним призначенням ТІС. Вказані технологічні операції є базовими для КМОН технології. Особливістю технології виготовлення ТІС за способом [109] є використання двохсторонньої фотолітографії, що дозволяє сформувати вікна в діелектрику на зворотному боці пластини для наступного анізотропного травлення кремнію наскрізь в розчині КОН з метою формування діелектричних мембран під резисторами переднього боку. Фото кремнієвих пластин із мембранними ТІС наведено на Рис. 2.2.

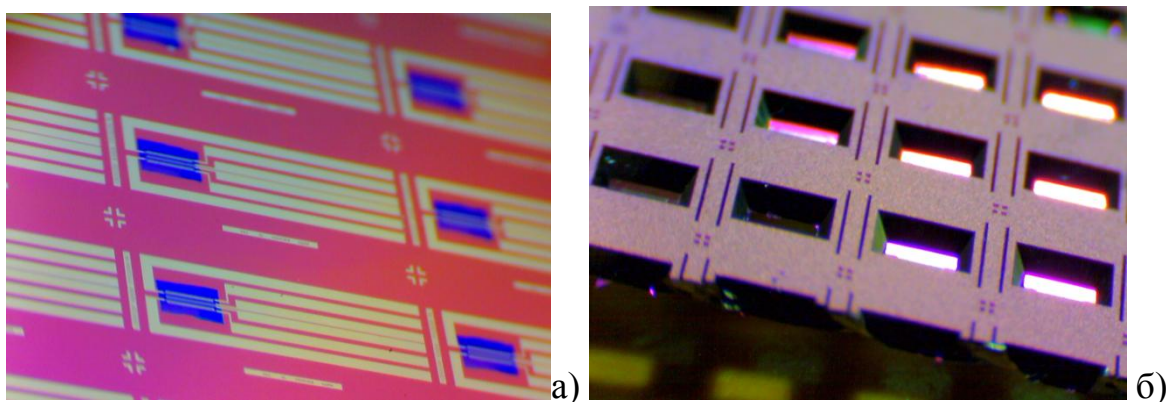


Рис. 2.2. Мембранні теплоізольовані структури, виготовлені за способом [108] методом анізотропного травлення кремнію зі зворотного боку; а) – вигляд з переднього боку пластини кремнію, б) - вигляд зі зворотного боку

Оптичне зображення на просвіт сформованого на завислій діелектричній  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  мембрані взаємного розташування ТГЕ і ТЧЕ (варіант топології “вкладених” резисторів) наведено на рис. 2.3.

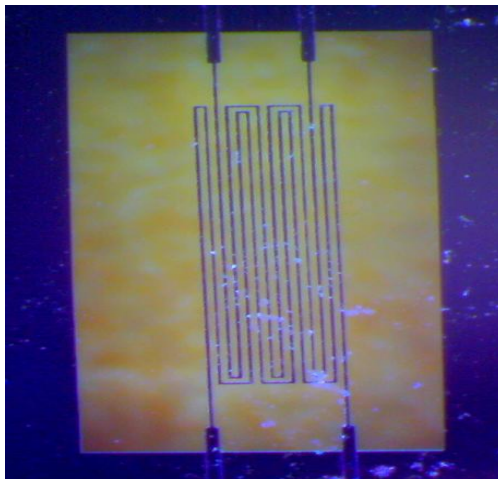


Рис. 2.3. Зображення на просвіт виготовленої за способом [108] теплоізованої структури із вкладеними термочутливим елементами на діелектричній мембрані

В результаті, як видно з рис. 2.2 і 2.3, діелектрична мембрана із сформованими на ній терморезисторами залишається завислою по периметру на кремнієвій підкладці над порожниною травлення. Вироджена планарна геометрія (відношення лінійних розмірів мембрани до її товщини 500:1) та властивості діелектричних матеріалів двошарової  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  мембрани забезпечують надійний тепловий контакт розміщених на ній резисторів з навколишнім середовищем та їх термо-ізоляцію від монокристалічної кремнієвої підкладки, що є необхідною умовою для подальшого функціонування ТРПП активного нагрівання.

Використання матриць ТІС в багатофункціональних ТРПП вимагає забезпечення підвищеної теплової ізоляції окремих ТІС, сформованих на одній підкладці. Для цього з метою усунення безпосереднього контакту ТГЕ з монокристалічним кремнієм після проведення фотолітографічного циклу додатково з переднього боку пластини плазмохімічним травленням формують вікна в плівці нітриду кремнію, через які в підкладці по периметру мембрани формують товстий ізолюючий окисел  $\text{SiO}_2$  (рис. 2.4)

[109]. Потім формують прошарки ТГЕ та ТЧЕ 6. Після проведення двосторонньої фотолітографії, формування вікон 5 та наступного проведення анізо-тропного травлення із зворотного боку отримуємо потрібні мікро-електромеханічні структури ТІС з прошарком товстого діелектрику по периметру кожної мембрани. Товщина ізолюючого окислу 1,0 - 1,5 мкм обрана з умови, що при проведенні окислення при температурі близько 1100 °С відбудеться окислення підкладки моно-кристалічного кремнію на глибину 0,3-0,5 мкм, а при виконанні анізо-тропного травлення із зворотнього боку буде видалено ділянки кремнію, які створювали теплові канали кондуктивного теплообміну між ТГЕ та підкладкою. Замість кремнію залишиться шар сформованого при окисленні ізолюючого двоокису кремнію і в результаті буде забезпечена підвищена діелектрична та теплова ізоляція ТГЕ від підкладки.

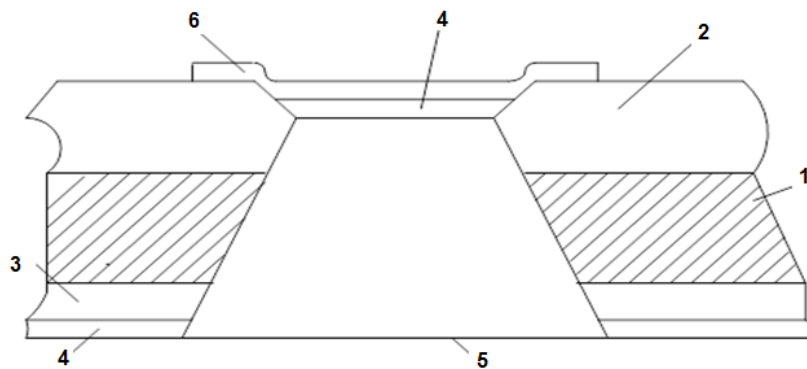


Рис. 2.4. Ескіз теплоізованої структури з додатковим прошарком діелектрику: Si підкладка 1, ізолюючий окисел 2, двоокис кремнію 3, нітрид кремнію 4, вікно 5 для анізотропного травлення підкладки, термочутливий резисторний шар 6 [109]

Після розрізання пластини на чутливі елементи їх монтують в корпуси та розварюють. Досягнення високих метрологічних характеристик ТРПП неможливе без урахування температури навколишнього середовища, для чого до складу чутливого елементу включають додаткові резистори температурної компенсації, розміщені на кремнієвій підкладці або ж на мембрані, винесеній із зони впливу вимірювального фактору.



## **2.4. Стаціонарний розподіл температури в мікромеханічному терморезисторному перетворювачі та в потокоформуючому каналі**

Дослідження розподілу температури в потокоформуючому каналі мікромеханічного ТРПП розглянуто в [57, 58, 67, 68] для аналізу теплових поточкових мікрофонів (the  $\mu$ -flow microphone). Місткові ТГЕ довжиною  $L$ , шириною  $b$ , загальною товщиною  $d_m$ , які складаються з прошарків металу на діелектричних підкладках  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , закріплені на міжосьовій відстані  $a$  один від одного посередині каналу прямокутної форми висотою  $2D = D_u + D_d$  на підкладці монокристалічного кремнію товщиною 300 мкм. Розв'язок задачі в [67, 68] шукається для фізично спрощеної моделі: теплогенеруюча область вважається ідентичною за теплофізичними параметрами з середовищем, що дозволяє механізми теплообміну не розглядати і коефіцієнти теплообміну не вводити. В рамках наведеного спрощення визначимо тепловий опір середовища в каналі та коефіцієнти теплообміну з поверхні. Вплив конструктивних параметрів корпусу ТРПП на температуру перегріву ТГЕ визначимо відповідно до рекомендацій МЕК 696-81 через параметр розсіювання потужності  $G_{th}$  [Вт/°C], сумарний тепловий опір середовища  $R_{th}$  [°C/Вт] і усереднений коефіцієнт теплообміну  $H(b, D, k)$  [Вт/(°C·м²)] з поверхні ТГЕ [110 - 112].

### **2.4.1. Містковий теплогенеруючий елемент в потокоформуючому каналі. Розрахунок теплового опору середовища**

Для визначення стаціонарного розподілу температури  $T(x, y, z)$  в каналі необхідно розв'язати рівняння теплопровідності для наведеної на рис. 2.5 геометрії ТГЕ [102, 113 - 115]:

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = -q(x, y, z), \quad (2.11)$$

де  $k$  – теплопровідність середовища в каналі,  $q(x,y) = [P_h / (b \cdot L)] \cdot F(x,y) \cdot \delta(z)$  – густина потужності ТГЕ,  $F(x,y)=1$  для  $|x| \leq L$ ,  $|y| \leq b$ ;  $F(x,y)=0$  для  $|y| > b$ .

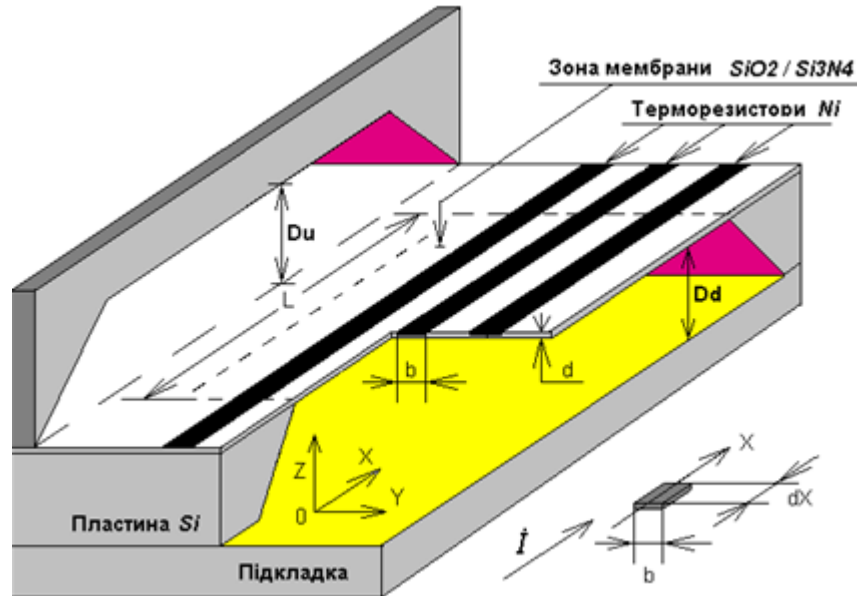


Рис. 2.5. Терморезисторний мембранний елемент в каналі

У випадку, коли шириною ТГЕ можна знехтувати,  $q_j = [P_h / L] \cdot \delta(y) \cdot \delta(z)$  для  $|x| \leq L$ . Граничні умови формулюємо наступним чином: температура стінок каналу залишається сталою і рівною температурі середовища в каналі  $T_c$  на значному віддаленні від нагрівача (наближення нескінченно високої теплоємності корпусу):

$$T(x = \pm L/2, y, z) = T(x, y \rightarrow \pm \infty, z) = T(x, y, z = D) = T_c. \quad (2.12)$$

Розв'язок (2.11) з граничними умовами (2.12) отримано в [67, 68] для каналу прямокутного перетину методом розділення змінних Фур'є у вигляді нескінченного ряду, кожен з членів якого – добуток періодичних складових відносно поперечних до потокоформуєчого каналу координат  $(x, z)$  та експоненціальної складової відносно поздовжньої координати  $y$  відповідно до рис. 2.5.

## Одиничний містковий нагрівач в каналі

Основна характеристика одиничного місткового ТГЕ в корпусі заданої геометрії – перевищення його власної середньої температури  $\Delta T_h$  відносно оточуючого середовища та просторовий розподіл температури середовища як результат розсіювання потужності  $P_h$  з поверхні ТГЕ при зміні довжини  $L$  і ширини  $b$  ТГЕ та висоти каналу  $2D = D_u + D_d$ . Для трьох зон каналу зліва від ТГЕ, безпосередньо над ним і справа від нього відповідно до наведеної на рис. 2.5 системи координат отримано вирази для розподілів температур в каналі зліва від нагрівача  $T_l(x, y_1, z)$ , над нагрівачем  $T_h(x, y_2, z)$  та справа від нього  $T_r(x, y_3, z)$  [67, 68, 116].

$$\Delta T_l(x, y_1, z) = \frac{2DP_h}{kLb} \sum_{N=0}^{\infty} \sum_{M=0}^{\infty} \left[ \frac{(-1)^m}{(\lambda_m)^2 (\sigma_{n,m})^2} \sinh(\sigma_{n,m} \frac{b}{2D}) \exp(\sigma_{n,m} \frac{y_1}{D}) \cos(\lambda_m \frac{x}{L/2}) \cos(\lambda_n \frac{z}{D}) \right];$$

(2.13a)

$$\Delta T_h(x, y_2, z) = \frac{2DP_h}{kLb} \sum_{N=0}^{\infty} \sum_{M=0}^{\infty} \left[ \frac{(-1)^m}{(\lambda_m)^2 (\sigma_{n,m})^2} (1 - \exp(-\sigma_{n,m} \frac{b}{2D})) \cosh(\sigma_{n,m} \frac{y_2}{D}) \cos(\lambda_m \frac{x}{L/2}) \cos(\lambda_n \frac{z}{D}) \right];$$

(2.13б)

$$\Delta T_r(x, y_3, z) = \frac{2DP_h}{kLb} \sum_{N=0}^{\infty} \sum_{M=0}^{\infty} \left[ \frac{(-1)^m}{(\lambda_m)^2 (\sigma_{n,m})^2} \sinh(\sigma_{n,m} \frac{b}{2D}) \exp(-\sigma_{n,m} \frac{y_3}{D}) \cos(\lambda_m \frac{x}{L/2}) \cos(\lambda_n \frac{z}{D}) \right].$$

(2.13в)

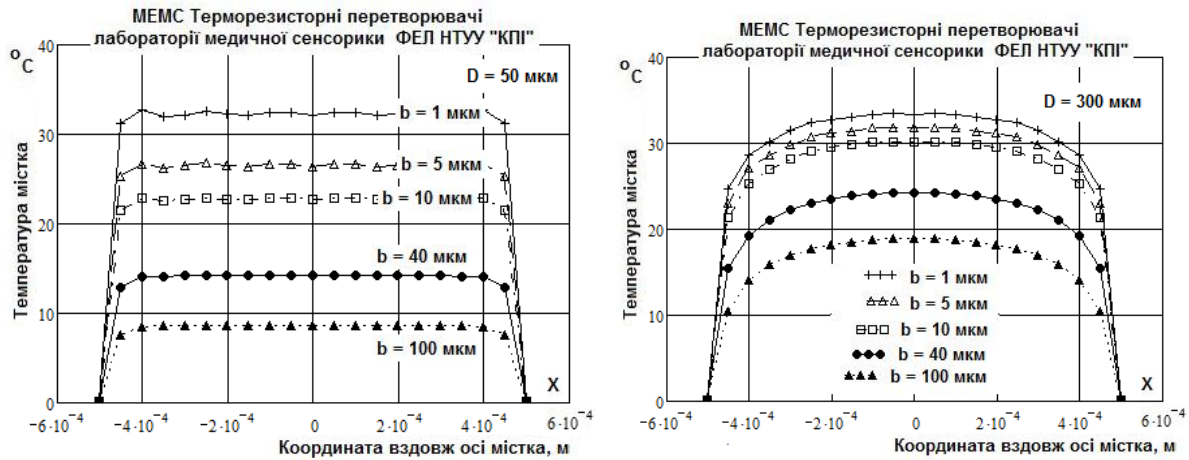
(2.13),

де  $\lambda_n = \frac{\pi}{2} (2n+1)$ ,  $\lambda_m = \frac{\pi}{2} (2m+1)$ ,  $\sigma_{n,m} = \sqrt{(\lambda_n)^2 + (\frac{D}{L/2})^2 (\lambda_m)^2}$ .

На рис. 2.6 і 2.7 наведено отримані в роботі результати розрахунків відповідно до (2.12) розподілу температури середовища в площині одиничного місткового ТГЕ. Сумарна розсіювана на ТГЕ потужність  $P_h$  приймається рівномірно розподіленою по його площі. З наведених рисунків видно істотні залежності температури середовища від геометричних параметрів каналу, які полягають у наступному:

1. У відносно неглибокому каналі  $2D = 100$  мкм збільшення поверхневої густини потужності ТГЕ на порядок (звуження ТГЕ від 10 мкм

до 1 мкм) призводить до росту температури його перегріву в 1,5 рази (приблизно від 20 до 30 °C при  $P_C = 2$  мВт).



а)  $2D=D_u+D_d=100$  мкм;

б)  $2D=D_u+D_d=600$  мкм

Рис. 2.6. Розрахунковий розподіл температури повітря в каналі вздовж осьової лінії місткового нагрівача. Розсіювана потужність  $P = 2$  мВт

2. Для каналу глибиною  $2D = 600$  мкм зміни ширини місткового ТГЕ менше 10 мкм при збереженні сталого значення потужності практично не змінює температури вздовж його осьової лінії (криві на рис. 2.6 б) практично накладаються). Причому температура перегріву відносно вузького ТГЕ практично не змінюється при зміні висоти каналу від 100 до 600 мкм (рис. 2.6 б)); ситуація наближується до теплообміну тонкого нагрівача з необмеженим оточуючим середовищем при співвідношенні  $(b/D) \leq 0,02$ . Якісно ситуація відповідає обернено пропорційній залежності коефіцієнту теплообміну поверхні ТГЕ з оточуючим середовищем від його характерного розміру (в даному випадку – ширини) і в результаті температура перегріву ТГЕ залишається незмінною незважаючи на зростання поверхневої густини потужності.

Отриманий результат ілюструється також серією розрахунків за (2.12), в яких фіксується ширина ТГЕ  $b$ , а параметром виступає висота каналу  $2D=D_u+D_d$ , рис. 2.7. Криві отримано для одиночних містків шириною 10 мкм та 40 мкм і довжиною  $L=1$  мм при  $P_h=2$  мВт.

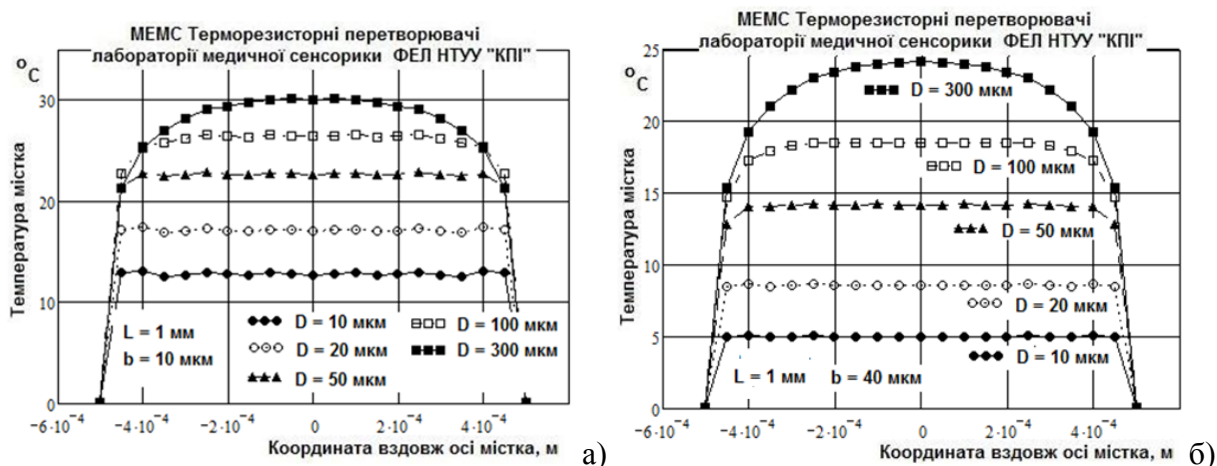


Рис. 2.7. Розрахунковий розподіл температури в каналі вздовж осьової лінії місткового нагрівача шириною: а)  $b=10$  мкм, б)  $b=40$  мкм. Розсіювана потужність  $P = 2$  мВт

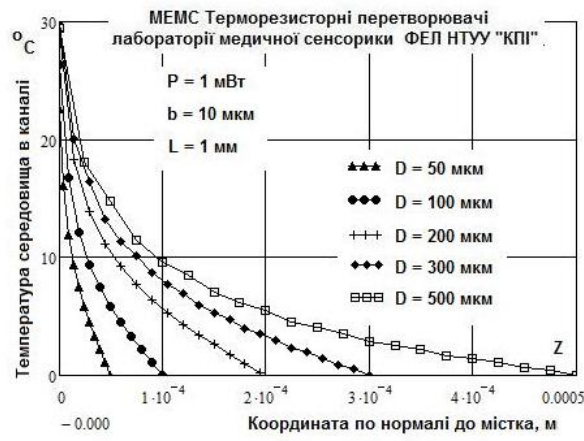
Серію розрахунків залежності розподілу температури по висоті каналу над ТГЕ, отриману для одиночних містків довжиною  $L=1$  мм, шириною  $b=1$  мкм,  $b=10$  мкм і  $b=40$  мкм наведено на рис. 2.8, де видно:

- в результаті зміни густини потужності нагрівача в 100 разів температура перегріву середовища на поверхні місткового ТГЕ змінюється приблизно на порядок (рис. 2.8 а) і б));

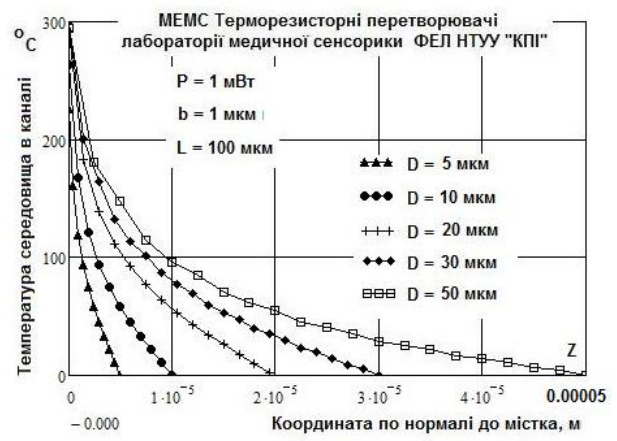
- для місткового ТГЕ шириною  $b=40$  мкм і для висоти каналу менше 300 мкм спостерігається близький до лінійного розподіл температури в каналі (рис. 2.8 в) і г)); при збільшенні висоти каналу понад 300 мкм спостерігається помітне відхилення характеру розподілу від лінійного;

- для висоти каналу більше 300 мкм розподіл температури в каналі над містковим ТГЕ шириною  $b=40$  мкм і довжиною 1 мм практично не змінюється (рис. 2.8 г), криві для  $D=300$  мкм та  $D=600$  мкм майже накладаються), отже теплообмін ТГЕ з середовищем втрачає залежність від геометрії каналу і визначається теплопровідністю середовища і геометрією містка.

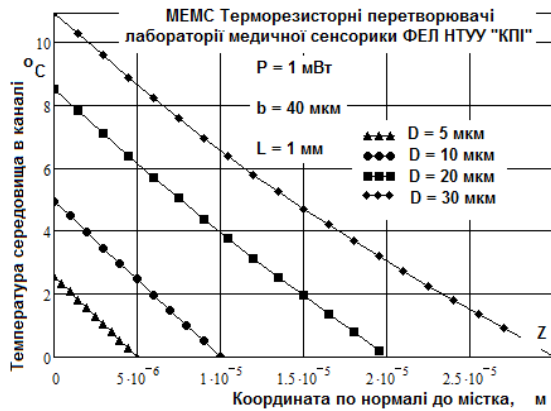
Проінтегрувавши (2.13 б) для  $\Delta T_C(x; y_2; z=0)$ , знаходимо середню по площі температуру середовища в каналі прямокутного перетину в площині місткового ТГЕ  $\Delta T_{cm}$ ):



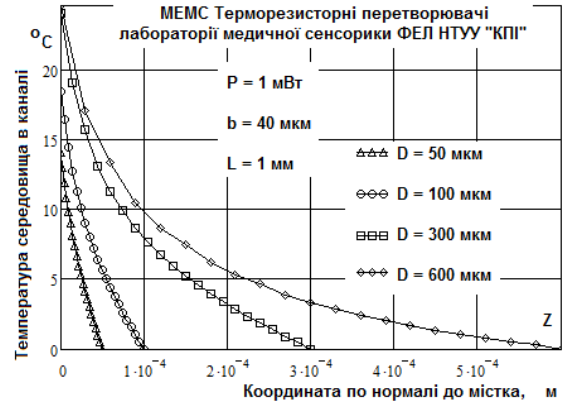
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.8. Розрахунковий розподіл температури в повітряному середовищі по нормалі над нагрівачем при зміні висоти каналу і ширини містка як параметрів

$$\Delta T_{cm} = \sum_{N=0}^{\infty} \sum_{M=0}^{\infty} \frac{1}{b} \int_{-b/2}^{b/2} dx * \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{2D(-1)^m P_{central}}{kL\lambda_m b (\sigma_{n,m})^2} * \{1 - \exp[-\sigma_{n,m} \frac{b}{2D}] (\cosh[-\sigma_{n,m} \frac{y}{D}]) \cos[\lambda_m \frac{2x}{L}]\} dy,$$

$$\Delta T_{cm}(b, D, L, k, P) = \frac{2DP_c}{kLb} \sum_{N=0}^{\infty} \sum_{M=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \sin(\lambda_m)}{(\lambda_m)^2 (\sigma_{n,m})^2} \{1 + \frac{D}{2b\sigma_{n,m}} (\exp[-\sigma_{n,m} \frac{b}{D}] - 1)\}$$

(2.14).

Тепловий опір заповненого нерухомим середовищем каналу прямокутного поперечного перерізу  $R_{thc}$  [°C/Вт] визначаємо із (2.14):

$$R_{thc} = \frac{2D}{kLb} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \sin(\lambda_m)}{(\lambda_m)^2 (\sigma_{n,m})^2} \left\{ 1 + \frac{D}{b\sigma_{n,m}} (\exp[-\sigma_{n,m} \frac{b}{D}] - 1) \right\}. \quad (2.15)$$

За (2.15) будемо серію кривих залежності теплового опору заповненого повітрям каналу прямокутного перерізу від його висоти і ширини містка:

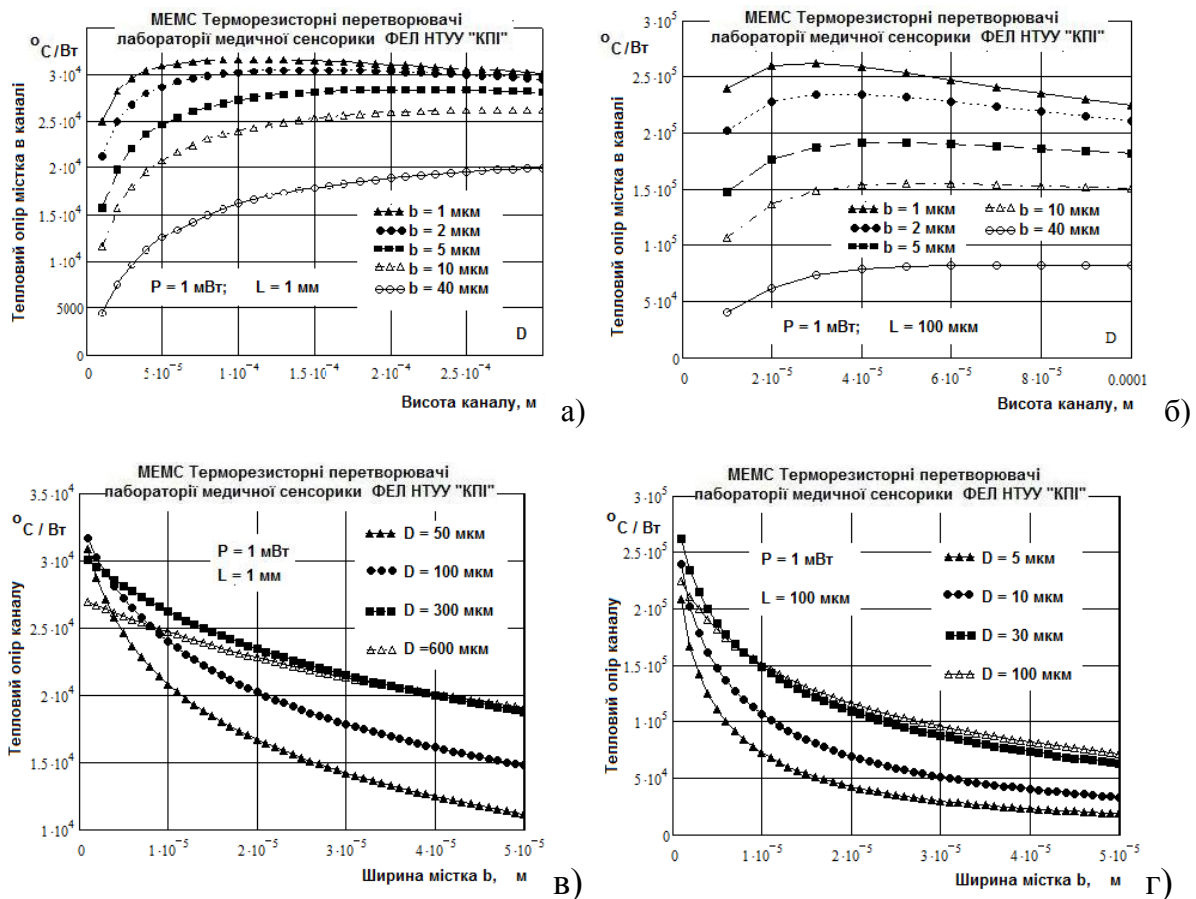


Рис. 2.9. Розрахункова залежність теплового опору заповненого повітрям каналу прямокутного перерізу від його висоти і ширини містка

Як видно із рис. 2.9, тепловий опір каналу шириною L=1 мм зазнає насичення для висоти понад 300 мкм. Для фіксованих загальної потужності нагрівача і висоти каналу немає можливості отримати вищі робочі температури ТГЕ, керуючись лише збільшенням густини потужності за рахунок зменшення площі тепловиділення (звуження ТГЕ). Зменшення ширини ТГЕ починаючи з певних значень відношення його ширини до висоти каналу (орієнтовно  $(b/D) \leq 0,02$ ) призводить до



обернено пропорційної до ширини ТГЕ зміни коефіцієнту теплообміну з його поверхні. Збільшення висоти каналу чи звуження ширини ТГЕ не може призвести до істотного росту теплового опору при  $(b/D) \leq 0,02$ .

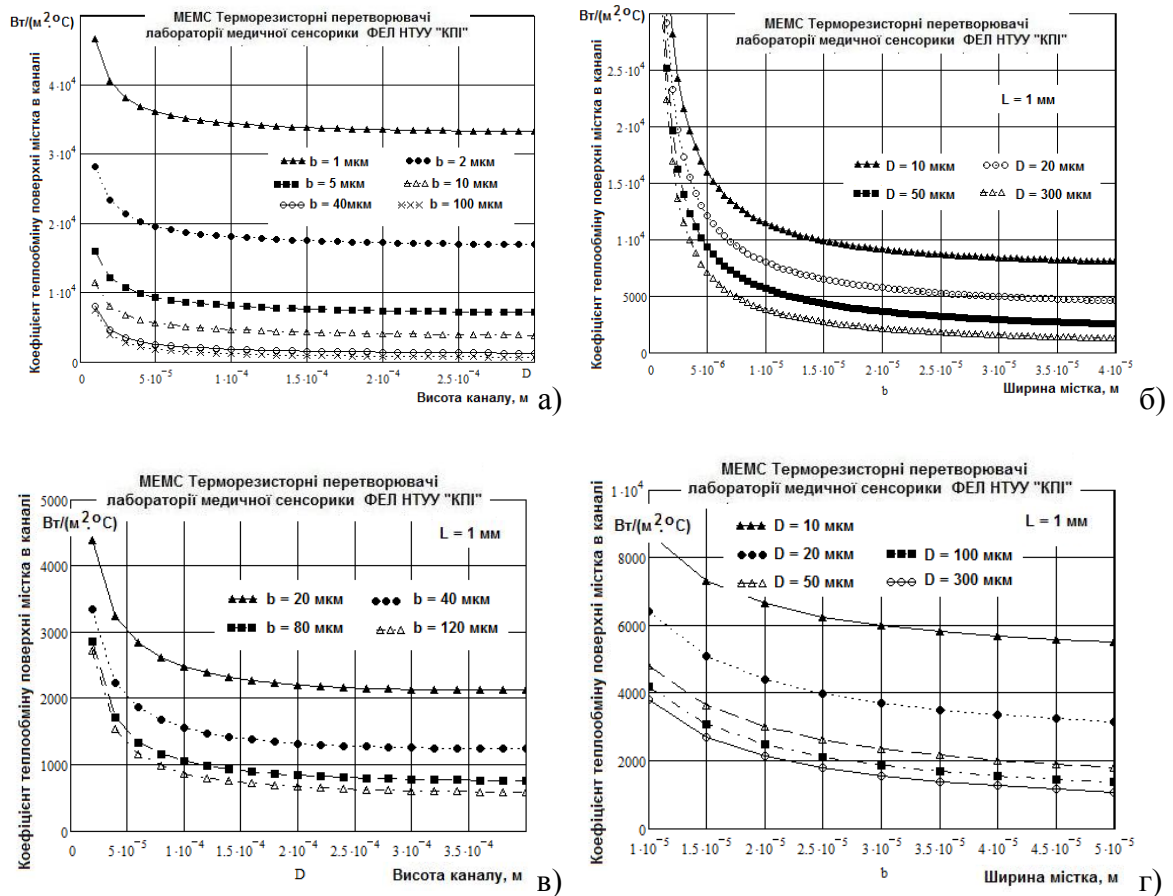


Рис. 2.10. Розрахункова залежність усередненого коефіцієнту теплообміну поверхні місткового нагрівача довжиною  $L=1$  мм в заповненому повітрям каналі за нормальних умов від ширини містка  $b$  і висоти каналу  $D$

Як видно з (2.15), (2.17), рис. 2.6 а) і 2.7 а), сумарний тепловий опір повітряного середовища в каналі за нормальних умов і коефіцієнт теплообміну одиниці площі ТГЕ довжиною  $L=1$  мм з корпусом за рахунок теплопровідності істотно залежить від ширини нагрівача менше 15 мкм і практично не залежить від висоти каналу, вищого за 50 мкм. Результат досить важливий з точки зору відтворюваності параметрів перетворювача при масовому виробництві: витримувати ширину місткового ТГЕ порядку декількох мікрон і більше значно простіше ніж висоту каналу порядку десятків – сотень мікрон.



Усереднений коефіцієнт теплообміну  $H(b,D,k)$  [Вт/(°С·м²)] з одиниці площі поверхні місткового ТГЕ в каналі прямокутного перетину відповідно до (2.5) і (2.6) знаходимо із (2.14) (за площу теплообміну приймається поверхня з обох боків ТГЕ, тобто  $S_{\text{пов}} = 2 \cdot b \cdot L$ ):

$$H(b,D,k) = \frac{k}{4D \sum_{N=0}^{\infty} \sum_{M=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \sin(\lambda_m)}{(\lambda_m)^2 (\sigma_{n,m})^2} \left\{ 1 + \frac{D}{b \sigma_{n,m}} (\exp[-\sigma_{n,m} \frac{b}{D}] - 1) \right\}} \cdot (2.16)$$

Чисельні результати проведених розрахунків наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3.

*Розрахункові значення теплового опору  $Z_{\text{thc}}$  повітряного середовища в каналі прямокутного перерізу висотою  $2D=D_U + D_D$  та коефіцієнт кондуктивного теплообміну  $H_{\text{Cond}}$ , [Вт/(°С м²)] з поверхні занурювального місткового ТГЕ розміром  $b$  x  $L$*

|   |                   |                   |                   |                   |                                     |                   |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------|
| <b>D, [мкм]</b>                                   | 100               |                   | 300               |                   |                                     |                   |
| <b>L, [мкм]</b>                                   | 500               |                   | 1000              |                   |                                     |                   |
| <b>b, [мкм]</b>                                   | 5                 | 10                | 5                 | 10                | 40                                  | 100               |
| <b><math>Z_{\text{thc}}</math>, [°С/Вт]</b>       | $5,07 \cdot 10^4$ | $4,48 \cdot 10^4$ | $2,71 \cdot 10^4$ | $2,44 \cdot 10^4$ | <b><math>1,98 \cdot 10^4</math></b> | $1,47 \cdot 10^4$ |
| <b><math>H_{\text{Cond}}</math>, [Вт/(°С м²)]</b> | $3,94 \cdot 10^3$ | $2,23 \cdot 10^3$ | $3,69 \cdot 10^3$ | $1,96 \cdot 10^3$ | <b><math>6,35 \cdot 10^2</math></b> | $3,40 \cdot 10^2$ |

### Триелементний містковий перетворювач в каналі.

Розподіл температур в каналі в околиці багатоеlementного ТРПП в лінійному наближенні визначено як суперпозицію розподілів, створюваних кожним з ТГЕ відповідно до виразів (2.13), де відповідно  $\Delta T_1(x, y_1, z)$ ,  $\Delta T_h(x, y_2, z)$ ,  $\Delta T_r(x, y_3, z)$  – перевищення температури середовища в околиці кожного з ТГЕ відносно температури на значному віддаленні від них. Враховуючи характер розв'язку для одиночного ТГЕ, перехід до триелементного ТРПП виконано шляхом поділу поздовжньої по відношенню до потокоформуєчого каналу координати на області з наступною суперпозицією розв'язків (2.12) для семи окремих областей вздовж каналу з локальними координатами  $y_j$  кожна,  $j=1,2,\dots,7$  (відповідно області до першого та після третього нагрівача, три області ТГЕ та два проміжки між ними). Ввівши власні координати для кожного ТГЕ та

виконуючи суперпозицію розв'язків по кожній області окремо, отримуємо шукані вирази відповідно до рис. 2.11.

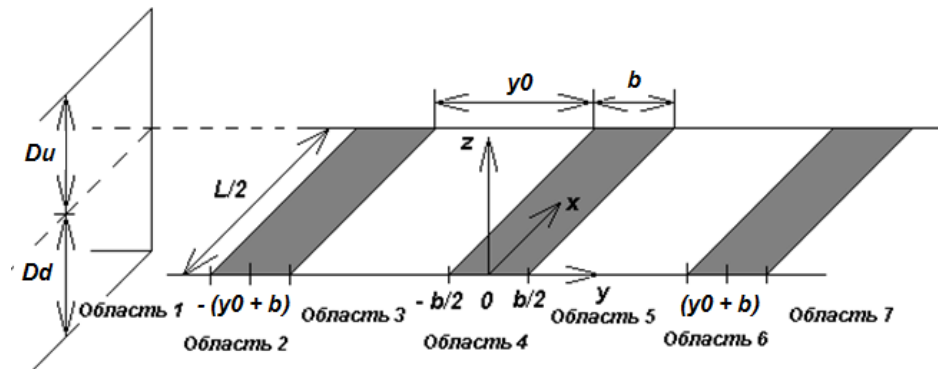


Рис. 2.11. Поділ площини триелементного МЕМС ТРПП на області 1-7 в площині ТГЕ і ТЧЕ шириною  $b$  та довжиною  $L$

Остаточний результат знаходимо як суперпозицію для кожної з областей  $y_1, y_2..y_7$ . Для трьох містків шириною  $b=40$  мкм, довжиною  $L=1$  мм, розміщених впоперек каналу висотою  $2D=D_u+D_d=600$  мкм на відстані  $a=40$  мкм один від одного за умови рівномірно розподіленої між боковими ТГЕ сумарної потужності 10 мВт ( $P_l = P_r = 5$  мВт;  $P_c = 0$  мВт) отримуємо наведені на рис. 2.12 криві:

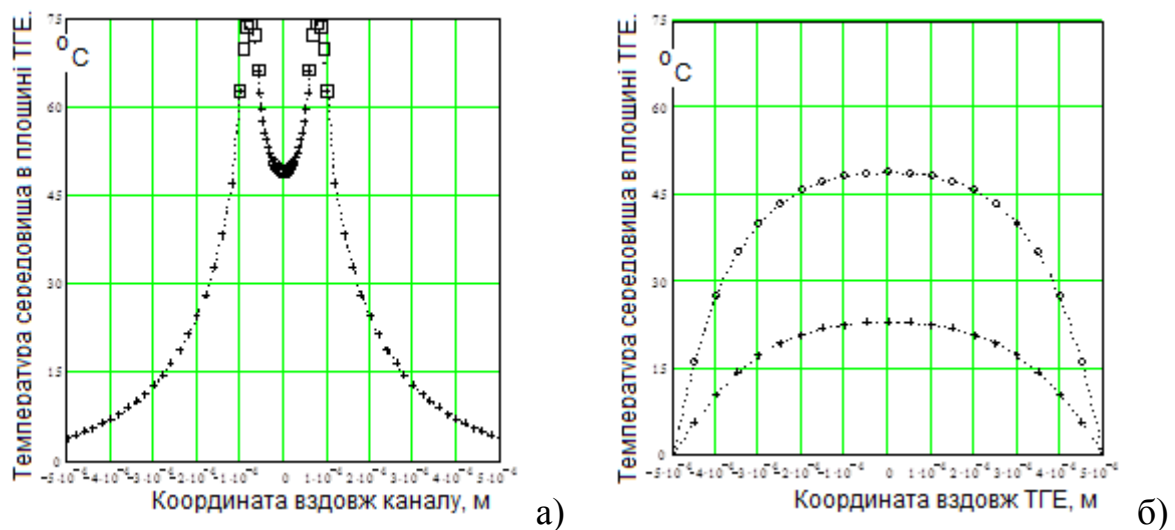


Рис. 2.12. Розрахунковий розподіл температури в потокоформуючому каналі висотою  $2D=D_{up}+D_{down}=600$  мкм при розсіюванні потужності  $P_l = P_{pr} = 5$  мВт на бокових нагрівачах; а) – розподіл температури вздовж осьової лінії каналу в площині нагрівачів; б) – розподіл температури вздовж нагрівача в його площині та на висоті  $D_{up}/2$ ;

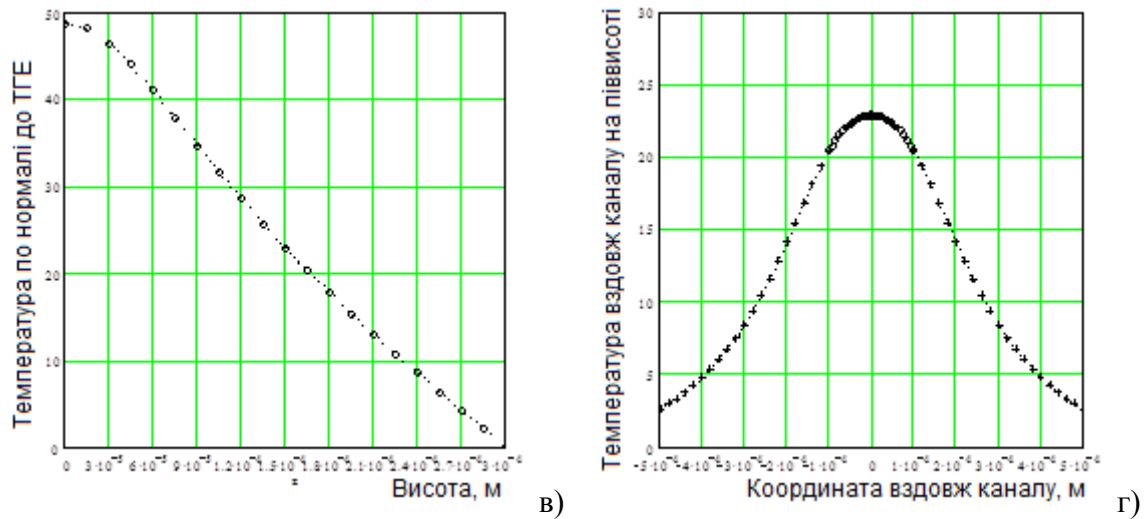


Рис. 2.12. продовження: в) – розподіл температури над нагрівачем по нормалі;  
г) – розподіл температури вздовж каналу на висоті  $D_{up}/2$ .

Результат розрахунку для аналогічних трьох містків в каналі на порядок більшої висоти  $2D=D_{up}+D_{down}=6$  мм наведено на рис. 2.13. На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що збільшення висоти каналу на порядок (з 600 мкм до 6 мм) слабо впливає на розподіл температури в площині ТГЕ, однак істотно змінює розподіл температури по висоті каналу, що підтверджує більш ефективне накладання профілів температури та швидкості середовища в каналах висотою  $2D \leq 600$  мкм.

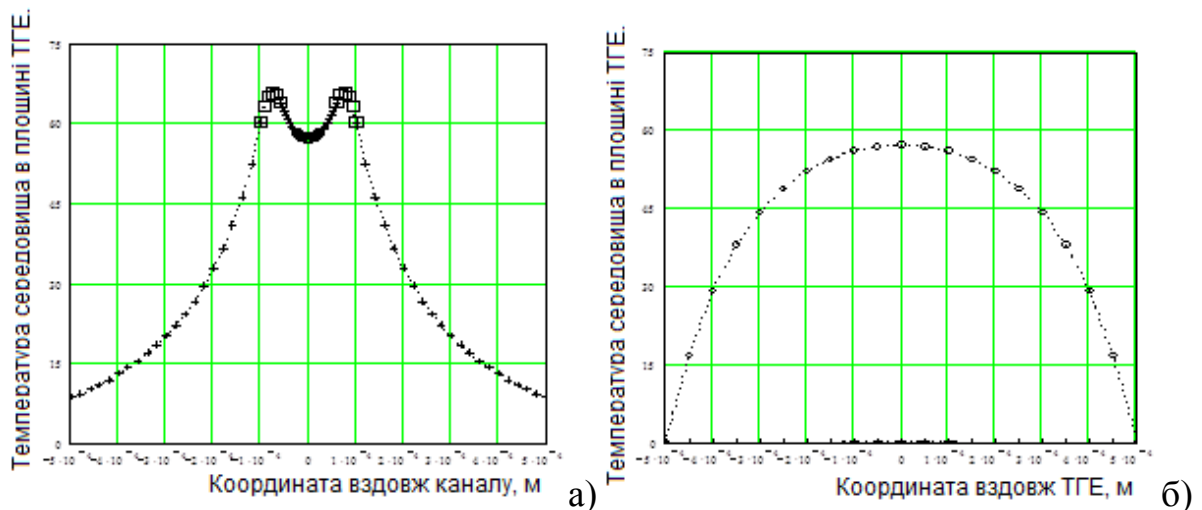


Рис. 2.13. Розрахунковий розподіл температури в об'ємі потокоформуєчого каналу висотою  $2D=D_{up}+D_{down}=6$  мм при  $P_{л} = P_{пр} = 5$  мВт; а) – розподіл температури вздовж осьової лінії каналу в площині нагрівачів; б) – розподіл температури вздовж нагрівача в його площині та на висоті  $D_{up}/2$ ;

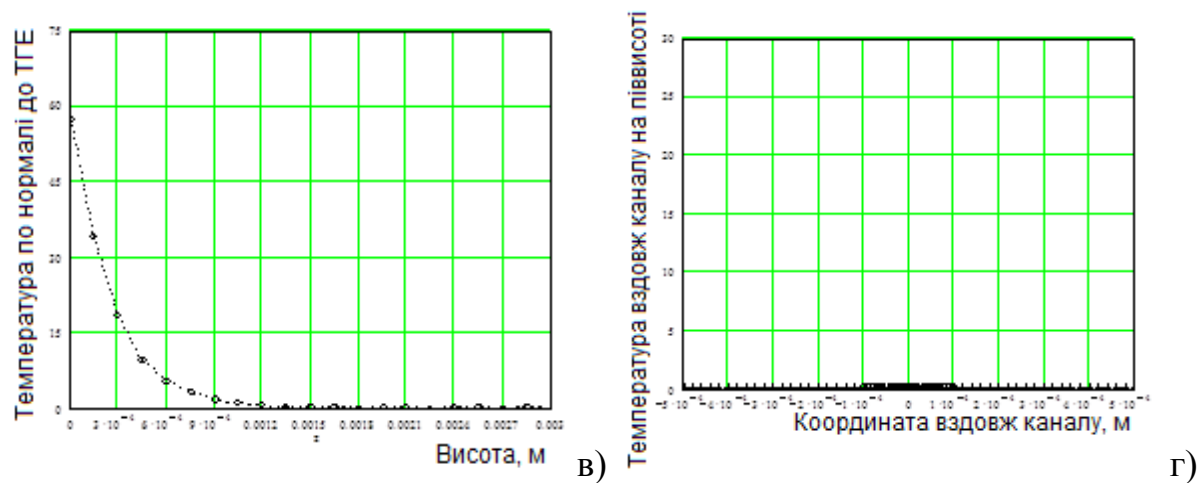


Рис. 2.13. продовження: в) – розподіл температури над нагрівачем по нормалі;  
г) – розподіл температури вздовж каналу на висоті  $D_{up}/2$

Істотно змінює ситуацію зменшення висоти каналу до  $2D=D_{up}+D_{down}=100+100$  мкм (результати наведено на рис. 2.14).

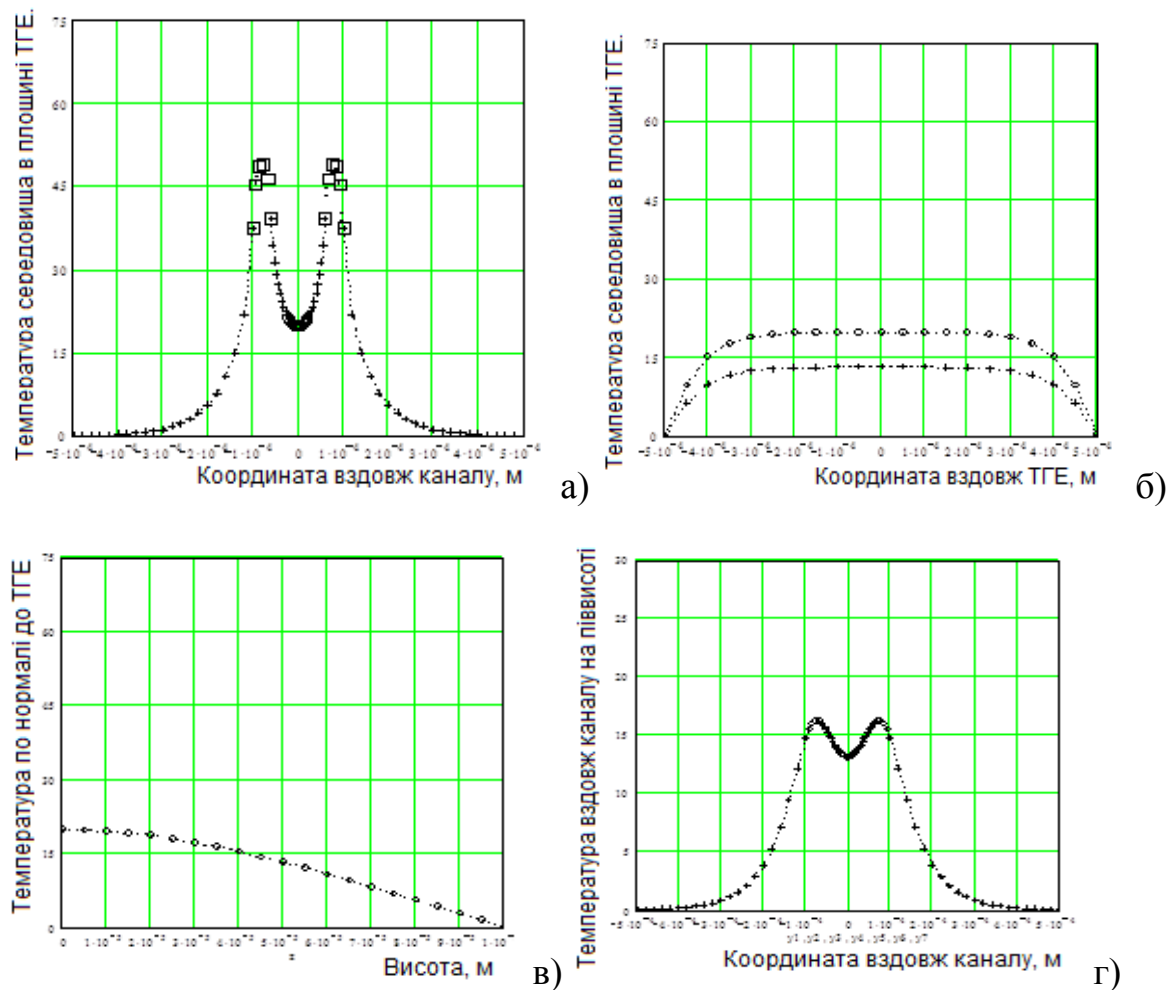


Рис. 2.14. Розрахунковий розподіл температури в потокоформуєчому каналі  
висотою  $2D=D_{up}+D_{down}=200$  мкм

#### **2.4.2. Електропровідний місток безпосереднього нагрівання на опорах сталої температури. Розрахунок коефіцієнту розсіювання потужності та аналіз впливних величин**

Отримані в попередньому розділі результати використаємо для отримання аналітичних залежностей електричного опору активного місткового ТГЕ від розсіюваної на ньому потужності електричного струму та умов теплообміну в наближенні однорідного по довжині електропровідного містка на опорах сталої температури. Електричний опір та температура містка зазнають змін під впливом наступних факторів: виділення джоулевого тепла; поверхневого теплообміну з середовищем; теплообміну з елементами кріплення шляхом теплопровідності; зміни температури оточуючого середовища.

Аналітичний вираз для задачі розподілу температури вздовж дрютяної конструкції електропровідного містка наведено в [102], поглиблено аналіз в [31, 117], а також в [16] для полікремнієвих МЕМС перетворювачів.

Конструкція ТІС у МЕМС виконанні включає електропровідний місток шириною  $b$ , товщиною електропровідного прошарку  $d_e$  і довжиною  $L$ , розміщений на діелектричній підкладці і захищений шаром діелектрику. Місток закріплено на корпусі з температурою точок опори, рівною температурі навколишнього середовища  $T_{н.с.}$ . Загальна товщина містка  $d_m$ , відповідно периметр поперечного перерізу містка  $p=2(b+d_m)$ , загальна площа поперечного перерізу  $S_m=(b \cdot d_m)$ , площа поперечного перерізу електропровідного прошарку  $S_e=(b \cdot d_e)$ . Електропровідний прошарок характеризується лінійно залежним від температури питомим електричним опором  $\rho(T)=\rho_0(1+\alpha(T-T_0))$ .

Відповідно до викладених в розділі 2.1 засад аналізу багат шарових плівкових МЕМС-структур, в подальшому для містка будемо використовувати ефективні значення коефіцієнту теплопровідності  $k_m$ ,

густини  $\gamma_m$  і питому теплоємність  $C_m$ , а також єдиний для всіх зовнішніх поверхонь коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем  $H$ , розрахований в попередньому розділі [118, 119].

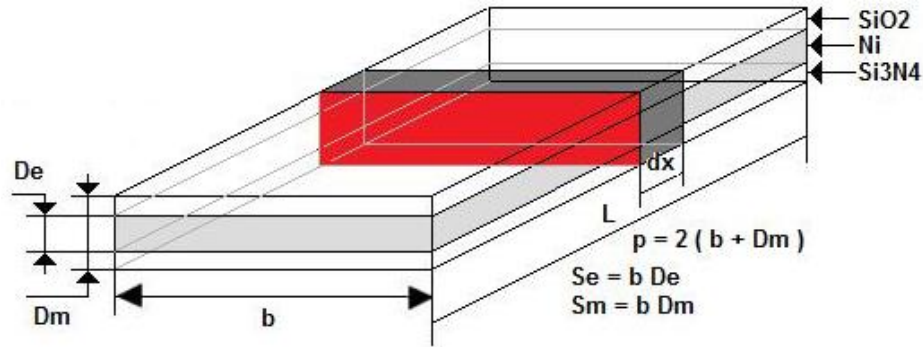


Рис. 2.15. Ескіз елементу  $dx$  багат шарового місткового ТРПП до розрахунку теплообмін з навколишнім середовищем і сусідніми елементами

Елементарний об'єм містка довжиною  $dx$  відповідно до рис. 2.15 визначається через площу поперечного перерізу як  $dV = S_m dx$ , площа теплообміну з навколишнім середовищем становить  $p dx$ , теплообмін між суміжними елементарними ділянками відбувається шляхом теплопровідності через торці. Елементарна кількість джоулевого тепла  $dQ_{Дж}$ , що виділяється в елементі  $dx$  в результаті протікання струму  $I$  за час  $dt$  визначиться виразом:

$$dQ_{Дж} = I^2 dR(T) dt = \frac{I^2 \rho_0 (1 + \alpha(T - T_0)) dx}{S_e} dt \quad (2.17).$$

Кількість тепла  $dQ_{Ак}$ , що акумулюється в елементі  $dx$  при зміні температури  $dT$ :

$$dQ_{Ак} = C_m \gamma_m dV dT = C_m \gamma_m S_m dx dT \quad (2.18).$$

Кількість тепла  $dQ_{Конд}$ , яким елементарний об'єм обмінюється з сусідніми елементами за рахунок теплопровідності вздовж містка:

$$dQ_{\text{Конд}} = k_m S_m \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_x - \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx} \right] dt = k_m S_m \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dt \quad (2.19),$$

Кількість тепла, що втрачається за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем відповідно до закону теплообміну Ньютона:

$$dQ_{\text{Обм}} = H p dx (T - T_{\text{н.с.}}) dt \quad (2.20).$$

Керуючись законом збереження енергії, отримуємо:

$$dQ_{\text{Ак}} = dQ_{\text{Джс}} - dQ_{\text{Конд}} - dQ_{\text{Обм}} \quad (2.21).$$

Після підстановок (2.17) – (2.20) в (2.21) та перетворень отримуємо вираз для розподілу температури вздовж містка - диференціальне рівняння в частинних похідних від температурного натиску  $(T - T_c)$ :

$$C_m \gamma_m S_m \frac{\partial (T - T_{\text{н.с.}})}{\partial t} = k_m S_m \frac{\partial^2 (T - T_{\text{н.с.}})}{\partial x^2} - H p (T - T_{\text{н.с.}}) + \frac{I^2 \rho_0 (1 + \alpha (T - T_0))}{S_e} \quad (2.22).$$

Рівняння (2.25) в загальному випадку не лінійне, оскільки і коефіцієнт теплопровідності матеріалу містка, і сумарний коефіцієнт теплообміну  $H$ , особливо в радіаційній і конвективній складовій, є температурно залежними. При невеликих температурних натисках (2.22) є лінійним, а його розв'язок може бути отриманим в аналітичному вигляді. Граничні та початкові умови задаємо в наступному вигляді:

$$T(x=0, t) = T(x=L, t) = T(x, 0) = T_{\text{н.с.}} \quad (2.23).$$

Розв'язок останнього рівняння в лінійному наближенні з вказаними граничними умовами описує розподіл температури вздовж містка в часі з моменту початку пропускання через місток сталого струму  $I$  [31]:

$$T(x,t)-T_{н.с.} = \frac{I^2 \rho_0 \frac{L}{S_e} (1 + \alpha(T_{н.с.} - T_0))}{HpL - I^2 \rho_0 \alpha \frac{L}{S_e}} \left\{ \begin{aligned} & 1 - \frac{sh(\sqrt{\frac{L}{k_{M M} S_e}} * (HpL - I^2 \rho_0 \alpha \frac{L}{S_e}) * \frac{x}{L}) + sh(\sqrt{\frac{L}{k_{M M} S_e}} * (HpL - I^2 \rho_0 \alpha \frac{L}{S_e}) * (\frac{L-x}{L}))}{sh(\sqrt{\frac{L}{k_{M M} S_e}} * (HpL - I^2 \rho_0 \alpha \frac{L}{S_e}))} \\ & - \frac{1}{(2n-1)(\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{\frac{L}{k_{M M} S_e} (HpL - I^2 \rho_0 \alpha \frac{L}{S_e})} + 1)} * \\ & - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\frac{(2n-1)\pi}{L} x) \exp(-[\frac{(2n-1)^2 \pi^2 k_{M M}}{C_{M M} \gamma_{M M} L^2} + \frac{1}{C_{M M} \gamma_{M M} L S_e} (HpL - I^2 \rho_0 \alpha \frac{L}{S_e})]t) \end{aligned} \right\} \quad (2.24).$$

Після введення позначення для потужності джоулевого тепла при температурі містка  $T(x,t)=T_0$ :

$$P_0 = I^2 \rho_0 \frac{L}{S_e} \quad (2.25)$$

і безрозмірного комплексу  $\mu$ :

$$\mu = \frac{L}{k_{M M} S_e} (HpL - I^2 \rho_0 \alpha \frac{L}{S_e}) = \frac{L}{k_{M M} S_e} (HpL - \alpha P_0) \quad (2.26)$$

із (2.24) отримуємо:

$$T(x,t)-T_c = \frac{P_0 [1 + \alpha(T_c - T_0)]}{\frac{k_{M M} S_e}{L} \mu} \left\{ \begin{aligned} & 1 - \frac{sh(\sqrt{\mu} \frac{x}{L}) + sh(\sqrt{\mu} [1 - \frac{x}{L}])}{sh\sqrt{\mu}} \\ & - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)(\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{\mu} + 1)} \sin((2n-1)\pi \frac{x}{L}) \exp[-\frac{k_{M M}}{C_{M M} \gamma_{M M} L^2} ((2n-1)^2 \pi^2 + \mu)t] \end{aligned} \right\} \quad (2.27).$$

Розв'язок (2.27) складається з доданку, що визначає стаціонарний розподіл температури в містку  $\Delta T(x)=T(x)-T_c$ :



$$\Delta T(x) = (T(x,t) - T_c) = \frac{P_0 [1 + \alpha(T_c - T_0)]}{\frac{k_{\text{м}} S_{\text{м}}}{L} \mu} \left\{ 1 - \frac{\text{sh}(\sqrt{\mu} \frac{x}{L}) + \text{sh}(\sqrt{\mu} [1 - \frac{x}{L}])}{\text{sh} \sqrt{\mu}} \right\} \quad (2.28)$$

та доданку, що описує процес її встановлення  $\Delta T(x,t) = T(x,t) - T_{\text{н.с.}}$  з моменту пропускання через місток сталого струму  $I$ :

$$\Delta T(x,t) = T(x,t) - T_c = - \frac{P_0 [1 + \alpha(T_c - T_0)]}{\frac{k_{\text{м}} S_{\text{м}}}{L} \mu} * \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1) \left( \frac{(2n-1)^2 \pi^2}{\mu} + 1 \right)} \sin((2n-1)\pi \frac{x}{L}) \exp[-\frac{k_{\text{м}}}{C_{\text{м}} \gamma_{\text{м}} L^2} ((2n-1)^2 \pi^2 + \mu)t]. \quad (2.29)$$

Відповідно до (2.27) виконуємо розрахунки розподілу температури по довжині містка в стаціонарній ситуації і в процесі її встановлення з моменту пропускання через місток ступінчастого струму. Із (2.28) знаходимо стаціонарну температуру перегріву посередині містка  $\Delta T(x=L/2)$  та середню по довжині температуру перегріву  $\Delta T$  відносно навколишнього середовища:

$$\Delta T(x = \frac{L}{2}) = \frac{P_0 [1 + \alpha(T_c - T_0)]}{\frac{k_{\text{м}} S_{\text{м}}}{L} \mu} \left\{ 1 - 2 \frac{\text{sh}(\frac{\sqrt{\mu}}{2})}{\text{sh} \sqrt{\mu}} \right\} = \frac{P_0 [1 + \alpha(T_c - T_0)]}{\frac{k_{\text{м}} S_{\text{м}}}{L} \mu} \left\{ 1 - \frac{1}{\text{ch}(\frac{\sqrt{\mu}}{2})} \right\} \quad (2.30);$$

$$\Delta T = \frac{1}{L} \int_0^L (T(x) - T_c)_{\text{см}} dx = \frac{P_0 (1 + \alpha(T_c - T_0))}{\frac{k_{\text{м}} S_{\text{м}}}{L} \mu} \left\{ 1 - \frac{2}{\sqrt{\mu}} [\coth(\sqrt{\mu}) - \frac{1}{\sinh(\sqrt{\mu})}] \right\} \quad (2.31).$$

Миттєве значення середньої по довжині ТГЕ температури містка в процесі встановлення  $\Delta T(t)$  знаходимо за виразом:

$$\Delta T(t) = \frac{1}{L} \int_0^L (T(x;t) - T_c) dx = \frac{P_0(1 + \alpha(T_c - T_0))}{\frac{k_m S_m}{L} \mu} \left\{ 1 - \frac{2}{\sqrt{\mu}} (\coth[\sqrt{\mu}] - \frac{1}{\sinh[\sqrt{\mu}]}) - \right.$$

$$\left. - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(2n-1)^2 \pi (\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{\mu} + 1)} \exp[-\frac{k_m}{C_m \gamma_m L^2} ((2n-1)^2 \pi^2 + \mu)t] \right\}$$

(2.32)

Результат виконаного за (2.32) розрахунку для містка довжиною  $L=1$  мм, шириною  $b=40$  мкм та загальною товщиною  $d=0,4$  мм за потужності  $P_0 \approx 4$  мВт наведено на рис. 2.14. Чисельне значення коефіцієнту теплообміну  $H=600$  [Вт/(м<sup>2</sup>·°C)] взято з попереднього розділу.

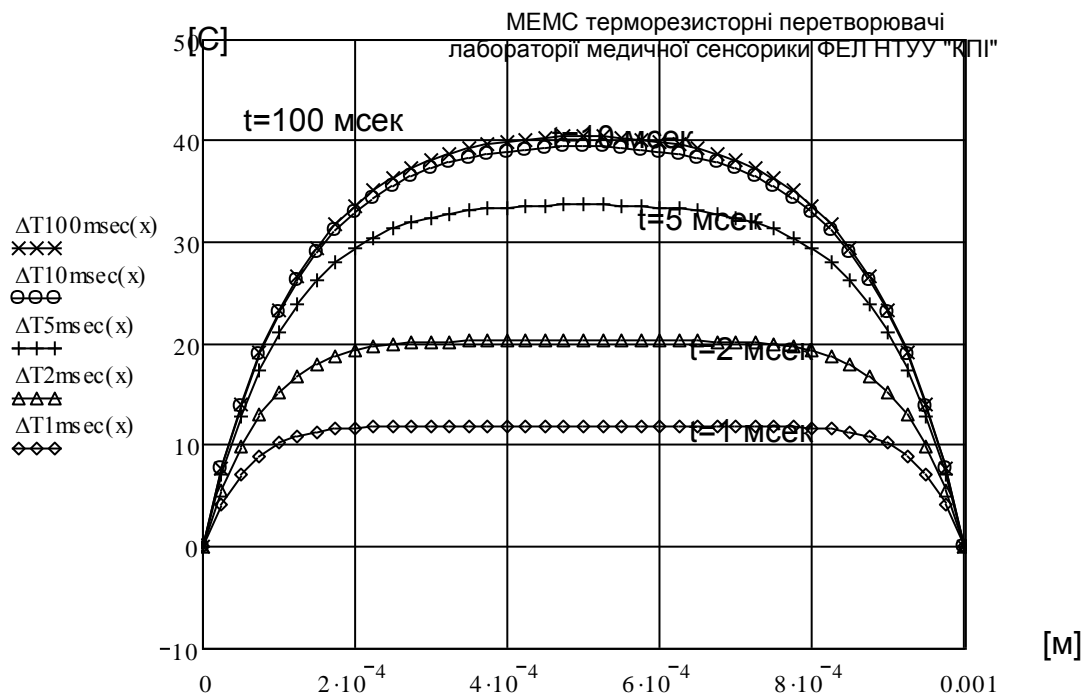


Рис. 2.16. Встановлення стаціонарного розподілу температури вздовж електропровідного містка, закріпленого на опорах сталої температури; довжина, ширина і товщина містка відповідно:  $L=1$  мм;  $b=40$  мкм,  $d=0,4$  мм, коефіцієнт теплообміну з поверхні  $H=600$  [Вт/(м<sup>2</sup>·°C)], потужність  $P_0 \approx 4$  мВт

Після підстановки  $\mu$  в (2.31) отримуємо:

$$\Delta T = \frac{P_0[1 + \alpha(T_c - T_0)]}{HpL - \alpha P_0} \left\{ 1 - \frac{2}{\sqrt{\frac{L}{k_m S_m} (HpL - \alpha P_0)}} \left[ \coth\left(\sqrt{\frac{L}{k_m S_m} (HpL - \alpha P_0)}\right) - \frac{1}{\sinh\left(\sqrt{\frac{L}{k_m S_m} (HpL - \alpha P_0)}\right)} \right] \right\} \quad (2.33)$$

В (2.33) наявні параметри, які визначають електрично керовану середню температуру ТГЕ, а отже – його активний електричний опір, вольт-амперну характеристику (ВАХ) та робочу точку за температурою: геометричні параметри містка; тепло і електро - фізичні параметри матеріалів: питома теплоємність  $C_m$ , густина  $\gamma_m$ , теплопровідність  $k_m$ ; питомий опір  $\rho_0$  та температурний коефіцієнт опору  $\beta$  провідного прошарку; фактори, що впливають на ВАХ через коефіцієнт теплообміну  $H$ , формують чутливість до вимірювального параметру і впливних величин.

Вказані параметри визначають характер вимірювального перетворення активного ТРПП і дозволяють керувати чутливістю містка до параметрів середовища. Інтегральний коефіцієнт теплообміну  $H$  - інформаційний фактор вимірювального перетворення. Його величину, як показано в попередньому розділі для стаціонарного режиму теплообміну, визначає також низка геометричних параметрів ТГЕ та тіл теплообміну, а також теплофізичні параметри та стан руху оточуючого середовища.

**Аналіз чутливості місткового теплогенеруючого елементу до зміни коефіцієнту теплообміну, струму живлення і температури середовища.**

Із (2.36) оцінимо чутливість температури містка до зміни коефіцієнту теплообміну  $H$ , струму живлення  $I$  та температури середовища  $T_c$ .

$$D(\Delta T) = \frac{\partial(\Delta T)}{\partial H} \delta H + \frac{\partial(\Delta T)}{\partial I} \delta I + \frac{\partial(\Delta T)}{\partial T_c} \delta T_c = G_H \delta H + G_I \delta I + G_{T_c} \delta T_c \quad (2.34).$$

Взявши частинні похідні по кожному з параметрів в робочій точці, знаходимо відповідні аналітичні вирази для чутливості перетворювача до кожного з факторів:  $H$ ,  $I$  та  $T_C$  [120, 121]. Кожен з отриманих виразів для чутливостей  $G_H$ ,  $G_I$ ,  $G_{T_C}$  потребує детального аналізу.  $G_H$  визначає залежність середньої стаціонарної температури перегріву терморезисторного містка від параметрів середовища і геометрії ТРПП.

$$G_H = \frac{\partial(\Delta T)}{\partial H} = \frac{\partial\left(\frac{P_0\{1+\alpha(T_{н.с.}-T_0)\}}{\frac{k_m S}{L}\mu}\left\{1-\frac{2}{\sqrt{\mu}}\left(\coth[\sqrt{\mu}]-\frac{1}{\sinh[\sqrt{\mu}]}\right)\right\}\right)}{\partial\mu} \frac{\partial\mu}{\partial H} =$$

$$= -\frac{1}{\mu^2} \frac{P_0\{1+\alpha(T_C-T_0)\}}{\frac{k_m S}{L}} \left\{1+\frac{\cosh[\sqrt{\mu}]-1}{\sinh^2[\sqrt{\mu}]}-\frac{3}{\sqrt{\mu}}\left(\coth[\sqrt{\mu}]-\frac{1}{\sinh[\sqrt{\mu}]}\right)\right\} \frac{\partial\mu}{\partial H} \quad (2.35),$$

$$\text{де } \frac{\partial\mu}{\partial H} = \frac{\partial\left(\frac{L}{k_m S}(HpL-I^2\rho_0\alpha\frac{L}{S})\right)}{\partial H} = \frac{pL^2}{k_m S} \quad (2.36).$$

Після підстановки (2.36) в (2.35) і з урахуванням виразу для  $\mu$  в першому множнику отримуємо остаточний вираз для  $G_H$ :

$$G_H = -\frac{I^2\rho_0\frac{pL^2}{S_e}\{1+\alpha(T_{н.с.}-T_0)\}}{[(HpL-I^2\rho_0\alpha\frac{L}{S_e})]^2} \left\{1+\frac{\cosh[\sqrt{\mu}]-1}{\sinh^2[\sqrt{\mu}]}-\frac{3}{\sqrt{\mu}}\left(\coth[\sqrt{\mu}]-\frac{1}{\sinh[\sqrt{\mu}]}\right)\right\} \quad (2.37).$$

Залежність зміни температури містка внаслідок зміни струму живлення, що характеризується параметром  $G_I$ , знаходимо аналогічно. Оскільки температура ТРПП для незначних перегрівів характеризується близькою до лінійної залежністю від споживаної потужності, то залежність від струму має бути більш сильною за квадратичну за рахунок

внутрішнього позитивного зворотного електротеплового зв'язку для ТГЕ із додатним ТКО.

$$G_I = \frac{\partial\left(\frac{I^2 \rho_0 \frac{L}{S} \{1 + \alpha(T_C - T_0)\}}{\frac{kS}{L} \mu} \left\{1 - \frac{2}{\sqrt{\mu}} \left(\coth[\sqrt{\mu}] - \frac{1}{\sinh[\sqrt{\mu}]}\right)\right\}\right)}{\partial I} =$$

(2.38),

$$= \frac{I}{\alpha} [1 + \alpha(T_{н.с.} - T_0)] \frac{\partial\left(\left(\frac{HpL^2}{kS\mu^2} - \frac{1}{\mu}\right) \left\{1 - \frac{2}{\sqrt{\mu}} \left(\coth[\sqrt{\mu}] - \frac{1}{\sinh[\sqrt{\mu}]}\right)\right\}\right)}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial I}$$

де  $\frac{\partial \mu}{\partial I} = \frac{\partial\left(\frac{L}{kS} (HpL - I^2 \rho_0 \alpha \frac{L}{S})\right)}{\partial I} = \frac{2I \rho_0 \alpha L^2}{kS^2}$  (2.39).

Вплив температури оточуючого середовища на середню температуру містка знаходимо диференціюванням (2.37) по  $T_C$ :

$$G_{T_C} = \frac{\partial\left(\frac{P_0 \{1 + \alpha(T_C - T_0)\}}{\frac{kS}{L} \mu} \left\{1 - \frac{2}{\sqrt{\mu}} \left(\coth[\sqrt{\mu}] - \frac{1}{\sinh[\sqrt{\mu}]}\right)\right\}\right)}{\partial T_C} =$$

$$= \frac{1}{\left(\frac{HpL}{I^2 \rho_0 \alpha \frac{L}{S_e}} - 1\right)} \left\{1 - \frac{2}{\sqrt{\mu}} \left(\coth[\sqrt{\mu}] - \frac{1}{\sinh[\sqrt{\mu}]}\right)\right\}$$

(2.40).

На противагу прагненню досягти максимальних величин для перших двох параметрів чутливості  $G_H$  і  $G_I$ , останній параметр  $G_{T_C}$  природно мінімізувати. Конструктивно неможливо отримати його нульове значення за будь-яких значень параметра  $\mu$ , що впливає з аналізу кінцевого виразу в (2.44). Залежність перегріву від температури навколишнього середовища за умови сталої потужності виявляє кратну залежність від потужності

(робочої температури).  $T_C$  суттєво впливає як на поточне значення робочої температури ТРПП (і відповідно на його електричний опір, формуючи початковий «зсув нуля»), так і на крутизну характеристик перетворення (вирази для  $G_H$ ,  $G_I$ ). Тому структура вторинних вимірювальних перетворювачів має носити диференційний характер для компенсації впливу температури середовища. Отриманий вирази по кожному з параметрів  $G_H$ ,  $G_I$  (а саме наявність множника  $[1 + \alpha(T_C - T_0)]$ ) обґрунтовує необхідність введення коректуючих ланцюгів для компенсації впливу зміни температури середовища і визначає їх конкретну функціональну залежність від  $T_C$ .

### **Електричний опір теплогенеруючого елементу в одновимірній містковій моделі**

Електричний опір ТГЕ в одновимірній моделі містка знаходимо із (2.27) як середнє за довжиною за наступним виразом:

$$\begin{aligned}
 R(t) &= \frac{1}{L} \int_0^L R(x, t) dx = \frac{1}{L} \int_0^L \left( \rho_0 \frac{L}{S} (1 + \alpha[T(x, t) - T_0]) \right) dx = \\
 &= \frac{\rho_0 L}{S} \left\{ 1 + \alpha(T_C - T_0) + \alpha \frac{P_0 (1 + \alpha(T_C - T_0))}{\frac{kS}{L} \mu} \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\mu}} (\coth[\sqrt{\mu}] - \frac{1}{\sinh[\sqrt{\mu}]}) - \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(2n-1)^2 \pi \left( \frac{(2n-1)^2 \pi^2}{\mu} + 1 \right)} \exp\left[-\frac{k}{C\gamma L^2} ((2n-1)^2 \pi^2 + \mu)t\right] \right) \right\}
 \end{aligned}
 \tag{2.41}$$

Із (2.41) підтверджується однозначний зв'язок електричного опору ТГЕ і його температури. Отже, методи визначення електричного опору придатні для аналізу теплового стану ТРПП і навпаки. Приймавши струм

за незалежний параметр, отримуємо вираз для вольт-амперної характеристики (ВАХ) місткового ТГЕ:

$$U(t) = I \frac{\rho_0 L}{S} \left\{ 1 + \alpha(T_C - T_0) + \alpha \frac{P_0(1 + \alpha(T_C - T_0))}{\frac{kS}{L} \mu} \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\mu}} (\coth[\sqrt{\mu}] - \frac{1}{\sinh[\sqrt{\mu}]}) - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(2n-1)^2 \pi (\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{\mu} + 1)} \exp[-\frac{k}{C\gamma L^2} ((2n-1)^2 \pi^2 + \mu)t] \right) \right\} \quad (2.42).$$

### Енергетична ефективність місткового ТГЕ

Енергетичну ефективність місткового ТГЕ визначаємо за часткою генерованої в містку потужності джоулевого тепла, яка віддається опорам шляхом теплопровідності. Для цього знаходимо градієнт температури містка на опорах (для  $x=L$ ) і обчислюємо шукану величину з урахуванням товщини містка і теплопровідності складових матеріалів. Для стаціонарного режиму функціонування із (2.28) отримуємо:

$$\frac{\partial \Delta T(x)}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{I^2 \rho_0 \frac{L}{S_e} [1 + \alpha(T_{н.с.} - T_0)]}{\sqrt{kS_m L (HpL - \alpha P_0)}} \left[ \text{cth}(\sqrt{\mu}) - \frac{1}{\text{sh}(\sqrt{\mu})} \right] \quad (2.43),$$

а шукані енергетичні втрати містка на корпус визначаються виразом:

$$P_{conduct} = 2k_m S_m \frac{\partial [\Delta T(x)]}{\partial x} \Big|_{x=L} = 2 \frac{I^2 \rho_0 \frac{L}{S_e} [1 + \alpha(T_{н.с.} - T_0)]}{\sqrt{\mu}} \left[ \text{cth}(\sqrt{\mu}) - \frac{1}{\text{sh}(\sqrt{\mu})} \right] \quad (2.44).$$

Відповідно відношення  $P_{cond}$  до загальної розсіюваної в містку в стаціонарному режимі потужності  $P_{tot}$  визначається виразом:

$$\frac{P_{cond}}{P_{tot}} = \frac{\frac{2}{\sqrt{\mu}} [cth(\sqrt{\mu}) - \frac{1}{sh(\sqrt{\mu})}] [1 + \alpha(T_c - T_0)]}{\{1 + \alpha(T_c - T_0) + \alpha \frac{P_0(1 + \beta(T_c - T_0))}{\frac{kS}{L} \mu} (1 - \frac{2}{\sqrt{\mu}} (cth[\sqrt{\mu}] - \frac{1}{sh[\sqrt{\mu}]}) )\}} \quad (2.50)$$

Отримані з (2.50) чисельні значення теплових втрат містка на корпус показує, що місток довжиною 1 мм в необмеженому повітряному середовищі за н.к.у втрачає на корпус близько 10% загальної потужності джоулевого тепла, тобто є досить ефективним з енергетичної точки зору.

### Власна стала часу місткового тепло генеруючого елементу

Параметр швидкодії містка – власна стала часу  $\tau_{tot}$  (обернена величина до множника при часі в експоненті (2.29)), що включає три складові із спільним множником – теплоємністю містка  $C_M = C_M \gamma_M S_M L$ . Перший доданок описує процеси встановлення температури містка з урахуванням теплопровідності по його довжині; другий - процеси теплообміну з середовищем, третій - зворотній електро-тепловий зв'язок, що полягає у додатковій зміні опору перетворювача в процесі нагрівання та може змінювати знак в залежності від ТКО:

$$\begin{aligned} \tau_{конд} &= C_M \gamma_M S_M L \frac{L}{(2n-1)^2 \pi^2 k_M S} = C_M \frac{L}{(2n-1)^2 \pi^2 k_M S}; \\ \tau_{обм} &= C_M \gamma_M S_M L \frac{1}{H_p L} = \frac{C_M}{H_p L}; \\ \tau_{зв} &= C_M \gamma_M S_M L \frac{1}{\frac{I^2 \rho_0 \beta L}{S_e}} = \frac{C_M}{\alpha I^2 R_0} = \frac{C_M}{\alpha P_0}. \end{aligned} \quad (2.51).$$

Чисельне значення теплоємності для нікелевого містка з периметром  $p=2(b+d)=80\text{мм}$  та площею поперечного перерізу  $S_M=b \cdot d_{Ni}= 4 \cdot 10^{-12}\text{м}^2$ , довжиною  $L= 1\text{мм}$  становить  $C_M=1,6 \cdot 10^{-8} \text{ [Дж/}^0\text{C]}$ , сталої часу в непорушному повітряному середовищі при  $H=600 \text{ Вт/м}^2$  -  $\tau_{заг} = 3 \text{ [мс]}$ .



## 2.4. Алгоритм розрахунку базових характеристик мікромеханічного терморезисторного первинного перетворювача

За результатами проведених у розділах 2.1 – 2.3 досліджень, розрахунок базових характеристик триелементного ТРПП активного нагрівання, спроектованого за технологією MEMS, пропонується проводити за наступним алгоритмом (рис. 2.55):

1. Задавання початкових умов:  
теплофізичні параметри матеріалів ТРПП і середовища; діапазон зміни температури ТГЕ і оточуючого середовища; початкові конструктивні характеристики містка і тіл теплообміну; виділення характерних зон ТІС та визначення усереднених теплофізичних характеристик елементів зон; початкові конструктивні параметри корпусу (допустимий пневматичний опір каналу для ТРПП лінійної швидкості та об'ємних витрат).
2. Визначення характеру теплообмінних процесів і механізмів теплообміну за критеріальними рівняннями і значеннями чисел подібності *Nu, Gr, Pr, Re*.
3. Розрахунок теплового опору каналу, заповненого непорушним середовищем. Визначення коефіцієнтів поверхневого теплообміну місткового нагрівача. Оцінка енергетичних втрат місткового ТГЕ на опорах сталої температури.
4. Розрахунок статичного параметру розсіювання  $G_{th}$ , теплових опорів  $R_T$ , енергетичної ефективності  $\chi$  ТРПП.
5. Вибір варіанту монтажу місткового ТРПП в потокоформуючому каналі. Внесення змін в конструкції ТРПП і каналу виходячи з діапазону вимірювання, діапазону лінійності характеристики перетворення, отриманих чисельних значень параметрів та допустимого пневматичного опору каналу.
6. Аналіз впливних величин на характеристику перетворення.

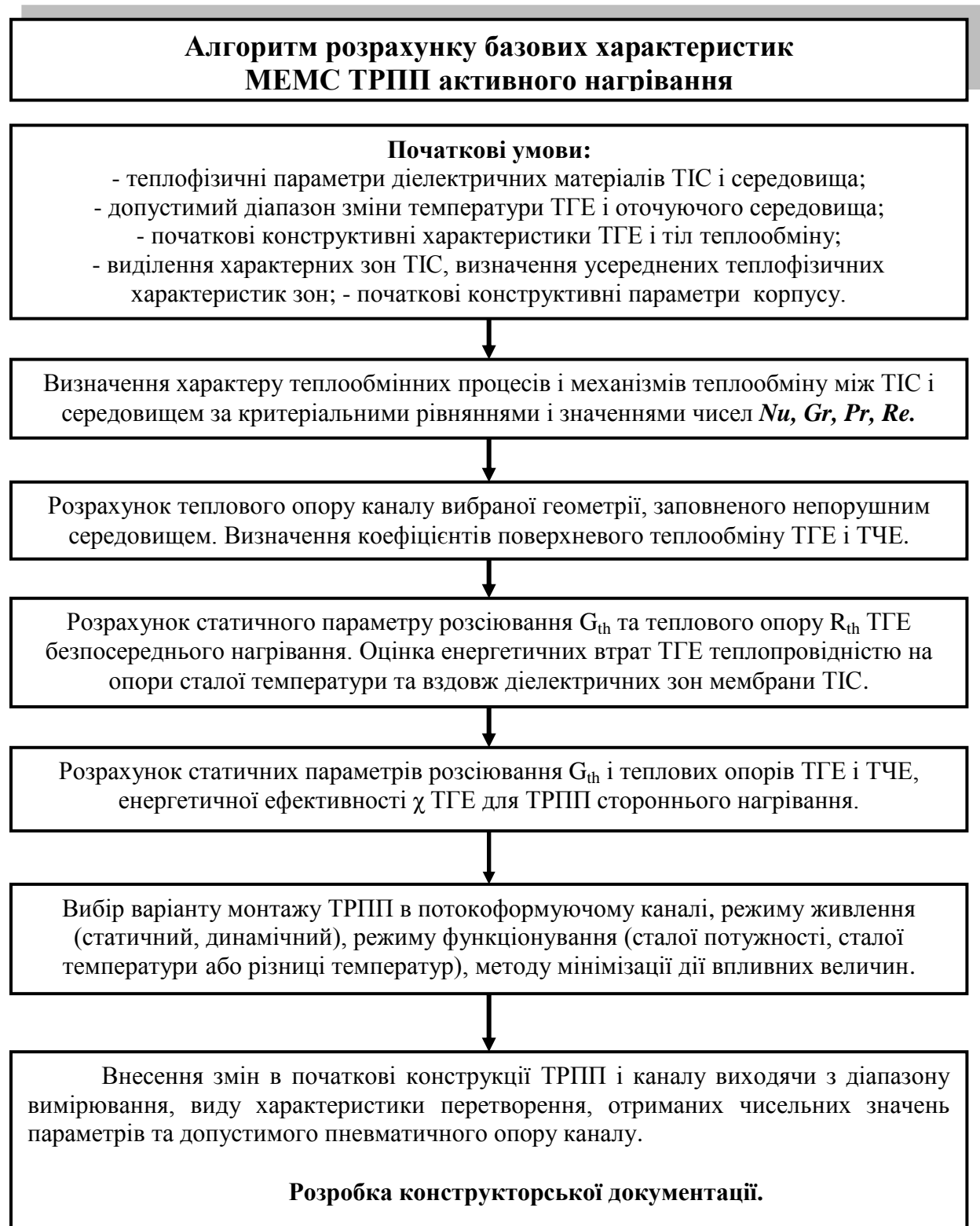


Рис. 2.17 Блок-схема алгоритму розрахунку базових характеристик місткових мікромеханічних ТРПП в потокоформуючому каналі.

## Висновки до розділу 2.

За результатами проведеного в цьому розділі моделювання ТРПП, можна зробити наступні висновки:

1. Аналіз критеріальних рівнянь для мікромеханічних ТРПП місткової і мембранної геометрій, проведений на основі теорії подібності для актуальних для роботи середовищ (табл. 2.1 і 2.2), показує, що при температурних натисках  $T_H - T_C \sim 50^\circ\text{C}$  основним механізмом теплообміну чутливого елементу є теплопровідність. Це дозволяє в розрахунках статичних параметрів ТРПП не враховувати природну конвекцію.

2. Аналітичний розрахунок базових характеристик ТРПП в каналі прямокутного поперечного перетину пропонується вести в рамках методики, що передбачає поділ ТІС на однорідні в теплофізичному сенсі області, визначення для кожної з областей ефективних параметрів матеріалів складових елементів конструкції, визначення теплового опору середовища, обчислення на основі цих результатів коефіцієнтів поверхневого теплообміну з поверхні ТГЕ, і статичного параметру розсіювання потужності ТГЕ, оцінки енергетичної ефективності ТРПП, внесення змін до початкової конструкції з метою оптимізації її структури.

3. Аналітичний аналіз електричних і теплових параметрів місткових ТРПП, виготовлених за технологією МЕМС, показує суттєву залежність коефіцієнту теплообміну поверхонь ТГЕ з характерними розмірами порядку одиниць-десятків мікрон від власної геометрії ТІС і конструктивних параметрів оточуючого середовища при глибині каналу порядку десятків-сотень мікрон (рис. 2.8 і 2.9, табл. 2.3).

4. Збільшення висоти каналу на порядок (з 600 мкм до 6 мм) не впливає істотно на розподіл температури в площині нагрівачів, однак істотно змінює розподіл температури по висоті каналу. Для потокоформуєчих каналів висотою  $2D \leq 600$  мкм характерний близький до лінійного розподіл температури по висоті над ТГЕ шириною близько 40

мкм і, як результат, ефективно накладання профілів температури та швидкості середовища в каналах.

5. При висоті каналу понад 300 мкм і ширині ТГЕ менше 100 мкм поперечний розмір нагрівача не є визначальним для його температури перегріву при заданій потужності, а саме: зміна ширини нагрівача в 100 разів від 1 мкм до 100 мкм призводить до зміни його температури перегріву близько 10% при сталій потужності ТГЕ.

6. Збільшення висоти каналу в 20 разів (з 50 мкм до 1 мм) призводить до збільшення теплового опору середовища в каналі (за відсутності вимушеної конвекції) лише в 1,5 рази. Доцільно вибирати висоту каналу понад 200 мкм, коли залежність температури ТГЕ від висоти каналу незначна, втрата енергетичних параметрів не є суттєвою, а технологічне відхилення висоти каналу від номінального значення за рахунок додаткової товщини фіксуєчого прошарку для кришки каналу слабо впливає на його температуру.

Основні результати, викладені в розділі 2, опубліковані автором в роботах [88, 96, 108 – 112, 120, 121].

### **Розділ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОРЕЗИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СЕРЕДОВИЩА.**

Характерною ознакою ТРПП, виготовленого за технологією МЕМС, є його багатофункціональність: конструктивно досить простий об'єкт (мембранна чи місткова ТІС) задовольняє потребу в контролі температури, тиску, складу газової суміші, лінійної швидкості чи об'ємних (масових) витрат рідини чи газу, тощо. Багатофункціональність має свої недоліки, оскільки процес вимірювального перетворення, як правило, перебуває під дією низки впливних величин. Тому застосування ТРПП для визначення параметрів середовища вимагає міждисциплінарного аналізу. Електротеплові процеси в твердотільних ТРПП, виготовлених за технологією МЕМС, за характером протікання суттєво відрізняються від аналогічних процесів в ТРПП, створених у макроскопічному виконанні. Розробка електронних перетворювальних пристроїв на їх основі потребує комплексної постановки задачі з обов'язковим розглядом як електричних і теплофізичних процесів безпосередньо в ТІС, так і теплофізичних та гідродинамічних процесів в оточуючому середовищі [9, 14 - 20]. Наявність внутрішнього зворотного електротеплового зв'язку між процесами в первинному і вторинному перетворювачах вимагає аналізу проходження сигналу в електричних колах і специфіки енергетичного обміну між ТІС, елементами корпусу ТРПП і навколишнім середовищем [18, 21-23].

#### **3.1. Калориметричний перетворювач лінійної швидкості газу та рідини з конструктивно керованою функцією перетворення**

Поле швидкостей  $V(x,y,z,t)$  рідини чи газу, викликаних дією зовнішнього перепаду тиску  $\Delta P$ , гравітаційного поля і в'язкості середовища  $\mu$  описується векторним рівнянням [55]:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \vec{\nabla} P - [\vec{\nabla} \bullet \vec{\tau}] + \rho \vec{g}, \quad (3.1)$$

де  $\frac{D\vec{V}}{Dt}$  - субстанційна похідна від поля швидкостей,

$[\vec{\nabla} \bullet \vec{\tau}]$  - тензорний оператор, чисельно рівний силі в'язкості, прикладеній до одиниці об'єму диференціального елементу рухомого середовища;  $\vec{\tau} = \mu[\vec{\nabla} \vec{V}]$  - дотичне навантаження, що виникає внаслідок дії сил в'язкості. Рівняння (3.1) для випадку руху нестискуваного середовища зі сталою в'язкістю спрощується до рівняння Нав'є-Стокса (рівняння моментів), наведеного нижче у векторному (3.2) і скалярному (3.3) вигляді:

$$-\gamma \cdot (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} + \mu \cdot \nabla^2 \vec{V} = \vec{\nabla} P + \gamma \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} + \gamma \vec{g}; \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \gamma \left( \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right); \\ \gamma \left( \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \eta \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right); \\ \gamma \left( \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) &= \gamma g - \frac{\partial P}{\partial z} + \eta \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (3.3)$$

Система рівнянь (3.3), що складає основу гідродинаміки в'язких рідин, отримана виходячи з закону збереження маси і другого закону Ньютона для нестискуваного середовища ( $\gamma = \text{const}$ ). Розмірність наведених рівнянь (3.3) – сила, прикладена до одиниці об'єму, а фізична сутність полягає в тому, що добуток густини середовища на прискорення (перший доданок лівої частини рівнянь системи) має дорівнювати сумі сил, що діють на одиницю об'єму рухомого середовища: зовнішньої рушійної (градієнт тиску) сили, гравітаційної сили та сили опору.

### Режим усталеного руху сформованого потоку газу в каналі.

Розрахунки цього розділу виконано з метою отримання значень лінійних швидкостей повітря в зоні вимірювання ТРПП і гідравлічних довжин каналів корпусу для ламінарного потоку виходячи з перепадів тиску, характерних для типових потокорезистивних перетворювачів для спірометрії. Для стаціонарної ламінарної течії нестискуваної в'язкої рідини з динамічною в'язкістю  $\eta$  [Па·сек] за рахунок перепаду тиску  $\Delta P$  на ділянці циліндричної труби довжиною  $L_y$  і радіусу  $R$  отримано розв'язок рівнянь (3.3), що дає розподіл швидкостей в струмені по радіусу  $V_y(r)$  [м/сек] та вираз для залежності об'ємних  $Q$  [м<sup>3</sup>/сек] і масових  $M$  [кг/сек] витрат від падіння тиску  $\Delta P$  на ділянці довжиною  $L_y$  [55]:

$$\begin{aligned} V_y(r) &= \frac{\Delta P}{4\eta L_y} (R^2 - r^2); \\ Q(r=R)[\text{м}^3 / \text{сек}] &= \int_0^R 2\pi r V(r) dr = \frac{\pi}{8\eta} \frac{\Delta P}{L_y} R^4; \\ M(r=R)[\text{кг} / \text{сек}] &= \pi \frac{\gamma}{8\eta} \frac{\Delta P}{L_y} R^4 = \frac{\pi}{8\nu} \frac{\Delta P}{L_y} R^4. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Із системи (3.4), що носить назву рівнянь Гагена – Пуазейля, видно, що в режимі ламінарної течії перепад тиску  $\Delta P$  на циліндричній трубі радіусом  $R$  і довжиною  $L_y$  пов'язаний лінійною залежністю з швидкістю, об'ємними і масовими витратами та обернено пропорційний діаметру труби в четвертому ступені; об'ємні витрати визначаються динамічною в'язкістю  $\eta$ , а масові - кінематичною в'язкістю  $\nu$  [м<sup>2</sup>/сек]. Лінійна залежність  $Q(\Delta P)$  спостерігається в обмеженому діапазоні швидкостей та діаметрів труб. Як вперше встановлено Рейнольдсом, характер руху рідини кінематичної в'язкості  $\nu$  в каналі гідравлічного діаметру  $D_h$  визначається значенням середньої по перетину каналу лінійної швидкості  $V$ : починаючи з деякої швидкості, рух втрачає ламінарність, стає турбулентним, з перемішуванням течій, а залежність  $Q(\Delta P)$  для високих швидкостей

наближається до квадратичної. При цьому подібними за режимом є течії, що мають однакове відношення прикладених до одиниці об'єму інерційних сил до сил внутрішнього тертя. Характер руху визначається співвідношенням величин у безрозмірнісному комплексі – критерії Рейнольдса  $Re$  [54, 73]. Низькі значення критерію Рейнольдса відповідають домінуванню сил в'язкості над силами інерції, дозволяють суттєво спростити рівняння Нав'є-Стокса (3.3) та отримати його аналітичний розв'язок, як це зроблено у випадку отримання системи рівнянь Гагена-Пуазейля (3.4) для циліндричного каналу.

Керуючись електро - гідравлічною аналогією, для характеристики потокоформуєного каналу вводиться пневматичний опір - параметр, що визначається як відношенню падіння тиску  $\Delta P$  [Па] на каналі довжиною  $L_y$  (аналог падіння напруги на елементі) до об'ємних витрат  $Q$ , [м<sup>3</sup>/сек] (аналог електричного струму):

$$R_h = \frac{2k_{shape}\eta L_y}{D_h^2 S}, \quad (3.5)$$

де  $k_{shape}$  – безрозмірнісний параметр форми поперечного перетину каналу, залежний від числа Рейнольдса,  $D_h=4S/Per$  – гідравлічний діаметр,  $Per$  – периметр каналу.

Для каналу циліндричної форми число Рейнольдса може бути вираженим через об'ємні витрати або, в режимі ламінарного струменя, через перепад тиску у відповідності до наступних виразів:

$$Re_D(Q) = \frac{4\gamma Q}{\pi\eta D}; \dots\dots\dots Re_D(\Delta P) = \frac{\gamma D^3 \Delta P}{32\eta^2 L_y}. \quad (3.6)$$

Останні вирази наведено для сформованого потоку з встановленим параболічним розподілом швидкостей по радіусу каналу. Для виконання цієї вимоги довжина прямолінійної ділянки каналу повинна бути більшою



за певне характеристичне значення гідравлічної довжини каналу  $L_h$ , яке визначається різними дослідниками дещо по-різному. В [51] пропонується наступна залежність для оцінки  $L_h$  в каналі довільного перетину:

$$\frac{L_h}{D_h} = 0.59 + 0.056 Re_D. \quad (3.7)$$

За оцінками інших авторів [16], гідравлічна довжина має меншу величину. Як бачимо із (3.7), у гіршому варіанті оцінки для чисел  $Re < 200$  довжина каналу, що забезпечує формування ламінарного потоку, має порядок десяти гідравлічних діаметрів. Тоді для каналів висотою до 1 мм чутливий елемент перетворювача має бути розташований на відстані 10 мм від початку каналу для реалізації ламінарного режиму в верхній частині діапазону, а корпус перетворювача відповідно повинен мати габарити щонайменше понад 20 мм. В таблиці параметрів форми для каналів різного поперечного перетину з [51] для розрахунку гідравлічного опору  $R_h$   $[(\text{Па} \cdot \text{сек})/\text{м}^3]$  каналу довжиною  $L$ , автором доповнено розрахунком гідравлічної довжини для практично важливого в цій роботі діапазону  $Re = 200$ . З наведеного зрозуміло, що відповідно до вимоги забезпечення ламінарного режиму потоку в каналі первинного перетворювача перевагу варто надавати конструкціям корпусу витратоміра з якомога меншими величинами гідравлічного діаметру потокоформуючого каналу (відповідно, великими значеннями пневматичного опору).

Прийнявши за типові значення діаметру потокоформуючого каналу мікромеханічного терморезисторного перетворювача величини  $D_h = 100$  мкм і  $D_h = 1$  мм, отримуємо верхні межі ламінарності потоку для лінійної швидкості повітря в потокоформуючому каналі прямокутного перетину  $V_{\text{lam. max air}} = 45$  м/сек і 4,5 м/сек, для води  $V_{\text{lam. max H}_2\text{O}} = 3$  м/сек і 0.3 м/сек, для спирту – чисельно близькі до  $V_{\text{lam. max H}_2\text{O}}$  для води величини. Як видно, для перетворювача лінійної швидкості потоку медичного призначення

діапазон режим турбулентної течії теоретично не досягається, відповідно течія зберігає ламінарність у всьому вимірювальному діапазоні з лінійною залежністю перепаду тиску від об'ємних витрат. Однак експериментальні дані із [51, 56] для МЕМС ТРПП дещо відмінні: в каналі трикутної форми, отриманому шляхом травлення пластини кремнію орієнтації <100> в КОН при ширині верхньої частини каналу  $2a=170$  мкм і висоті близько 100 мкм помітні відхилення від лінійної залежності об'ємних витрат етанолу від перепаду тиску спостерігаються уже на витратах порядку  $1,5 \cdot 10^{-8}$  [м<sup>3</sup>/сек.] для каналів довжиною 1 - 3 мм. Оскільки площа поперечного перетину описаного каналу трикутної геометрії визначається як  $1,41 \cdot l^2$  (Див. Табл. 3.1), наведені величини об'ємних витрат спостерігаються відхилення від ламінарності, порядку  $V_{\text{lam.exp. max C}_2\text{H}_5\text{OH}} = 1,5$  [м/сек].

Таблиця 3. 1

Пневматичний опір і гідравлічна довжина потокоформуєного каналу для  $Re=200$

| Форма поперечного перерізу каналу                       | Параметр форми<br>$k_{\text{shape}}$ | Гідравлічний діаметр<br>$D_h$ , [м] | Площа каналу<br>$S$ , [м <sup>2</sup> ] | Пневматичний опір каналу $R_h$ ,<br>[Па·сек/м <sup>3</sup> ] | Гідравлічна довжина<br>$L_h$ , [мм]          |
|---|--------------------------------------|-------------------------------------|---|--|--|
| Круг діаметром<br>$D=2R$                                | 16                                   | $D_h=D=2R$                          | $\pi R^2$                               | $\frac{8\eta_{FL}}{\pi R^4}$                                 | $D=1$ мм<br>$L_h = 12$ мм                    |
| Квадрат стороною $2l$                                   | 14,2                                 | $2l=1$ мм                           | $4 l^2$                                 | $\frac{1,78\eta_{FL}}{l^4}$                                  | $L_h = 12$ мм                                |
| Прямокутник<br>$2l \times 2b$ , $b < l$                 | 24                                   | $4b$                                | $4 l b$                                 | $\frac{3\eta_{FL}}{4lb^3}$                                   | $2l=1$ мм $2b=0,1$ мм<br>$L_h = 24$ мм       |
| Трикутник з осн. $2l$ ,<br>вис. $2b$ і кутом $55^\circ$ | 13,3                                 | $1.04l$                             | $1,41 l^2$                              | $\frac{17,4\eta_{FL}}{l^4}$                                  | $2l=1$ мм, $2b \approx 1$ мм<br>$L_h = 6$ мм |

Стала часу встановлення розподілу швидкостей в каналі визначається за наступним виразом [65]:

$$\tau_h = R_h C_h = \gamma \frac{D_h^2}{4\eta} \quad (3.8)$$

за умови, що 90% формування потоку відбувається за час  $\tau_h/2$ . Тоді для прямокутного каналу висотою 100 мкм формування повітряного потоку має відбуватися за час  $\tau_{h \text{ air}} (D_h=400 \text{ мкм}) \approx 3 \text{ мсек}$ ; для прямокутного каналу висотою 300 мкм в повітрі формування потоку має відбуватися за час  $\tau_{h \text{ air}} (D_h=1,2 \text{ мм}) \approx 25 \text{ мсек}$ . Як бачимо, наведені чисельні значення сталої часу встановлення повітряного потоку співвимірні або перевищують теплові сталі часу MEMC ТРП, тому результуюча швидкодія первинного перетворювача витратоміра газового середовища буде визначатися сумарним впливом гідродинамічних і теплових фізичних чинників вимірювального процесу. Канал висотою порядку 100 мкм і менше дозволяє в повній мірі реалізувати теплові характеристики MEMC - перетворювача по швидкодії. Аналогічні чисельні значення для води наступні:  $\tau_{h \text{ H}_2\text{O}} (D_h=400 \text{ мкм}) \approx 40 \text{ нсек}$ ;  $\tau_{h \text{ H}_2\text{O}} (D_h=1,2 \text{ мм}) \approx 0,4 \text{ мсек}$ .

### **3.1.1. Терморезисторний перетворювач занурюваного типу в каналі прямокутного перетину.**

Рівняння для поля температури  $T(x;y;z)$  в рухомому потоці без урахування виділення тепла за рахунок тертя і роботи сил стискання, котре фактично виражає закон збереження енергії в елементарному об'ємі середовища, набуває вигляду [54, 56]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.9).$$

Стационарний розв'язок (3.9) для одновимірної постановки задачі – розподілу температури вздовж каналу MEMC ТРПП занурювального типу в площині одиночного нагрівача наведено в [46, 120, 122]. Канал заповнено середовищем теплопровідністю  $k$ , теплоємністю  $C$ , густиною  $\gamma$ , середня швидкість середовища  $V_y$  [м/сек]. Переріз каналу має прямокутну геометрію шириною  $L$  та висотою  $2D = D_b + D_n$ ; тонкий нагрівач шириною

б розташований впоперек каналу посередині висоти; площа поперечного перерізу каналу  $S=(L \cdot 2D)$ .

Для зображеної на рис. 2.5 (ескіз) і рис. 3.1 (фото – вид зверху) геометрії занурюваного перетворювача процеси усталеного теплообміну плоского нагрівача з оточуючим рухомим середовищем в каналі описуються розв'язком (3.9), отриманим для температури перегріву середовища  $T$  в площині ТРПП відносно температури на достатньо значному віддаленні від нагрівача, рівній температурі корпусу [46, 120]:

$$(L \cdot 2D)k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - (L2D)C\gamma V_y \frac{\partial T}{\partial y} - k \frac{2L}{D}T = 0 \quad (3.10)$$

Останній доданок в (3.10) відповідає теплообміну із корпусом каналу за умови лінійного розподілу температури середовища по висоті від нагрівача до стелі та дна каналу (градієнт температури вздовж вертикалі вважається сталим). Обґрунтування такого спрощення виконано у попередньому розділі 2.2.1, де показано, що наближення досить добре виконується для містка шириною  $b=40$  мкм, довжиною  $L_x=1$  мм в каналі висотою до 300 мкм (рис. 3.1).

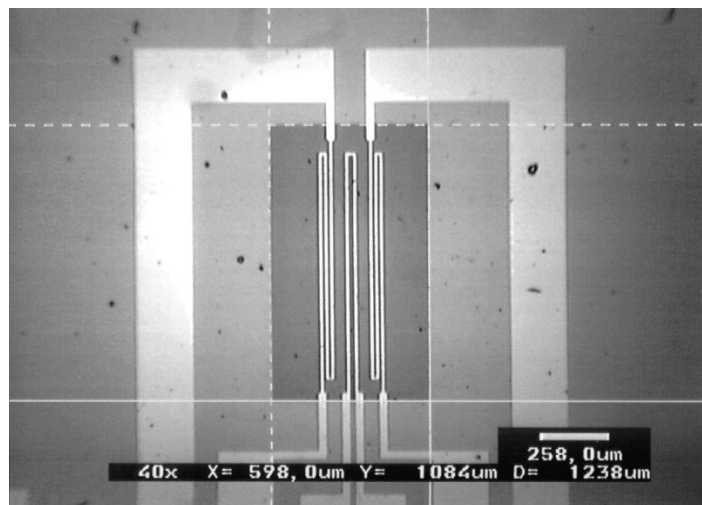


Рис. 3.1. Фото (вид зверху) мікромеханічного мембранного елемента перетворювача лінійної швидкості газу лабораторії медичної сенсорики ФЕЛ КПІ ім. І. Сікорського

Граничні умови до рівняння (3.10) задаємо у вигляді:  $\lim_{y \rightarrow \pm\infty} T(y) = 0$ , що відповідає відсутності розігрівання середовища на значній відстані від ТГЕ. Розв'язок для ТРПП занурюваного типу для зон мембрани до ТГЕ  $T1(y1)$ , над ТГЕ  $T2(y2)$  та після нього  $T3(y3)$  (зони орієнтовано відповідно до напрямку руху середовища в каналі) знайдено відповідно до методики із [46, 120]:

$$\begin{aligned} T1(y1) &= \frac{P}{\frac{2kLb}{D} + 2kLD(\lambda_1 - \lambda_2)} \exp\left\{\lambda_1\left(y1 + \frac{b}{2}\right)\right\} = (T2) \cdot \exp\left\{\lambda_1\left(y1 + \frac{b}{2}\right)\right\}; \\ T2 &= \frac{P}{\frac{2kLb}{D} + 2kLD(\lambda_1 - \lambda_2)} = \frac{1}{C\gamma} \left[ \frac{P}{\frac{2a}{D}Lb + 2LD\sqrt{V^2 + \left(\frac{2a}{D}\right)^2}} \right]; \\ T3(y3) &= \frac{P}{\frac{2kLb}{D} + 2kLD(\lambda_1 - \lambda_2)} \exp\left\{\lambda_2\left(y3 - \frac{b}{2}\right)\right\} = (T2) \cdot \exp\left\{\lambda_2\left(y3 - \frac{b}{2}\right)\right\}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\text{де } y1 \in -\infty \div -\frac{b}{2}; y3 \in \frac{b}{2} \div \infty ;$$

$$T2 = \frac{1}{C\gamma} \left[ \frac{P}{\frac{2a}{D}Lb + 2LD\sqrt{V^2 + \left(\frac{2a}{D}\right)^2}} \right] = \frac{P}{2kL \left[ \frac{b}{D} + 2\sqrt{\left(\frac{C\gamma D}{2k}V\right)^2 + 1} \right]} \quad (3.12)$$

– температура ТГЕ;

$$\lambda_{1,2} = \frac{C\gamma}{2k} \left[ V \pm \sqrt{V^2 + \frac{4}{D^2} \frac{k^2}{(C\gamma)^2}} \right] = \frac{1}{2a} \left[ V \pm \sqrt{V^2 + \left(\frac{2a}{D}\right)^2} \right] \quad (3.13)$$

– розмірний параметр  $[m^{-1}]$ , що визначає профіль температури в середовищі в площині ТГЕ;

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \frac{2}{D} \sqrt{\left(\frac{VD}{2a}\right)^2 + 1}.$$

Оскільки температура перегріву оточуючого середовища в околиці ТГЕ відносно температури на значному віддаленні від нього лінійно

залежить від розсіюваної потужності, ТГЕ як елемент з зосередженими параметрами доцільно характеризувати тепловим опором як функцією параметрів середовища, стану його руху і геометрії потокоформуєного каналу:  $R_{th} (V; L; a; k; C; \gamma ; D) = G^{-1} [^{\circ}\text{C}/\text{Вт}]$ . Чутливість ТРПП до швидкості визначатимемо як зміну різниці температур просторово рознесених відносно нагрівача ТЧЕ на одиницю зміни вимірюваного параметру і на одиницю розсіюваної на ТГЕ потужності теплового збудження. Для ТРПП лінійної швидкості чутливість вимірюватиметься в одиницях  $[^{\circ}\text{C}/(\text{Вт} \cdot \text{м/сек})]$ . Як бачимо з розмірності шуканого параметру, фактично чутливість перетворювача визначається через зміну його теплового опору під впливом вимірюваної величини. Отже, аналіз вимірювальних характеристик первинного перетворювача доцільно виконувати через аналіз теплового опору. Вплив згаданих параметрів на середню температуру ТГЕ, яка однозначно визначає величину його електричного опору, визначається через їх вплив на величину теплового опору за умови підтримання відомої потужності розсіювання (примусово заданої на потрібному рівні або такої, що підлягає поточному вимірюванню) в ТГЕ.

Температура в межах ТГЕ в запропонованій моделі, як видно з (3.12), вважається однаковою по координаті вздовж потоку, що, строго кажучи, не відповідає реальному стану; однак, при використанні резисторного перетворювача вимірюють його загальний електричний опір, який фактично визначається усередненою по площі температурою. Вираз (3.12) для температури ТГЕ  $T_2$  також має залежність від швидкості середовища, що дозволяє проаналізувати характеристику перетворення одноелементного ТРПП. В подальшому порівнюємо чутливість до швидкості перетворювачів альтернативних конструкцій занурювальних ТРПП: трьохелементного, до складу якого входить фізично відокремлений ТГЕ, а вимірюваним сигналом є різниця температур двох ТЧЕ, просторово рознесених відносно ТГЕ в напрямку потоку, та одноелементного, в якому

вимірюваним сигналом є температура власне ТГЕ. Виконані за (3.12) графічні залежності наведено на рис. 3.2.

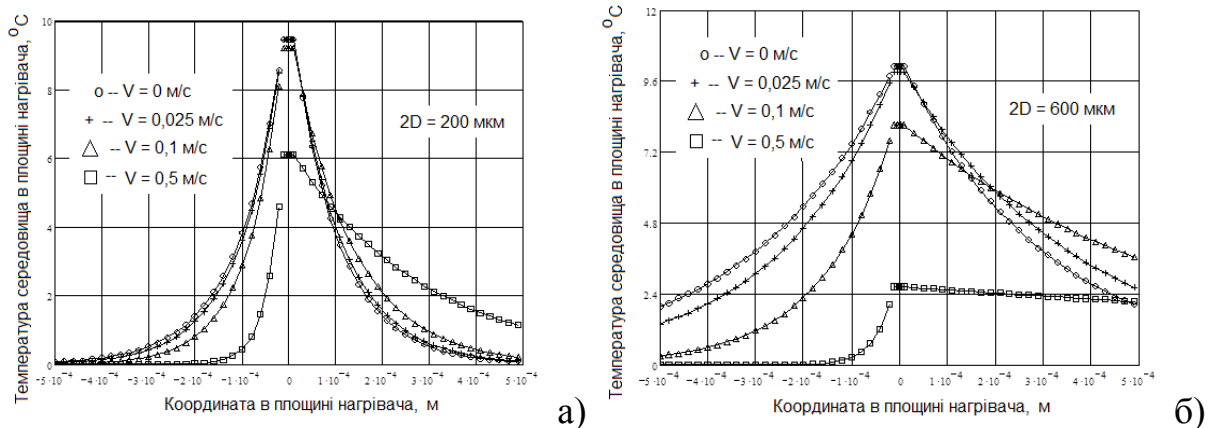


Рис. 3.2 Розподіл температури вздовж осі потокоформуючого каналу при різних швидкостях повітря; нагрівач прямокутної форми 1мм x 20 мкм, розташований впоперек каналу висотою: а) -  $2D=200$  мкм; б) -  $2D=600$  мкм;  $P=1$  мВт.

Аналіз режимів функціонування ТРПП у МЕМС виконанні та визначення характеристик перетворення вимірювача лінійної швидкості потоку в каналі виконується в наступній послідовності:

а) визначення базових характеристик ТГЕ (коефіцієнтів розсіювання потужності і теплообміну з поверхні теплопровідністю, теплового опору каналу), аналіз залежності температури непорушного середовища з відомими теплофізичними параметрами в площині мембрани як функції характерного розміру ТГЕ, висоти каналу і потужності розсіювання;

б) оцінка градієнтів температури середовища на поверхні ТГЕ та в площині мембрани з метою визначення оптимального розташування ТЧЕ і геометрії потокоформуючого каналу;

в) дослідження залежності температури ТГЕ і середовища в площині нагрівача від лінійної швидкості потоку в каналі вибраної геометрії.

### Одиничний нагрівач в нерухомому середовищі.

Відповідно до (3.12), в умовах відсутності масопереносу температура  $T_2$  перегріву середовища в площині ТГЕ для запропонованої моделі

пов'язана з розсіяваною в ньому потужністю  $P$  залежністю, яка включає теплопровідність середовища, геометричні параметри ТГЕ і каналу:

$$T_2(D; b; V = 0) = \frac{1}{4kL} \frac{P}{\left(\frac{b}{2D} + 1\right)} \quad (3.14).$$

Результат (3.14) є масштабованим: температура ТГЕ в середовищі залишиться незмінною після кратної зміни його довжини і потужності (при сталій поздовжній густині потужності) та збереження відношення ширини ТГЕ до висоти каналу. Однак вже при співвідношенні  $\frac{b}{2D} \approx 0,1$  визначальною є лише густина потужності: перегріву в  $100^\circ\text{C}$  в повітряному середовищі зазнає ТГЕ з відношенням  $\frac{b}{2D} \ll 1$ , довжиною 1 мм при потужності  $P = 10$  мВт (тепловий опір середовища в каналі  $R_{th} = 10^4$  [ $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ]).

### **Одиничний нагрівач в рухомому середовищі.**

Залежність температури ТГЕ від швидкості середовища проведено за (3.12) при зміні ширини ТГЕ і висоти каналу. На рис. 3.2 наведено такі залежності, з чого видно, що зменшення висоти каналу до 100 мкм і нижче призводить до втрати чутливості ТГЕ шириною 40 мкм до руху повітряного середовища над ним для лінійних швидкостей нижче  $0,1$  [м/сек]. Це пояснюється тим, що теплообмін ТГЕ з тепловим стоком – дном та стелею каналу за рахунок теплопровідності значно більш інтенсивний за вимушену конвекцію у вказаному діапазоні швидкостей. Така особливість звільняє від необхідності побудови схем зворотного зв'язку за температурою перегріву ТГЕ відносно оточуючого середовища.

Для каналів висотою 300 мкм і вище залежність температури перегріву ТГЕ від швидкості потоку за у вказаному діапазоні дуже значна і вимагає її врахування у вимірювальних схемах витратоміру у всьому



діапазоні лінійних швидкостей; для стабілізації температури ТГЕ необхідно вводити схеми зворотного зв'язку.

Верхню межу лінійної швидкості ламінарного режиму течії має визначити критичне значення числа Рейнольдса, після перевищення якого теплообмін під дією появи турбулентності не відповідає залежностям (3.3), а наведена залежність (3.12) між температурою і швидкістю потоку порушується.

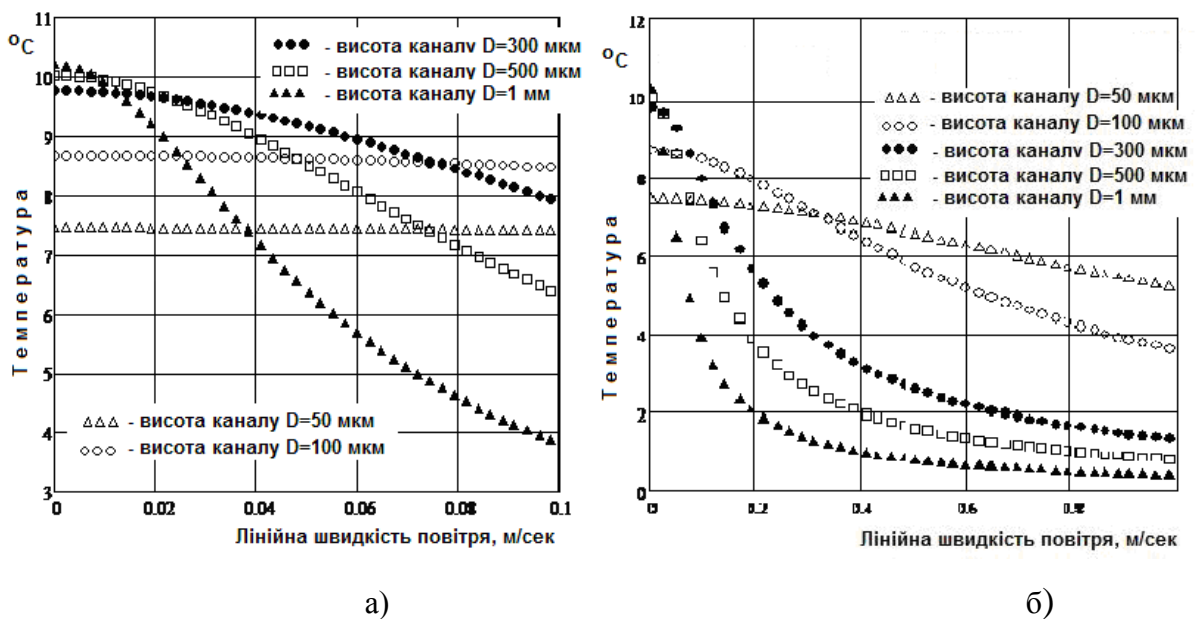


Рис. 3.3. Розрахункова залежність температури місткового нагрівача (довжина  $L=1$  мм, ширина  $b=40$  мкм, потужність  $P=1$  мВт) від швидкості руху середовища  $V$  [м/сек] для висоти каналу  $D$ : а) - нижній та б) - верхній діапазони швидкості

### Триелементний MEMС ТРПП в каналі прямокутного поперечного перетину. Режим сталої потужності ТГЕ.

Для одночасного визначення величини і напрямку швидкості два ТЧЕ розміщують симетрично відносно ТГЕ. Якісно зрозуміло: оскільки в діапазоні низьких лінійних швидкостей практично немає чутливості до потоку в безпосередній близькості до ТГЕ та на досить значному віддаленні від нього, повинна бути зона відстані “ТГЕ – ТЧЕ” оптимальної чутливості. Параметрами оптимізації ТІС для заданого діапазону

швидкостей наступні: ширина ТГЕ, відстань від його центру до точок розміщення ТЧЕ, висота  $D$  та ширина  $L$  каналу.

Із (3.11) і (3.12) знаходимо різницю температур двох рівновіддалених від центру ТГЕ координат  $y$  як функцію швидкості потоку:

$$\Delta T(y) = T_3(y) - T_1(y) = (T_2) \cdot \{ \exp[\lambda_2(y - \frac{b}{2})] - \exp[\lambda_1(-y + \frac{b}{2})] \} =$$

$$= \frac{P}{2kL \left[ \frac{b}{D} + 2\sqrt{\left(\frac{C\gamma}{k} \cdot \frac{D}{2} \cdot V\right)^2 + 1} \right]} \cdot \left\langle \exp[\lambda_2(y - \frac{b}{2})] - \exp[\lambda_1(-y + \frac{b}{2})] \right\rangle \quad (3.15).$$

Підставивши вирази для параметрів  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ , із (3.15), отримуємо:

$$\Delta T(y) = \frac{P}{2 \frac{a}{C\gamma} L \left[ \frac{b}{D} + 2\sqrt{\left(\frac{1}{a} \cdot \frac{D}{2} \cdot V\right)^2 + 1} \right]} \cdot$$

$$\cdot \left\langle \exp\left[ \frac{1}{2a} \left( V - \sqrt{V^2 + \left(\frac{2a}{D}\right)^2} \right) \left( y - \frac{b}{2} \right) \right] - \exp\left[ \frac{1}{2a} \left( V + \sqrt{V^2 + \left(\frac{2a}{D}\right)^2} \right) \left( -y + \frac{b}{2} \right) \right] \right\rangle \quad (3.16).$$

За (3.16) будуємо розрахункові криві наступних типів: залежність різниці температур ТЧЕ  $\Delta T(y; D; V)$  в точках, розташованих симетрично відносно ТГЕ на фіксованій відстані  $y_0$  від його центру як функцію швидкості потоку  $V$  і висоти каналу  $2D$  як параметру (рис. 3.4) та, зафіксувавши швидкість потоку, знаходимо залежність різниці температур від відстані  $y_0$  від центру ТГЕ для зміни висоти каналу (рис. 3.5).

В діапазоні монотонної зміни сигналу спостерігається збільшення чутливості трьохелементного перетворювача при збільшенні висоти каналу за умови розміщення ТЧЕ на оптимальній відстані від нагрівача, рівній половині висоти каналу. Однак розміри ТІС (діелектричного містка або мембрани над порожниною травлення) часто не дають можливості

розташувати ТЧЕ на оптимальній відстані від ТГЕ, особливо для каналів висотою 0,3 мм і більше.

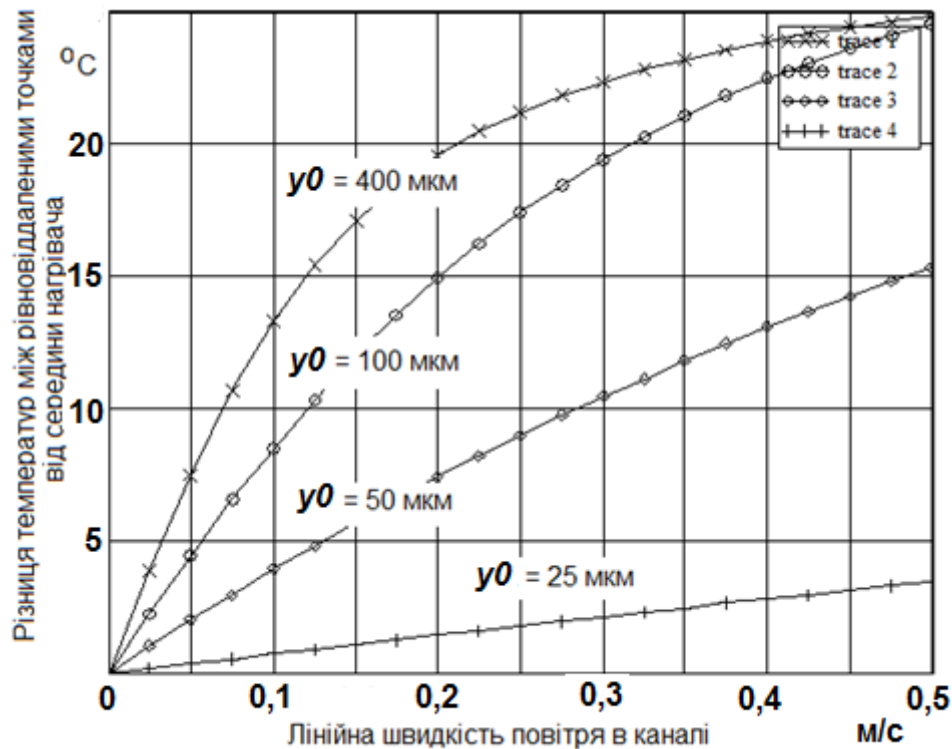


Рис. 3.4. Різниця температур між двома точками, рівновіддаленими вздовж каналу на відстань  $y_0$  від центру нагрівача, для різних швидкостей повітря (розрахунок відповідно до (3.16)); нагрівач прямокутної форми 1 мм х 40 мкм, розташований впоперек каналу висотою  $2D=600$  мкм;  $P=3$  мВт

Із літературних джерел відомі на перший погляд принципово суперечливі отриманим експериментальні результати авторів F.Mayer, O.Paul, H.Baltes [123], в яких чутливість перетворювача монотонно зростає від 0,3 до 1,2 [В/(Вт·м/сек)] зі зменшенням висоти каналу від 1,6 до 0,1 мм та має функціональну залежність від висоти каналу порядку  $D^{-1/2}$ . Невідповідність можна пояснити надто близьким розташуванням вимірювачів температури від нагрівача (30 мкм), хоча в тій же роботі наведено графічну залежність з близьким до лінійного монотонним зростання чутливості від відстані нагрівач – вимірювач в діапазоні 10 – 80 мкм при висоті каналу 0,8 мм.

Як видно з рис. 3.5, характеристики перетворення не однозначні у вибраному діапазоні змінних. Фізично результат пояснюється зниженням температури ТГЕ з ростом швидкості потоку, що в режимі сталої потужності призводить і до результуючого падіння різниці температур ТЧЕ у вимірювальних точках.

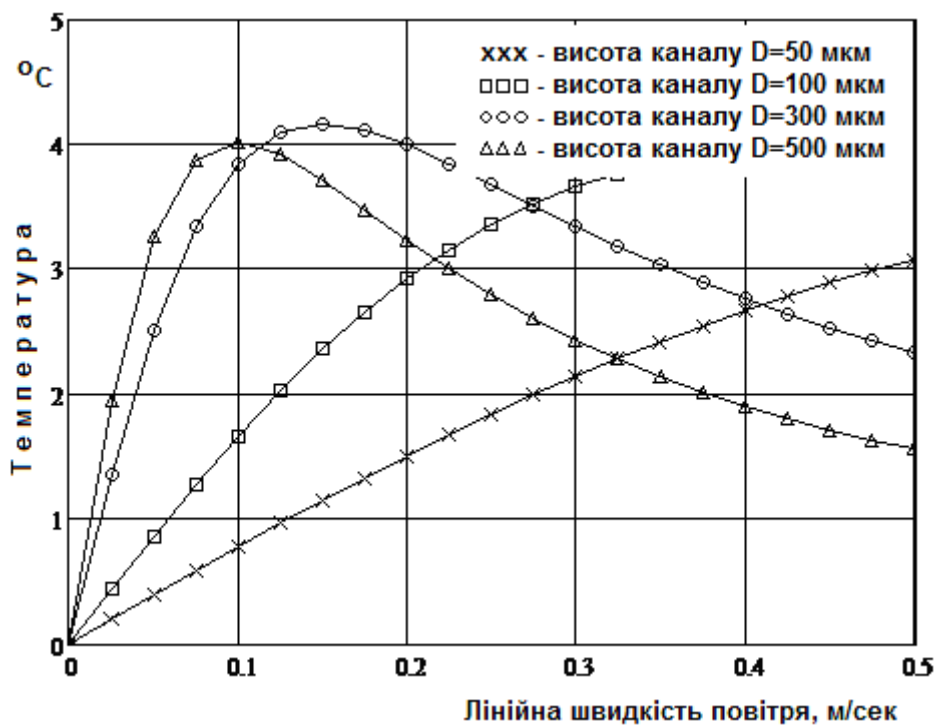


Рис. 3.5. Розрахункова залежність різниці температур середовища між двома точками, рівновіддаленими вздовж каналу на відстань від центру нагрівача, рівну половині висоти каналу, від лінійної швидкості повітря в каналі. Нагрівач прямокутної форми (довжина  $L=1$  мм, ширина  $b=20$  мкм, потужність  $P=1$  мВт)

Графічні залежності температури для одноелементного ТРПП від лінійної швидкості повітря в каналах висотою  $2D=200$  мкм,  $2D=600$  мкм, і  $2D=1000$  мкм наочно проявляють наступні два ефекти: значну деформацію температурного поля в каналі в околиці нагрівача та одночасно значно менш значне зниження температури власне нагрівача в нижньому діапазоні швидкостей. Це визначає переваги в чутливості триелементного калориметричного перетворювача над одноелементним термоанометричним в наступних аспектах:

- вид характеристики перетворення: лінійна залежність від швидкості в нижній частині діапазону для трьохелементного калориметричного перетворювача і нульова (принципова відсутність чутливості) або близька до нульової – для одноелементного термоанемометричного;

- в порогових значеннях вимірюваної лінійної швидкості: задавши порогове значення достовірно вимірюваної різниці температур  $\delta T = 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , отримуємо для триелементного занурювального ТРПП в каналі висотою понад 100 мкм порогову швидкість менше 0,01 м/сек;

- чисельні значення чутливості перетворювачів двох альтернативних конструкцій:  $160 \text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{м/сек})$  на швидкості 0,1 м/с для триелементного калориметричного занурювального перетворювача в каналі висотою 300 мкм і  $65 \text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{м/сек})$  – для одноелементного.

Для більш високих швидкостей вказані відмінності стають менш суттєвими, однак з оглядом на необхідність визначення напрямку руху і компенсації впливу нестабільності температури потоку на характеристику перетворення перевагу однозначно слід надавати триелементним ТРПП. Зазначимо конструктивну перевагу ТРПП у MEMC виконанні над дротяними: технології MEMC завдяки методам фотолітографії дозволяють з високою точністю реалізувати потрібні відстані між ТГЕ і ТЧЕ та забезпечити їх стабільність шляхом розміщення ТРПП на діелектричній теплоізолюючій мембрані.

Згідно з наведеним вище, розподіл зміни температури в площині ТГЕ в фіксованій точці як функція швидкості середовища має наведені на рис. 3.4, 3.5 залежності. Результат має бути використаним для фіксації точок оптимального розміщення ТЧЕ при реєстрації залежності  $\Delta T(y, V)$ : як видно, ТЧЕ для повітряного середовища в каналі висотою  $2D = 600 \text{ мкм}$  повинні бути розташовані на відстані порядку 300 мкм від центру ТГЕ. Для розширення вимірювального діапазону в бік високих швидкостей необхідно підвищувати споживану потужність або використовувати калориметричний режим зі стабілізацією температури ТГЕ.

Як бачимо із (3.16), для одноелементного ТГЕ залежність градієнтів температури від координати вздовж потоку – монотонна експоненціально спадаюча функція, вона не має екстремуму. Для одноелементного занурювального ТГЕ, розміщеного у каналі, отримуємо чисельні значення градієнтів на його ближній за потоком границі в точці  $y_{\text{grad.max}} = b/2$ :

$$\frac{\partial(\Delta T(y))}{\partial y} \Big|_{(y=b/2)} = \frac{P \cdot C \cdot \gamma}{2k^2 L \left[ \frac{b}{D} + 2\sqrt{\left( \frac{1}{a} \cdot \frac{D}{2} \cdot V \right)^2 + 1} \right]} \cdot V \quad (3.17).$$

Відомі результати з експериментального визначення профілю температури вздовж нагрівача шляхом створення потенціальних контактів по його довжині [54]; ці результати підтверджують коректність застосування вибраних в нашій роботі методик визначення середнього по площі значення температури ТГЕ і, відповідно, його електричного опору.

Із виразу для  $T_2$  в (3.12) визначаємо коефіцієнт теплообміну ТГЕ  $H_2(V), [ \frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C} ]$  в залежності від швидкості середовища як параметру і граничне значення теплового опору середовища в каналі для обраної моделі ТРПП  $R_{th}(V), [ \frac{^\circ C}{Bm} ]$  при  $V \rightarrow 0$ :

$$H_2(V) = \frac{P}{T_2(V) L b} = C \gamma \left( \frac{2a}{D} + 2 \frac{D}{b} \sqrt{V^2 + \left( \frac{2a}{D} \right)^2} \right) \left[ \frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]; \quad (3.18)$$

$$R_{thTTE \max}(V) = \frac{1}{C \gamma} \frac{1}{\left( \frac{2a}{D} L b + 2 L D \sqrt{V^2 + \left( \frac{2a}{D} \right)^2} \right)} \quad (3.19).$$

Як видно з аналізу останніх виразів, для малих швидкостей коефіцієнт теплообміну  $H_2(V \rightarrow 0)$  характеризується слабкою залежністю від швидкості, а його абсолютне граничне значення за умови  $D \gg b$  визначається коефіцієнтом теплопровідності середовища і шириною нагрівача:

$$Z_T(V \rightarrow 0) \approx 2k\left(\frac{1}{D} + \frac{2}{b}\right) \approx \frac{4k}{b}. \quad (3.20)$$

Тепловий опір для малих швидкостей потоку  $G2^{-1}(V \rightarrow 0)$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ] також характеризується слабкою залежністю від швидкості, а його значення визначається коефіцієнтом теплопровідності середовища, висотою каналу, довжиною і шириною нагрівача; граничне значення цього параметру (для  $b/D \rightarrow 0$ ) визначається лише теплопровідністю середовища і довжиною містка:

$$G2^{-1}(V \rightarrow 0) \approx \frac{1}{\frac{2kLb}{D} + 4kL} = \frac{1}{4kL\left(\frac{b}{2D} + 1\right)} \approx \frac{1}{4kL} \text{ } [^{\circ}\text{C}/\text{Вт}]. \quad (3.21)$$

Залежність (3.21) коректно застосовувати за умови нехтування теплопровідністю з торців ТГЕ на корпус; для коротких перетворювачів ця умова може порушуватися. Наприклад, для містка довжиною 1 мм граничне значення теплового опору в повітряному середовищі  $R_{th}(L=1\text{мм}) = 10^4$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ]. Припущення рівної по площі температури нагрівача і відсутності теплопровідності по його довжині приводить до завищеного значення теплового опору. За порядком розрахунків значення є дуже близькими до експериментально отриманої величини теплового опору ТМЕ в непорушному повітрі:  $R_{th \text{ ТМЕ експер.}} = 9 \cdot 10^3$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ] з розмірами нагрівача 40 мкм x 1 мм і розмірами мембрани 0,5 мм x 1 мм.

Перехід від «малих» до «великих» лінійних швидкостей визначає співвідношення величини швидкості і комплексу  $\frac{2a}{D} = \frac{2k}{C\gamma D}$  розмірності [м/сек], до якого входять температуропровідність середовища  $a$  і висота каналу  $2D$ . Для повітряного середовища в каналі з висотою  $2D = 600$  мкм перехідна область лежить в околиці  $V \approx 0,13$  [м/сек]. Відповідно для «великих» лінійних швидкостей  $V \gg \frac{2k}{DC\gamma}$  аналізовані параметри

характеризуються наступними залежностями:  $H2(V \gg 2a/D)$  - близькою до лінійної залежністю від швидкості, а  $R_{th} = G2^{-1}(V \gg 2a/D), [\frac{^0C}{Bm}]$  - обернено пропорційною (закон Кінга та відповідність до нього):

$$H2(V \rightarrow \infty) \approx \frac{2k}{D} + 2\frac{DC\gamma}{b}V \quad (3.22),$$

$$R_{th}(V \rightarrow \infty) \approx \frac{1}{\frac{2kLb}{D} + 2C\gamma LDV} \quad (3.23).$$

В каналі висотою порядку 100 мкм практично немає залежності коефіцієнту теплообміну від лінійної швидкості до величин 0,1 м/сек, а тому не буде помітної чутливості одноелементного перетворювача до переміщення середовища в каналі; це пояснюється слабким (не істотним) впливом вимушеної конвекції на фоні значної величини теплообміну нагрівача шляхом теплопровідності через заповнений середовищем тонкий канал. Теплопровідність середовища впливає лише на значення коефіцієнту теплообміну і теплового опору при низьких швидкостях потоку, а коефіцієнт пропорційності в лінійному діапазоні залежності  $H2(V \rightarrow \infty)$  визначається теплоємністю, густиною і співвідношенням висоти каналу і ширини нагрівача. Діапазон швидкостей перехідної області, як уже зазначалось, визначається співвідношенням лінійної швидкості середовища в каналі і комплексу з розмірністю швидкості  $(2a/D)$ . Оскільки нижня межа діапазону вимірювання для одноелементного термоанемометричного ТРПП площинної геометрії визначається появою залежності теплообміну від швидкості, для збільшення чутливості в області малих значень швидкості потоку варто зменшувати ширину нагрівача і збільшувати висоту каналу, що не завжди можливо з вимоги мінімально допустимого пневматичного опору каналу.



Система (3.11) дозволяє дослідити крутизну характеристики в режимі сталої потужності для одноелементного  $GO_V = \frac{\partial T2}{\partial V}$  та триелементного ТРПП  $G3_V = \frac{\partial T3}{\partial V}$  з одним ТГЕ і двома симетрично рознесеними ТЧЕ:

$$GO_V = \frac{\partial T2}{\partial V} = -\frac{D^2}{8L} \frac{P \cdot V}{ka^2 \left( \sqrt{\left(\frac{D}{2a} \cdot V\right)^2 + 1} \right) \cdot \left( \frac{b}{D} + 2\sqrt{\left(\frac{D}{2a} V\right)^2 + 1} \right)^{3/2}} \quad (3.24).$$

Змінюючи висоту каналу як параметр, будемо залежності температурної чутливості одноелементного ТРПП:

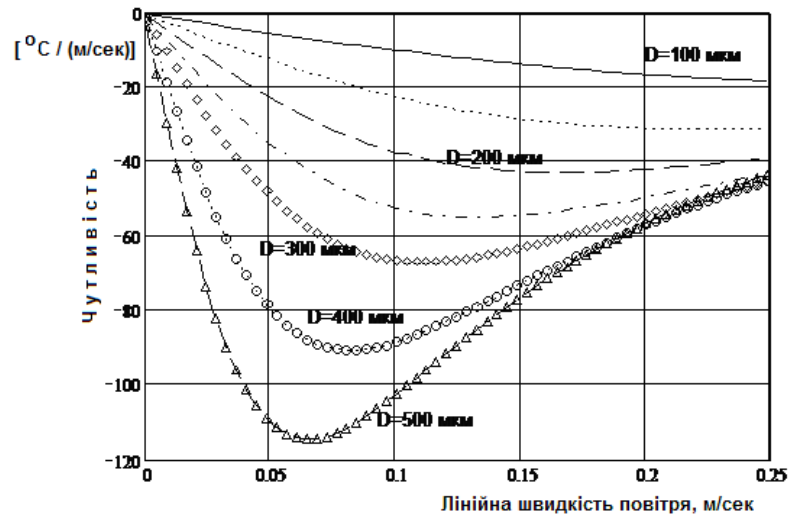


Рис. 3.7 Розрахункова залежність температурної чутливості **одноелементного** перетворювача [ $^{\circ}\text{C}/(\text{м/сек.})$ ] від лінійної швидкості потоку [ $\text{м/сек}$ ] для висоти каналу D.

Чутливість  $G3_V$  триелементного ТРПП до лінійної швидкості потоку для симетрично рознесених ТЧЕ перед та після ТГЕ визначаємо похідною від різниці температур по швидкості:

$$\begin{aligned}
G3_V(k, C, \gamma, b, D, y, V) &= \frac{\partial \{T3(y) - T1(-y)\}}{\partial V} = \\
&= GO_V \{ \exp[\lambda_2(y - \frac{b}{2})] - \exp[\lambda_1(-y + \frac{b}{2})] \} + \\
&+ T0 \frac{y - b/2}{2a} \{ (1 - \frac{V}{\sqrt{V^2 + (\frac{2a}{D})^2}}) \exp[\lambda_2(y - \frac{b}{2})] + (1 + \frac{V}{\sqrt{V^2 + (\frac{2a}{D})^2}}) \exp[\lambda_1(-y + \frac{b}{2})] \}
\end{aligned}
\tag{3.26},$$

де узагальнена координата  $y \in \frac{b}{2} \div \infty$  відрахована від центру ТГЕ. Графічна залежність чутливості  $G3_V$  від кожного з параметрів від швидкості потоку і відстані від осьової лінії ТГЕ наведено нижче:

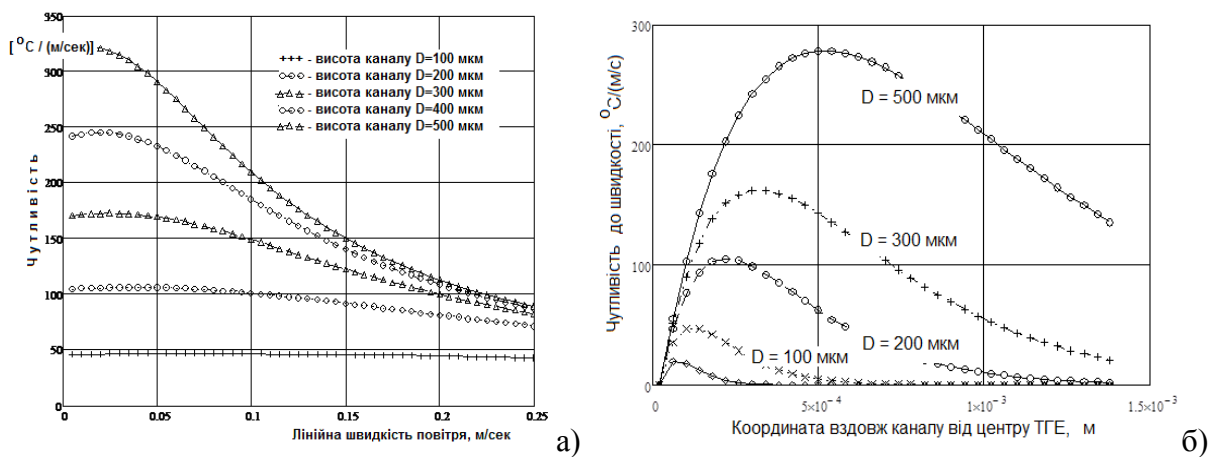


Рис. 3.8 Розрахункова залежність температурної чутливості триелементного перетворювача від швидкості повітряного потоку для висоти каналу  $D$  та від відстані від центру нагрівача до точок реєстрації температури для різної висоти каналу.

### Триелементний МЕМС ТРП в каналі прямокутного поперечного перетину. Режим сталої температури ТГЕ.

Введення зворотного зв'язку (режим стабілізації температури ТГЕ) принципово змінює ситуацію з неоднозначністю характеристики. На Рис. 3.13 наведено відповідні криві температурного поля вздовж осі каналу для різних швидкостей повітряного потоку.

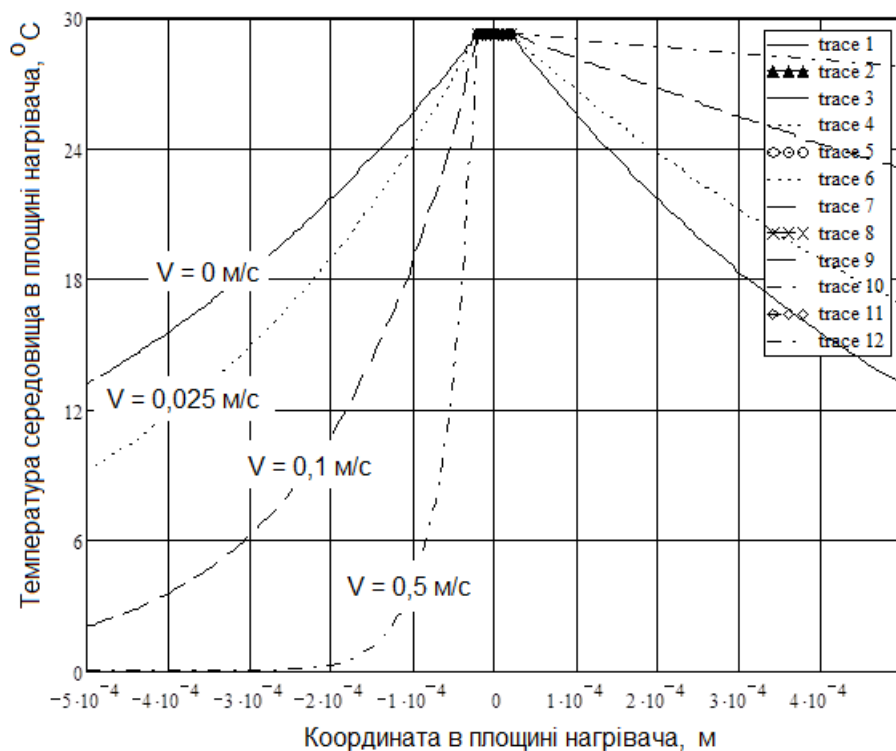


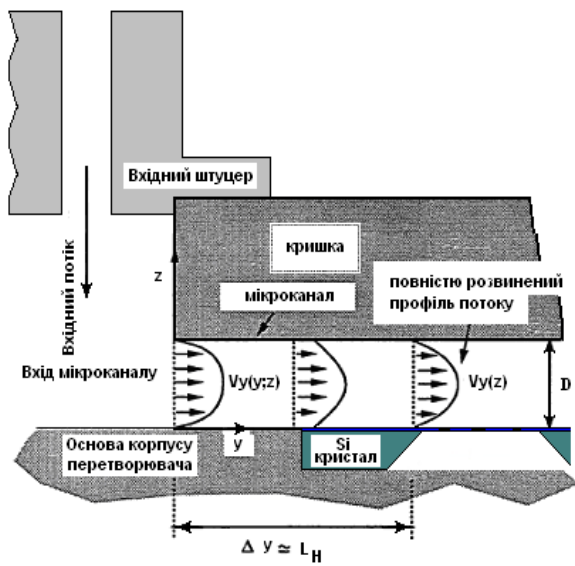
Рис. 3.9 Розрахунковий розподіл температури вздовж мембрани в залежності від швидкості повітря в каналі в режимі сталої температури. Нагрівач прямокутної форми 1 мм x 40 мкм, розташований впоперек каналу висотою  $2D=600$  мкм; розсіювана на нагрівачеві потужність  $P=3$  мВт. Вертикальна вісь – температура [ $^{\circ}\text{C}$ ], горизонтальна вісь – координата, [мм].

### 3.1.2 Поверхневий терморезисторний перетворювач, вмонтований в стінку потокоформуючого каналу.

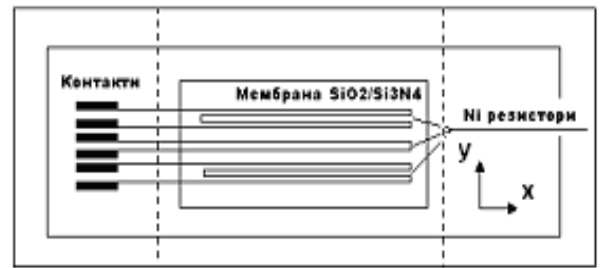
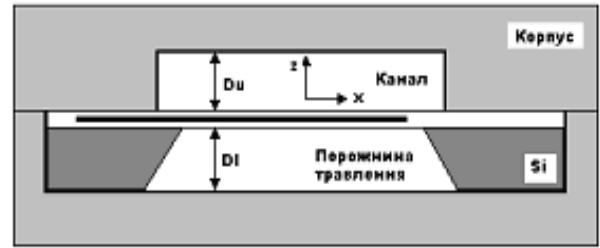
Спрощену двовимірну геометрію пневматичного каналу висотою  $D_{\text{верх}}$ , в стінку якого вмонтовано мембранний ТРПП, зображено на Рис. 2.51, а) і б). Відстань між площиною мембрани ТРПП і корпусом становить  $D_{\text{низ}}$ . Корпус виконує роль теплового стоку зі сталою температурою, рівною температурі потоку на значній відстані від ТРП.

Для елементарного фрагменту ширини мембранного поверхневого перетворювача  $dy$  в заповненому середовищем каналі процеси усталеного теплообміну описуються наступним рівнянням, отриманим із закону збереження енергії:

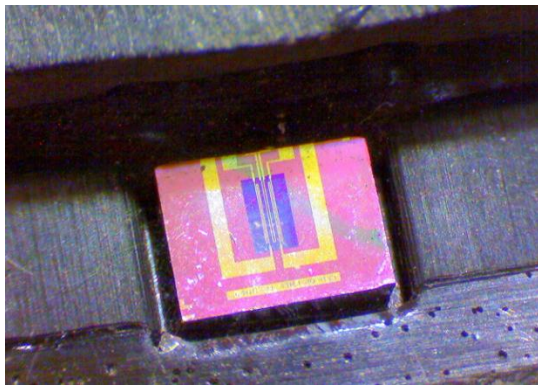
$$P_{dy} = P_{\text{конд.у.сер}} + P_{\text{конв.у.сер}} + P_{\text{конд.у.мембр.}} + P_{\text{конд.сер}} + P_{\text{конд.дно}} \quad (3.27),$$



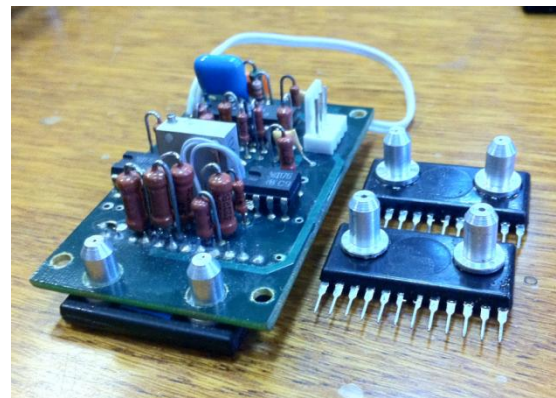
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.10 Мембранний ТРПП лінійної швидкості середовища поверхневого типу.  
а), б) – ескізи до побудови моделі, в) - фото перетворювача, вмонтованого врівень зі стінкою потокоформуючого каналу, г) - фото вторинного перетворювача.

де  $P_{dy} = P_{TGE} \frac{dy}{b}$  – електрична потужність, що рівномірного виділяється на елементі  $dy$  ТГЕ загальної ширини  $b$ ,

$$P_{\text{конд.у.сер}} = k_{\text{fluid}} \cdot \frac{\partial(T(y)/2)}{\partial y} \cdot L_x \cdot D_{\text{верх}} - \text{втрати тепла теплопровідністю в}$$

середовищі в напрямку ОУ вздовж каналу за рахунок теплопровідності за

умови лінійного розподілу (сталого градієнту) температури середовища по висоті каналу; тоді  $T(y)/2$  – середня по висоті каналу температура перегріву середовища відносно температури корпусу і середовища на достатньо значному віддаленні від нагрівача,

$$P_{\text{конв.у.сер}} = \gamma \cdot C \cdot V_y \cdot (T(y)/2) \cdot L_x \cdot D_{\text{верх}} - \text{конвективні втрати тепла в}$$

середовище, що рухається зі швидкістю  $V$  в напрямку ОУ,

$$P_{\text{конд.у.мембр.}} = k_m \cdot \frac{\partial(T(y))}{\partial y} \cdot L_x \cdot d_m - \text{кондуктивні втрати тепла вздовж}$$

мембрани товщиною  $d_m$  в напрямку ОУ,

$$P_{\text{конд.сер}} + P_{\text{конд.дно}} = (H_{\text{верх}} + H_{\text{низ}}) \cdot T(y) \cdot L_x \cdot dy - \text{втрати тепла з}$$

верхньої та нижньої поверхонь елементу мембранного перетворювача довжиною  $dy$ .

Втрати тепла в середовище за рахунок теплопровідності з поверхні не занурюваного ТГЕ визначалися в попередніх роботах [63, 64, 120, 122] за наступним виразом:

$$P_{\text{конд.сер}} = k_{\text{fluid}} \cdot \frac{T(y)}{D_{\text{верх}}} \cdot L_x \cdot dy \quad (3.28).$$

Така залежність справедлива тільки за умови лінійного розподілу температури по висоті каналу від мембрани до стелі; до того ж градієнт температури рухомого середовища в каналі вздовж вертикалі в [63, 64, 120, 122] вважався сталим в діапазоні зміни швидкостей руху середовища. Такі припущення інших авторів суттєво обмежують область застосування шуканого розв'язку. Більш раціональним є використання отриманих в розділі 2.3 нашої роботи результатів і врахування теплообміну як з середовищем в каналі (умовно – “зверху” ТГЕ), так і з середовищем під мембраною (повітрям). Відповідно до (2.17) для мембранного ТРПІ

поверхневого типу, вмонтованого в стінку потокоформуєчого каналу, за умови теплофізичних параметрів середовища в каналі  $(k, C, \gamma)_{fluid}$  і заповненої нерухомим повітрям порожнини травлення отримуємо:

$$H_{верх}(b, D_{верх}, k_{fluid}) = \frac{k_{fluid}}{4D_{верх} \sum_{N=0}^{\infty} \sum_{M=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \sin(\lambda_m)}{(\lambda_m)^2 (\sigma_{n,m})^2} \{1 + \frac{D_{верх}}{b\sigma_{n,m}} (\exp[-\sigma_{n,m} \frac{b}{D_{верх}}] - 1)\}} \quad (3.29),$$

$$H_{низ}(b, D_{низ}, k_{air}) = \frac{k_{air}}{4D_{низ} \sum_{N=0}^{\infty} \sum_{M=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \sin(\lambda_m)}{(\lambda_m)^2 (\sigma_{n,m})^2} \{1 + \frac{D_{низ}}{b\sigma_{n,m}} (\exp[-\sigma_{n,m} \frac{b}{D_{низ}}] - 1)\}} \quad (3.29).$$

Після підстановки в (3.27) отримуємо для елементу  $dy$  зони нагрівача:

$$k_{fluid} \cdot \frac{\partial(T(y)/2)}{\partial y} \cdot L_x \cdot D_{верх} + k_m \cdot \frac{\partial(T(y))}{\partial y} \cdot L_x \cdot d_m + \gamma_{fluid} \cdot C_{fluid} \cdot V_y \cdot (T(y)/2) \cdot L_x \cdot D_{верх} +$$

$$+ (H_{верх} + H_{низ}) \cdot T(y) \cdot L_x \cdot dy = P_{dy} \quad (3.30).$$

Після перетворень отримуємо:

$$(\frac{1}{2} + \frac{k_m \cdot d_m}{k_{fluid} \cdot D_{верх}}) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \frac{V_y}{2a_{fluid}} \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{H_{верх} + H_{низ}}{k_{fluid} \cdot D_{верх}} T = \frac{P_{нагр.} / (bL_x)}{k_{fluid} \cdot D_{верх}} \quad (3.31).$$

Граничні умови задаємо у вигляді:  $\lim_{y \rightarrow \pm\infty} T(y) = 0$ . Розв'язок (3.31) для мембранного перетворювача поверхневого типу для зон мембрани до нагрівача  $T1(y1)$ , над нагрівачем  $T2(y2)$  та після нагрівача  $T3(y3)$  отримуємо у наступному вигляді (зони орієнтовано відповідно до напрямку руху середовища в каналі):

$$T1(y1) = T2 \exp[\lambda_1 (y1 + \frac{b}{2})];$$

$$T2 = \frac{P}{b \cdot L \cdot [\frac{k_{fluid}}{D_{верх}} + \frac{k_{air}}{D_{низ}}] + D_{верх} L \cdot (C \cdot \gamma)_{fluid} \sqrt{\frac{V^2 + 16a_{fluid}^2 (\frac{1}{2} + \frac{k_m \cdot d_m}{k_{fluid} \cdot D_{верх}}) (\frac{H_{верх} + H_{низ}}{k_{fluid} \cdot D_{верх}})}{(1 + 2 \frac{k_m \cdot d_m}{k_{fluid} \cdot D_{верх}})}}$$

$$T3(y3) = T2 \exp\{\lambda_2 (y3 - \frac{b}{2})\}.$$

(3.32)

$$\text{де } y1 \in -\infty \div -\frac{b}{2}; y3 \in \frac{b}{2} \div \infty ;$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{4a_{fluid} \cdot (\frac{1}{2} + \frac{k_m \cdot d_m}{k_{fluid} \cdot D_{верх}})} \left[ V \pm \sqrt{V^2 + 16a_{fluid}^2 (\frac{1}{2} + \frac{k_m \cdot d_m}{k_{fluid} \cdot D_{верх}}) (\frac{H_{верх} + H_{низ}}{k_{fluid} \cdot D_{верх}})} \right]$$

(3.33);

де  $a_{fluid}$  – температуропровідність середовища в каналі,  $[m^2/сек]$ .

Виконані відповідно до (3.32) результати розрахунку температури в площині мембрани поверхневого ТРПП наведено на рис. 3.11. Отриманий розрахунковий результат відповідає експериментально виміряним чисельним значенням параметру розсіювання потужності для мембранних ТРПП медичної сенсорики ФЕЛ (тепловий опір місткового ТГЕ в непорушному повітрі за нормальних умов становить  $Z_T = 10^4 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$ ). Попередньо в літературних джерелах [41] відстань від середини ТГЕ до точки вимірювання температури, що відповідає найбільшій чутливості до лінійної швидкості потоку в каналі, визначалась рівною половині висоти потокоформуючого каналу. Такий результат отримано в розглянутій нами в попередньому розділі моделі ТРПП занурюваного типу; аналогічний результат отримано в попередньому розділі нашої роботи. З наведеного рис. 3.11 видно, що в режимі сталої потужності такий результат не

відповідає дійсності для поверхневого ТРПП. Більше того, для нижнього по потоку ТЧЕ спостерігається зона нечутливості у вказаному, рекомендованому авторами в в [160 - 162] у якості оптимального діапазоні розміщення ТЧЕ.

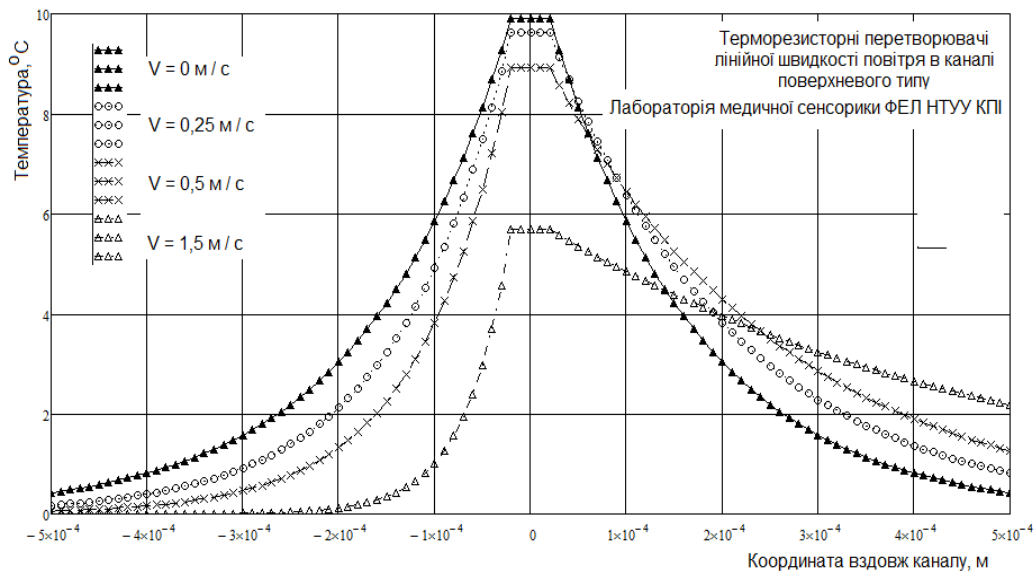


Рис. 3.11. Розрахункова залежність розподілу температури вздовж мембранного поверхневого перетворювача від швидкості повітря в каналі висотою 300 мкм. Товщина мембрани 0,4 мкм. Розміри ТЧЕ: 1000мкм x 40 мкм. Режим сталої потужності,  $P=1$  мВт

Розрахункові результати для поверхневого ТРПП в режимі сталої температури ТЧЕ наведено на рис. 3.12.

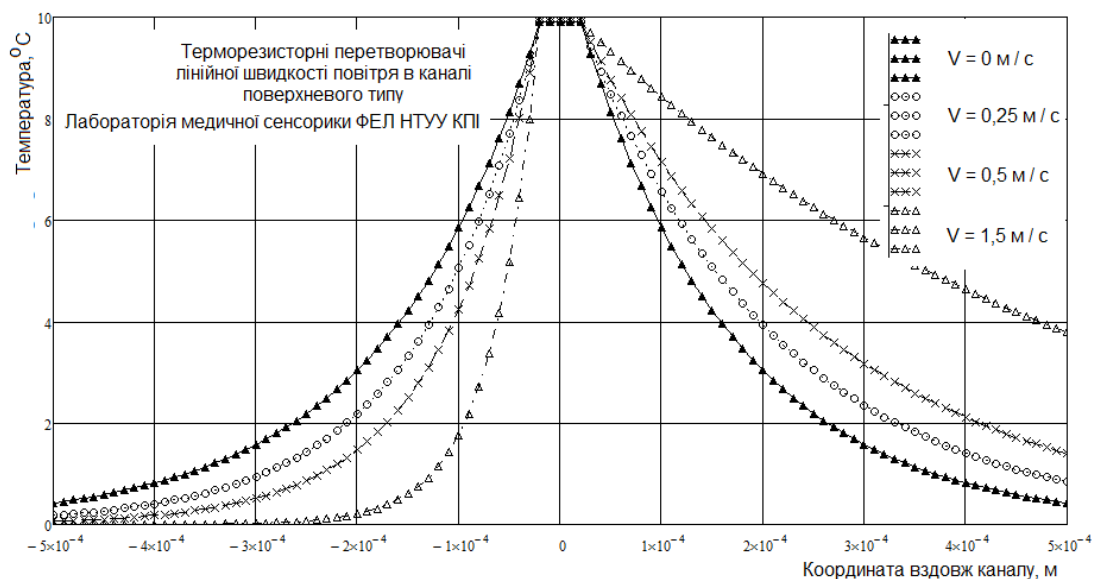


Рис. 3.12. Розрахункова залежність розподілу температури вздовж мембранного поверхневого перетворювача від швидкості повітря в каналі висотою 300 мкм. Товщина мембрани 0,4 мкм. Розміри ТЧЕ: 1000мкм x 40 мкм. Режим стабілізації температури.



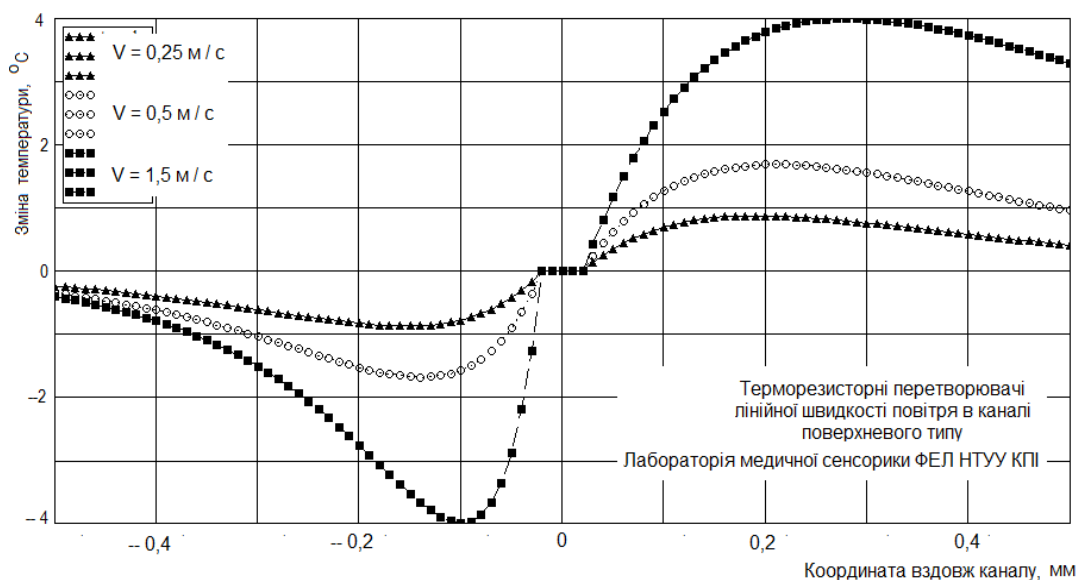


Рис. 3.13. Розрахункова залежність зміни температури відносно розподілу за відсутності потоку середовища в каналі. Перетворювач поверхневого типу вмонтовано в стінку потокоформуєчого каналу. Товщина мембрани 0,4 мкм. Розміри ТГЕ 1000мкм x 40 мкм. Режим стабілізації температури ТГЕ

### 3.2 Методи динамічного нагрівання для вимірювання теплофізичних параметрів середовища.

Методи динамічного нагрівання ТГЕ з наступним аналізом амплітудно-фазових характеристик зміни безпосередньо його температури або температури належним чином просторово розподілених ТЧЕ є ефективним інструментом визначення теплофізичних параметрів досліджуваного середовища. В [136 – 139] розглянуті методи періодичного, монотонного та імпульсного нагрівання ТГЕ, які використовують об'ємний (дротовий або фольговий) ТРПП для визначення теплофізичних характеристик переважно твердих тіл [140, 147, 158, 159]. В більшості цих робіт зразок розміщують у камері, вакуумованій до тиску нижче 0,001 Па з метою зменшення впливу теплообміну ТГЕ з оточуючим середовищем на результат вимірювання параметрів матеріалів. На противагу згаданим роботам, при дослідженні газів [148 – 150, 160] і рідин, включаючи електропровідні [155 – 157], використовується залежність просторово-часових характеристик зміни температури ТГЕ і ТЧЕ від параметрів оточуючого середовища – рідини або газу. Вимірюваним

сигналом є амплітуда та (або) фаза зміни температури безпосередньо нагрівача ТГЕ (зондовий метод) або температури середовища в просторово рознесених точках на відомій відстані від ТГЕ. Велика кількість наукових робіт останнього періоду присвячена дослідженню параметрів тонких діелектричних плівок [86, 96, 97, 99] і структур наноелектроніки [104] з використанням активного тонкоплівкового ТРПП, виготовленого за технологіями мікроелектроніки.

Методи монотонного та імпульсного нагрівання передбачають реєстрацію часових змін температури активного ТГЕ заданої геометрії, розміщеного в об'ємі або на поверхні досліджуваного середовища, за умови розсіюванні на ТГЕ відомої потужності електричного струму. Конструктивні особливості ТГЕ суттєво впливають на інформативність методу: ТГЕ площинної геометрії або геометрії тонкого дроту є менш інформативними, тоді як ТГЕ смужкової (hot strip) та дискової (hot disc) геометрії за умови належного вибору часових рамок реєстрації інформативного сигналу та методики математичної обробки дозволяють одночасно в одному вимірювальному процесі реєструвати два теплофізичні параметри: теплопровідність і температуропровідність (або теплоємність одиниці об'єму).

Інформативні переваги методу періодичного нагрівання над іншими ґрунтуються на можливості одночасного контролю декількох параметрів процесу теплообміну між ТІС та оточуючим середовищем: просторових змін амплітуди коливання температури та її середнього значення для ТГЕ чи ТЧЕ, частотних залежностей амплітуди коливання температури, фазових характеристик теплової хвилі. Висока інформативність методу робить його внутрішньо контрольованим за рахунок можливості обробки даних, отриманих в одному експериментальному циклі, за різними методиками.

### ***Зондовий метод періодичного нагрівання.***

Специфіка методу температурної хвилі ґрунтується на особливостях її збудження і поширення в середовищі, а саме на залежності глибини затухання амплітуди від частоти  $\omega_T$  і теплофізичних параметрів середовища – теплопровідності  $k$ , теплоємності  $C_P$  за сталого тиску, густини  $\gamma$ , а також їх комплексів у різних комбінаціях: температуропровідності  $a = k / (C_P \gamma)$  і теплової активності  $\varepsilon = \sqrt[2]{k C_P \gamma}$ . Аналіз чисельних значень параметрів середовищ показує, що найбільш значна відмінність теплофізичної характеристики між повітрям і вуглекислим газом спостерігається в температуропровідності (більше ніж вдвічі), між водою та етанолом – в тепловій активності (майже втричі), між  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – в теплопровідності. Доцільно використовувати цю особливість при конструюванні ТРПП динамічного нагрівання на комплекс теплофізичних параметрів середовища на стадії вибору оптимальної методики теплового збудження і обробки інформаційного результату [136 – 138].

Проаналізуємо зміну температури півпростору середовища для випадку нагрівання його межі за гармонічним законом (наближення нескінченно широкого ТГЕ). Просторово-часові зміни температури середовища відбуваються відповідно до наведеної нижче залежності  $T(z, t)$ , яка описує проникнення плоскої теплової хвилі в півпростір [98, 124, 154, 160]:

$$T(z, t) = T_0 \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega_T}{2a}} z\right) \cos\left(\omega_T t - \sqrt{\frac{\omega_T}{2a}} z\right), \quad (3.34)$$

де  $T_0$  – амплітуда коливань температури на межі півпростору,  $\omega_T$  – кругова частота коливань температури,  $a$  – температуропровідність середовища,  $t$  – час,  $z$  – координата по нормалі до межі півпростору. Комплекс  $\sqrt{\frac{\omega_T}{2a}}$  характеризує просторове затухання амплітуди коливання температури

середовища (глибину проникнення теплової хвилі в середовище). На характерній відстані  $l_T$ , яку прийнято називати глибиною затухання, амплітуда плоскої теплової хвилі зменшується в  $e^1 \approx 2,72$  раз:

$$l_T = \sqrt{2a/\omega_T} = \sqrt{a/\pi f_T} = \sqrt{a/2\pi f} \quad (3.35).$$

На глибині  $5l_T$  амплітуда коливання температури зменшується в 100 разів, а на довжині хвилі  $\lambda_T$  теплового коливання

$$\lambda_T = 2\pi l_T = 2\pi \sqrt{2a/\omega_T} = \sqrt{2\pi(a/f)} \quad (3.36)$$

амплітуда зменшується в  $e^{2\pi} \approx 535$  раз, що свідчить про значну просторову локалізацію коливального процесу в околиці ТГЕ та про можливість активного керування товщиною досліджуваного середовища чи матеріалу шляхом зміни частоти зонduючого струму живлення ТГЕ. Для випадку збудження циліндричної або сферичної теплової хвилі характерне більш швидке просторове затухання її амплітуди в середовищі, тому, відповідно, спостерігається ще вища локалізація коливального процесу.

В [150 – 152, 154, 160] проведено аналіз просторової залежності зміни амплітуди коливання температури середовища при зміні температуропровідності за поширення теплової хвилі в півпростір від розташованого на межі активного ТГЕ. Гранична умова на межі півпростору передбачає підтримання сталої амплітуди коливання температури в заданому частотному діапазоні її зміни. Розрахунки відносної зміни амплітуди виконано з використанням моделі процесу за виразом (3.34), отримані залежності наведено на рис. 3.14 для різних частот коливального процесу. Наявність та просторове розташування істотно вираженого максимуму відносної зміни амплітуди та отримані чисельні значення цього параметру для практично значимих частот підтверджує переваги у використанні вимірювальних перетворювачів саме в МЕМС виконанні з характерними

розмірами ТГЕ та ТЧЕ порядку десятків – сотень мікрон та з власними сталими часу порядку одиниць - десятків мілісекунд. Залежність відносної зміни амплітуди коливання температури від відстані від межі півпростору як результат зміни температуропровідності середовища від  $1,87 \cdot 10^{-5}$  [м<sup>2</sup>/сек] (повітря за нормальних умов) до  $8,75 \cdot 10^{-6}$  [м<sup>2</sup>/сек] (вуглекислий газ за нормальних умов) для частот струму живлення  $f = 10$  Гц, 50 Гц, 100 Гц наочно показує наявність оптимального просторового розташування ТЧЕ при вимірюванні температуропровідності середовища. Зазначимо, що в розглянутій одночастотній моделі вимірювального перетворення немає можливості експериментального визначення повного комплексу теплофізичних характеристик (теплопровідності, питомої теплоємності, густини). Характерним є звуження кривої  $\Delta T(z)$  і просторове наближення її максимуму до межі півпростору до величин порядку сотень мікрон з ростом частоти розігрівуючого струму, що призводить до зростання критичності до оптимального взаємного розташування складових ТІС – ТГЕ та ТЧЕ. Конструкції ТРПП, виготовлених за технологією МЕМС, на противагу дрововим аналогам, характеризуються прецизійністю форми та взаємного просторового розташування окремих елементів.

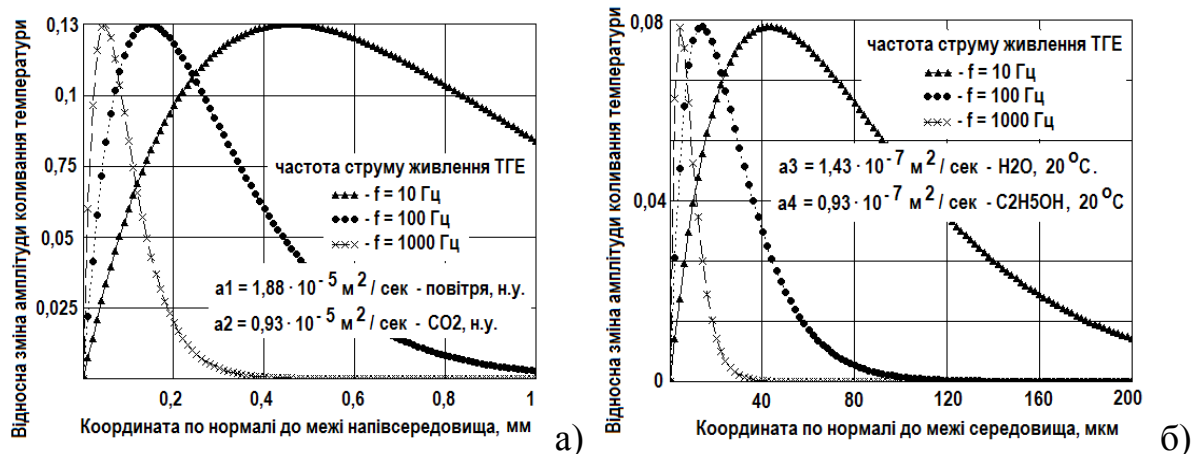


Рис. 3.14. Просторова залежність зміни амплітуди коливання температури внаслідок зміни хімічного складу середовища: а) повітря,  $a_1 = 1,88 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/сек, вуглекислий газ  $a_2 = 0,93 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/сек за нормальних умов, б) вода  $a_3 = 1,43 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/сек, спирт етиловий,  $a_4 = 0,93 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/сек при температурі 20 °С [154, 160]

Довідникові значення теплофізичних параметрів важливих для нашої роботи речовин та обчислені за ними чисельні значення температуропровідності, теплової активності, глибини затухання та довжини теплової хвилі для діапазону частот струму живлення від 10 Гц до 10 кГц наведені нижче в таблиці 3.2.

Оскільки зондові методи динамічного нагрівання передбачають застосування розрахункової стадії при визначенні теплофізичних параметрів середовища, кінцева методична похибка вимірювання визначальним чином залежить від адекватності вибраної математичної моделі ТРПП, а основними її чинниками є конструктивні відхилення реального ТРПП від модельного (скінченні поперечні та поздовжні розміри ТГЕ, ТЧЕ і аналізованого об'єму середовища, скінченні теплоємності ТГЕ і ТЧЕ, коректність граничних умов). Саме ТРПП, спроектовані за технології МЕМС, мають переваги в прецизійності окремих елементів ТПС та взаємного розташування ТЧЕ відносно ТГЕ.

Таблиця 3.2

Довжина теплової хвилі  $\lambda_T$  в середовищі.

| Середовище             | Температуропровідність<br>$a = k / (C_p \gamma)$<br>[м <sup>2</sup> /(сек)] | Довжина теплової хвилі в середовищі $\lambda_T$<br>на частоті зміни струму живлення нагрівача $f$ , *<br>$\lambda_T = 2\pi \sqrt{2a / \omega_T} = \sqrt{2\pi(a/f)}$ , [м] |  |  |  |
|------------------------|---|---|--|--|--|
|                        |   | $f = 5 \text{ Гц}$  | $f = 50 \text{ Гц}$                    | $f = 250 \text{ Гц}$                   | $f = 1\,000 \text{ Гц}$                |
| <b>Si</b>              | $9,14 \cdot 10^{-5}$  | $7,58 \cdot 10^{-3}$  | $2,40 \cdot 10^{-3}$                   | $1,07 \cdot 10^{-3}$                   | $5,35 \cdot 10^{-4}$                   |
| <b>Ni</b>              | $2,29 \cdot 10^{-5}$  | $3,79 \cdot 10^{-3}$  | $1,20 \cdot 10^{-3}$                   | $5,37 \cdot 10^{-4}$                   | $2,69 \cdot 10^{-4}$                   |
| <b>SiO2</b>            | $8,96 \cdot 10^{-7}$  | $7,50 \cdot 10^{-4}$  | $2,37 \cdot 10^{-4}$                   | $1,06 \cdot 10^{-4}$                   | $5,30 \cdot 10^{-5}$                   |
| <b>SiN<sub>x</sub></b> | $1,3 \cdot 10^{-6}$   | $9,03 \cdot 10^{-4}$  | $2,86 \cdot 10^{-4}$                   | $1,30 \cdot 10^{-4}$                   | $6,50 \cdot 10^{-5}$                   |
| <b>Повітря</b>         | <b><math>2,14 \cdot 10^{-5}</math></b><br>(20°C, 10 <sup>5</sup> Па)        | <b><math>5,19 \cdot 10^{-3}</math></b>  | <b><math>1,64 \cdot 10^{-3}</math></b> | <b><math>7,33 \cdot 10^{-4}</math></b> | <b><math>3,67 \cdot 10^{-4}</math></b> |
| <b>CO2</b>             | <b><math>9,27 \cdot 10^{-6}</math></b><br>(20°C, 10 <sup>5</sup> Па)        | $2,41 \cdot 10^{-3}$  | $7,63 \cdot 10^{-4}$                   | $3,41 \cdot 10^{-4}$                   | $1,70 \cdot 10^{-5}$                   |
| <b>Вода</b>            | <b><math>1,43 \cdot 10^{-7}</math></b><br>(20 °C)                           | <b><math>4,24 \cdot 10^{-4}</math></b>  | <b><math>1,34 \cdot 10^{-4}</math></b> | <b><math>5,99 \cdot 10^{-5}</math></b> | <b><math>3,00 \cdot 10^{-5}</math></b> |
| <b>Етанол</b>          | <b><math>9,32 \cdot 10^{-8}</math></b><br>(20°C)                            | $2,42 \cdot 10^{-4}$  | $7,65 \cdot 10^{-5}$                   | $3,42 \cdot 10^{-5}$                   | $1,71 \cdot 10^{-5}$                   |

\* - розраховано автором. В табл. 3.1  $f_T$  – лінійна частоти зміни температури активного нагрівача,  $f$  – лінійна частота зміни електричного струму живлення ТГЕ.

Рівняння теплового балансу ТГЕ як елементу із зосередженими параметрами, площею поверхні теплообміну  $S$  та однорідною температурою об'єму і поверхні теплообміну, який занурено в однорідне середовище з теплопровідністю  $k_c$  і який живиться гармонічним електричним струмом частотою  $\omega$  з амплітудою потужності  $P_0$ , запишемо у вигляді:

$$P_0 e^{-i2\omega t} = C_M \frac{\partial T_m}{\partial t} - k_c S \operatorname{grad}(T_c)_S \quad (3.37),$$

де  $C_M$  – ізобарна теплоємність ТГЕ [Дж/°C],  $\operatorname{grad}(T_c)_S$  – градієнт температури середовища на поверхні ТГЕ по нормалі до його поверхні. Температуру тонкого металевого ТГЕ вважатимемо рівною температурі на поверхні середовища, тобто  $T_m = T_c$ .

Для знаходження градієнту амплітуди коливань температури середовища на поверхні зонду  $\operatorname{grad}(T_c)_S$  в (3.38) необхідно розв'язати рівняння теплопровідності для середовища заданої геометрії. Зазвичай шукають розв'язки задачі для наступної геометрії ТГЕ:

- нескінченний тонкий ТГЕ на межі півпростору середовища;
- тонка довга дротина на осі циліндричної ємності;
- довгий тонкий ТГЕ скінченної ширини (смужка, місток) на поверхні або в об'ємі середовища.

Відхилення конструкції реального ТРПП від модельної та пов'язані з ними додаткові джерела похибки вимірювання (осьові втрати тепла на корпус ТРПП, вплив теплоємності ТГЕ, вплив захисних діелектричних прошарків на поверхні ТГЕ, наявність теплового опору на межі ТГЕ – середовище, скінченність розмірів вимірювального об'єму середовища) враховуються як поправки до точного розв'язку із моделі. Рівняння теплового балансу ТГЕ (3.38) розглядається при цьому як гранична умова рівняння теплопровідності.

У випадку незначних амплітуд змінної складової температури  $\Delta T_{ac}$  можна обмежитися лінійним наближенням в розгляді теплообміну між ТГЕ і середовищем. Аналіз процесів теплообміну на постійному та змінному сигналах можна проводити окремо. В такому випадку рівняння теплопровідності для середовища розкладається на два незалежних рівняння – для постійної  $\Delta T_{dc}(r)$  та змінної  $\Delta T_{2\omega}(r, t)$  складових температури перегріву. При цьому в спрощеній моделі не враховуються:

- залежність теплофізичних параметрів середовища від температури; у розрахунках чисельні значення параметрів приймаються для температури  $\Delta T_{dc} + T_c$ ;

- залежність розсіюваної на нагрівачеві електричної потужності від температури нагрівача, тобто у розрахунках приймається  $P_0 = \text{const}$ .

Рівняння теплового балансу запишемо для змінної складової потужності  $P_{2\omega}$  тонкоплівкового плоского місткового ТГЕ [96, 99]:

$$P_{2\omega} = i2\omega C_M \Delta T_{2\omega}(z=0) - 2k_c Lb \frac{\partial [\Delta T_c(z=0)]}{\partial z} \quad (3.38),$$

де  $C_M$  – теплоємність зонду,  $k_c$  – теплопровідність середовища,  $\frac{\partial [\Delta T_c(z=0)]}{\partial z}$  – градієнт амплітуди колювання температури середовища на межі з містком по нормалі до його поверхні.

Для знаходження градієнту амплітуди колювання температури середовища на поверхні плоского містка необхідно розв'язати рівняння теплопровідності для середовища відносно змінної складової температури. У випадку ТРПП прямокутної місткової геометрії  $C_M = C_m \gamma_m Lbh$ , де  $C_m$  та  $\gamma_m$  – питома теплоємність і густина матеріалу містка,  $L$ ,  $b$  та  $h$  – відповідно довжина, ширина і товщина містка,  $\gamma_m Lbh = m$  – маса містка,  $2Lb \approx S$  – зовнішня поверхня теплообміну.

Коли довжина теплової хвилі в середовищі значно менша за довжину та ширину нагрівача, а глибина середовища перевищує довжину хвилі,



теплову хвилю в середовищі можна вважати плоскою. У випадку тонкоплівкового місткового ТГЕ конструктивні вимоги до збудження плоскої хвилі формуються з оглядом на наступні фізичні засади:

а) оскільки амплітуда експоненційно затухаючої хвилі зменшується в 100 разів на глибині проникнення, рівній п'яти довжинам затухання  $l_T$ , логічно до зв'язку частоти струму живлення і глибини середовища  $D_C$  висунути наступну вимогу:

$$l_T = \sqrt{2a/\omega_T} = \sqrt{a/2\pi f} < \frac{D_C}{5}; \quad f > \frac{25*a}{2\pi D_C^2} \quad (3.39).$$

б) довжина хвилі коливання температури в середовищі  $\lambda_T$  має бути істотно меншою за геометричні розміри ТГЕ:  $\lambda_T = \sqrt{2\pi(a/f)} \ll b, L$ .

Оскільки ширина  $b$  місткового ТГЕ зазвичай істотно менша за його довжину  $L$ , на практиці обмежуються наступною вимогою:

$$\lambda_T = \sqrt{2\pi(a/f)} < \frac{b}{5}; \quad f > \frac{25*2\pi*a}{b^2} \quad (3.40).$$

Отримані вимога (3.40) для нижньої межі робочої частоти струму живлення ТГЕ активного нагрівання є критичною і конструктивно жорсткою, оскільки при дослідженні рідинного середовища (вода, етиловий спирт) та газу (повітря, CO<sub>2</sub>) отримуємо наступні значення нижньої робочої частоти струму живлення ТГЕ місткової геометрії з шириною нагрівача  $b$  порядку 300 мкм при збудженні плоскої хвилі:

$$f_{H_2O} > 250 \text{ Гц}; \quad f_{C_2H_5OH} > 160 \text{ Гц}; \quad f_{\text{повітря}} > 37,7 \text{ кГц}; \quad f_{CO_2} > 18,6 \text{ кГц};$$

Рівняння теплопровідності, записане для змінної складової температури перегріву середовища  $\Delta T_{2\omega}$ , матиме вигляд:

$$\frac{\partial^2 \Delta T_{2\omega}(z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{a_C} \frac{\partial \Delta T_{2\omega}(z,t)}{\partial t} = \frac{2i\omega}{a_C} \Delta T_{2\omega}(z,t) \quad (3.41).$$

Розв'язок (3.41) для півпростору середовища має вигляд плоскої хвилі, амплітуда якої згасає за експонентою:

$$\Delta T_{2\omega}(z) = \Delta T_{2\omega}^a(z=0) \exp\left(-\sqrt{\frac{2i\omega}{a_c}} z\right) \quad (3.42).$$

Гradient амплітуди на поверхні зонду знаходимо із (3.42):

$$\frac{\partial[\Delta T_c(z=0)]}{\partial z} = \sqrt{i2\omega/a_c} \quad (3.43).$$

Після підстановки (3.42) і (3.43) в (3.41) отримуємо вираз для комплексної амплітуди коливання температури зонду (ТГЕ з зосередженими параметрами та однорідною по площі температурою)  $\Delta T_{2\omega}^a(x=0)$  (індекс  $2\omega$  - кругова частота зміни температури ТГЕ):

$$\Delta T_{2\omega}^a = \frac{P_{2\omega}}{(i2\omega C_M + 2k_c S \sqrt{i2\omega/a_c})} = \frac{P_{2\omega}}{(i2\omega C_M + 2S \varepsilon_c \sqrt{i2\omega})} \quad (3.44).$$

Амплітуда коливання температури ТГЕ, спричиненого розсіюванням на ньому потужності електричного струму амплітудою  $P_0$ , відповідно до (3.44) визначається теплоємністю містка і теплофізичними параметрами середовища – теплопровідністю, густиною та теплоємністю, які входять в (3.44) єдиним комплексом у вигляді теплової активності  $\varepsilon_c$  :

$$\varepsilon_c = \sqrt{k_c C_c \gamma_c} \quad (3.45).$$

Із (3.45) шляхом алгебраїчних перетворень та враховуючи  $\sqrt{i} = \frac{1+i}{\sqrt{2}}$  знаходимо амплітуду і фазу коливань температури зонду в наближенні збудження плоскої хвилі в середовищі, яка визначається конструктивними параметрами ТГЕ, його теплоємністю і тепловою активністю середовища:

$$\Delta T_{\text{пл}}^a = \frac{P_2 \omega / 2S}{\sqrt{\omega} \sqrt{2\varepsilon_C^2 + 2\frac{C_M \sqrt{\omega}}{S} \varepsilon_C + (\frac{C_M \sqrt{\omega}}{S})^2}} \quad (3.46),$$

$$\text{tg } \varphi_{\text{пл}} = -\left(1 + \frac{\frac{C_M \sqrt{\omega}}{S}}{\varepsilon_C}\right) \quad (3.47).$$

Підставивши (3.45) в (3.46) і (3.47), отримуємо зв'язок амплітуди коливання температури зонду в наближенні збудження плоскої хвилі в середовищі та зсуву фази відносно фази коливання потужності з теплофізичними параметрами середовища і характеристиками зонду:

$$\Delta T_{\text{пл}}^a = \frac{P_2 \omega / 2S}{\sqrt{\omega} \sqrt{2k_C C_C \gamma_C + 2\sqrt{k_C C_C \gamma_C} \sqrt{\omega} C_m \gamma_m h + \omega (C_m \gamma_m h)^2}} \quad (3.48);$$

$$\text{tg } \varphi_{\text{пл}} = -\left(1 + \frac{\sqrt{\omega} \frac{C_M}{S}}{\sqrt{k_C C_C \gamma_C}}\right) = -\left(1 + \frac{C_M}{S} \sqrt{\frac{\omega}{k_C C_C \gamma_C}}\right) \quad (3.49).$$

Описані виразами (3.48) і (3.49) процеси характерні для плоскої теплової хвилі в нескінченному середовищі; в табл. 3.1 наведено розраховані чисельні значення довжини теплової хвилі в середовищах. Використання залежностей (3.48) і (3.49) накладає досить жорсткі обмеження на співвідношення довжини хвилі і геометричних розмірів ТГЕ відповідно до (3.40) і (3.41). Отримані за (3.48) розрахункові залежності зміни амплітуди коливання температури зондового ТГЕ у МЕМС виконанні у практично важливому частотному діапазоні при аналізі параметрів газового середовища (повітря за нормальних умов і CO<sub>2</sub>) та рідин (води і етанолу) наведено на рис. 3.3.

Аналіз частотних залежностей амплітуди коливання температури тонкоплівкового плоского зонду дозволяє зробити наступні висновки:

- збудження плоскої теплової хвилі в рідинах (вода, спирт етиловий) в частотному діапазоні 100 Гц – 1 кГц за амплітуди потужності 20 мВт дозволяє отримати амплітуду коливання температури до 1 °С для ТГЕ

розмірами 300 мкм x 800 мкм, що достатньо для обробки сучасними електронними вторинними перетворювачами (рис. 3.15 а));

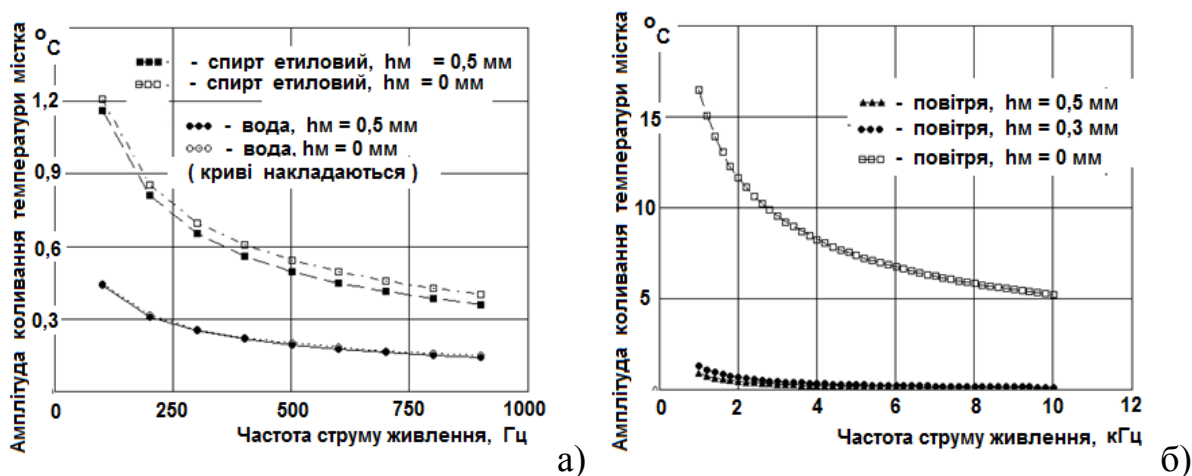


Рис. 3.15. Розрахункові частотні залежності амплітуди коливання температури тонкоплівкового плоского зонду розмірами 300 мкм x 800 мкм на діелектричній підкладці ( $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ ) в наближенні плоскої хвилі. Загальна товщина зонду  $h_m$ . а) - зонд занурено в рідину, амплітуда потужності електричного струму 20 мВт; б) - зонд в повітрі за нормальних умов, амплітуда потужності електричного струму 5 мВт.

- досить проблематичним є збудження плоскої теплової хвилі в газах за нормальних умов; для ТГЕ розмірами 300 мкм x 800 мкм частотний діапазон для плоскої хвилі становить понад 10 кГц, амплітуда коливання температури зазнає істотної залежності від конструктивних характеристик струмопровідних та захисних діелектричних прошарків ТГЕ, що визначають його власну теплоємність  $C_M$  (рис. 3.15 б).

Із аналітичних залежностей (3.11), (3.25), (3.26) (модельні наближення плоскої хвилі), наведених на рис. 3.15 результатів розрахунків і отриманих автором та наведених у табл. 3.1 чисельних значень параметрів теплового коливального процесу в рідинах та газах можна зробити наступні висновки:

- інформацію про температуропровідність і теплову активність середовища несуть обидві характеристики коливання - амплітуда і фаза;
- процес зазнає експоненціального затухання амплітуди коливань температури в середовищі; в цьому є і перевага методу, оскільки

геометричні розміри ТГЕ можуть складати порядок сотень мікрон, ТРПП може бути спроектованим і виготовленим за технологією МЕМС, а для дослідження теплофізичних характеристик середовища достатньо незначної кількості речовини;

- для збудження теплового коливання в газах вкрай критичним фактором є власна теплоємність ТГЕ. Навіть товщини нікелю та діелектрику порядку 0,1 мкм істотно зменшують амплітуду коливання температури зондового ТГЕ (рис. 3.15 б)). Значно менш критичним є вплив власної теплоємності та геометрії ТГЕ на збудження плоскої хвилі в рідинах (рис. 3.15 а)). Розрахункова теплоємність меандрового нікелевого ТГЕ довжиною 0,8 мм з товщиною та шириною меандру Ni відповідно 0,1 мкм та 20 мкм, розміщеного на діелектричній підкладці SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> з товщиною 0,4 мкм та загальною шириною діелектрика 300 мкм складає близько  $4,5 \cdot 10^{-8}$  [Дж/°С]. Чисельне значення вказаного параметру близьке до значень, наведених для конструктивно подібних і комерційно доступних перетворювачів від провідних європейських розробників із [78] і підтверджене нами експериментально за методикою ступінчастого нагрівання в роботі [168, 169].

### Висновки до Розділу 3.

Отриманий в розділі 3 результат показує наступне:

1. Триелементний калориметричний перетворювач швидкості рідини або газу в каналі має регульовану за діапазоном лінійності характеристику перетворення в нижній частині діапазону на протигагу залежності  $\sim V^{1/2}$  у відповідності до закону Кінга для одноелементного термоанемометричного перетворювача. Діапазони монотонної лінійної залежності різниці температур ТЧЕ триелементного калориметричного ТРПП визначаються відношенням його ширини до висоти каналу, тобто є конструктивно керованими. Чутливість триелементного місткового занурювального перетворювача шириною 40 мкм в каналі висотою 300 мкм в 2,5 рази вище за чутливість одноелементного анемометричного аналога за величини лінійної швидкості повітря в каналі 0,1 м/с [180].
2. Калориметричний метод вимірювання лінійної швидкості газового середовища або рідини, що реалізується багатоеlementним ТРПП, має ряд суттєвих переваг над одноелементним термоанемометричним і дозволяє в якості вимірювального сигналу використовувати різницю температур середовища в просторово рознесених відносно ТГЕ точках. Тим самим калориметричні методи дозволяють ефективно компенсувати вплив основної впливної величини – температури оточуючого середовища.
3. Аналіз методів нестационарного нагрівання мікромеханічних ТРПП місткової і мембранної геометрії показує можливість їх застосування для вимірювання теплофізичних параметрів газу та рідини. Імпульсний метод має переваги в технологіях обробки інформативного сигналу над методом нагрівання гармонічним струмом, оскільки останній потребує вимірювання амплітуди і фази гармоніки потрібної частоти на фоні щонайменше в три порядки вищої амплітуди основної гармоніки.
4. Технології МЕМС надають переваги в конструкціях складових елементів зондових ТРПП динамічного нагрівання, оскільки дозволяють

реалізовувати активні ТІС істотно виродженої геометрії з відношенням характерного розміру тіла теплообміну до сумарної товщини ТГЕ понад 50. Це надає можливість реалізації нових способів вимірювання тиску і густини газового середовища [151, 152, 154].

5. Оскільки зондові методи динамічного нагрівання передбачають застосування розрахункової стадії, методична похибка вимірювання визначальним чином залежить від адекватності вибраної математичної моделі ТРПП, а основними її чинниками є конструктивні відхилення реального ТРПП від модельного (скінченні поперечні та поздовжні розміри ТГЕ і ТЧЕ, їх скінченні теплоємності, коректність задавання граничних умов). Саме технології МЕМС надають переваги в прецизійності окремих елементів ТІС та їх взаємного розташування.

Основні результати, викладені в розділі 3, опубліковані автором в роботах [96, 108 - 112, 114, 117, 148 – 152, 154, 160].

## **РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ**

В розділі наведено результати експериментальних робіт, виконаних в лабораторії медичної сенсорики факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського з розробки ТРПП активного нагрівання за технологією МЕМС, а також результати їх практичного застосування в приладі для діагностики функції зовнішнього дихання людини “Пульмовент” і в якості первинного перетворювача типу Пірані з компенсацією температурного дрейфу вихідного сигналу методом модуляції напруги живлення.

### ***4.1. Стенди для вимірювання характеристик терморезисторних перетворювачів***

В процесі розробки ТРПП виникає необхідність в проведенні великих обсягів контрольно-вимірювальних операцій. Їх виконання бажано перекласти на автоматизовані стенди з використанням персонального комп'ютеру (ПК) для задавання робочих електричних режимів перетворювача, збору, обробки і аналізу отриманої інформації, за можливості – для управління вимірювальними процесами [161, 162]. В апаратній частині таких стендів доцільно використовувати промислові плати збору даних з вбудованим інтерфейсом з ПК, до складу яких входять підсилювачі вимірюваного сигналу з програмно керованим коефіцієнтом перетворення, багатоканальні аналого-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі (АЦП і ЦАП) [163 - 165]. Оптимальним програмним середовищем для розв'язку подібних задач визнано середовище графічного програмування LabVIEW. Вибравши плату збору даних виробництва фірми National Instruments, розробник позбавлений необхідності написання драйверу пристрою, оскільки



програмне забезпечення NI-DAQmx driver software входить в комплект постачання плати збору даних від виробника апаратної частини. Додаткова перевага такого вибору полягає також у можливості вільного доступу до реалізованих проектів із бібліотечного ресурсу LabVIEW [163].

### ***Автоматизований стенд для вимірювання статичних параметрів терморезисторних перетворювачів***

На рис. 4.1 наведено блок-схему розробленого автоматизованого стенду на основі пристрою збору даних NI USB6009 для вимірювання статичних параметрів ТРПП.

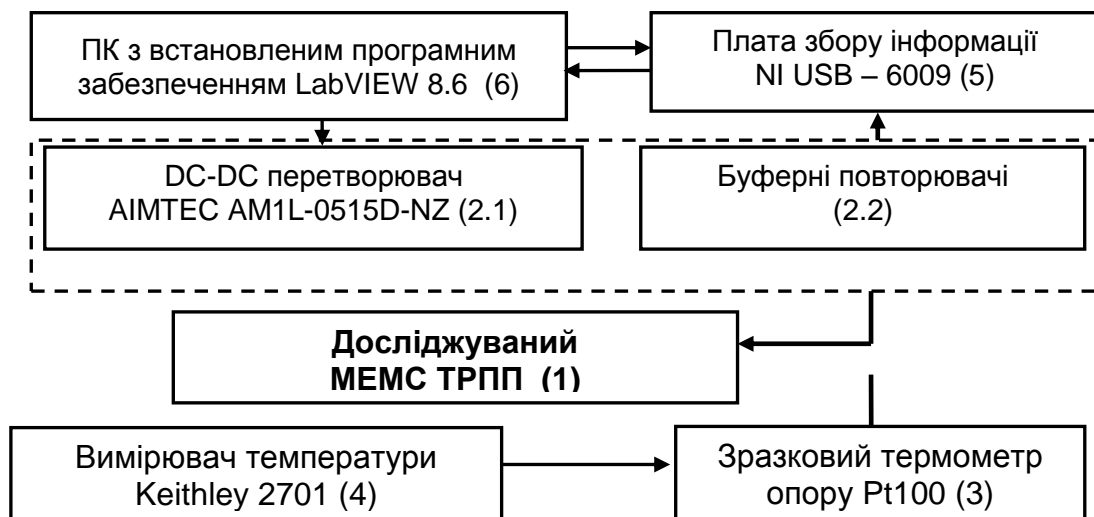


Рис. 4.1 Схематичне зображення автоматизованого стенду на основі пристрою збору даних NI USB 6009.

#### **До складу стенду входять наступні функціональні вузли:**

- 1- досліджуваний зразок – МЕМС ТРПП;
- 2- електрична схема управління первинним МЕМС-ТРПП з елементами живлення на DC-DC перетворювачі AIMTEC типу «AM1L-0515D-NZ» (2.1) та буферними повторювачами на основі операційних підсилювачів (2.2);

3, 4 – контрольний вимірювач температури оточуючого середовища моделі Keithley 2701 з термометром опору Pt-100;

- 5- пристрій збору даних National Instruments NI USB-6009;
- 6- ПК з встановленим програмним забезпеченням LabVIEW 8.6.

Блок-схему пристрою збору даних NI USB-6009 наведено на рис 4.2.

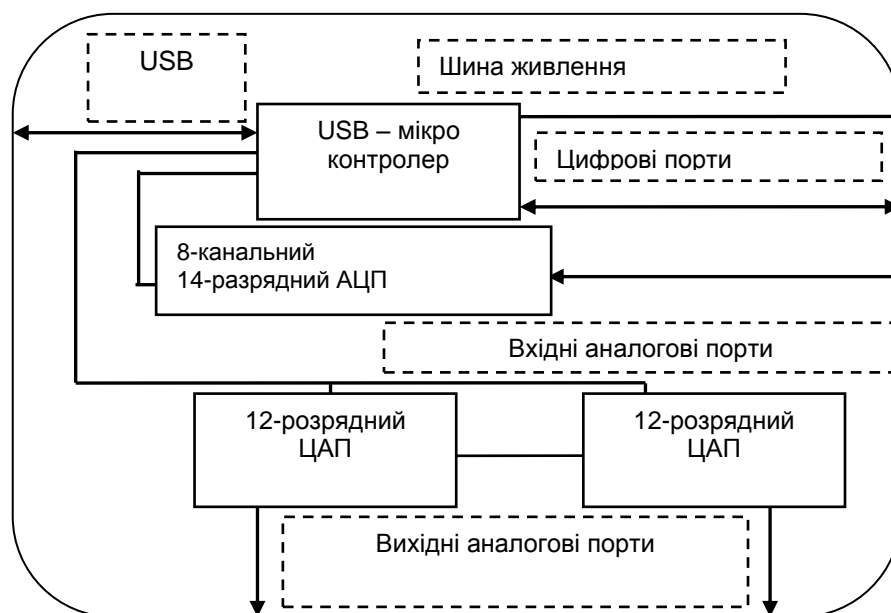


Рис. 4.2 Блок-схема пристрою збору даних NI USB-6009.

Навантажувальна здатність шини живлення USB-інтерфейсу ПК і наявність джерела вторинного живлення для зовнішніх пристроїв +5В, 200 мА в пристроях збору даних NI USB-6009 надає можливість проектувати пристрій як “Bus powered device” без додаткового мережевого блоку живлення. Зовнішній вигляд стенду представлено на рис. 4.3 (нумерацію складових елементів подано у відповідності до блок-схеми рис. 4.1).

Досліджуваний зразок ТРПП під’єднується до електричної схеми вто-ринного перетворювача, яка зкомутована з аналоговими портами вводу-виводу пристрою збору даних та через шину USB - з ПК. Електрична схема реалізує підключення резисторів досліджуваного ТРПП послідовно з постійними прецизійними резисторами типу С2-29В-0,125, допустиме паспортне відхилення опору яких від номінального значення не перевищує  $\pm 0,25\%$ . Завдяки цьому для визначення величини струмів, що протікають через активні елементи ТРПП, та напруг на них використовуються 14-розрядні АЦП з типовою абсолютною похибкою

вимірювання  $\pm 2,56$  мВ для діапазону вхідного диференціального сигналу  $\pm 2,5$  В, тоді як програмне задавання напруги аналогових виходів NI USB-6009 виконується з використанням 12-розрядних вбудованих ЦАП з типовою паспортною абсолютною похибкою вихідної напруги  $\pm 7$  мВ.

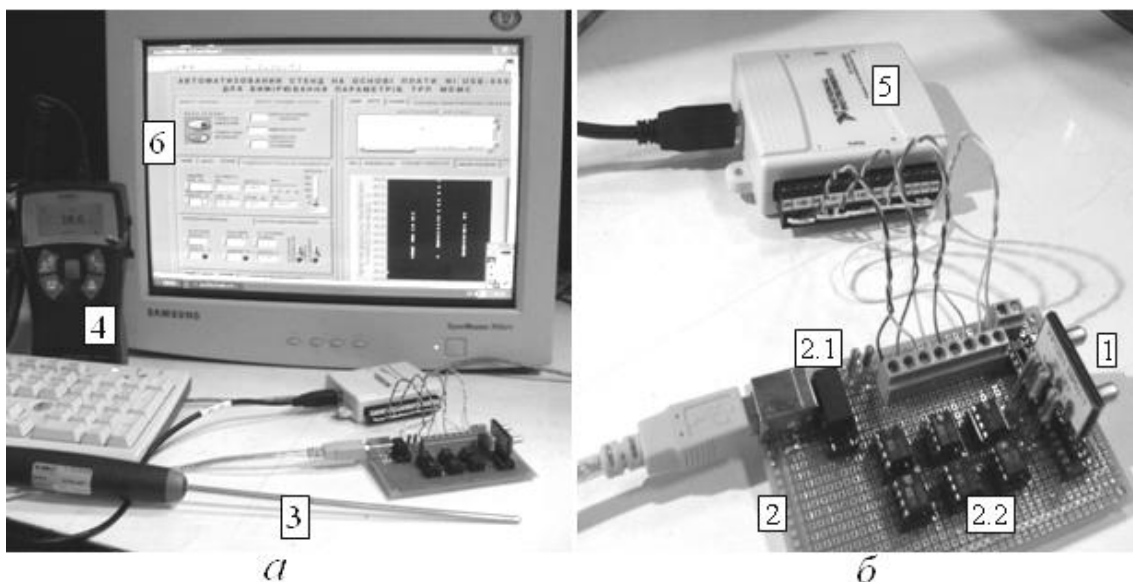


Рис. 4.3. Загальний вигляд автоматизованого стенду (а) та збільшене зображення електричної схеми і пристрою збору даних (б) [167]

Схема зміщення вимірюваного сигналу на вході комутатору NI USB-6009 визначає вхідний опір його аналогових входів на рівні 144 кОм. Для запобігання додаткової похибки вимірювання за рахунок протікання вхідного струму аналогових портів плати NI USB 6009 через досліджувані елементи схеми використовуються буферні повторювачі напруги на базі прецизійних операційних підсилювачів.

Блок живлення досліджуваних ТРПП і схеми вторинного перетворювача реалізовано на DC-DC – перетворювачі з двополярним виходом типу AM1L-0515D-NZ з вихідним струмом до 33 мА, на вхід якого подається напруга +5В шини USB персонального комп'ютера з навантажувальною здатністю 100 мА. Отримані від вторинного перетворювача аналогові сигнали поступають на аналогові входи NI USB

6009, дискретизуються та через USB - інтерфейс надходять до ПК з встановленим програмним забезпеченням LabVIEW.

Для обробки, зберігання та відображення даних, які поступають через USB-інтерфейс на комп'ютер створено програму у пакеті LabView 8.5, алгоритм функціонування якої наступний. З відповідних вхідних фізичних каналів плати NI USB-6009 за допомогою елемента DAQ Assistant вимірюються напруги на резисторах ТРПП та на ввімкнених послідовно з ними прецизійних резисторах. Сигнали розділяються вузлом Split signals та поступають до підпрограми Amplitude and Level Measurements, яка виконує дискретизацію вхідних аналогових напруг 14-розрядними АЦП. Шляхом програмних перетворень виміряних напруг з використанням вбудованих функцій Subtract, Multiply, Divide визначаються поточні значення активних опорів і температури елементів перетворювача і розсіювані на кожному з них потужності. Чисельні значення вказаних величин виводяться на передню панель програми, заносяться до таблиці програмним вузлом Build Table і використовуються для побудови відповідних графіків. Для зручності обробки отриманих результатів у програмі передбачено збереження файлів даних у форматі Excel (підпрограма Write to spreadsheet file). Побудову графіків покладено на підпрограму Build XY Graph.

Розроблена програма забезпечує наступні можливості:

1. Задавання електричних режимів і розподілу потужностей між резисторними елементами досліджуваного зразка.
2. Автоматичний підрахунок ТКО нагрівачів за виміряними значеннями їх опорів в двох температурних точках.
3. Задавання діапазону вихідної напруги ЦАП, величину її зміни між вимірювальними точками, максимальне значення напруги на кожному з нагрівачів, координати нагрівачів в каналі по його довжині.
4. Виведення на передню панель “віртуального приладу” поточних чисельних значень безпосередньо виміряних або програмно обчислених параметрів: напруги на кожному з нагрівачів, струму через них, опору

кожного нагрівача, потужності, що розсіюється на нагрівачах, температури їх перегріву відносно температури оточуючого середовища.

5. Виведення на передню панель програми графіків отриманих вольт-амперних характеристик і залежності температури перегріву ТГЕ досліджуваних ТРПП від розсіюваної на них потужності.

6. Контроль діапазону безпечного перегрівання нагрівачів та автоматичної зупинки роботи стенду при досягненні напруги на одному з нагрівачів попередньо заданого максимально допустимого значення.

7. Можливість запису чисельних значень виміряних і обчислених параметрів у форматі таблиць Microsoft Excel.

Інтерфейс користувача - передня панель віртуального приладу - розроблено в програмному середовищі LabView 8.5 із можливістю задавання умов дослідження і контролю поточних параметрів (рис. 4.4). В лівій частині панелі розташовані елементи управління та індикації (віртуальні перемикачі та індикатори), в правій - результати досліджень.

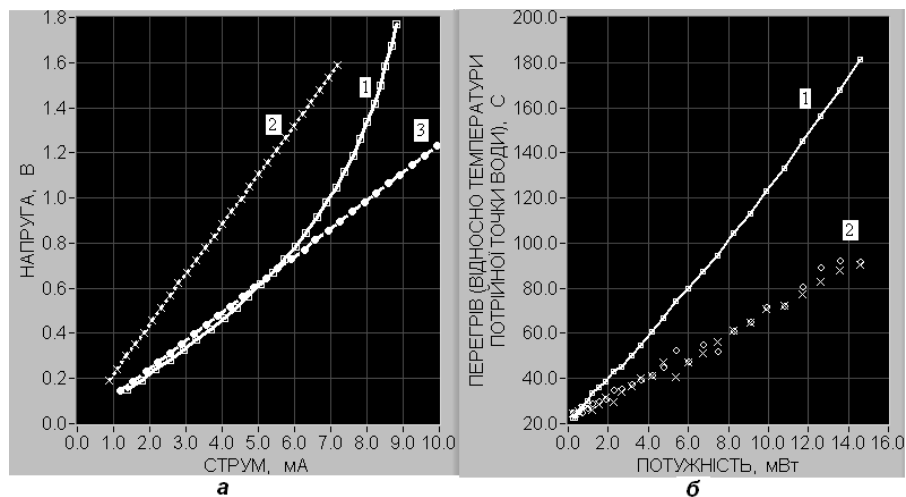


Рис. 4.4. Вольт-амперні характеристики MEMC ТРПП: а ) - центрального нагрівача (1) і резисторів С2-29В номіналами  $R1=221\Omega$  (2) та  $R2=124\Omega$  (3); б) – Ом-Ватні характеристики, крива 1 – безпосередній розігрів, 2 – непрямий розігрів

Проведено вимірювання статичних параметрів MEMC ТРПП, отримано їх вольт-амперні (рис. 4.5 а)) та градус-ватні (рис. 4.5 б)) характеристики. При розсіюванні на центральному ТГЕ потужності 17мВт

його температура перегріву в непорушному повітрі за нормальних умов становить  $160^{\circ}\text{C}$ , що відповідає сталій розсіювання потужності в непорушному повітрі за нормальних умов порядку  $G_{th} \approx 10^{-4} \text{ Вт}/^{\circ}\text{C}$ . При цьому різниця температур між центральним ТГЕ та боковими ТЧЕ, розташованими на міжцентровій відстані 100 мкм, близько  $100^{\circ}\text{C}$ , що відповідає градієнту температур в площині мембрани ТРПП понад  $10^3^{\circ}\text{C}/\text{мм}$ . Теплова ефективність нагрівача по відношенню до резисторів непрямого нагрівання в ТІС становить величину порядку  $\chi = 30\%$ . Наведені чисельні значення параметрів не поступаються зразкам МЕМС ТРП, розроблених в провідних наукових установах світу [ 16, 78].

***Стенд для дослідження динамічних характеристик МЕМС ТРПП на базі платформи віртуальних приладів NI Elvis II.***

Як показано в попередньому розділі, живлення змінним струмом дозволяє значно підвищити інформативність вимірювального сигналу ТРПП, внаслідок чого - розширити їх функціональність і сферу застосування. Метою цієї частини роботи є вимірювання динамічних параметрів ТРПП в різних фізичних середовищах з використанням сучасних програмно-апаратних засобів гнучкої архітектури.

Сучасні методики вимірювання параметрів газового середовища або рідини базуються на аналізі усталеного теплообміну чутливого елемента з навколишнім середовищем при реєстрації перехідних теплообмінних процесів. Типові чисельні значення сталої часу первинних перетворювачів сучасних ТРПП, виготовлених за технологією МЕМС, становлять одиниці – десятки мілісекунд, а теплоємність первинного перетворювача - порядку  $(10^{-6} - 10^{-8}) \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$ . Це дозволяє розширити частотний діапазон їх чутливості, виміряний за рівнем зниження -3 дБ, до декількох кілогерц і реалізувати швидкість зміни температури окремих елементів первинного перетворювача понад  $10^5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Наведені чисельні значення параметрів ТРПП у МЕМС виконанні вказують на необхідність використання

достатньо швидкодіючих автоматизованих програмно-апаратних засобів. Обравши програмно-апаратний комплекс NI Elvis II за основу автоматизованого стенду для дослідження динамічних параметрів МЕМС ТРП, уникаємо необхідності написання власного драйверу пристрою та маємо вільний доступ до бібліотек програм від виробника апаратної частини з відкритим програмним кодом в середовищі графічного програмування LabView [172, 173]. До складу NI Elvis II входять підсилювачі вимірюваних сигналів з програмно керованим коефіцієнтом підсилення, високорозрядні аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі (АЦП та ЦАП), генератор сигналів спеціальної форми, регульовані джерела постійної напруги, вбудований USB-інтерфейс, що значно розширює можливості побудови спеціалізованих вимірювальних стендів з програмно керованою гнучкою архітектурою.

Для місткового нікелевого ТРПП товщиною 0,1 мкм на діелектричній підкладці  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  шириною 40 мкм, товщиною 0,3 мкм і довжиною 1 мм сумарна розрахункова теплоємність містка становить близько  $4 \cdot 10^{-8}$  [Дж/°C]. При розміщенні такого первинного перетворювача у вимірювальному каналі висотою 100 мкм теплоємність повітряного середовища, яке зазнає теплового збудження містком при нагріванні в процесі вимірювального перетворення, за нормальних умов становитиме близько  $7 \cdot 10^{-9}$  [Дж/°C], теплоємність спирту етилового 96% в каналі над нагрівачем –  $7,6 \cdot 10^{-6}$  [Дж/°C], води -  $16 \cdot 10^{-6}$  [Дж/°C].

Стенд для дослідження динамічних параметрів ТРП створено у відповідності до основних вимог сучасної технології віртуальних інструментів (ТВІ) [161 - 164]. ТВІ передбачають поєднання спеціальних технічних засобів вимірювання та управління, прикладного програмного забезпечення та стандартних промислових комп'ютерних технологій. Перевагою ТВІ при використанні її в наукових дослідженнях є функціональна гнучкість, програмна і апаратна відкритість, необхідні при

модернізації автоматизованих стендів у випадку постановки нових дослідницьких завдань.

На рис. 4.6 показано структурну схему розробленого стенду для дослідження динамічних характеристик ТРПП на базі програмно-апаратного комплексу NI Elvis II. Активний ТГЕ ввімкнений послідовно з прецизійним резистором відомого номіналу типу С2-29 і живиться з вихідного аналогового порту функціонального генератора плати комутації апаратного комплексу. Пасивні елементи перетворювача послідовно з резисторами С2-29 підключені до вихідних аналогових портів керованого джерела живлення плати комутації. Резистори С2-29 та елементи ТРПП під'єднанні до входних аналогових портів комутаційної плати для реєстрації падіння напруги на кожному з них і наступного розрахунку струму живлення ТГЕ. Аналогові порти ввімкнено в диференційному режимі, що дозволяє програмно обирати діапазон вхідного сигналу.

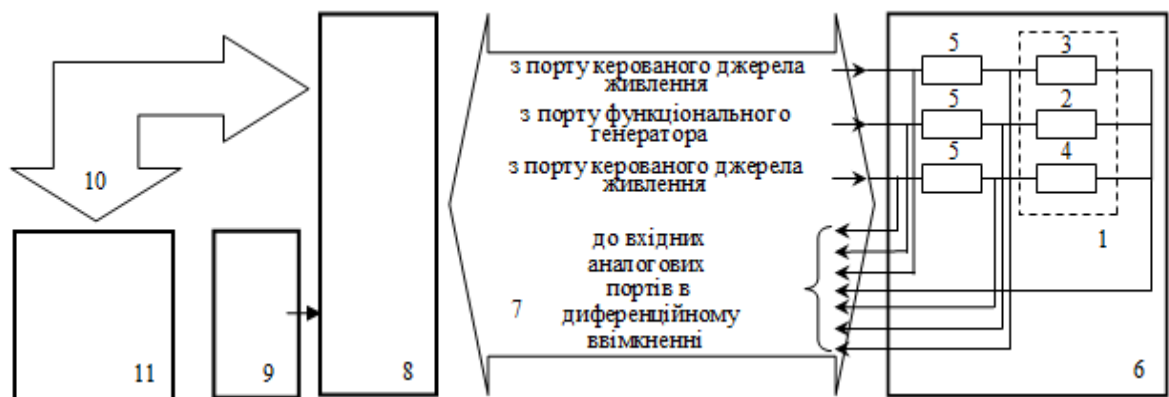


Рис. 4.5 Структура автоматизованого стенду для дослідження ТРПП: 1 - досліджуваний ТРПП, до складу якого входить активний ТГЕ 2 та ТЧЕ 3 і 4; 5 – прецизійні резистори С2-29; 6 – макетна плата NI Protoboard; 7 – PCI-роз'єм для під'єднання плати до комплексу Elvis II; 8 – програмно-апаратний комплекс NI Elvis II; 9 – мережевий блок живлення; 10 – USB-інтерфейс; 11 – ПК.

Сигнали з входних аналогових портів через роз'єм PCI між програмно-апаратним комплексом та платою комутації поступають на 8-канальний 16-розрядний АЦП Elvis II, обробляються апаратною частиною комплексу та через USB-інтерфейс поступають на ПК з встановленим



програмним забезпеченням LabView 8.6. В NI Elvis II для генерації сигналів використовується функціональний генератор XR2206 з можливостями амплітудної та частотної модуляції. Функціональний генератор забезпечує генерацію сигналів синусоїдальної (діапазон частот 0,186 Гц...5М Гц), трикутної та прямокутної (0,186 Гц ... 1 МГц) форм по одному 10-ти бітному каналу амплітудою до 10 В (типова похибка  $1\% \pm 15$  мВ), постійною складовою  $\pm 5$  В; максимальний струм навантаження становить 100 мА. Оскільки точність задавання амплітуди імпульсів не достатньо висока, в роботі вибрана описана вище архітектура вимірювального стенду, що передбачає поточний контроль струму живлення ТГЕ.

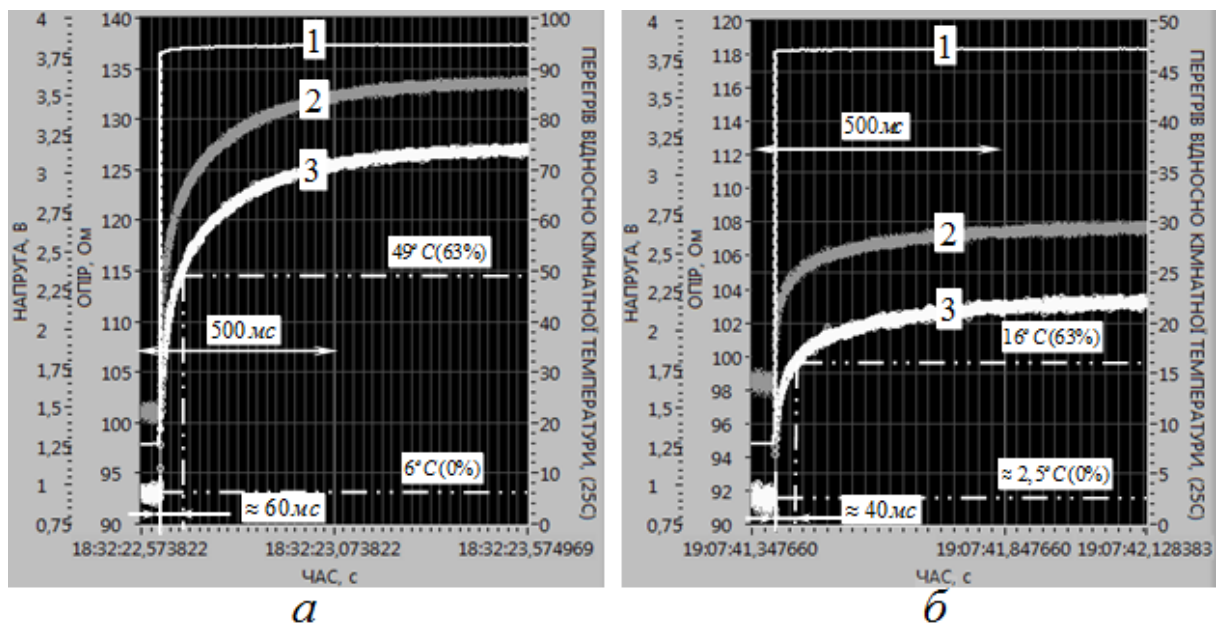


Рис. 4.6. Часові залежності зміни напруги на дільнику (1), опору (2) та температури (3) активного нагрівача при зануренні ТРПП: а) - у етиловий 96%-ий спирт; б) – у дистильовану воду [167 – 169]

Отримано часові залежності напруги на дільнику, опору та температури активного нагрівача при зануренні ТРП у дистильовану воду (рис. 4.6 а)) та у етиловий 96%-ий спирт (рис. 4.6 б)) [167- 169]:. Постійна складова напруги на дільнику для вказаних вимірів становила 2,56 В, амплітуда змінної складової 1,3 В, частота 0,5 Гц, скважність 0,5.

На наведених характеристиках видно, що за однакової зміни потужності на центральному ТГЕ часові зміни його опору і, відповідно, температури у спирті та у воді істотно різняться. Наприклад, при зміні потужності від 2,5 мВт до 22,5 мВт відносне збільшення опору ТГЕ у спирті становить 32,6%, що відповідає зростанню температури на 68°C (рис. 4.6. а)) і сталій розсіювання близько 0,29 мВт/°C. При тій же зміні потужності відносне збільшення опору ТГЕ у дистильованій воді склало 10,2%, що відповідає зростанню температури на 22°C і сталій розсіювання близько 0,91 мВт/°C. Отримані дані вказують на можливість використання досліджуваних мембранних структур у якості ТРПП процентного вмісту спирту в водних розчинах. Значення теплової сталої часу цих ТРПП у вказаних речовинах також суттєво різні: 60 мс у спирті та 40 мс у воді.

#### **4.2. Перетворювач лінійної швидкості (об'ємних витрат) газу для діагностики функції зовнішнього дихання людини**

Вимірювач об'ємних витрат повітря медичного призначення (флоуспірометр) використовується для вимірювання швидкостей потоків повітря під час дихання пацієнта методами проточної витратометрії та традиційно складається із первинного вимірювально-перетворювального вузла та вторинного інформаційного перетворювача. Вимірювально-перетворювальний вузол також є двостадійним. На першій стадії пневматичний приймач повітряного потоку (ППП), через який безпосередньо виконується дихальний маневр пацієнта, реалізує функцію перетворення об'ємних витрат повітря  $Q$  [л/сек] в перепад тиску на потокорезистивному аеродинамічному елементі  $\Delta P$  [Па]; розмірність функції перетворення вихідного сигналу ППП - [(Па·сек)/л] – співпадає з розмірністю пневматичного опору [173 - 175]. Безпосередньому вимірюванню підлягають перепад тиску на ППП [Па] та часові інтервали [сек]; в окремих випадках – тиск газу та склад газової суміші. На другій

стадії електронний вимірювальний перетворювач (в нашому випадку – триелементний калориметричний ТРПП) трансформує перепад тиску з виходу ППП в електричний сигнал струму, напруги або частоти, котрий в свою чергу зазнає інформаційної та математичної обробки з використанням загальної характеристики перетворення ТРПП, заданої таблично або у вигляді калібровочної кривої [184-186]. Необхідною складовою вимірювального процесу є програмна фіксація моментів початку та закінчення дихальних маневрів пацієнта і окремих фаз вдиху – видиху, а також вимірювання їх тривалості.

В залежності від умов функціонування системи дихання вентиляційні процеси мають суттєві відмінності, а параметри потоку лежать в істотно різних амплітудних та часових межах. В звичайних умовах життєдіяльності реалізується режим спокійного (спонтанного) дихання, котрий характеризується наступними параметрами вентиляції: поточні об'ємні швидкості вдиху та видиху  $Q_i$  і  $Q_e$  в не нормованому документально діапазоні (від 0,1 [л/сек] до 3,0 [л/сек]), час дихального циклу, об'єми вдиху та видиху. Збільшення фізичного навантаження переводить дихальний процес в режим максимальної вентиляції легень (МВЛ), який супроводжується його одночасним максимальним поглибленням та зростанням частоти. Деякі режими, наприклад режим форсованого дихання, виконуються при активній участі дихальних м'язів пацієнта і передбачають його активну участь в проведенні дихального маневру; в результаті максимальні за амплітудою дихальні маневри виконуються за найкоротші часові інтервали. Показники режиму форсованого дихання є найбільш інформативними, оскільки вони найбільш фізіологічно обумовлені і повторювані. При проведенні діагностичних тестів з дослідження вентиляції легень вимірюються або обчислюються фізичні параметри процесів, що визначають функціональні можливості пацієнта у відповідних режимах дихання. Такими параметрами є об'ємні швидкості  $Q$  та об'єми повітряних потоків, що формуються при

диханні. За результатами вказаних безпосередніх вимірювань та наступних обчислень визначаються структура загальної ємності легень та резервні можливості апарату легеневої вентиляції.

Розв'язок задач спірометрії висуває до флоуспірометрів низку медико-технічних вимог (МТВ), необхідних для адекватного виконання тестів за умови їх фізіологічності та метрологічної коректності, та регламентують їх основні характеристики. Актуальними є наступні метрологічні показники [175, 177]:

А. Мінімальний потік через перетворювач, що підлягає реєстрації вимірювальним каналом (поріг реагування за потоком).

Б. Діапазон вимірювання об'ємної швидкості повітряного потоку.

В. Межі допустимої похибки вимірювання.

Основні викладені в стандартах Європейського Товариства Вугілля і Сталі (ECCS), в США - в стандартах Американського Торакального Товариства (ATS) норми наступні:

1. Перетворювач повітряного потоку (ППП) сучасного флоуспірометра має забезпечувати вимірювання об'ємних витрат повітря до 15 л/с з порогом реагування 0,05 л/с і відносною похибкою вимірювання  $\pm 3\%$ .

2. Межі допустимої абсолютної похибки при вимірюванні об'ємних витрат в діапазоні вимірювань від 0,1 до 1,5 л/с не повинні перевищувати  $\pm 0,045$  л/с. Межі допустимої відносної похибки при вимірюванні об'ємних витрат в діапазоні вимірювань від 1,5 до 15,0 л/с не повинні перевищувати  $\pm 3\%$ .

В стандартах не нормовані величини об'єму "мертвого простору" PPP, можливість та зручність санітарної обробки PPP (включаючи допустимість стерилізації PPP та його довготривалу стійкість до вказаної процедури) або ж вимоги одноразовості використання, масо-габаритні параметри PPP та пристрою в цілому. Рациональне поєднання окремих метрологічних вузлів флоуспірометричного вимірювального каналу передбачає розв'язання наступних задач: вибір оптимального за

конструкцією ППП виходячи з МТВ, мінімізація статичної похибки вимірювання, забезпечення необхідного частотного діапазону вимірювального перетворювача відповідно до діагностичних дихальних процесів.

Об'єднання первинного перетворювача перепаду тиску з ППП флоуспірометра висуває наступні вимоги до ТРПП [175, 177]:

- діапазон вимірювання перепадів тиску від +2000 Па до -2000 Па з порогом реагування не більше 0,02 Па (динамічний діапазон  $10^5$ );
- межі відносної похибки вимірювання  $\pm 2 \%$  від вимірюваного значення;
- нелінійність АЧХ не більше  $\pm 2 \%$  в частотному діапазоні від 0 до 15 Гц.

При використанні флоуспірометра в лабораторних умовах мінімальна температура повітря в циклі вдиху приймається за +15 °С, на видиху - +35 °С. Динамічна в'язкість повітря в циклі вдиху становить  $1,79 \cdot 10^{-5}$  Па·с, а в циклі видиху -  $1,88 \cdot 10^{-5}$  Па·с [172, 173], в результаті величина зміни чутливості може досягти 5,8 %. Для забезпечення МТВ такі зміни параметру середовища повинні бути врахованими введенням поправочних коефіцієнтів на вдиху і видиху в програмному забезпеченні.

На Рис. 4.7 а) наведено блок – схему каналу вимірювання об'ємних витрат повітря в приладі для діагностики функції зовнішнього дихання „ПУЛЬМОВЕНТ”. За умови, що вимірюванню підлягає один з параметрів середовища (лінійна швидкість, об'ємні витрати), необхідно вжити методичних метрологічних заходів до виключення взаємних впливів параметрів середовища: температури, тиску, хімічного складу газової суміші на вдиху і видиху як впливних величин. Експериментальні дослідження ТРПП виконано в складі вимірювального каналу діагностичного комплексу „ПУЛЬМОВЕНТ” на виробничій базі ТОВ «Сенсорні системи» (м. Київ) з використанням ротаметричної установки 1-го класу з межами відтворюваних об'ємних витрат повітря від 0,02 до 16,36 л/с.

Характеристику перетворення ТРПП об'ємних витрат повітря через ППП (рис. 4.11 б)) адаптовано до діапазону диференціального тиску на

його вихідних штуцерах перетворювача повітряного потоку приладу для діагностики функції зовнішнього дихання [171 - 178].

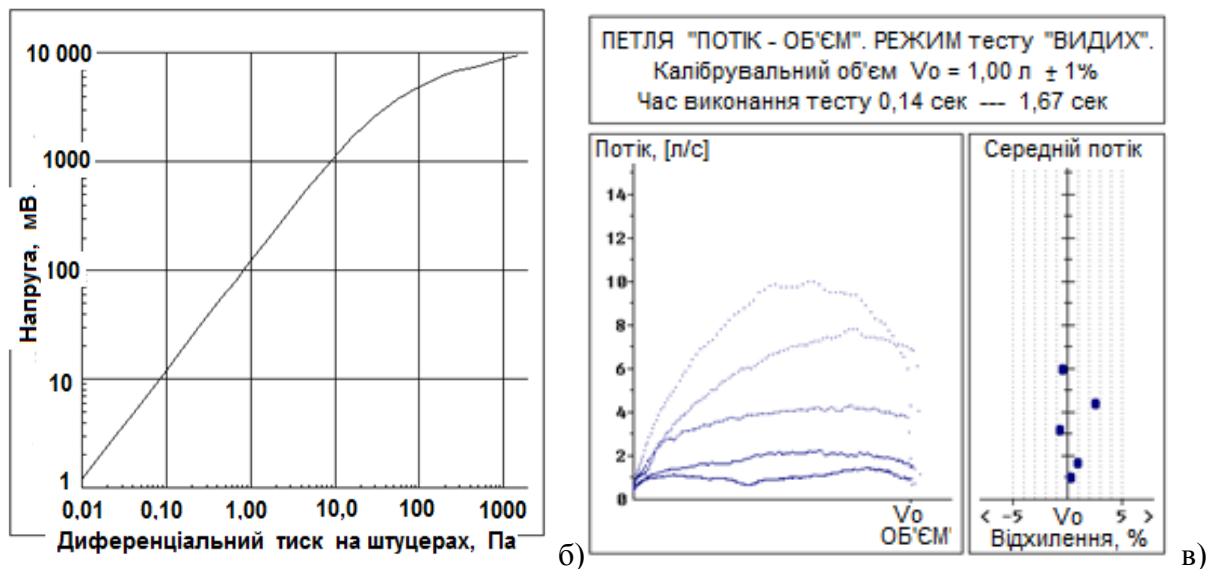
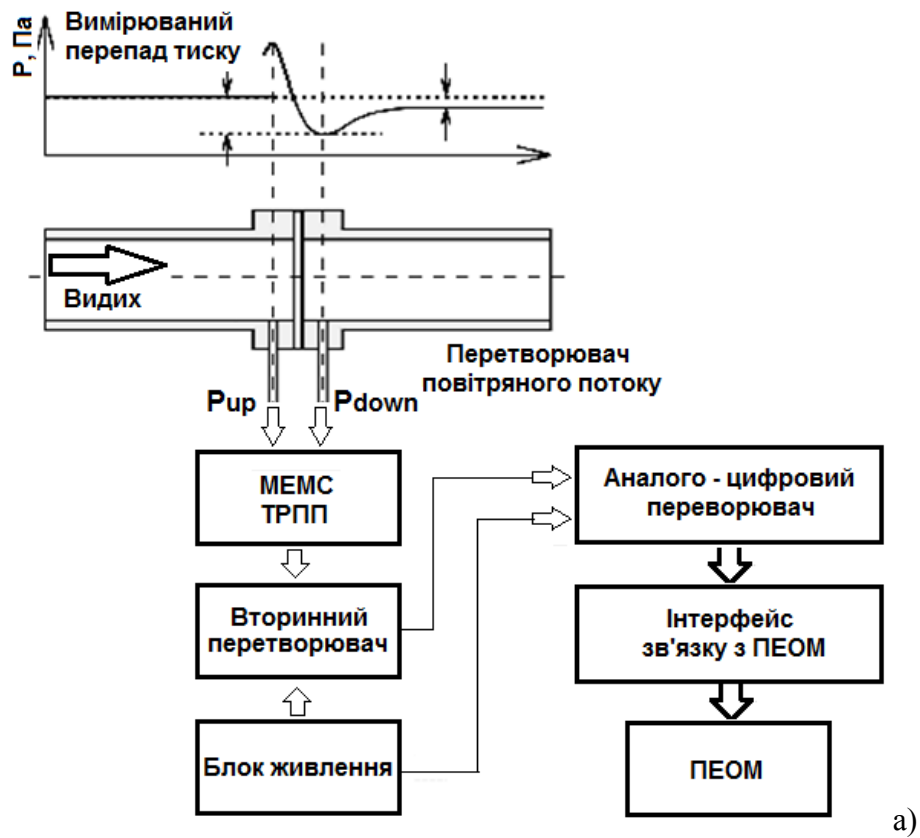


Рис. 4.7 а) - блок-схема каналу вимірювання об'ємних витрат повітря в приладі для діагностики функції зовнішнього дихання „ПУЛЬМОВЕНТ”, б) - характеристика перетворення ТРПП об'ємних витрат повітря, в) - Результати тестування каналу вимірювання об'ємних витрат калібрувальним об'ємом 1 літр [176, 177, 179, 181].

Як видно, діапазон зміни вхідного диференціального тиску – близько п'яти порядків в діапазоні від 0,02 до 1000 Па. Результати тестування каналу вимірювання об'ємних витрат повітря на вдиху і видиху приладу для діагностики функції зовнішнього дихання „ПУЛЬМОВЕНТ” з використанням калібрувального шприца об'ємом 1 літр з комплекту приладу наведено на рис. 4.7 в). Зазначимо, що використання мікроелектронного ТРПП, виготовленого за технологією MEMC, у якості первинного перетворювача об'ємних витрат повітря має суттєві експлуатаційні переваги над традиційними турбінними перетворювачами, оскільки не змінює характеристику перетворення на вдиху і видиху внаслідок накопичення конденсату та мокрот пацієнта на власних конструктивних елементах.

#### **4.3. Компенсація температурного дрейфу вихідного сигналу активного терморезисторного перетворювача методом модуляції напруги живлення**

З відомих на сьогоднішній день технологій проектування та виготовлення первинних перетворювачів абсолютного тиску за теплообміном (первинні перетворювачі вакууму типу Пірані) технології MEMC пропонують оптимальні засади для розширення вимірювального діапазону на обох межах чутливості. Переважна більшість наукових колективів, що розроблюють вимірювальні MEMC - перетворювачі, пропонують свої оригінальні конструктивні підходи до реалізації вакуумметрів типу Пірані за методикою вимірювання і схемотехнікою обробки сигналу. Короткий огляд конструкцій і вимірювальних характеристик наведено в табл. 4.1 за матеріалами публікацій останніх років [17-19, 69 - 74, 76, 182].

Найважливішим параметром стану розрідженого газу є абсолютний тиск, вимірювання якого в певному діапазоні можливе теплоелектричними

вакуумметрами типу Пірані. Вимірювальний механізм ґрунтується на залежності теплообміну ТГЕ з оточуючим газом. Верхня межа діапазону чутливості таких вакуумметрів визначається співвідношенням довжини вільного пробігу молекули газу та характерним розміром об'єктів теплообмінних процесів у системі; нижня межа діапазону визначається мінімальною зміною температури тіла теплообміну, що підлягає достовірним вимірам. Відповідно забезпечення якомога ширшого діапазону вимірювання і зниження допустимої похибки на межах вимірювального діапазону вимагає принципово різних підходів: конструювання первинних перетворювачів належної геометрії для розширення верхньої межі діапазону та розробки прецизійних вимірювальних схем – для нижньої. Для об'ємних дротяних перетворювачів вимірювальний діапазон складає орієнтовно три порядки від 0,1 Па до 100 Па, похибка – на рівні 15% від вимірюваної величини. Незалежно від конструктивного варіанту ТРПП вакууму типу Пірані, основним фактором його похибки є залежність вимірюваного сигналу від різниці температур тіл теплообміну, яка має бути або стабілізованою на відомому рівні, або досить точно виміряною. В об'ємних конструкціях перетворювачів теплообмін, як правило, відбувається між тонкою металевою дротиною або напівпровідниковим терморезистором і скляною колбою перетворювача. Для ефективної стабілізації температури елементів теплообміну в них використовуються досить складні та громіздкі інженерні підходи, серед яких відомий навіть технічний розв'язок з використанням рідинного теплоносія для стабілізації температури колби. В мікромеханічних ТРПП вимірюється температури окремих елементів конструкції, які визначають теплообмінні процеси вимірювального перетворення.

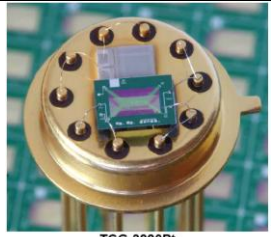
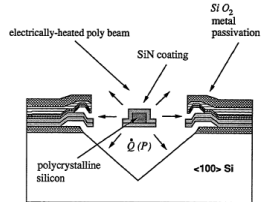
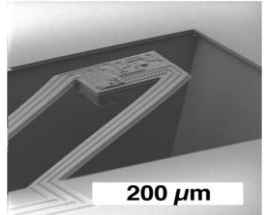
ТРПП абсолютного тиску за зміною теплопровідності газу набувають чутливості лише починаючи з діапазону тиску, при якому



довжина вільного пробігу стає одного порядку з характерним розміром тіл теплообміну, які беруть участь у процесі [69 – 74, 76].

Таблиця 4.1

### Характеристики MEMC перетворювачів вакууму типу Пірані

| Виробник, розробник, автор, джерело                                  | Діапазон вимірювання   | Тепловий опір, $R_{th}$ [°C/Вт]                              | Чутливий елемент.  | Процес виготовлення  |
|--|--|--|--|--|
| TCG 3880 from XENSOR Integration, Netherlands, 2007 p. [78]          | 10мПа – 10кПа<br>Мембрана $Si_3N_4$<br>2,5 x 3,33 мм <sup>2</sup><br>300 мкм товщина | 100 000<br>у вакуумі,<br>23 000<br>при P=10 <sup>5</sup> Па  | <br>TCG-3880Pt | Модифікований біполярний MEMC  |
| U.C. Berkeley<br>C.G.Mastrangelo [16]                                | 10 Па – 10 кПа<br>полі-Si-резистор<br>ТКО: 0,12 %/°C                                 | 80 000<br>при P=10 <sup>5</sup> Па                           |               | Покритий $SiO_2/Si_3N_4$<br>Полі-Si місток<br>400x3x1 мкм <sup>3</sup> |
| Erno Klaassen [17]   | 0,8Па – 9,2·10 <sup>4</sup> Па<br>p-n перехід<br>2 мВ/°C                             | 180 000<br>(при P=0,1 Па)                                    | <br>200 μm   | Первинний елемент на двох консольних балках                            |
| MTCS Pirani Sensor from Silsens S.A., Neuchâtel, Switzerland, 2007 p | 10 мПа – 100 кПа<br>Вимірювач температури<br>Ni/Pt резистор<br>ТКО: 0,4 %/°C         | 30 000<br>у вакуумі<br>6 000<br>за нормальних умов (P=1 атм) | Кристал 2,2 x 3 мм <sup>2</sup> ,<br>Відстань від ТГЕ до корпусу 10, 20, 200 або 380 мкм,        | CMOS модифікований MEMC<br>Мембрана 100x100 мкм <sup>2</sup>           |

Чисельне значення числа Кнудсена  $Kn$  ( $Kn = \frac{L_0}{D_0}$ ) визначає режим

теплообміну поверхні твердого тіла з газом за співвідношенням довжини вільного пробігу молекули газу та характерним розміром системи (відстанню від поверхні теплообміну до «теплого стоку»  $D_0$ ). Можливі

наступні режими теплообміну, для кожного з яких фізичні параметри газу (теплопровідність та в'язкість) мають різну залежність від тиску:  $Kn > 3$  – вільномолекулярний режим;  $10^{-2} < Kn < 3$  перехідний режим;  $Kn < 10^{-2}$  – режим неперервного середовища (в'язкісний режим).

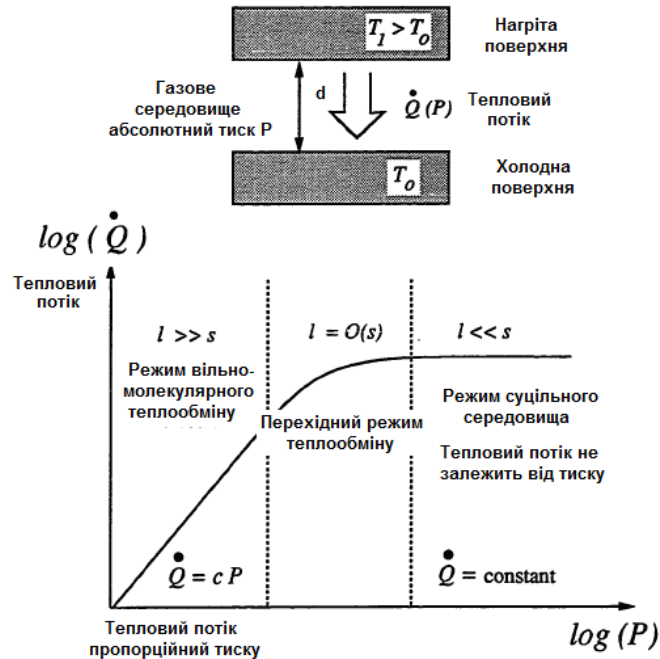


Рис. 4.8 Типова характеристика перетворення і характерні області зміни абсолютного тиску газу в вільномолекулярному, перехідному і в'язкісному (суцільного середовища) режимах теплообміну. Криві наведено в логарифмічному масштабі.

Реалізація широкодіапазонного перетворювача типу Пірані передбачає його функціонування при різних режимах теплообміну: у вільномолекулярному в нижній частині діапазону вимірювання, в'язкісному – в верхній і відповідно у перехідному – посередині. Інтенсивність теплообміну між двома паралельними пластинами з температурами  $T_1$  та  $T_2$  за рахунок теплопровідності газу  $Q(P)$  визначається за виразом [18, 69, 70, 78, 113 – 115, 182]:

$$Q(P) \propto k(P)(T_1 - T_2) = \frac{k_0}{1 + 2 \frac{P_0}{P} \cdot \frac{L_0}{D_0} \left( \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \right)} (T_1 - T_2) \quad (4.4),$$

де  $k(P)$  - залежний від абсолютного тиску коефіцієнт теплопровідності газу,  $k_0$  і  $L_0$  – відповідно коефіцієнт теплопровідності та довжина вільного пробігу молекули газу за тиску  $P_0$ ,  $D_0$  – відстань між поверхнями теплообміну з різницею температур  $(T_1 - T_2)$ ,  $\sigma_T$  – тепловий коефіцієнт акомодатії.

Теплова провідність одиниці площі газового середовища між двома паралельними стінками оцінюється за виразом [18, 102, 78, 113-115, 182]:

$$G[Bm/(^{\circ}C \cdot m^2)] = \sigma_T \frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)} P \sqrt{\frac{k}{2\pi m T}} = \frac{9\gamma - 5}{8} n \cdot m \cdot V \cdot k_B \cdot C_V \quad (4.5),$$

де  $\gamma = (C_P/C_V)$ ,  $k_B$  – стала Больцмана.

За наведеними формулами отримано чисельні значення теплової провідності одиниці площі газового середовища між двома паралельними площинами (табл. 4.2). Ескіз кристалу ТРПП наведено на рис. 4.9.

Табл. 4.2

Розрахункові параметри характеристики перетворення вакуумметра типу Пірані

| Газ       | $K,$<br>[Вт / (м· °С)]<br>$P = 10^5$ Па | $H$ при $P=10^5$ Па,<br>$D_0 = 300$ мкм<br>[ Вт / (°С · м² )] | Довжина вільного<br>пробігу молекули<br>$L_0$ , [мм] при $P=1$ Па | $P_T$ , [Па]<br>для $d = 300$<br>мкм | $G_0$ ,<br>[Вт / (°С·Па·м² )] |
|-----------|---|---|---|--------------------------------------|-------------------------------|
| Аргон     | 0,018                                   | 60  | 7,1   | 90                                   | 0,66                          |
| Гелій     | 0,151                                   | 500   | 19,8  | 600                                  | 0,84                          |
| Азот      | 0,0257                                  | 86  | 6,7   | 90                                   | 0,95                          |
| Кисень    | 0,0262                                  | 87  | 7,3   | 90                                   | 1,00                          |
| Пари води | 0,0199                                  | 66  | 4,6   | 35                                   | 1,90                          |

### ***Розробка схеми вторинного перетворювача за методом модуляції напруги живлення ТРПП.***

Запропонований варіант електронної схеми живлення чутливого елементу терморезисторного перетворювача [186] не має жорсткої

прив'язки до конкретного типу давача чи певного вимірювального параметру фізичної величини та має на меті зменшення температурної похибки вимірювання при використанні ТРПП в схемі самозбалансованого містка. Схема може бути застосована для розширення робочого температурного діапазону різноманітних сенсорів на основі ТРПП як то вакуумметр, первинний перетворювач складу газової суміші за теплопровідністю, швидкості потоку термоанемометричного типу, болометр тощо. Зменшення температурного дрейфу вихідного сигналу ТРПП запропоновано реалізувати методом модуляції струму живлення[184].

До складу первинного МЕМС ТРПП входить набір терморезисторів (ескіз рис. 4.9), виготовлених в єдиному технологічному циклі із матеріалу з температурним коефіцієнтом опору  $\alpha$  та лінійною залежністю опору від температури. Для досягнення високих метрологічних характеристик віддано перевагу мостовій схемі із самобалансуванням та з використанням додаткового ТРПП температури оточуючого середовища.

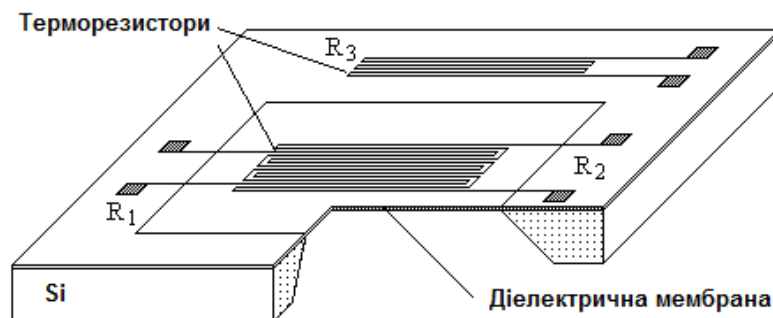


Рис. 4.9 Ескіз кристалу терморезисторного первинного перетворювача типу Пірані лабораторії медичної сенсорики факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського

За умови тотожності температури корпусу перетворювача та температури оточуючого середовища  $T_{н.с.}$  для номіналу терморезистору  $R_T$ , розміщеного на кремнієвій підкладці, та терморезистору  $R_P$ , розміщеного на термоізолюючій мембрані, отримуємо:

$$\begin{aligned}
 R_T &= R_{T0} (1 + \alpha T_{н.с.}) \\
 R_P &= R_{P0} (1 + \alpha (T_{н.с.} + \Delta T_{н.с.}))
 \end{aligned}
 \quad (4.6).$$

В схемі рис. 4.10 передбачена можливість періодичної зміни комбінації постійних резисторів мосту R1 - R4 шляхом комутації електронних ключів Кл1 и Кл2 під управлінням генератору 18. Схеми вибірки-зберігання 11 и 12, котрі також управляються генератором 18, забезпечують запам'ятовування напруги з виходу операційного підсилювача 10 у відповідних напівперіодах вимірювання.

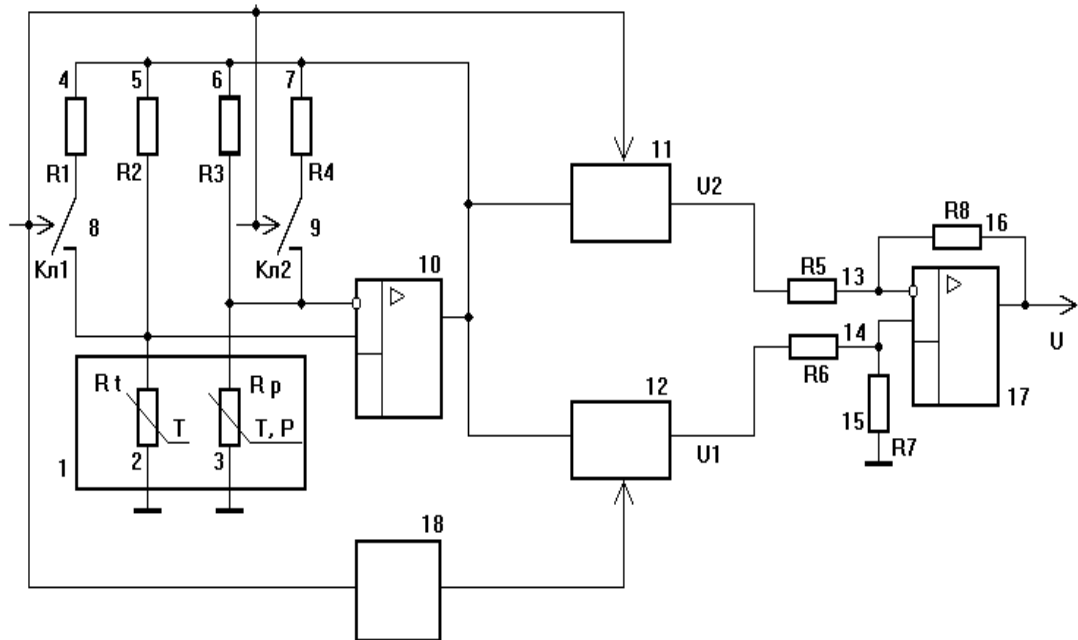


Рис. 4.10. Структурна схема вимірювача вакууму типу Пірані із компенсацією впливу нестабільності температури середовища методом модуляції напруги живлення

Коли ключі розімкнуті, напруга на виході операційного підсилювача U1 самобалансується до значення, що забезпечує баланс опорів у мості завдяки саморозігріванню резистору  $R_P$ , а температура його розігрівання визначається залежним від тиску тепловим опором  $R_{th}$  із співвідношення:

$$\Delta T_{н.с.} = R_{th} P = R_{th} (U1)^2 \frac{R_P}{(R3 + R_P)^2} . \quad (4.7)$$

Розв'язуючи наведені рівняння відносно  $U1$  та маючи на увазі умову

збалансованості мосту  $\frac{R_3}{R_P} = \frac{R_2}{R_T}$ , отримуємо:

$$U1 = \{R_{th}^{-1} \frac{R_3}{\alpha R_{T0} R_2} [\frac{R_3 R_{T0}}{R_2 R_{P0}} - 1]\}^{1/2} [R_2 + R_{T0}(1 + \alpha T_{н.с.})]. \quad (4.8)$$

Коли ключі Кл1 та Кл2 замкнуті, маємо:

$$U2 = \{R_{th}^{-1} \frac{R_3^{//}}{\alpha R_{T0} R_2^{//}} [\frac{R_3^{//} R_{T0}}{R_2^{//} R_{P0}} - 1]\}^{1/2} [R_2^{//} + R_{T0}(1 + \alpha T_{н.с.})], \quad (4.9)$$

$$\text{де } R_3^{//} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}, \text{ а } R_2^{//} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Напруги  $U1$  та  $U2$  запам'ятовуються схемами вибірки-зберігання УВ31 та УВ32, синхронізацію котрих із ключами 8 и 9 виконано таким чином, що період вибірки схеми 11 відповідає замкнутому стану ключів, а період вибірки схеми 12 - різімкнутому. Виконавши додаткову умову

$$\frac{R_3}{R_2} = \frac{R_3^{//}}{R_2^{//}}, \text{ що забезпечує сталість } R_P \text{ незалежно від стану ключів, та}$$

знайшовши різницю напруг  $U1$  и  $U2$ , остаточно отримуємо:

$$U = U1 - U2 = \{R_{th}^{-1} \frac{R_3}{\alpha R_{T0} R_2} [\frac{R_3 R_{T0}}{R_2 R_{P0}} - 1]\}^{1/2} [R_2 - R_2^{//}]. \quad (4.10)$$

Зміна температури середовища призводить до зміни номіналів резисторів  $R_P$  та  $R_T$  з урахуванням їх температурної чутливості, зміни потужності електричного струму та до наступної зміни температури  $\Delta T_{н.с.}$  резистора  $R_P$ . Вихідна напруга пропонованої схеми у відповідності до (11) не залежить від вказаних механізмів похибки, тоді як кожна з проміжних напруг  $U1$  та  $U2$  мають значну залежність від температури середовища.

Випробування ТРПП типу Пірані виконано на редуційній вакууметричній установці ОРУ-2М, атестованій як з зразковий засіб вимірювання низького тиску другого розряду, а також на промисловій вакуумній установці УВН-2М, оснащений вакуумметром ВІТ-2П з іонізаційним ПМН-2 та термопарним ПМТ-2 перетворювачами. Результати наведені на рис. 4.10. та описані в роботах [185, 186]. Для порівняння наведена також характеристика перетворення промислового аналога ПМТ-6-3. Як видно з рис. 4.16, ТРПП вакууму типу Пірані лабораторії медичної сенсорики ФЕЛ НТУУ КПІ в режимі живлення за сталою температурою ТГЕ мають чутливість до абсолютного тиску повітря в діапазоні від 0,04 Па до 10 кПа, споживана потужність 3 мВт при максимальних температурах перегріву до 100 °С.

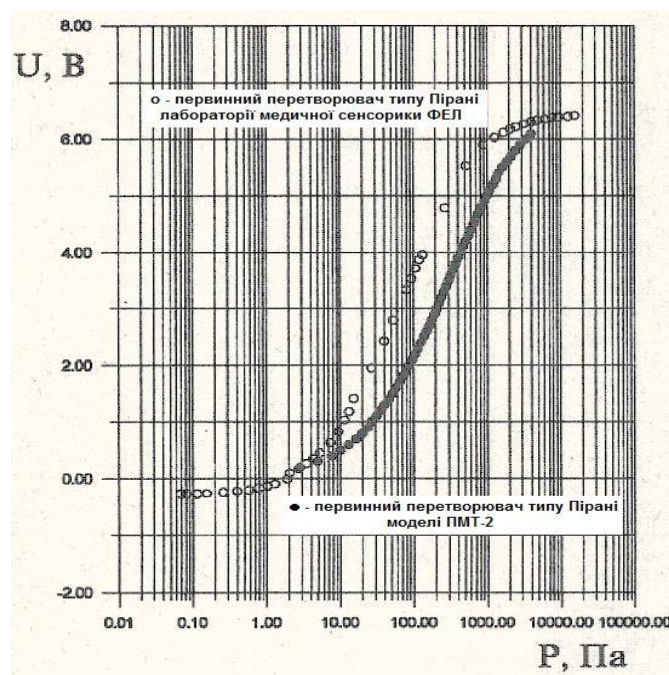


Рис. 4.11 Характеристика перетворення мікромеханічного перетворювача вакууму типу Пірані лабораторії медичної сенсорики ФЕЛ НТУУ КПІ [185, 186].

Режим сталої температури; схема самозбалансованого містка.

## Висновки до Розділу 4.

Отриманий у розділі 4 результат з експериментального дослідження ТРПП і їх практичного застосування показує наступне:

1. Стенди для дослідження статичних і динамічних параметрів ТРПП створено у відповідності до основних вимог сучасної технології віртуальних інструментів, яка передбачає поєднання спеціальних технічних засобів вимірювання, прикладного програмного забезпечення та стандартних промислових комп'ютерних технологій. Розроблено та реалізовано вимірювально-управляючі автоматизовані системи з гнучкою функціональністю, яка забезпечується вибраними апаратними засобами (пристрій збору даних NI USB6009 та платформа для розробки віртуальних приладів ELVIS II) і програмним середовищем LabVIEW.

2. Апробацією розроблених ТРПП лінійної швидкості (об'ємних витрат) газу в приладах діагностики функції зовнішнього дихання людини «Пульмовент» доведено можливість їх використання з виконанням сучасних медико-технічних вимог до названих приладів.

3. При використанні ТРПП абсолютного тиску газу за теплообміном (первинні перетворювачі вакууму типу Пірані) експериментально підтверджено діапазон їх чутливості в межах від 0,1 Па до 10 кПа. Отримано аналітичні вирази для залежності вихідної напруги вторинного перетворювача від температури вимірюваного середовища як впливної величини. Запропоновано новий спосіб компенсації вказаної залежності в схемах самозбалансованого містка методом модуляції струму живлення.

Основні результати, викладені в розділі 4, опубліковані автором в роботах [167 – 169, 172 - 177, 179 - 181, 185, 186].



## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень на основі встановлених закономірностей впливу фізико-топологічних характеристик на метрологічні параметри розв'язано науково-прикладну задачу розробки терморезисторних первинних перетворювачів із конструктивно керованими характеристиками перетворення. В роботі отримано наступні результати:

1. Розроблено нові ТРПП у МЕМС виконанні з удосконаленою конструкцією ТІС, що дозволяє розширити діапазони чутливості ТРПП та реалізувати нові методи вимірювань параметрів середовища. За результатами досліджень функції перетворення активних твердотільних ТРПП теплофізичних параметрів середовища за методиками динамічного нагрівання запропоновано способи вимірювання абсолютного тиску та густини газу, що використовують специфіку в конструктивно-топологічних аспектах ПП, виготовлених за технологією МЕМС. Запропоновані технічні рішення на способи виготовлення таких ТРПП у МЕМС виконанні захищено двома патентами, а на способи вимірювання та пристрої, що їх реалізують – трьома патентами.

2. Доведено функціональні і конструктивно-топологічні переваги активних багатoeлементних ТРПП над одноелементними аналогами на прикладі калориметричного ТРПП лінійної швидкості (об'ємних витрат) рідини та газу. Триелементний калориметричний перетворювач швидкості рідини або газу в каналі має регульовану за діапазоном лінійності характеристику перетворення в нижній частині діапазону, а діапазон її монотонної залежності визначається взаємним розташуванням ТЧЕ і ТГЕ та висотою каналу, тобто є конструктивно керованим. Чутливість триелементного місткового занурюваного перетворювача шириною 40 мкм в каналі висотою 300 мкм в 2,5 рази вища за чутливість одноелементного аналога за лінійної швидкості повітря в каналі 0,1 м/с.

3. Встановлено, що збільшення висоти каналу калориметричного ТРПП лінійної швидкості (об'ємних витрат) рідини або газу в режимі сталої потужності ТГЕ призводить до істотного підвищення чутливості до швидкості потоку середовища в каналі з одночасним звуженням діапазону лінійності. Для нагрівача шириною  $b$  в діапазоні 10 – 100 мкм висота каналу  $D$  в 200 – 300 мкм є перехідною від зони “сильної” залежності температури нагрівача від висоти каналу до зони “слабкої”. Сильна залежність ( $D < 100$  мкм) характерна для сумірних значень висоти каналу і ширини нагрівача; вона описується обернено пропорційною залежністю коефіцієнту теплообміну від відстані до теплового стоку, яка накладається на аналогічну залежність від ширини нагрівача. Отриманий результат дає змогу сформулювати інженерну методику проектування ТРПП у МЕМС виконанні на потрібний вимірювальний діапазон.

4. У результаті проведеного комплексного аналізу теплообмінних процесів в ТРПП та електричних процесів в колах вторинного перетворювача за схемою самозбалансованого мосту виявлено закономірності впливу зміни температури вимірюваного середовища на характеристику перетворення, що дало змогу розробити новий спосіб компенсації температурної чутливості ТРПП за методом модуляції струму живлення ТГЕ (захищено патентом).

5. Проведено апробацію ТРПП лінійної швидкості (об'ємних витрат) газу в приладах діагностики функції зовнішнього дихання людини “Комплекс автоматизований для дослідження функції зовнішнього дихання ПУЛЬМОВЕНТ 1 і ПУЛЬМОВЕНТ 1.002”, ТУ У 19018095.001-96 та доведено можливість їх використання з повним виконанням комплексу сучасних медико-технічних вимог до названих приладів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Petersen K.E. Silicon as a mechanical material / K.E. Petersen // Proc. IEEE Electron Devices, vol. 70, №5, – 1982. P. 420 – 457.
2. Ваганов В.И. Оптимальные режимы анизотропного травления кремния в водных растворах щелочей / В.И. Ваганов, Н.И. Гончаров // Электронная техника. Серия 3, Микроэлектроника. – 1980. – Вып.1. – С. 73–78.
3. Baltes H. CMOS as sensor technology / H. Baltes // Sensors & Actuators, A 37-38. – 1993. P. 51 – 56.
4. Petersen K. From microsensors to microinstruments / K. Petersen // Sensors and Actuators A, 56. – 1996. P. 143 – 149.
5. Baltes H. Micromachined Thermally Based CMOS Microsensors / H.Baltes, O. Paul, O. Brand // Proceeding of the IEEE, Vol.86, No 8, August 1998. – P. 1660 – 1678.
6. Мальцев П.П. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам / Сборник статей под ред. П.П. Мальцева // Москва: - ТЕХНОСФЕРА, 2005. – 592 с.
7. Смолин В. К. Тонкоплёночные резистивные элементы первичных преобразователей датчиков / В. К. Смолин // Нано- и микросистемная техника, №9 (122) 2010, с. 16 – 23.
8. Васильев А.А. Микромощные полупроводниковые сенсоры на тонких диэлектрических мембранах / А.А. Васильев // Нано- и микросистемная техника, №10, 2004, с. 7 – 12.
9. Hautefeuille M. Development of a Microelectromechanical System (MEMS) - Based Multisensor Platform for Environmental Monitoring. / Mathieu Hautefeuille, Brendan O’Flynn, Frank H. Peters and Conor O’Mahony // Micromachines 2011, 2. – p.p. 410 – 430; doi:10.3390/mi2040410.

10. Eloy J.C. Status of the MEMS industry in 2006, Sensors and Transducers Magazine, Vol. 66, Issue 4, April 2006. – p.p. 521 – 525.
11. Status of the MEMS Industry 2015. Report by Yole Developpement, [http://www.slideshare.net/Yole\\_Developpement/status-of-thememsindustry](http://www.slideshare.net/Yole_Developpement/status-of-thememsindustry) 2015sample.
12. Dixon R. Prospects for MEMS in the automotive industry / R. Dixon and J. Bouchaud // <http://www.memsinvestorjournal.com>, August 09, 2007.
13. Pressure, Force and Airflow Sensors. MICRO SWITCH Sensing and Control. Каталог фірми Honeywell, August 1996.
14. Johnson R.G. A highly sensitive silicon chip microtransducer for air flow and differential pressure sensing applications / R.G. Johnson, R.E. Higashi // Sensors and Actuators, 11 (1987) – p.p. 63–72.
15. Crary S.B. Thermal management of integrated microsensors / S.B. Crary // Sensors and Actuators, 12 (1987) p. 303–312.
16. Mastrangelo C.H. Thermal applications of micro-bridges / C.H. Mastrangelo // Ph.D. Dissertation, Univ. of California, Berkeley, (1991). –388 P.
17. Klaassen E. H. Micromachined Instrumentation Systems / E. H. Klaassen // Ph.D. Dissertation, Stanford University, 1996. – P.169.
18. van Herwaarden S. Physical Principles of Thermal Sensors / S. van Herwaarden // Sensors and Materials, Vol.8, No 6 (1996) p. 373–387.
19. Козлов А.Г. Тепловые микросенсоры: классификация, основные типы / А.Г. Козлов // Нано- и микросистемная техника, №4 2006, стр. 2-13.
20. Козлов А.Г. Тепловые микросенсоры: конструктивные особенности / А.Г. Козлов // Нано- и микросистемная техника, №1 (90) 2008, – С. 16 – 28.
21. Стадник Б.І. Автоматизоване проектування контактних термоперетворювачів / Б.І. Стадник, М.М. Семерак, І.П. Дмитраш // – Київ: Наукова думка, 1991. –152 с.

22. Damean N. Measurement concepts: from a classical transducers to new MEMS / N. Damean, Paul P. L. Regtien // *Measurement*, 27 (2000), –p. 159–178.
23. Damean N. Heat transfer in a MEMS for microfluidics / N. Damean, Paul P. L. Regtien, M. Elwenspoek // *Sensors and Actuators A*, -105 (2003) – P. 137–149.
24. Swart N. Numerical optimisation of flow-rate microsensors using circuit simulation tools / N. Swart, A. Nathan. M. Shams, M. Parameswaran // *Proc.6<sup>th</sup> Int.Conf.Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '91)*, San Francisco, CA, USA, June 24-27, 1991, –pp.26–29.
25. Nagata M. Thermal Based Micro Flow Optimisation Using Coupled Electrothermal Numerical Simulation / Mitsuhiro Nagata, N. Swart, M. Stevens, Arokia Nathan // *TRANSDUSERS '95 • EUROSENSORS IX, The 8<sup>th</sup> Intern. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX*, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995. –P.447–449.
26. Rusconi R. Numerical Analysis of Convective Instabilities in a Transient Short-Hot-Wire Setup for Measurement of Liquid Thermal Conductivity / Roberto Rusconi, Wesley C. Williams, Jacopo Buongiorno, Roberto Piazza and Lin-Wen Hu // *International Journal of Thermophysics*, Vol. 28, No. 4, August 2007, –p.p. 1131 – 1146 .
27. Дульнев Г.Н. Теория тепловых режимов ПТС / Г.Н. Дульнев // *Теплоэнергетические приборы и регуляторы*. – М.: Машгиз, 1954. - С.
28. Геращенко О.А. Температурные измерения. Справочник / О.А. Геращенко, А.Н. Гордов, А.К. Еремина и др. // – К: Наукова думка, 1989. – 704 с.
29. ДСТУ ГОСТ 6651:2014 Термоперетворювачі опору із платини, міді та нікелю. Загальні технічні вимоги і методи випробування (ГОСТ 6651 – 2009, IDT). Надано чинності з 2014–11–01.

30. ДСТУ 3742-98 Державний стандарт України. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання температури. Контактні засоби вимірювання температури. Чинний від 1999-01-01.
31. Попов В.С. Подогреваемые электрические сопротивления в электроизмерительной технике и автоматике / В.С. Попов // – М. – Л.: Наука, 1964. – 228 с.
32. Нечаев Г.К. Полупроводниковые термосопротивления в автоматике / Г.К. Нечаев // – К.: Государственное изд-во технической литературы УССР, 1962. – 254 с.
33. Шашков А.Г. Терморезисторы и их применение / А.Г. Шашков // – М.: Энергия, 1967. – 320 с.
34. Карандеев К.Б. Мостовые методы измерений: теория и расчет электроизмерительных мостовых схем / К.Б. Карандеев // - Киев : Гостехиздат, 1953. – 246 с.
35. Кестер У. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков. Материалы семинара Analog Devices / У. Кестер, Дж. Брайнт, У. Юнг Перевод с англ. Горшкова Б.Л. // – Цит. 2006. 13.01. – Доступний з: <<http://www.autexspb.da.ru>>.
36. Precision DC Current, Voltage and Resistance Measurement. Low Level Measurements Handbook. 7-th edition. Keithley Instruments. 2013. P. 245.
37. [http://heraeus-sensor-technology.com/en/produkte\\_1/sensormodule/](http://heraeus-sensor-technology.com/en/produkte_1/sensormodule/)
38. Маргелов А. Новые платиновые датчики температуры / А. Маргелов // Новости электроники, №1 (27) 2007, с. 17-18.
39. Брайловский В.В. Стабильность характеристик медных пленочных термопреобразователей сопротивления, / В.В. Брайловский, О.Е. Иларионов, П.М. Шпатар // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, №1 2004, стр. 56-58.
40. Jiang L. Micromachined polycrystalline thin film temperature sensors /Linan Jiang, Man Wong and Yitshak Zohar// Meas. Sci. Technol. 10 (1999). P. 653- 664.

41. Rejutor – Electronically re-adjustable resistor from Microbridge Technologies. [www.rejutor.com](http://www.rejutor.com)
42. Яганов П.О. Мікроелектронні перетворювачі на кремнієвій структурі з діелектричною ізоляцією / П.О. Яганов // Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, Київ, 2006. УДК 621.315.592.
43. Swart N.R. Flow-rate microsensor modelling and optimisation using SPICE / N.R.Swart, A. Nathan // 6th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '91), San Francisco, CA, USA, June 24-28, 1991, p.p. 109-122.
44. van Oudheusden B.W. Silicon thermal flow sensors, Sensors & Actuators, A 30 (1992) – P. 5-26.
45. Cho S.T. A High-Performance Microflowmeter with Built-in Self Test / S.T. Cho, Kensall D. Wise // Sensors and Actuators A36 (1993), 47-56.
46. Lammerink Theo S.J. Micro-liquid flow sensor / Theo S.J. Lammerink, Niels R.Tas, Miko Elwenspoek, Jan H.J. Fluitman // Sensors and Actuators A, 37-38 (1993) 45-50.
47. Swart N.R. Coupled electrothermal modeling of microheaters using SPICE / N.R.Swart, A. Nathan // IEEETrans. Electr. Dev., 41 (1994) P. 920-925
48. Robadey J. Two-dimensional integrated gas flow sensors by CMOS technology / J. Robadey, O. Paul, H. Baltes // J. Micromech. Microeng. 5 (1995) P. 243-250
49. van Putten M. J. A. M. Thermal Flow Measurements at  $(Gr/Re^2) \gg 1$  by Silicon Anemometry / M. J. A. M. van Putten, M. H. P. M. van Putten and A. F. P. van Putten // IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 48, NO. 3, JUNE 1999, p.p. 724-729.
50. de Bree H.E. Bidirectional fast flow sensor with a large dynamic range / H.E. de Bree, H.V. Jansen, T.S.J. Lammerink et al. // J. Micromech. Microeng. 1999). V. 9. P. 186 – 189.

51. Tas N.R. Towards Thermal Flowsensing With pL/sec Resolution / N.R. Tas, T.S.J. Lammerink, P.J. Leussink, J.W. Berenshot, H.-E. de Bree, M. Elwenspoek // Micromachined Devices and Components VI, Proc. SPIE 4176, 106 (2000).
52. Ernst H. High-Resolution Thermal Measurements in Fluids / H. Ernst // Ph.D. Dissertation, Albert-Ludwigs University of Freiburg, Breisgau, 2001. P. – 149.
53. Rasmussen A. Simulation and optimization of a microfluidic flow sensor / A. Rasmussen, C. Mavriplis, M.E. Zaghoul, O. Mikulchenko, K. Mayaram // Sensors and Actuators A, -88 (2001) – p.121-132.
54. van Baar J. Distributed thermal micro sensors for fluid flow / John van Baar // Ph.D. thesis, University of Twente, 2002. P. – 134.
55. Sabaté N. Multi-range silicon micromachined flow sensor / N. Sabaté, J. Santander, L. Fonseca, I. Gràcia, C. Cané // Sensors and Actuators A 110 (2004), - p.p. 282–288.
56. Matova S.P. Calibration and Testing of Integrated Thermal Airflow Sensors / S.P. Matova // Ph.D. Dissertation, Technical University of Delft, December 2004. – 176 p.
57. van Honschoten J.W. Analytic model of a two-wire thermal sensor for flow and sound measurements / J.W. van Honschoten, G.J.M. Krijnen, V.B. Svetovoy, H.-E. de Bree and M.C. Elwenspoek // Journal of Micromechanics and Microengineering, (2004) – P. 1468–1477.
58. van Honschoten J.W. Optimization of a Thermal Flow Sensor for Acoustic Particle Velocity Measurements / J.W. van Honschoten, V.B. Svetovoy, G.J.M. Krijnen, M.C. Elwenspoek // Journal of Microelectromechanical systems, vol.14, No. 3, June 2005, – P. 436–443.
59. Дюжев Н. А. Универсальный термочувствительный элемент для датчиков газового потока / Н. А. Дюжев, А. Н. Поправкин, И. Г. Шкуропат, А. Н. Шокин, А. Ф. Попков // Нано- и микросистемная техника, №2 (103) 2009, – с. 23–26.



60. Kim T. H. Study of the sensitivity of a thermal flow sensor / T. H. Kim, D.-K. Kim, S. J. Kim // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (2009), – p.p. 2140–2144.
61. Бобров А. А. Расчет терморезистивного анемометрического преобразователя на мембране / А. А. Бобров, А. Ф. Попков, Н. А. Дюжев, Н. Е. Кулагин, М. А. Махиборода, А. М. Медников // *Нано- и микросистемная техника*, №8 (121). 2010. – с. 34-39.
62. Бобров А. А. Исследование выходного отклика резистивного анемометрического преобразователя расхода газа мембранного типа в стационарном и импульсном режимах нагрева / А. А. Бобров, Н. А. Дюжев, А. М. Медников, М. А. Махиборода, А. Ф. Попков, И. Г. Шкуропат, Н. К. Матвеева // *Нано- и микросистемная техника*, №9 (122) 2010, – с. 23–27.
63. Сажин О.В. Микросенсор потока теплового типа для датчика массового расхода воздуха / О.В. Сажин, Ю. В. Первушин // *НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ*, 2011, том 21, № 3, – с. 52–61.
64. Sazhin O. Prototype of calorimetric flow microsensor / O. Sazhin // Citation: 28th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, AIP Conf. Proc. 1501, 837 (2012). View online: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4769629>
65. Kuo J. T. W. Micromachined Thermal Flow Sensors—A Review / Jonathan T. W. Kuo, Lawrence Yu and Ellis Meng // *Micromachines* 2012, 3, 550-573; doi:10.3390/mi3030550.
66. Beigelbeck R. From basic flow property to MEMS multiparameter sensor / Roman Beigelbeck, Samir Cerimovic, Almir Talic, Franz Kohl, Artur Jachimowicz, ... // *AMA Conferences 2015 – Sensor 2015 and IRS 2015*, DOI 10.5162/sensor2015/B2.3, – p.p. 216–221.
67. Svetovoy V.B. Model of the  $\mu$ -flow microphone / V.B. Svetovoy, I.A. Vinter // *Sensors and Actuators A*, -86 (2000). – P. 171–181.
68. van Honschoten J.W. Modelling and optimisation of the Microflow / J.W. van Honschoten // *Ph.D. Dissertation*, University of Twente, Netherland, (2004). – 224 P.

69. van Herwaarden A.W. Integrated vacuum sensor / A.W. van Herwaarden, P.M. Sarro // *Sensors and Actuators*, 8 (1985). – P. 187-196.
70. van Herwaarden A.W. Floating-membrane thermal vacuum sensor / A.W. van Herwaarden, P.M. Sarro // *Sensors and Actuators*, 14 (1988). – P. 259–268.
71. Juneja P.P.S. A Wide-Range Vacuum Sensor Using Phase Sensitive Detection / Juneja P.P.S., Chapman G.H. // *Proceeding of the Canadian Conference on VLSI'93*, 1993. Banf, Alberta, Canada, – pp. 3A: 7–12.
72. Chou Bruce C.S. A highly sensitive Pirani vacuum gauge / Bruce C.S. Chou, Yeong-Maw Chen, Mang Ou-Yang, Jin-shown Shie // *TRANSDUSERS'95• EURO-SENSORS'IX The 8<sup>th</sup> Intern. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX*, Stockholm, Sweden, June 25–29, 1995. – p.167–170.
73. Paul O. Novel fully-compatible vacuum sensor / Paul O., Baltes H. // *Sensors and Actuators A* 46-47 (1995). – p.143-146.
74. Chou B.C.S. A sensitive Pirani vacuum sensor and the electrothermal SPICE modelling / B.C.S. Chou, Y.-M. Chen, J.-S. Shie, M. Ou-Yang // *Sensors and Actuators A*, -53 (1996) – p. 273–277.
75. Jin R. Coupled Electro-thermal-mechanical and Transient Characteristic for Micro Gas Pressure Sensor Micro-hotplate-based / Rencheng Jin, Lisha Meng, Mingliang Shao and Zhenan Tang // *Sensors & Transducers Journal*, Vol. 131, Issue 8, August 2011, – pp. 8–20.
76. Punchihewa K. G. Comparisons between Membrane, Bridge and Cantilever Miniaturized Resistive Vacuum Gauges / Kasun Gardiye Punchihewa, Evan Zaker, Rade Kuljic, Koushik Banerjee, Tatjana Dankovic, Alan Feinerman and Heinz Busta // *Sensors* 2012, 12. – p. 8770–8781.
77. van Herwaarden A.W. Liquid and gas micro-calorimeters for (bio) chemical measurements / A.W. van Herwaarden, P.M. Sarro, J.W. Gardner, P. Bataillard // *Sensors and Actuators A*, 43 (1994). – p. 24–30.

78. van Herwaarden S. Smart Sensor Devices from Xensor Integration. Thermal Conductivity gauge TCG-3880, Gas Nanocalorimeters XEN-39. / S. van Herwaarden // [www.xensor.nl](http://www.xensor.nl)

79. Kechao X. A scanning AC calorimetry technique for the analysis of nano-scale quantities of materials / Xiao Kechao, John M. Gregoire, Patrick J. McCluskey and Joost J. Vlassak // Review of Scientific Instruments, 2012, 83(11): 114901.

80. Briand A. D. Thermally Isolated Microelectronic Devices for Gas Sensing Applications / A. D. Briand // Dissertation for the degree of “Docteur ès Sciences”, Institute of Microtechnology University of Switzerland, 2001.

81. Kozlov A.G. Optimisation of structure and power supply conditions of catalytic gas sensor / A.G. Kozlov // Sensors and Actuators B, – 82 (2002), – P. 24 – 33.

82. Локтев Д.В. Исследование теплопроводности плотных газов в микросистемах / Д.В. Локтев, В.М. Андреев, Д.В. Зиновьев, К.А. Тузовский, И.Н. Шишкова // Нано- и микросистемная техника, № 11, 2008. – с. 29–31.

83. PRASAD M. Design and Simulation of Double-spiral Shape Micro-heater for Gas Sensing Applications / Mahanth PRASAD, R. P. YADAV, V. SAHULA and V. K. KHANNA // Sensors & Transducers Journal, Vol. 129, Issue 6, June 2011, – pp. 135–141.

84. van der Wouden E. Multi Parameter Flow Meter for On-Line Measurement of Gas Mixture Composition / Egbert van der Wouden, Jarno Groenesteijn, Remco Wiegerink and Joost Lötters // *Micromachines* 2015, 6, 452-461; doi:10.3390/mi6040452.

85. Jachimowicz J. Bridge-Based Microsensor for Determining the Thermal Properties of Liquids / Jachimowicz, J. Schalko, J. Kuntner, F. Kohl, B. Jakoby // The Society for Micro- and Nanoelectronics – Biennial Report 2005 – 2006, – p.p. 379 – 383.

86. Plochinger H. FLUID PROPERTY SENSOR WITH HEAT LOSS COMPENSATION AND OPERATING METHOD THEREOF / Heinz Plochinger // US Patent 2014/0026640 A1, Pub. Date: Jan. 30, 2014.

87. Shie J.-S. Design considerations of metal-film bolometer with micromachined floating membrane / J.-S. Shie, P.K. Weng // Sensors and Actuators A, -33 (1992) – p.183-189.

88. Кацан И.И. Тонкопленочный никелевый болометр / И.И. Кацан, Б.И. Лупина, В.И. Почтарь, Г.А. Фролов // Приборы и техника эксперимента. - 1994, №4, – с. 199-202.

89. Kozlov A.G. Optimization of thin-film thermoelectric radiation sensor with comb thermoelectric transducer / A.G. Kozlov // Sensors and Actuators A, – 75 (1999), – P. 139 – 150.

90. Козлов А.Г. Моделирование нестационарного режима работы микроэлектронного теплового приемника излучения консольного типа / А.Г. Козлов // Нано- и микросистемная техника, № 12, 2005. – с. 16–25.

91. [http://www.memsic.com/products/selector\\_app.htm](http://www.memsic.com/products/selector_app.htm)

92. Mailly F. Effect of gas pressure on the sensitivity of a micro-machined thermal accelerometer / F. Mailly, A. Martinez, A. Giani, F. Pascal-Delannoy, A. Boyer // Sensors and Actuators A, -109 (2003), – P. 88 – 94.

93. Rekik A. A. Modeling the influence of etching defects on the sensitivity of MEMS convective accelerometers / A. A. Rekik, F. Azaïs, N. Dumas, F. Mailly, P. Nouet // "IMS3TW'10: 16th IEEE International Mixed-Signals, Sensors and Systems Test Workshop, La Grande Motte, Montpellier : France", June 2010.

94. Legendre O. Novel humidity sensing method based on the transient response of a microheater / O. Legendre, H. Bertin, H. Mathias, F. Maily, S. Megherbi // Sensors and Actuators A, -192 (2013), – P. 92 – 100.

95. Zambrozi P. Relative-Air Humidity Sensing Element Based on Heat Transfer of a Single Micromachined Floating Silicon Resistor / P. Zambrozi, F. Fruett // Journal Integrated Circuits and systems, 2012; v.7/n.1: – P. 130 – 136.

96. Грудин О.М. Микроэлектронный терморезистивный датчик скорости изменения давления газа / О.М. Грудин, И.И. Кацан, Б.И. Лупина, Г.А. Фролов // Приборы и техника эксперимента. –1995, № 4. – С. 161–166.
97. ДСТУ 3651.2-97 Державний стандарт України. Метрологія. Одиниці фізичних величин. Фізичні сталі та характеристичні числа. Основні положення, позначення, назви та значення. Чинний від 1999-01-01.
98. Ландау Л.Д. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика / Л.Д. Ландау, А.И. Ахиезер, Е.М. Лифшиц // М.: Наука, 1965. – 399 с.
99. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры / Н.А. Ярышев // Л.: Энергоатомиздат, 1990. –256 с.
100. Kozlov A.G. Analytical modelling of steady-state temperature distribution in thermal microsensors using Fourier method: Part 1. Theory / A.G. Kozlov // Sensors and Actuators A, – 101 (2002), – P. 283 – 298.
101. Kozlov A.G. Analytical modelling of steady-state temperature distribution in thermal microsensors using Fourier method: Part 2. Practical application / A.G. Kozlov // Sensors and Actuators A, –101 (2002), –P.299–310.
102. Карслоу Г.С. Теория теплопроводности / Г.С. Карслоу // М – Л: ОГИЗ. 1947. – 288 с.
103. Козлов А.Г. Моделирование стационарного распределения температуры в газовых микросенсорах на термически изолированных структурах / А.Г. Козлов // Микросистемная техника, № 2. 2004, – С. 8–14.
104. Prasad M. Design and Simulation of Double-spiral Shape Micro-heater for Gas Sensing Applications / Mahanth Prasad, R. P. Yadav, V. Sahula and V. K. Khanna // Sensors & Transducers Journal, Vol. 129, Issue 6, June 2011. – pp. 135-141.
105. Khan U. An Accurate and Computationally Efficient Model for Membrane-Type Circular-Symmetric Micro-Hotplates / Usman Khan and Christian Falconi // *Sensors* 2014, 14, – P. 7374-7393; doi:10.3390/s140407374
106. Козлов А.Г. Погрешность и адекватность аналитического моделирования распределения температуры в тепловых микросистемах /

А.Г. Козлов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2014. Сборник трудов под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2014. Часть II. – С. 167 – 172.

107. Козлов А.Г. Моделирование процессов в теплофизических микросенсорах / А.Г. Козлов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, Специальность 05.27.01. Санкт-Петербург, 2014.

108. Головнева И.В. Способ изготовления терморезисторного преобразователя / И.В. Головнева, О.М. Грудин, В.Ф. Заворотный, П.Д. Иванов, И.И. Кацан, Б.И. Лупина, Г.А. , В.И. Почтарь // Пат. РФ № 2085874. Подача заявки: 1992-09-24, публикация патента: 27.07.1997.

109. Козирський В.В. Спосіб виготовлення матриці терморезисторних перетворювачів / В.В. Козирський, В.М. Решетюк, С.М. Осінов, А.Т. Орлов, Б.І. Лупина, І.С. Дейнека // Патентна корисну модель UA 76885 U. Номер заявки: u 2012 05498. Публікація відомостей про видачу патенту: 25.01.2013, Бюл. №2.

110. Лупина Б.І. Аналітичний розрахунок параметрів мікро-механічного терморезисторного перетворювача / Б.І. Лупина, О.В. Борисов // - Электроника и связь, 2004, № 21, Том 9. – С. 10–13.

111. Лупина Б.І. Моделювання та оптимізація конструкції мікромеханічного терморезисторного перетворювача / Б.І.Лупина, О.В.Борисов, В.Ф.Заворотний, І.І.Кацан, С.М.Осінов // 2-й Международный радиоэлектронный форум “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития”. Харьков, Украина, 19 – 23 сентября 2005 г. Том 3. – с. 240 – 243.

112. Борисов О.В. МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ТЕРМОРЕЗИСТОРНОГО ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА / О.В. Борисов, В.Ф. Заворотний, Б.І. Лупина, С.М. Осінов, Г.Л. Сорохтіна // II-я Международная научно-техническая конференция «ДАТЧИКИ, ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ – 2007»,

13-22 сентября, г. Ялта. Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2007 Спецвипуск. – С. 60 – 62.

113. Лыков А.В., Теория теплопроводности, М: Высшая школа, 1967. – 600 с.

114. Гребер Г. Основы учения о теплообмене / Гребер, Г., Эрк С., Григуль У. // М: Изд-во Иностранной литературы, 1958. – 566 с.

115. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе // М: Атомиздат, 1979, – 416 с.

116. Вірченко Н.О. Основні методи розв'язання задач математичної фізики / Н.О. Вірченко // К.: Інрес: Воля, 2006. – 332 с.

117. Feuchter M. Investigations on Joule heating applications by multiphysical continuum simulations in nanoscale systems / Manuel Feuchter // PhD Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Published: 08.07.2014, ISBN 978-3-7315-0261-6

118. Фрайден Дж. Современные датчики / Дж. Фрайден // Москва: Техносфера, 2006. – 592 с.

119. Джексон Р.Г. Новейшие датчики / Р.Г. Джексон // Москва: Техносфера, 2007. – 384 с.

120. Грудин О.М. Многофункциональные микроэлектронные терморезистивные датчики / О.М. Грудин, И.И. Кацан, Б.И. Лупина, Г.А. Фролов // VI международный семинар “Российские технологии для индустрии”, “Физические, Химические и Биологические Сенсоры”, С-Петербург, - 29–31 мая 2000 г.

121. Борисов О.В. Багатофункціональний терморезисторний перетворювач механічних та теплофізичних параметрів середовища / О.В. Борисов, Б.І. Лупина, Г.Л. Сорохтіна // 5-й Международный радиоэлектронный форум “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития”. Харьков, Украина, 14-17 октября 2014 г. Том III, – с. III-96 – III-99.

122. Elwenspoek M. Towards integrated microliquid handling systems / M. Elwenspoek, T.S.J. Lammerink, R. Miyake, J.H.J. Fluitman // J. Micromech. Microeng. 4 (1994). – 227-245
123. Nguyen N. T. Fundamentals and Applications of Microfluidics. Second Edition / Nam-Trung Nguyen, Steven T. Wereley // ARTECH HOUSE, INC. 2006. – 497 P.
124. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика / Д.В. Сивухин // М, Наука, 1979 – 552 с.
125. Volklein F. Optimisation tool for the performance parameters of thermoelectric microsensors / F. Volklein, H. Baltes // Sensors and Actuators A, -36 (1993) – p. 65 – 71.
126. Mayer F. Influence of design geometry and packaging on the response of thermal CMOS flow sensors / F. Mayer, O. Paul and H. Baltes // Transducers'95 - Eurosensors IX. The 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995, p. 528-531.
127. Nguyen N.T. Asymmetrical locations of heaters and sensors relative to each other using heater arrays - a novel method for designing multi-range electrocaloric mass-flow sensors / N.T. Nguyen, W. Dotzel // Sensors and Actuators A 62 (1997), – p.p. 506 – 512.
128. Mayer F. Scaling of thermal CMOS gas flow microsensors: experiment and simulation / F. Mayer, G. Salis, J. Funk, O. Paul, H. Baltes // Proceedings of the 9<sup>th</sup> Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, San Diego, California, USA, 11–15 Feb., 1996
129. Richter M. Micro Channels for Applications in Liquid Dosing and Flow Rate Measurement / M. Richter, P. Woias, D. Weib // Eurosensors X, Leuven, Belgium, 8–11 September 1996
130. Volklein F. Thermal conductivity and diffusivity of a thin film SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> sandwich system / F. Volklein // Thin Solid Films, 188 (1990). – P. 27



131. Zhang X. Thermal conductivity and diffusivity of free-standing silicon nitride thin films / Xiang Zhang and Costas Grigoropoulos // Rev.Sci.Instrum. -66 (2), February 1995. – P. 1115 – 1120.

132. Eriksson P. Thermal Characterization of Surface-Micromachined Silicon Nitride Membranes for Thermal Infrared Detectors / P. Eriksson, J.Y. Andersson, G. Stemme // Journal of Microelectromechanical Systems, - vol.6, - 1, (March 1997) – p.55–61.

133. Ftouni H. Thermal conductivity measurement of suspended Si-N membranes from 10 K to 275 K using the  $3\omega$ -Volklein method / H. Ftouni, C. Blanc, A. Sikora, J. Richard, M. Defoort, K. Lulla, E. Collin, O. Bourgeois // Eutotherm 2012.

134. Song Q. Measurement of SiN<sub>x</sub> thin film thermal property with suspended membrane structure / Q. Song, Z. Gui, S. Xia, Z. Chen, J. Zhang // Sensors and Actuators A, -112 (2004), – p.122–126

135. Кравчун С.Н. Измерение тепловых свойств тонких диэлектрических пленок зондовым методом периодического нагрева. I. Теория метода / С.Н. Кравчун, С.Т. Давитадзе, Н.С. Мизина, Б.А. Струков // Физика твердого тела, 1997, том 39, №4, с. 762 – 767.

136. Шашков А.Г. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А.Г. Шашков, Г.М. Волохов, Т.Н. Абраменко, В.П. Козлов. Под ред. Лыкова А.В. // М.: Энергия, 1973. – 336 с.

137. Филиппов Л.П. Измерение теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева / Филиппов, Л.П. // М.: Энергоатомиздат, 1984, – 104 с.

138. Кравчун С.Н. Метод периодического нагрева в экспериментальной теплофизике / С.Н. Кравчун, А.А. Липаев // – Казань: Изд. Казанского университета, 2006. –208 с.

139. Cahill D.G. Thermal conductivity measurement from 30 to 750 K: the  $3\omega$  method / D.G. Cahill // Review of Scientific Instruments. – 1990. – Vol. 61, Issue 2. – P. 802–808.
140. Lu L. 3 omega method for specific heat and thermal conductivity measurements / L. Lu, W. Yi, and D. L. Zhang // REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS VOLUME 72, NUMBER 7 JULY 2001 Rev. Sci. Instrum., Vol. 72, No. 7, July 2001, – p.p. 2996 – 3003.
141. Dijkstra M.A. Nano-flow thermal sensor applying dynamic w-2w sensing method / M.A. Dijkstra, T.S.J. Lammerink, R.J. Wiegerink and M.C. Elwenspoek // Proceedings of the 17 workshop on Micromachining, Micromechanics and Microsystems, 03 September 2006. Conference or Workshop Paper.
142. Tritt T. M. Thermal conductivity: theory, properties and applications / Edited by Terry M. Tritt // New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers. 2004. – P. 290.
143. Assael M. J. Historical evolution of the transient hot-wire technique / M. J. Assael, K. D. Antoniadis, and W. A. Wakeham // International Journal of Thermophysics. 2010, vol. 31, no. 6, – P. 1051–1072.
144. Cahill D. G. Thermal Conductivity of Thin Films: Measurement and Understanding / D. G. Cahill, H. E. Fischer, T. Klitsner, E. T. Swartz, and R. O. Pohl // J. Vac., Sci. Technol. 1989. A 7. –P. 1259-1269.
145. Hopkins P. E. Thermal conductivity measurements on polycrystalline silicon microbridges using the  $3\omega$  technique / Patrick E. Hopkins, Leslie M. Phinney // Journal of Heat Transfer, APRIL 2009, Vol. 131 / p.p. 043201-1 - 043201-8
146. Duquesne J.Y. Analytical solutions of the heat diffusion equation for 3 omega method geometry / J.Y. Duquesne, D. Fournier, C. Fretigny // Journal of Applied Physics, American Institute of Physics (AIP), 2010, 108 (8), –P. 086104.

147. Kozlov A. G. Analytical Modelling of Transient Processes in Thermal Microsensors / A. G. Kozlov, D. Randjelović, Z. Djurić // 12th. Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2011. – P. 1 – 7.

148. Frolov G.A. Micromechanical gas heat capacity sensor / G.A. Frolov, O.M. Grudin, I.I. Katsan, B.I. Lupina // ESSDERS 96, 26th European Solid State Device Research Conference. Technical digest, – pp. 215-218.

149. Frolov G.A. Micromechanical thermal sensor for absolute gas pressure measurements / G.A. Frolov, O.M. Grudin, I.I. Katsan, B.I. Lupina // International Mechanical Engineering congress and exposition, november 17-22, 1996, Atlanta Hilton and Towers, Atlanta, Georgia, USA

150. Grudin O.M. Thermal microsensor with a.c. heating for gas-pressure measurements / O.M. Grudin, G.A. Frolov, I.I. Katsan, B.I. Lupina // Sensors and Actuators A: Physical. Volume 62, Issues 1–3 (July 1997), – p.p. 571-575. Proc. of Eurosensors X, Leuven, Belgium, 8 – 11 Sept. 1996.

151. Головнева И.В. Способ измерения давления газов и устройство для его реализации / И.В. Головнева, О.М. Грудин, В.Ф. Заворотный, П.Д. Иванов, И.И. Кацан, Б.И. Лупина, В.И. Почтарь, Г.А. Фролов // Пат. РФ № 2036448. Дата публикации 27.05.1995.

152. Головнюова І.В. Спосіб вимірювання тиску газів і пристрій для його реалізації / І.В. Головнюова, О.М. Грудін, В.Ф. Заворотний, П.Д. Иванов, І.І. Кацан, Б.І. Лупина, В.І. Почтар, Г.О. Фролов // Патент України № 19035 від 25.12.1997 р.

153. Bran-Anleu G. Algorithm to optimize transient hot-wire thermal property measurement / Gabriela Bran-Anleu, Adrienne S. Lavine, Richard E. Wirz, and H. Pirouz Kavehpour // Review of Scientific Instruments 85, 045105 (2014); View online: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4870275>

154. Заворотний В.Ф. Спосіб визначення густини газів / В.Ф., Заворотний, О.В. Борисов, Б.І. Лупина, С.М. Осінов // – Патент на корисну модель №18749 від 15 Листопада 2006 р., Бюл. № 11.

155. Garnier J. P. A New Transient Hot-Wire Instrument for Measuring the Thermal Conductivity of Electrically Conducting and Highly Corrosive Liquids using Small Samples / J. P. Garnier, J. P. Maye, J. Saillard, G. Thévenot, A. Kadjo, S. Martemianov // *Int J Thermophys.* 2008. 29: 468–482, DOI 10.1007/s10765-008-0388-y

156. GOSALA N. Design and Development of Embedded System for the Measurement of Thermal Conductivity of Liquids by Transient Hot Wire Method / Nagamani GOSALA, Raghavendra Rao KANCHI // *Sensors & Transducers Journal*, Vol. 129, Issue 6, June 2011. – P. 42 – 56.

157. Choi T. Y. Measurement of the thermal conductivity of a water-based single-wall carbon nanotube colloidal suspension with a modified 3- $\omega$  method / Tae Y. Choi, Mohammad H. Maneshian, Boseon Kang, Won S. Chang, Chang S. Han and Dimos Poulikakos // *Nanotechnology* 20 (2009) 315706 (6pp). – p. 1 – 6 Online at [stacks.iop.org/Nano/20/315706](http://stacks.iop.org/Nano/20/315706)

158. Жуков Н.П. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ ДВУХ ТЕЛ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, О.Н. Попов, С.В. Молодов // *Вестник ТГТУ*. 2011. Том 17. № 2, – с. 360 – 364.

159. Демежко Д.Ю. Способ определения тепловой активности материалов и устройство для его осуществления / Д.Ю. Демежко, В.В. Дергачев, А.В. Климшин, Д.Г. Рывкин // Патент РФ № 2462703 на изобретение. Приоритет изобретения 19.07.2010. опубликовано 27.09.2012, бюлл. № 27.

160. Борисов О.В. Спосіб вимірювання густини газів за фазовими характеристиками теплової хвилі / О.В. Борисов, В.Ф. Заворотний, Б.І. Лупина, С.М. Осінов, Г.Л. Сорохтіна // II-я Международная научно-техническая конференция «*ДАТЧИКИ, ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ – 2007*», 13-22 сентября, г. Ялта. Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2007 Спецвипуск. – С. 161 – 163.

161. Томпкинс У. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC: Пер. с англ./ Под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера // – М.: Мир, 1992. – 592 с.
162. Сиберт У.М. Цепи, сигналы, системы: в 2-х ч., ч.1 / У.М. Сиберт // М.: Мир, 1988, – 336 с.
163. <http://www.ni.com/solutions>
164. Евдокимов Ю.К. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW / Ю.К. Евдокимов, В.Р. Линдваль, Г.И. Щербаков // – М.: ДМК Пресс, 2007. – 400 с.
165. Webster John G. Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook / John G. Webster // CRC Press LLC, 1999. - 2588 p.
166. Chen Y.M. Parameter extraction of resistive thermal sensors / Y.M. Chen, J.S. Shie, T. Hwang // Sensors and Actuators A, – 55 (1996), – p.43 – 47.
167. Борисов О.В. Автоматизований стенд на основі плати збору даних NI USB–6009 для вимірювання статичних параметрів мікромеханічного терморезисторного перетворювача / О.В. Борисов, І.С. Дейнека, Б.І. Лупина // Електроніка і зв'язь. – 2010. №5. – С. 113 – 119.
168. Борисов А.В. Исследование динамических характеристик микромеханических терморезисторных преобразователей физических параметров жидкости и газа на аппаратной платформе NI Elvis II в программной среде LabVIEW / А.В. Борисов, И.С. Дейнека, Б.И. Лупина // Прикладная радиоэлектроника. – 2010. Том 9, №4, – с. 562 – 568.
169. Борисов О.В. Вимірювання динамічних параметрів мікромеханічного терморезисторного перетворювача з використанням програмно-апаратного комплексу NI Elvis II / О.В. Борисов, І.С. Дейнека, Б.І. Лупина // Електроніка і зв'язь. – 2011. - №5 (64). – С. 5 – 12.
170. Смердов А.А. Біомедичні вимірювальні перетворювачі / А.А. Смердов, Сторчун Є.В. // Львів: Кальварія, 1997. – 112 с.

171. Грудин О.М. Устройство для измерения скорости газового потока / О.М. Грудин, П.Д. Иванов, И.И. Кацан, С.Н. Кривоблоцкий, В.А. Лопата, В.И. Почтарь, Г.А. Фролов // Патент № 2086922 РФ. – Заявл. 02.06.94; Опубл. 10.08.97, Бюл. № 22.

172. Лопата В.А. Вопросы применения электронных датчиков в составе флоуспирометрической аппаратуры / В.А. Лопата, И.И. Кацан, Б.И. Лупина, Г.А. Фролов, Х. Эльози // - Электроника и связь, 1998, 4, ч. III. Проблемы физической и биомедицинской электроники: Тематический выпуск по материалам Международной научно-технической конференции 28-30.05.1998, Киев, 1998, – с. 615–619.

173. Лопата В.А. Оценка преобразователей объемного расхода воздушного потока как объекта стандартизации флоуспирометров / В.А. Лопата, О.И. Островский, И.И. Кацан, Б.И. Лупина, Ю.С. Синекон, Х. Эльози // - Электроника и связь, 1999, N 6, т.2, – с. 252–255.

174. Lopata V.A. Choise of measuring channels design for spirometric telemedical systems / V.A. Lopata, M.M. Khvorov, O.M. Grudin, G.A. Frolov, L.D. Pisarenko, Ju.S. Sinekop, I.I.Katsan, B.I. Lupina // Workshop “Microtechniken und Mikrosensoren fur die Medizin, Biologie und Umwelt” - Jena 6- 7. Oktober 2000.

175. Лопата В.А. Применение микроэлектронной техники в составе флоуспирометрической аппаратуры / В.А. Лопата, И.И. Кацан, Б.И. Лупина, Ю.С. Синекон, Х. Эльози // Сборник научных трудов по материалам 5-й Международной конференции "Теория и техника передачи, приема и обработки информации" ("ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ, РАДИОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА"), Харьков, 1999, – с. 280–282.

176. Грудин О.М. Микроэлектронный датчик для измерения малых перепадов давления / О.М. Грудин, П.Д. Иванов, И.И. Кацан, С.Н. Кривоблоцкий, Б.И. Лупина, В.И. Почтарь // Приборы и техника эксперимента. - 1995, № 2, – с. 193 –197

177. Грудин, О.М. Возможности электронных преобразователей давления в решении метрологических проблем флоуспирометрии / О.М. Грудин, И.И. Кацан, В.А. Лопата, Б.И. Лупина, Х. Эльози, Г.А. Фролов // Международная конференция по биомедицинскому приборостроению „Биомедприбор-98”, Москва, НИИ медицинского приборостроения РАМН, 6-8 октября 1998 г., – с. 33-35.

178. Benkstein K. D. Microsensors in Dynamic Backgrounds: Toward Real-Time Breath Monitoring / Kurt D. Benkstein, Baranidharan Raman, Christopher B. Montgomery, Carlos J. Martinez, and Steve Semancik // IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 10, NO. 1, JANUARY 2010. – P. 137 – 144.

179. Frolov G.A. Pulmovent-2 computer – based diagnostic complex for lung function screening / G.A. Frolov, A.V Gendin., O.M. Grudin, I.I.Katsan, S.N. Krivoblotsky, V.A. Lopata, B.I. Lupina, A.I. Ostrovsky, V.I. Pochtar // A XVI-a Conferinta Nationala de Fiziologie, - 21-23 octombrie 1999, Craiova

180. Лупина Б.И. Мікромеханічний поверхневий терморезисторний перетворювач лінійної швидкості середовища в каналі прямокутного перерізу - Електроніка та зв'язок, 2016, Том 21, №3 (92). – С. 17 – 28.

181. Лопата В.А. Тенденции совершенствования микропроцессорных спирометров / В.А. Лопата, Ю.С. Синекон, И.И. Кацан, Б.И. Лупина, Х. Эльози // – Девятый Национальный конгресс по болезням органов дыхания, Москва. 31 октября - 3 ноября 1999 г. Сборник резюме, – с.198.

182. Active Linear Pirani Gauge APDX from BOC EDWARDS, <http://www.bocedwards.com>, Publication № D023-72-895

183. Бохов О.С. Микро-сенсор для контроля остаточного давления на основе периодического теплового нагрева / О.С. Бохов, А.П. Бройко, А.В. Корляков, В.В. Лучинин // Нано- и микросистемная техника, №2 (115) 2010, – с. 14 – 17.

184. Frolov, G. Offset compensation for flow sensing devices / G. Frolov, O. Grudin, Patent US 2013/0211767 A1, Pub. date: Aug. 15, 2013.

185. Грудин О.М. Терморезистивный датчик вакуума / О.М. Грудин, И.И. Кацан, Б.И. Лупина, В.И. Почтарь, Г.А. Фролов // Вакуумная техника и технология. – 1994. - Том 4. - № 2. – С. 5–7.

186. Лупина Б.И. Теплоэлектрический вакуумметр / Б.И. Лупина // Патент РФ № 2104507 от 5 октября 1995 г.



## ДОДАТОК



### «СЕНСОРНІ СИСТЕМИ» Ltd

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

03680, Україна, Київ, бул. Вацлава Гавела, 8 тел/факс +380442774097

№ 187/1116 від 25.11.2016 р.

У спеціалізовану вчену раду Д26.002.08

#### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів наукових досліджень, виконаних в дисертаційній роботі  
Лупини Бориса Івановича «Мікромеханічні терморезисторні перетворювачі»

Фахівцями ТОВ «Сенсорні системи» ЛТД у співпраці з колективом лабораторії медичної сенсо-рики факультету Електроніки Національного Технічного Університету України «Київський Політехнічний Інститут ім. І. Сікорського» розроблено та організовано виробництво комплексу автоматизованого для діагностики функції зовнішнього дихання людини «ПУЛЬМОВЕНТ», ТУ У 19018095.001-96. Оснащення медичних установ вказаними комплексами виконувалось відповідно до Реєстраційного посвідчення Міністерства охорони здоров'я України № 139/95 про успішне проходження випробувань та внесення в Державний реєстр медичних виробів, які дозволені до використання в медичній практиці на території України.

Результати наукових досліджень, виконаних у дисертаційній роботі Лупини Бориса Івановича за темою «Мікромеханічні терморезисторні перетворювачі», а саме встановлені закономірності впливу конструктивно-топологічних характеристик на метрологічні параметри триелементного терморезисторного перетворювача лінійної швидкості газу в потокоформуючому каналі, використані при розробці каналу вимірювання об'ємних витрат повітря комплексу «ПУЛЬМОВЕНТ». Отриманий в дисертаційній роботі результат дає можливість проектувати первинний перетворювач на заданий діапазон вимірювань та задовольнити медико-технічним вимогам до вказаного діагностичного комплексу в частині порогу реагування 0,05 л/с, діапазону вимірювань до 15 л/с з відносною похибкою вимірювання  $\pm 3\%$ , опору диханню перетворювача повітряного потоку в межах 50 Па · с / л.

Директор

К.М. Дудчак

« 25 » 11 2016 р.

