

У спеціалізовану вчену раду Д 26.224.02
Інституту технічної теплофізики НАН України

ВІДГУК

офіційного опонента, провідного наукового співробітника Інституту
технічної теплофізики НАН України, доктора технічних наук, старшого
наукового співробітника **Грищенко Тетяни Георгіївни**

на дисертаційну роботу

КРАЙОВСЬКОГО ВОЛОДИМИРА ЯРОСЛАВОВИЧА

на тему «**Розвиток фізичних основ термометрії із запровадженням нових
чутливих елементів термоперетворювачів**»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за
спеціальністю 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин
(152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка)

1. Актуальність теми

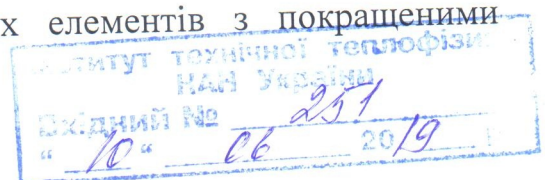
Дисертаційна робота *Крайовського Володимира Ярославовича* присвячена подальшому розвитку фізичних основ термометрії.

Професійний підхід в термометрії почався ще у 18-му сторіччі. За минулий час шляхом систематичних досліджень сформована теорія температурних вимірювань та створено велику кількість засобів вимірювальної техніки, включаючи різноманітні чутливі елементи щодо змінення значень температури, тобто, первинні перетворювачі температури.

За різних умов вимірювання температури існують обмежувальні фактори стабільності та відтворюваності характеристик перетворювачів температури, обумовлених стабільністю та відтворюваністю характеристик термометричних матеріалів, які використовують для виготовлення перетворювачів температури.

З появою нових завдань у термометрії, що пов'язано, зокрема, із потребами сучасного забезпечення температурних вимірювань та моніторингу теплових процесів в одно- та двовимірних структурах, в умовах космосу та реакторах термоядерного синтезу необхідно застосовувати результати наукових досліджень проблем, які формально належать до різних наук, тому суттєвий технологічний прорив в температурних дослідженнях можливо здійснити тільки за результатами наукових досліджень, що отримані на стиках кількох наукових напрямів. Саме такий шлях обрав здобувач у своїх наукових дослідженнях.

А тому *актуальність* теми дисертації *Крайовського В.Я.* визначається необхідністю запровадження нових принципів та підходів як для аналізу перетворювачів температури, які вже існують та застосовують, так і обґрунтування запровадження нових чутливих елементів з покращеними



метрологічними та експлуатаційними характеристиками. Розвиток здобувачем фізичних засад термометрії шляхом запровадження нових перетворювачів температури, які створені на основі новітніх термометричних матеріалів зі стабільними та відтворюваними характеристиками у широкому температурному діапазоні (4,2÷1300) К є *актуальним і доцільним* як в суто теоретичному аспекті для розуміння природи фізичних процесів у чутливих елементах перетворювачів температури, так і в практичному аспекті, що дозволило отримати перетворювачі температури з покращеними метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

Дисертаційне дослідження виконане *Крайовським В.Я.* у Національному університеті «Львівська політехніка» у межах пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки України, визначених Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» відповідно до планів НДР МОН України за фаховим напрямом «Метрологія і приладобудування», а саме:

– «Вимірювання температури мікро- та наноструктурованих об'єктів методом комбінаційного розсіювання світла» (2015-2016 рр., № ДР 0115U000431);

– «Дослідження температурної та часової стабільності і відтворюваності характеристик чутливих елементів термоперетворювачів на основі інтерметалічних напівпровідників» (2015-2019 рр., № ДР 0114U005464).

2. Оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеність

Виходячи із глибокого аналізу вже існуючих методів і засобів вимірювання температури, Крайовський В.Я. обґрунтовано і зважено сформулював мету своїх дисертаційних досліджень і завдання, вирішення яких забезпечує досягнення поставленої мети.

Мета полягала у подальшому *розвитку фізичних основ* термометрії із запровадженням нових чутливих елементів для перетворювачів температури, як термоелектричних (термопар) так і електрорезистивних (термометрів опору), а також у *створенні методів прогнозування* характеристик перетворювачів температури із значно більшою чутливістю та термостійкістю відносно підвищеної температури шляхом моделювання потрібних характеристик перетворювачів температури із новітніх термометричних матеріалів.

У процесі виконання дисертації здобувач *вирішив такі завдання:*

– проаналізував проблеми температурних вимірювань у широкому температурному діапазоні та, зокрема, з використанням напівпровідникових чутливих елементів у перетворювачах температури в діапазоні 4,2÷1300 К;

– створив *теоретичні основи* розв'язання науково-технічної проблеми запровадження термічно стійких перетворювачів температури у діапазоні 4,2÷1300 К на основі новітніх термометричних матеріалів, отриманих

легуванням напів-Гейслерових фаз рідкісноземельними $4f$ - та перехідними $3d$ - і $4d$ -металами, а також $4p$ -металом Ga;

– обґрунтував *концепцію* моделювання та отримання термічно стійких чутливих елементів шляхом *розроблення методу ітераційного моделювання* їхніх структурних, енергетичних, термодинамічних та кінетичних характеристик з урахуванням температурних залежностей питомого електроопору, коефіцієнта термо-ерс та магнітної сприйнятливості за результатами їхнього визначення експериментальним шляхом;

– запропонував *феноменологічну модель* формування структури термічно стабільних чутливих елементів перетворювачів температури на основі новітніх термометричних матеріалів, яка пояснює механізм появи напівпровідникових властивостей та способи впливу на значення електроопору та термо-ерс для підвищення чутливості перетворювачів температури обох типів;

– *дослідив* структурні характеристики новітніх термометричних матеріалів, знання яких потрібно для моделювання енергетичних та кінетичних характеристик чутливих елементів перетворювачів температури, що виконані на їх основі;

– провів *термодинамічні розрахунки* за різних значень температури для визначення стабілізуючого фактору при формуванні структури термометричних матеріалів і отриманих на їхній основі чутливих елементів перетворювачів температури;

– провів *моделювання* енергетичних характеристик отриманих перетворювачів температури шляхом розрахунків розподілу густини електронних станів (DOS), густини станів на рівні Фермі, ширини забороненої зони, глибини залягання рівня Фермі, що потрібні для визначення кінетичних характеристик перетворювачів температури;

– провів *експериментальні* дослідження процесів змінення значень *кінетичних, енергетичних та магнітних* характеристик отриманих перетворювачів температури у широких діапазонах температури та концентрації, а також дослідив вплив зовнішнього магнітного поля на змінення значень питомого електроопору та коефіцієнта термо-ерс;

– *дослідив механізми* електропровідності у діапазоні температури (4,2÷1300) К для отримання результатів, потрібних для моделювання функцій перетворення перетворювачів температури;

– *вивчив* закономірності функцій перетворення запропонованих перетворювачів температури у діапазоні (4,2÷1300) К;

– *дослідив вплив* термічного циклювання (нагрівання-охолодження) у діапазоні температури (300÷1300) К на змінення структурних, енергетичних та кінетичних характеристик отриманих чутливих елементів.

Таким чином, *об'єктом дослідження* дисертаційної роботи **Крайовського В.Я.** були процеси вимірювання температури у широкому температурному діапазоні з використанням напівпровідникових чутливих елементів перетворювачів температури двох типів, а *предметом дослідження* – нові чутливі елементи перетворювачів температури та моделі їхніх структурних, енергетичних, кінетичних і термодинамічних характеристик.

Дисертаційна робота **Крайовського В.Я.** складена з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаної літератури з 187 найменувань та п'яти додатків. Загальний обсяг дисертації 297 сторінок, з них 262 – основного тексту, та включає 158 рисунків і 11 таблиць. Дисертація за структурою, мовою та стилем викладення *відповідає вимогам МОН України.*

Матеріали кандидатської дисертації Крайовського В.Я. частково використано у першому розділі при аналізуванні проблем температурних вимірювань.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, показано зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами, особистий внесок здобувача, відомості про наукові публікації, апробацію, впровадження та структуру роботи.

Перший розділ присвячено критичному аналізу існуючих методів та засобів вимірювання температури, зокрема, із використанням електрорезистивних та термоелектричних перетворювачів температури, чутливі елементи яких виготовлені з напівпровідникових матеріалів, а також наведено результати моделювання їхньої електронної структури. Отримані результати показали, що електрорезистивні перетворювачі температури, чутливий елемент яких виготовлений з *традиційних* напівпровідникових матеріалів, мають високу чутливість, стабільність та відтворюваність характеристик при вимірюванні, як правило, лише низьких і, в окремих випадках, середніх значень температури.

Проведений у цьому розділі ґрунтовний аналіз сучасного стану температурних вимірювань дозволив **Крайовському В.Я.** сформулювати науково-технічну проблему *дисертаційного дослідження*, мету та завдання досліджень, які пов'язані з подальшим розвитком фізичних основ термометрії із *запровадженням нових чутливих елементів* перетворювачів температури двох типів, а також *методів моделювання* характеристик перетворювачів температури, виготовлених із новітніх термометричних матеріалів.

Проте, на жаль, відсутній повний порівняльний аналіз характеристик нових, створених здобувачем, перетворювачів температури з існуючими стандартизованими перетворювачами температури та посилання на відповідні нормативні документи.

У другому розділі описані теоретичні та експериментальні методи дослідження, обґрунтовано вибір методів моделювання структурних, енергетичних та кінетичних характеристик. При цьому виконано розрахунки, які стосуються зонної структури, розподілу густини електронних станів (density of states, далі DOS), функції локалізації електрона (ELF) і заселеності орбіталей кристалу (COOP) та термодинамічних характеристик.

При обґрунтуванні вибору методу моделювання характеристик перетворювачів температури здобувач виходив з того, що чисельні методи зонної теорії при моделюванні енергетичних характеристик розрізняються лише вибором базисних функцій, а тому ефективність методу визначається тим, наскільки точно *пробна хвильова функція* збігається з хвильовою функцією у матеріалі. Це – найголовніша проблема моделювання, яка вимагає точної інформації про особливості структури матеріалів. Але, якщо не до кінця відомі всі особливості структури, однак вдається досягнути узгодженості пробної хвильової функції з хвильовою функцією у матеріалі кристалу, то можна отримати інформацію про його структуру, недосягну рентгенівськими методами дослідження. Саме ця ідея покладена в основу *розробленого Крайовським В.Я. алгоритму ітераційного моделювання* структурних, енергетичних та термодинамічних характеристик чутливих елементів перетворювачів температури з новітніх термометричних матеріалів з урахуванням результатів експериментальних досліджень їхніх фізичних властивостей.

При виконанні ітераційного моделювання здобувач користувався сучасними методами комп'ютерного моделювання (наприклад, методом Корінґи-Кона-Ростокера (KKR) та ліцензованим програмним забезпеченням (AkaiKKR та SPR-KKR)). Експериментальне дослідження особливостей структури новітніх термометричних матеріалів із визначенням температурних залежностей кінетичних та магнітних характеристик нових перетворювачів температури у широкому температурному діапазоні здійснені у провідних Європейських наукових центрах. Це є запорукою достовірності результатів, викладених в дисертації.

У третьому розділі, який можна вважати ключовим, розглянуто фізичні основи отримання термічно стійких перетворювачів температури для вимірювання температури у діапазоні значень від 4,2 К до 1300 К, виконаних із новітніх термометричних матеріалів на основі напів-Гейслерових фаз. При цьому показано наявність об'єктивних обмежувальних факторів, обумовлених, зокрема, мірою стабільності та відтворюваності характеристик матеріалів чутливих елементів перетворювачів температури обох типів.

Головним фактором нестабільності характеристик матеріалів на основі напів-Гейслерових фаз є невпорядкованість їхньої структури, що в умовах

циклів «нагрівання-охолодження» змінює просторове розташування атомів. Це є причиною невідтворюваності їхніх характеристик, що унеможлиблює їхнє використання для термометрії. З іншого боку, результати моделювання кінетичних характеристик таких чутливих елементів суттєво відрізнялися від результатів експериментальних вимірювань. Це дозволило здобувачеві *виключити чутливі елементи* з матеріалів на основі фаз напів-Гейслера з числа *перспективних*.

Однак, на основі аналізу лише структури напів-Гейслерової фази **Крайовський В.Я.** розробив феноменологічну модель її електронної структури, яка пояснює механізм утворення фундаментального енергетичного параметру напівпровідникового матеріалу – забороненої зони. У свою чергу, знання такого механізму робить зрозумілими *способи впливу* на значення електроопору та термо-ерс і дозволяє моделювати та отримувати перетворювачі температури з наперед заданими властивостями. Такими способами є часткове заміщення, наприклад, у $ZrNiSn$, атомів Zr та/або Ni іншими атомами.

Здобувач розвинув спосіб *моделювання енергетичних* характеристик нових чутливих елементів шляхом розрахунків DOS, густини станів на рівні Фермі, ширини забороненої зони, глибини залягання рівня Фермі тощо, що дозволило *моделювати* їхні *кінетичні* характеристики у широкому температурному діапазоні. Окрім того, було встановлено причину *непрогнозованості* характеристик чутливих елементів на основі термометричних матеріалів з напів-Гейслерових фаз, суть якої в незнанні особливостей структури чутливих елементів та неврахуванні їх при моделюванні характеристик.

У **четвертому розділі** наведено результати моделювання та експериментальні дослідження перетворювачів температури із застосуванням новітніх термометричних матеріалів, отриманих легуванням напів-Гейслерової фази $HfNiSn$ атомами рідкісноземельних металів Tm, Y, Er, Lu та перехідним 4d-металом Ru. Представлено результати дослідження чутливих елементів на основі термометричних матеріалів $Hf_{1-x}Tm_xNiSn$, $Hf_{1-x}Y_xNiSn$, $Hf_{1-x}Er_xNiSn$, $Hf_{1-x}Lu_xNiSn$, $HfNi_{1-x}Ru_xSn$. Легування $HfNiSn$ атомами рідкісноземельних металів Tm, Y, Er, Lu, а також Ru проведене для отримання максимально можливих значень коефіцієнта термо-ерс і питомого електроопору у діапазоні (4,2÷1300) К. Досліджено вплив домішок Tm, Y, Er, Lu та Ru на зміну структурних, енергетичних та кінетичних характеристик чутливих елементів на основі напів-Гейслерової фази $HfNiSn$.

Комплексне дослідження структурних, енергетичних, кінетичних та магнітних характеристик чутливих елементів на основі напів-Гейслерової фази $HfNiSn$ із *запровадженням алгоритму ітераційного моделювання* їхніх характеристик дозволило здобувачу встановити умови, за яких кінетичні

характеристики чутливих елементів є прогнозованими та стабільними до температурних та часових змінень. Встановлено причину *непрогнозованості* характеристик чутливих елементів, отриманих легуванням напів-Гейслерової фази HfNiSn атомами великого розміру (рідкісноземельними металами), суть якої в *непередбаченому* генеруванні донорів через появу вакансій у позиції атомів Sn.

Крайовський В.Я. отримав два варіанти чутливих елементів: низькотемпературні (до 450 К) та середньотемпературні (до 1300 К). У першому варіанті використано мідний дріт для контактів термометра опору чи вітки термопар, а в другому – платиновий. Визначено функції перетворення перетворювачів температури (як електрорезистивних, так і термоелектричних).

Розроблені *здобувачем* чутливі елементи термоелектричних перетворювачів температури мають високу чутливість, а відношення зміни значень термо-ерс до температурного діапазону є більшим від усіх відомих промислових термопар. Температурний коефіцієнт опору отриманих чутливих елементів електрорезистивних перетворювачів температури є більшим від температурного коефіцієнту опору металів, однак поступається значенням температурного коефіцієнту опору чутливих елементів, виготовлених із традиційних напівпровідників. У той же час, жодний із відомих термометрів опору на базі традиційних напівпровідників не має стабільних термометричних характеристик у діапазоні (4,2÷1300) К.

На протязі 3-х років **Крайовським В.Я.** досліджено часову стабільність та відтворюваність характеристик нових перетворювачів температури шляхом вимірювання значень опору та термо-ерс за температури 272 К. Встановлено, що значення температури, отримані з вимірювань опору та термо-ерс чутливих елементів перетворювачів температури, після 50 циклів «нагрівання-охолодження» в діапазоні (300÷1300) К стабільні у межах $\pm 0,05$ К та $\pm 0,06$ К, відповідно, що дозволяє їх запровадження для температурних вимірювань.

У **п'ятому розділі** представлено результати моделювання та експериментальних досліджень чутливих елементів перетворювачів температури із застосуванням термометричних матеріалів, отриманих легуванням напів-Гейслерової фази TiNiSn атомами рідкісноземельних металів Dy та Y, 3d-металів Co та Cu, а також 4p-металом Ga. Представлено результати дослідження чутливих елементів на основі термометричних матеріалів TiNiSn_{1-x}Ga_x, Ti_{1-x}Y_xNiSn, Ti_{1-x}Dy_xNiSn, TiNi_{1-x}Cu_xSn, TiNi_{1-x}Co_xSn. Легування TiNiSn атомами рідкісноземельних металів Dy та Y, 3d-металів Co та Cu, а також 4p-металом Ga, яке виконано з метою отримання максимально можливих значень коефіцієнта термо-ерс і питомого електроопору у діапазоні (4,2÷1300) К. Досліджено вплив домішок Dy, Y, Co, Cu та Ga на змінення структурних,

енергетичних та кінетичних характеристик чутливих елементів перетворювачів температури на основі напів-Гейслерової фази TiNiSn.

Здобувачем отримано два варіанти чутливих елементів з мідними (низькотемпературні, до 450 К) та платиновими контактами (середньотемпературні, до 1300 К). Наведено функції перетворення чутливих елементів термометрів опору та термоелектричних перетворювачів температури.

У шостому розділі представлено результати моделювання та експериментальних досліджень чутливих елементів електрорезистивних та термоелектричних перетворювачів температури на основі термометричних матеріалів, отриманих легуванням ZrNiSn атомами рідкісноземельного металу Ce, 3d-металів V та Fe, 4d-металом Rh, а також 4p-металом Ga. Представлено результати дослідження чутливих елементів на основі термометричних матеріалів $ZrNiSn_{1-x}Ga_x$, $Zr_{1-x}Ce_xNiSn$, $Zr_{1-x}V_xNiSn$, $ZrNi_{1-x}Fe_xSn$ та $ZrNi_{1-x}Rh_xSn$. Легування ZrNiSn атомами рідкісноземельного металу Ce, 3d-металів V та Fe, 4d-металом Rh, а також 4p-металом Ga проведене для отримання максимально можливих значень коефіцієнта термо-ерс і питомого електроопору у діапазоні (4,2÷1300) К. Досліджено вплив домішок Ce, V, Fe, Rh та Ga на змінення структурних, енергетичних та кінетичних характеристик чутливих елементів на основі напів-Гейслерової фази ZrNiSn. Наведено функції перетворення електрорезистивних та термоелектричних перетворювачів температури на основі напів-Гейслерової фази ZrNiSn, які виконано у варіантах температурних вимірювань до 450 К та 1300 К.

У висновках по розділах та дисертаційної роботи в цілому систематизовано основні науково-практичні результати проведених досліджень.

У додатках наведено список основних публікацій здобувача, а також публікації, в яких засвідчено апробацію матеріалів дисертації та відокремлено додаткові наукові праці (монографії та патенти України).

Результатами досліджень *Крайовського В.Я.* обґрунтовано перспективні напрями розвитку температурних вимірювань із запровадженням нових перетворювачів температури, які виготовлено на основі новітніх термометричних матеріалів, отриманих легуванням напів-Гейслерових фаз атомами рідкісноземельних 4f-металів, перехідних 3d- та 4d-металів, а також 4p-металом.

В цілому, дисертація *Крайовського В.Я.* характеризується завершеністю, вдалою структурою і логічною послідовністю викладення матеріалу. Висновки у розділах, а також загальні висновки відповідають отриманим у дисертації науковим і практичним результатам.

3. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру

У дисертаційній роботі *Крайовського В.Я.* отримано та сформульовано такі нові наукові результати:

1. *Уперше* запропоновано концепцію моделювання та отримання термічно стійких перетворювачів температури на основі новітніх термометричних матеріалів шляхом *розроблення методу ітераційного моделювання* структурних, енергетичних, термодинамічних і кінетичних характеристик з урахуванням результатів експериментальних досліджень температурних залежностей електроопору, термо-ерс та магнітної сприйнятливості нових перетворювачів температури.

2. *Уперше* запропоновано феноменологічну модель формування структури термічно стабільних чутливих елементів перетворювачів температури на основі новітніх термометричних матеріалів, яка пояснює механізм появи у них напівпровідникових властивостей, а також способи моделювання й отримання перетворювачів температури з високими значеннями температурного коефіцієнта опору та термо-ерс обох знаків, що підвищує їхні метрологічні характеристики.

3. *Розвинуто метод* моделювання кінетичних характеристик чутливих елементів перетворювачів температури у широкому температурному діапазоні шляхом розрахунків розподілу густини електронних станів (DOS), густини станів на рівні Фермі, ширини забороненої зони та глибини залягання рівня Фермі тощо.

4. *Уперше* встановлено закономірності функцій перетворення перетворювачів температури, виготовлених із запровадженням новітніх термометричних матеріалів на основі напів-Гейслерових фаз у температурному діапазоні (4,2÷1300) К з покращеними метрологічними характеристиками.

5. *Розвинуто* метод отримання термоелектричної пари чутливого елементу термоелектричних перетворювачів температури (термопар), обидві вітки яких виготовлені з новітніх термометричних матеріалів електронного та діркового типів провідності, що у 4÷6 разів підвищує чутливість у порівнянні з існуючими термоперетворювачами та розширяє діапазон температурних вимірювань із застосуванням лише одного перетворювача температури.

6. *Розвинуто* метод отримання лінійки термічно стабільних чутливих елементів електрорезистивних перетворювачів температури (термометрів опору) з новітніх термометричних матеріалів, що істотно розширяє діапазон та підвищує точність температурних вимірювань.

4. Практичне значення та використання результатів роботи

Наукові положення дисертаційної роботи *Крайовського В.Я.*, висновки та рекомендації є важливим внеском у створення науково-технологічних засад моделювання та отримання нових чутливих елементів перетворювачів

температури на основі новітніх термометричних матеріалів зі стабільними та відтворюваними характеристиками у діапазоні температури (4,2÷1300) К.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження полягає в отриманні нових термоелектричних та терморезистивних перетворювачів температури зі стабільними та відтворюваними характеристиками у діапазоні температури (4,2÷1300) К. Результати дисертаційного дослідження **Крайовського В.Я.** впроваджені та використовуються в ПрАТ НВО “Термоприлад” (м. Львів), СП “Галка» Лтд” (м. Львів), ДП НДІ “Система” (м. Львів), а також у навчальному процесі та при виконанні науково-дослідних робіт на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету “Львівська політехніка”.

5. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів

Усі наукові положення та результати, що винесені на захист, отримано автором особисто. Формулювання наукового напряму та об’єктів дослідження, постановка задачі, аналіз та узагальнення результатів складають особистий внесок дисертанта. У процесі виконання наукових досліджень, при розробленні та виготовленні чутливих елементів перетворювачів температури були залучені співавтори, ідеї та розробки яких здобувачем в дисертації не використовувались.

6. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій

Основні наукові результати **Крайовського В.Я.** достатньою мірою обґрунтовані. Їхня достовірність не викликає сумнівів, оскільки результати аналітичних досліджень отримані з використанням фізичних і математичних моделей, та підтверджені численними експериментами на надійному обладнанні. Автор дисертації чітко окреслив мету роботи і логічно побудував завдання дослідження та шляхи їхнього виконання. Достовірність практичної частини дисертації підтверджена відповідними актами.

7. Апробація та публікація результатів досліджень

Апробація основних наукових положень та прикладних аспектів дисертаційної роботи **Крайовського В.Я.** проведена шляхом доповідей та обговорень на низці міжнародних науково-технічних конференцій.

За темою дисертації опубліковано **59** наукових праць, серед яких: **1** монографія, **1** підручник, **44** статті (**4** одноособові) у міжнародних та вітчизняних періодичних фахових виданнях, з яких **6** статей індексується у **Web of Science (ESCI)**, **9** – **Scopus**, **10** – **Copernicus**, **2** патенти України на корисну модель, **11** публікацій у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій.

8. Відповідність дисертації паспорту спеціальності, за якою вона представлена до захисту

Дисертація й автореферат *Крайовського В.Я.* повністю відповідають паспорту спеціальності 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин (152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка).

По своїй структурі дисертація відповідає вимогам МОН України. В авторефераті викладено основну суть виконаних досліджень, що достатньо повно відображає дисертаційну роботу. Зміст автореферату й основних положень дисертації ідентичні. Практична частина роботи представлена відповідними актами впровадження.

9. Зауваження щодо змісту та оформлення дисертації

1. Вважаю, що Розділ 1 є дещо перевантаженим рисунками, що утруднює сприйняття викладеного матеріалу.

2. Оскільки у Розділах 4, 5, 6 викладено результати однотипних досліджень чутливих елементів перетворювачів температури з трьох напів-Гейслерових фаз HfNiSn, TiNiSn та ZrNiSn, то доцільно було би в одному розділі навести результати, наприклад, чутливих елементів електрорезистивних перетворювачів температури, а в іншому – термоелектричних перетворювачів температури. Така подача матеріалу була би кращою для сприйняття та порівняння характеристик чутливих елементів.

3. У роботі не висвітлено спосіб приєднання контактів до електрорезистивних чутливих елементів перетворювачів температури. Адже відомо, що контакт напівпровідника (а термометричний матеріал, з якого виготовлені чутливі елементи є напівпровідником) з металом може приводити до появи енергетичного бар'єру, наприклад, у вигляді *p-n* переходу у приконтактній області. А це, у свою чергу може суттєво спотворити характеристики чутливого елемента. У зв'язку з цим не зрозуміло, чи досліджувалася авторами електроопір контактів чутливих елементів електрорезистивних перетворювачів температури?

4. Здобувач проводить моделювання характеристик чутливих елементів перетворювачів температури різними методами, зокрема, методом *функцій Гріна*, методом *лінійної МТ орбіталі*, методом *лінеаризованих плоских хвиль*. Чому не можна було використати один метод? Чи однаковою є точність отриманих результатів при моделюванні характеристик термоперетворювачів? У чому перевага обраного методу перед іншими?

5. При ознайомленні з матеріалами дисертаційного дослідження не зрозуміло, чи проводилися дослідження часової та температурної стійкості та відтворюваності характеристик отриманих чутливих елементів в умовах агресивного середовища, зокрема, підвищеної вологості, наявності кислотних випаровувань тощо, а також іонізуючого радіаційного випромінювання? Адже такі дослідження дозволяють розширити область застосування отриманих

перетворювачів температури.

6. Зважаючи на те, що створено й досліджено чималу низку нових перетворювачів температури, було б доцільно надати зведену таблицю з їхніми характеристиками в порівнянні з характеристиками стандартних перетворювачів температури.

7. Хоча існує стандартизоване правило застосовувати будь-яку фізичну величину при написанні у однині, здобувач нерідко порушує це. Наприклад, «...за винятком ... температур...», «...до абсолютного нуля температур...», «...за температур, вищих температури Дебая...», «...у діапазоні концентрацій та температур...» (стор. 45, 49, 50, 56, 141 тощо).

8. На жаль по тексту дисертації можна натрапити на окремі термінологічні помилки, наприклад:

– різницю значень температури (у К) названо температурним градієнтом (що має розмірність у К/м) (див. стор. 72);

– абсолютна похибка вимірювання маси (у мкг) та роздільної здатності (у мкВт) названо точністю (див. стор. 74).

9. За наявності посилання на кандидатську дисертацію (див. [63]), посилання на її автореферат є недоцільним.

10. Мають місце граматичні помилки і описки, особливо у таблицях (див. табл. 1.1, 1.2, 4.1, 4.2).

10. Загальний висновок

Вищевказані зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційного дослідження, не зменшують її наукову новизну та практичну значимість.

Сформульовані у дисертації наукові положення, висновки та рекомендації повністю відображені у наукових працях опублікованих у фахових виданнях, та доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях. Роботи здобувача добре відомі спеціалістам як в Україні, так і за кордоном, сам він користується авторитетом серед колег.

Вважаю, що дисертаційна робота **Крайовського Володимира Ярославовича «Розвиток фізичних основ термометрії із застосуванням нових чутливих елементів термоперетворювачів»**, яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин є завершеною науковою працею, в якій вирішено актуальну науково-прикладну проблему подальшого розвитку фізичних засад термометрії шляхом запровадження методу ітераційного моделювання кінетичних і енергетичних параметрів чутливих елементів перетворювачів температури, виконаних на основі новітніх

термометричних матеріалів із покращеними метрологічними та експлуатаційними характеристиками в широкому температурному діапазоні.

За актуальністю вирішеної науково-технічної проблеми, отриманими науковими результатами і практичною цінністю роботи, вона відповідає пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. за № 567 зі змінами від 27 липня 2016 р., а її автор, **Крайовський Володимир Ярославович**, заслуговує присудження шуканого наукового ступеня.

Офіційний опонент,

Провідний науковий співробітник
Інституту технічної
теплофізики НАН України,
доктор технічних наук, ст. наук. співр.,
Лауреат державної премії
в галузі науки і техніки



Т.Г. Грищенко

