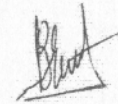


Автореферат  
Е-60

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЕМЕЛЬЯНОВ ВАСИЛЬ ЮРІЙОВИЧ



УДК621.642.6

СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОТОТОНТИПУ  
ВИМІРНИКА РІВНЯ КРІОГЕННИХ РІДИН  
НА ОСНОВІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ  
НАДПРОВІДНИКІВ

Спеціальність 05.05.14 - Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи  
кондиціонування

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2015

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Московському державному технічному університеті ім. М.Е. Баумана

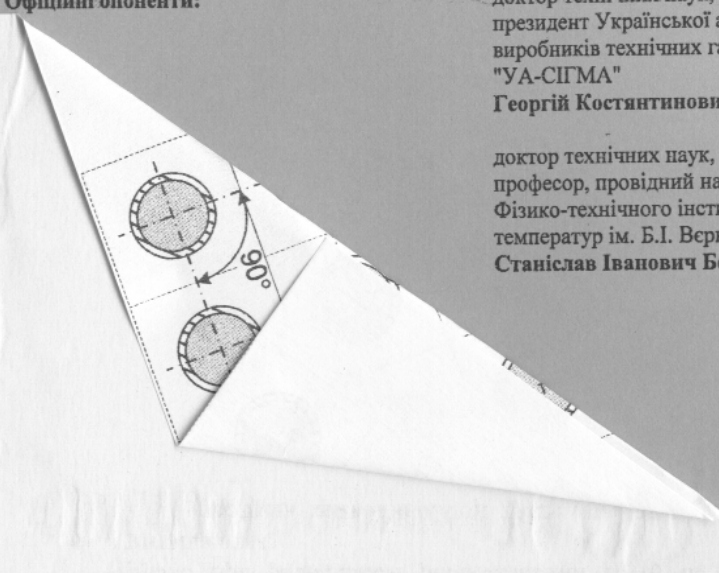
**Науковий керівник:**

доктор технічних наук,  
професор, завідувач кафедри  
кріогенної техніки  
Одеської національної академії  
харчових технологій МОН України  
**Юрій Михайлович Симоненко**

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор,  
президент Української асоціації  
виробників технічних газів  
"УА-СІГМА"  
**Георгій Костянтинович Лавренченко**

доктор технічних наук,  
професор, провідний науковий співробітник  
Фізико-технічного інституту низьких  
температур ім. Б.І. Веркіна НАН України  
**Станіслав Івапович Бондаренко**



Захист дисертації відбудеться 6 квітня 2015 о 14 год. 30 хв. в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.088.03 в Одеській національній академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

Автореферат розіслано 5 березня 2015 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої  
ради Д41.088.03,  
доктор технічних наук, професор

В.І. Милованов

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність роботи.** У об'єктах сучасної техніки і науки, а також в медичних, біологічних, хімічних технологіях широко використовуються рідкі кріопродукти. У зв'язку з цим актуальними є питання діагностики, контролю і вимірювання параметрів рідких і парорідних кріогенних середовищ. Особливе місце серед них займає розробка надійних і досить точних вимірників їх рівня в кріогенних сховищах, резервуарах, емностях і судинах, теплоізольованих від навколишнього середовища.

Рівнеміри рідких гелію і водню на основі надпровідних матеріалів Nb-Sn або Nb-Ti вже здобули загальне визнання завдяки своїй простоті, довговічності, надійності, малому тимчасовому дрейфу характеристик. З появою нових матеріалів, в яких спостерігаються явища надпровідності в діапазоні температур 77...135К, одним з потенційних практичних застосувань може бути використання подібних матеріалів для створення рівнемірів таких зріджених газів, як азот, кисень, аргон і, в перспективі, також зріджений природний газ (ЗПГ).

Головними труднощами і стримуючим фактором їх застосування є суттєва відмінність характеристик переходу в надпровідний стан класичних надпровідників (НП) і високотемпературних (ВТНП). У класичних НП область переходу становить  $\Delta T_{\text{перех}} \approx 0,01 \dots 0,1\text{К}$ , в той час як у ВТНП  $\Delta T_{\text{перех}} \approx 1 \dots 3\text{ К}$ . В наслідок ВТНП мають більш пологі характеристики і, у разі їх використання в якості чутливого елемента кріогенного рівнеміра, зона переходу в надпровідний стан і фактичний рівень рідини будуть відрізнятися. Зважаючи на це, для створення терморезистивних рівнемірів на високотемпературних надпровідниках необхідні додаткові дослідження.

При виконанні досліджень за темою дисертації автор спирався на роботи В.І. Алексєєва, В.А. Вікторова, О.І. Бабікова, Г.Н. Бобровникова, В.І. Кабанова, А.І. Смирнова, А.А. Шелковникова, Л.Г. Яковлева, а також R. Barton, A. Wexler, H.J. Smith і Ch. L. Kuhn, присвячені створенню та дослідженню різних типів рівнемірів, питанням вимірювання рівнів кріогенних рідин.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана з урахуванням наступних законодавчих актів: «Основні положення енергетичної стратегії України на період до 2030 р.», затверджені Кабінетом Міністрів України 15.03.06.; Закон України «Про енергозбереження», затверджений постановою Верховної Ради України №74 / 94 від 01.07.94.

**Мета дослідження** – вивчення основних закономірностей функціонування і розробка наукових принципів проектування контактних терморезистивних датчиків рівня кріогенних рідин, температури нормального кипіння яких складають 70..120К, а також створення прототипу приладу для вимірювання рівня таких рідин з використанням цих датчиків. Для кращого прояву терморезистивного ефекту автором використовувалися датчики, створені на основі довгомірних композитних високотемпературних надпровідників, конструкція яких представляє гексагональну щільну упаковку ВТНП-ниток в матриці з металу з високою теплопровідністю (срібло або сплав срібло-олово).

xv 750

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

– створити фізико-математичну модель чутливого елемента ВТНП-датчика, що представляє собою довгомірний композитний ВТНП-провідник; – з використанням створеної моделі досліджувати характеристики теплових процесів, що відбуваються в ньому при роботі рівнеміра; – виконати прогнозування робочих характеристик рівнемірів з різними конструктивними параметрами (діаметр, коефіцієнт заповнення, матеріал основи ВТНП-провідника, його довжина та ін.); – розрахунково дослідити вплив температури навколишнього середовища на робочі (вольт-лінійні) характеристики; – розрахунково вивчити вплив тиску зберігання кріоагента на робочі характеристики і працездатність ВТНП різних типів; – спроектувати і виготовити експериментальний стенд для досліджень і зняття вольт-лінійних характеристик  $U=f(h)$  ВТНП і розробити методику проведення експериментів; – експериментально отримати статичні вольт-лінійні характеристики ВТНП різних типів; – експериментально визначити перехідні характеристики при зміні рівня кріоагента і оцінити постійні часу для досліджених датчиків; – оцінити розсіювану при вимірах електричну потужність і значення величин теплоприпливів, що вносяться ВТНП-рівнеміром; – за результатами експериментальних досліджень і моделювання провести аналіз характеристик оптимального ВТНП-матеріалу, відповідного мінімуму теплоприпливів в вимірювану середу, і сформулювати вимоги до конструкції; – оцінити чутливість ВТНП-провідника до способу його підключення до вимірювального приладу; – сформулювати вимоги до «ідеального» ВТНП-матеріалу як чутливого елемента терморезистивного рівнеміра кріогенної рідини.

**Об'єкт дослідження** – характеристики серійно створюємих промисловою ВТНП-матеріалів, а також виготовлених довгомірних композитних ВТНП-провідників згідно сформульованим автором вимогам.

**Предмет дослідження** – ВТНП-матеріали для створення терморезистивного вимірника рівня кріогенних рідин з нормальними температурами кипіння в діапазоні 77...120К.

Рішення поставлених завдань виконуються з використанням наступних методів дослідження: теоретичні та розрахункові описи процесів в довгомірних ВТНП-провідниках; експериментальні визначення вольт-лінійних характеристик і показників рівнемірів, створених на основі ВТНП-датчиків.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Розроблена модель довгомірного ВТНП-датчика на основі рівняння нестационарної теплопровідності з внутрішнім джерелом теплоти, доповнена системою рівнянь гідродинаміки і теплообміну на границі датчика з кріопродуктом, який описується граничними умовами III-роду. Адекватність результатів чисельного рішення системи рівнянь, що описують модель, експериментальними даними дозволяє істотно скорочувати обсяг трудовітких і досить витратних досліджень.

2. Експериментально отримані для сімох досліджених довгомірних ВТНП-провідників нові дані щодо статичних вольт-лінійних  $U=f(h)$  і динамічних  $U=\varphi(\Delta h, \tau)$  характеристик, необхідних для розрахунку діапазону вхідних напруг підсилювача постійного струму і проектування вторинного приладу – вимірника рівня рідини в кріосудині.

3. Сформульовано науково обгрунтовані вимоги до ефективного довгомірного композитного ВТНП-датчику терморезистивного вимірника рівня рідкого кріопродукта.

4. Показано, що на основі купратних ВТНП-матеріалів типу Bi2223 і Bi2212 можна створювати довгомірні датчики з необхідними для їх використання в терморезистивних вимірниках рівня з властивостями рідкого азоту, наприклад, з максимальною крутизною робочої вольт-лінійної характеристики або мінімальним тепловим обуренням, внесеним в середу рідкого кріопродукта.

За результатами проведених досліджень сформульовано наукове положення:

**Терморезистивний вимірник рівня рідких азоту, кисню і аргону доцільно створювати на основі довгомірного композитного ВТНП-датчика U-подібної конструкції з надпровідного матеріалу, в якому забезпечується компенсація термоелектричних ефектів на границі рідина-пар кріоагента і подвоюється напруга в порівнянні з датчиком, що має лінійне розташування ниток.** Порівняння з іншими ВТНП-датчиками, дослідженими автором, показує, що така конструкція повинна стати основою для створення нового покоління вимірників рівня рідких кріопродуктів.

**Крім цього, автор захищає:** – результати експериментальних досліджень і розрахунків, що підтверджують можливість створення рівнеміра кріогенної рідини (діапазон кипіння при атмосферному тиску 70...120 К) як на основі ВТНП-матеріалів які серійно випускаються, так і спеціально синтезованих; – результати аналізу впливу конструктивних особливостей чутливого елемента на точність показань ВТНП-рівнеміра; – рекомендації з вибору типу ВТНП-датчика для створення терморезистивного рівнеміра з урахуванням властивостей конкретної кріогенної рідини.

**Обгрунтованість і достовірність результатів дослідження підтверджується** застосуванням атестованих вимірювальних засобів і апробованих методик вимірювання, хорошою повторюваністю результатів вимірювань робочих характеристик ВТНП-рівнеміра, використанням при побудові фізико-математичної моделі співвідношень теплофізики та гідродинаміки.

**Практичне значення отриманих результатів:** – в роботі отримані нові результати дослідження датчиків з композитних ВТНП-провідників, створених для терморезистивних вимірників рівня рідкого азоту; – в роботі вперше були досліджені довгомірні датчики рівня кріогенної рідини, що використовують терморезистивний ефект, підігрів яких відбувається в результаті теплоприпливів з навколишнього середовища; – отримані робочі характеристики ВТНП-терморезистивних рівнемірів; – сформульовані вимоги до квазіідеального ВТНП-провідника для рівнеміра кріогенної рідини; – розроблено новий тип ВТНП-датчика з

нелінійною характеристикою для систем автоматики релейного типу; – сформульовані практичні рекомендації для створення промислових рівнемірів на ВТНП-провідниках; – розроблено прототип вимірювального приладу, що використовує в якості чутливого елемента ВТНП-провідник, і отриманні тарувальної (робочої) кривої індикатора вторинного приладу.

**Реалізація та впровадження результатів дисертації.** Створено прототип приладу-вимірника рівня криогенної рідини на основі довгомірного ВТНП-матеріалу, який може бути рекомендований для його застосування на підприємствах, що виробляють або використовують рідкі криопродукти.

**Апробація результатів дисертації:** Результати роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародній конференції «Cryogenics-2010» (Братислава), організованій Міжнародним інститутом холоду; на 15 міжнародному семінарі з проблем виробництва продуктів розділення повітря (Мінськ, 30 вересня - 3 жовтня 2014р.).

**Особистий внесок автора** полягає у вивченні характеристик ВТНП-провідників які серійно випускаються, розробці та дослідженні прототипу терморезистивного ВТНП-рівнеміра криогенної рідини, оформленні патентів на винаходи.

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 6 статтях, опублікованих у наукових виданнях, які відповідають вимогам МОН України, а також входять до наукометричних баз. Отримано 2 патенти Російської Федерації на винаходи.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаної літератури, що становить 92 джерела, і чотирьох додатків. Робота викладена на 132 стор., котрі містять 15 таблиць і 76 рисунків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок її з державними програмами, сформульовані цілі, а також завдання дослідження, що підлягають вирішенню. Викладені основні результати дослідження, що характеризують його наукову новизну; розкрито практичне значення отриманих результатів; відображено особистий внесок автора у виконання цієї роботи.

Перший розділ присвячений критичному розгляду відомих способів і пристроїв вимірювання рівня криогенних рідин, а також постановці завдання наукового дослідження.

Наведено оцінку частоти використання того чи іншого методу вимірювання рівня в приладах, що виробляються промисловістю. Існуючі типи криогенних рівнемірів систематизовані за такими ознаками: метод вимірювання рівня рідини; принцип дії на об'єкт виміру; спосіб візуалізації (відображення) результатів вимірювання.

У зв'язку із створенням нових матеріалів (табл.1), в яких спостерігається надпровідність в діапазоні 77...135К, з'явилася можливість розробки на їх основі рівнемірів зріджених  $N_2$ ,  $Ar$ ,  $O_2$  і також ЗПГ.

Відзначено переваги терморезистивних вимірників рівня з ВТНП-датчиками, обрані кіль-

ка типів ВТНП для проведення досліджень з метою створення рівнеміра для рідких продуктів розділення повітря.

Таблиця 1  
Типи керамічних купратних ВТНП-матеріалів

Назва та хімічна формула	Критична температура $T_c$ , К
Вісмутовий Bi2212 ( $Bi_2Pb_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ )	82
Ітрієвий Y123 ( $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ )	90
Вісмутовий Bi2223 ( $Bi_2Pb_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$ )	110
Талієвий Tl1111 (Tl-Ba-Sr-Ca-Cu-O)	130
Ртутний Hg1111 (Hg-Ba-Ca-Cu-O)	158

$\Delta T_1 \approx 0,01 \dots 0,1K$ , в той час як у ВТНП  $\Delta T_2 = 1 \dots 3K$ . В результаті ці датчики мають більш пологі характеристики. При їх використанні як чутливих елементів криогенних рівнемірів зона переходу в НП-стан і фактичний рівень рідкого криопродукта можуть відрізнитися, тому необхідно усунути це явище.

Так як температура рідини, що знаходиться в криосудині, і пару однакові, то для забезпечення роботи ВТНП-датчика проводиться підігрів його частини, що знаходиться в нормальному стані. Він може бути прямим або непрямым. При прямому підігріві роль підігрівача виконує сам чутливий елемент, через який проходить необхідний струм. При непрямому підігріві датчик комплектується додатковим підігрівачем.

Використовуючи дані що до конкретної рідини (рис.2) та умови її зберігання або транспортування, можна визначити величину нагріву ВТНП-провідника до переходу частини його в парів надпровідний стан. Так, для рідкого азоту при тиску зберігання 5 атм підігрів Y123 практично не потрібен, оскільки весь ВТНП знаходиться в не надпровідному стані. Для ВТНП-датчика на основі Bi2223 необхідно його підігріти на 17 град.

Проведений огляд і аналіз відомих методів вимірювань і конструкцій датчиків рівня криогенних рідин дозволив сформулювати мету і завдання дослідження. В якості чутливих елементів були обрані довгомірні ВТНП-провідники 1-го покоління, що представляють собою купратні з'єднання  $Bi_2Pb_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$  (Bi2212) з  $T_c = 82K$  та  $Bi_2Pb_2Sr_2CaCu_3O_{10+x}$  (Bi2223) з  $T_c = 110 K$ .

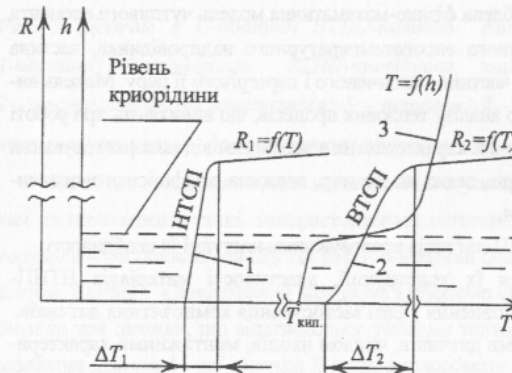


Рис.1. Зміни опорів  $R_1(T)$  та  $R_2(T)$  датчиків з НТСП (крива 1) і ВТСП (крива 2), а також температури в криогенній смісті від висоти криорідини  $h$  (крива 3)

Крім цього сформульовані вимоги до ВТНП-рівнемірів. При використанні зазначених ВТНП-матеріалів рівнемір повинен характеризуватися такими ознаками: нечутливістю до наявності неконденсованих домішок в вимірюваному середовищі; мінімально вносимою в кріорідину теплою; технологічністю при використанні серійно виробленого ВТНП-провідника; простотою конструкції, що дозволяє надавати датчику будь-яку конфігурацію і, як наслідок, розміщувати його в кріосудині довільної форми.

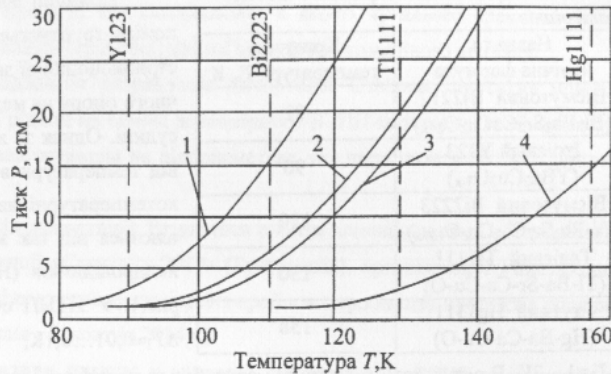


Рис.2. Температури переходу ВТНП-провідників в НІІ-стан і  $P$ ,  $T$ -залежності фазових рівноваг рідина-пар кріопродуктів: 1 - азот; 2 - аргон; 3 - кисень; 4 - метан

Створений рівнемір кріогенних рідин повинен складатися з двох вузлів: чутливого елемента для вимірювання рівня, що представляє собою довгомірний ВТНП-провідник, і вторинного приладу що відображає/реєструє результати вимірювань.

У другому розділі описується розроблена фізико-математична модель чутливого елемента ВТНП-датчика – довгомірного композитного високотемпературного надпровідника, частина якого знаходиться в області кріорідини, а частина - насиченого і перегрітого ІІ пару. Модель використовується для вивчення і подальшого аналізу теплових процесів, що виникають при роботі ВТНП-рівнеміра; прогнозування його робочих характеристик з відмінним від використовуваних в експериментах конструктивних параметрів, таких як діаметр, довжина, коефіцієнти заповнення, матеріал основи ВТНП-провідника та ін.

При розробці моделей кожного з ВТНП-датчиків враховувалися наступні їх особливості:

1. Технологічні, до яких відносяться їх конструкції, властивості матеріалів ВТНП-проводів, види покриттів, коефіцієнти заповнення у разі застосування композитних датчиків.
2. Конструктивні, обумовлені розмірами датчиків, числом входів, монтажними характеристиками.
3. Режимні і зовнішні, що визначаються температурою, умовами теплообміну, типом ізоляції.

Модель створювалася виходячи з розгляду двох часто зустрічаючихся на практиці випадків: верхній кінець терморезистивного ВТНП-датчика теплоізолюваний від теплоприпливів з навколишнього середовища герметичним введенням, що характерно для судин Дьюара з обсягами більше 25 л; верхній кінець терморезистивного ВТНП-датчика через з'єднувальний провід контактує з навколишнім середовищем і є тепловим мостом в переносних або невеликих лабораторних судинах Дьюара.

Конструктивно ВТНП-датчик являє собою провідник, розташований зовні або всередині несучого стрижня - діелектричної підстави. В якості такої підстави використовувалися наступні

елементи і композиції: керамічна (корундова) оболонка з ВТНП-провідником, розміщеним всередині; текстолітова пластина з ВТНП-провідником, що знаходяться зовні.

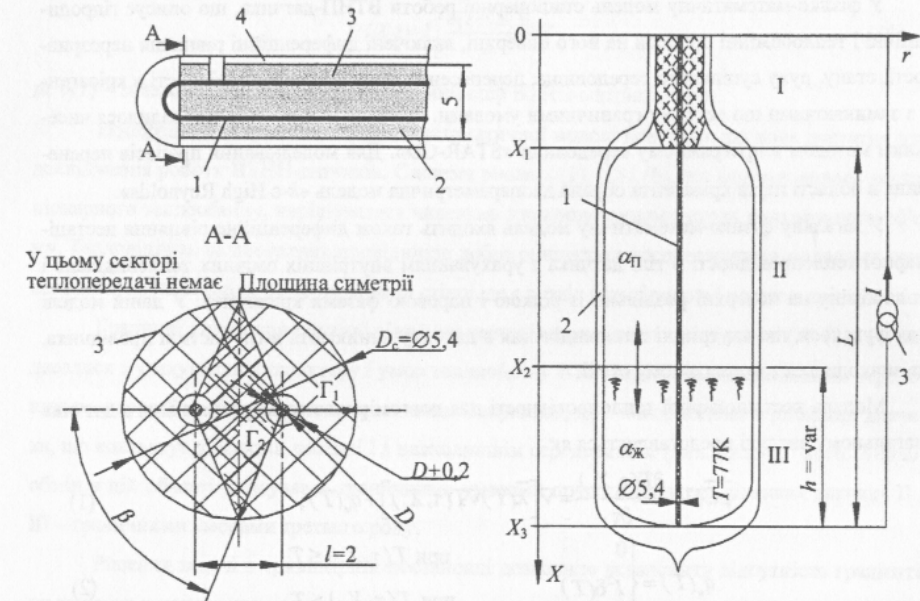


Рис. 3. Датчик з U-подібної ВТНП-ниткою: 1- частина довгомірного ВТНП-провідника; 2 - несуча корундова конструкція; 3 - торцева частина датчика; 4 - фторопластова оболонка стрижня

Як об'єкт дослідження, для встановлення ступеня адекватності моделі реальним показникам на початковому етапі, використовувався виготовлений довгомірний ВТНП-датчик рівня з корундовою оболонкою (рис.3). На рис.4. показаний спосіб його розміщення в дьюарі 2 з рідким азотом. Датчик 1 є закріплений між дном і пробкою судини. ВТНП-датчик можна умовно розбити на три ділянки, що відрізняються умовами теплообміну на поверхні чутливого елемента: адіабатна ділянка І і дві ділянки ІІ та ІІІ теплообміну з газоподібним і рідким кріопродуктом. По стрижню пропущений вимірювальний постійний струм  $I \approx 0,1$  А. Падіння напруги дає уявлення про довжину резистивної ділянки, що перебуває в парі. Крім цього струм  $I$  викликає виділення в датчику теплоти Джоуля, яка разом з теплоприпливом від нього відводиться до кріоагента, випаровуючи його. На ділянці, де температура ВТНП нижче температури його переходу в НІІ-стан, опір струму відсутній.

При моделюванні також розглядався ВТНП-провідник U-подібної конфігурації. Це дозволяє, по-перше, мінімізувати прояв термоелектричних ефектів, по-друге, в два рази збільшити значення напруги на провіднику.

Загальна фізико-математична модель рівнеміра складається з моделей стаціонарної та нестаціонарної його роботи.

У фізико-математичну модель стаціонарної роботи ВТНП-датчика, що описує гідродинамічні і теплообмінні процеси на його поверхні, включені диференційні рівняння нерозривності, стану, руху суцільного середовища, перенесення енергії і теплопровідності в криоагенті з замикаючими цю систему граничними умовами. Рішення цих рівнянь проводилося чисельним методом в програмному середовищі «STAR-CD». Для моделювання процесів перенесення в області парів криоагента обрана двопараметрична модель « $k$ - $\epsilon$  High Reynolds».

У загальну фізико-математичну модель входить також диференційне рівняння нестаціонарної теплопровідності в тілі датчика з урахуванням внутрішніх омичних тепловиділень і теплообміну на поверхні роздільно із рідкою і паровою фазами криоагента. У даній моделі враховувалося, що внутрішні тепловиділення в датчику виникають в тій частині провідника, яка знаходиться в нормальному стані.

Модель нестаціонарної теплопровідності для довгомірного терморезистивного датчика в загальному вигляді представляється як

$$\bar{\rho} \bar{C}(T) \frac{\partial T(\tau, X_i)}{\partial \tau} = \nabla [\bar{\lambda}(T) \nabla T(\tau, X_i)] + q_v(T); \quad (1)$$

$$q_v(T) = \begin{cases} 0 & \text{при } T(\tau, X_i) \leq T_c \\ I^2 \delta(T) / S^2 & \text{при } T(\tau, X_i) > T_c, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\bar{\rho}$  – середня густина матеріалу датчика, кг/м<sup>3</sup>;  $\bar{C}(T)$  – середня теплоємність матеріалу датчика, кДж/(кгК);  $\bar{\lambda}(T)$  – середня теплопровідність матеріалу, Вт/(мК);  $q_v(T)$  – об'ємна густина тепловиділень, Вт/м<sup>3</sup>;  $\delta(T)$  – питомий електроопір металевої матриці ВТНП, Ом·м;  $S$  – електропровідна частина перерізу стрижня, м<sup>2</sup>.

Модель доповнювалася рівняннями для розрахунку властивостей матеріалу датчика  $\bar{C}(T)$ ,  $\bar{\rho}$ ,  $\bar{\lambda}(T)$ . Але враховуючи, що датчик представляє собою композитний провідник, то використовувалися наступні співвідношення для розрахунку його теплопровідності, теплоємності та густини:

$$\bar{\lambda}(T) = \lambda_{\text{сер}} (1 - K_3) + \lambda_{\text{ВТНП}} K_3; \quad (3)$$

$$\bar{C}(T) = C_{\text{сер}} \frac{\rho_{\text{сер}}}{\rho} (1 - K_3) + C_{\text{ВТНП}} \frac{\rho_{\text{ВТНП}}}{\rho} K_3; \quad (4)$$

$$\bar{\rho} = \rho_{\text{сер}} (1 - K_3) + \rho_{\text{ВТНП}} K_3, \quad (5)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт заповнення (частка надпровідника в поперечному перерізі нитки);  $C_{\text{сер}}$  – теплоємність матриці, кДж/(кгК);  $\rho_{\text{сер}}$  – густина оболонки ВТНП-провідника, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ВТНП}}$  – густина ВТНП-кераміки провідника, кг/м<sup>3</sup>.

Досліджувалися провідники з коефіцієнтами  $K_3$ , які приймали значення від 0,3 до 0,7.

Термічний стан провідника, який розраховується з використанням цієї моделі, впли-

ває на електричний опір матеріалу ВТНП-матриці. Тому модель доповнювалася наступним виразом для визначення напруги, що знімається із кінців довгомірного ВТНП-провідника:

$$U(X) = I \int_0^X \frac{\delta(T(\tau, X))}{S} dX, \quad (6)$$

де  $\delta(T)$  – залежний від температури питомий опір ВТНП-матриці, Ом·м.

Попереднє використання фізико-математичної моделі показало, що вона достатня для дослідження роботи ВТНП-датчиків. Система рівнянь (1), (2) і (6), що формує модель нестаціонарного теплообміну, вирішувалася чисельно з використанням методу контрольного об'єму. Тепловіддача на поверхнях провідників добре описується зосередженими моделями конвективного теплообміну на вертикальній стінці, де є розділ між рідиною і паром в криосудині.

Граничні умови при рішенні рівняння нестаціонарної теплопровідності (1), (2) і (6) задавалися з урахуванням характеру і умов теплообміну ВТНП-датчика з навколишнім середовищем, парової та рідкої фазами криоагента. Наприклад, при використанні в рівнемірі датчика, що контактує у верхній частині I з навколишнім середовищем (див. рис. 4), його теплообмін в цій області описувався граничними умовами другого роду; на ділянках датчика II і III – граничними умовами третього роду.

Рішення задачі в тривимірній постановці дозволило встановити відсутність градієнта температур в поперечних перетинах, тому створена модель розглядалася в подальшому в одновимірній постановці при відомих коефіцієнтах тепловіддачі роздільно для газової і рідкої областей.

Окремо розрахунково вивчався вплив коефіцієнтів тепловіддачі з боку пара  $\alpha_n$  і рідини  $\alpha_{ж}$  на точність опису статичної вольт-лінійної характеристики датчика. Розрахунки робочих характеристик при  $\alpha_n=6,6$  Вт/м<sup>2</sup>К і  $\alpha_{ж}=900$  Вт/м<sup>2</sup>К, а також при їх значеннях, збільшених майже в 2 рази до  $\alpha_n=15$  Вт/м<sup>2</sup>К і до  $\alpha_{ж}=1700$  Вт/м<sup>2</sup>К, показали, що вони змінилися незначно. Це вказує на істотно більше впливу на результати розрахунків високою вісьовою теплопровідністю срібла, ніж значень коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha_n$  і  $\alpha_{ж}$ .

З використанням створеної моделі були проаналізовані три варіанти роботи ВТНП-датчика, зображеного на рис. 3: 1) ізольований від навколишнього середовища що безпосередньо контактує із криогенної рідиною; 2) знаходиться у верхній частині дьюара в тепловій взаємодії з навколишнім середовищем і що безпосередньо контактує в нижній частині без корундової оболонки (оголений) з криоагента; 3) ізольований від навколишнього середовища, що контактує з криорідиною через корундову оболонку.

Порівняння розрахунків з експериментами вказало на їх задовільну збіжність, яка була підтверджена особливо детально в подальших експериментах. Однак розрахунки дозволили отримати також ряд результатів, які, по-перше, більш повно охарактеризували тепло-

фізичні явища, що відбуваються в ВТНП-датчиках, по-друге, дали можливість створити надійний вимірник рівня кріорідини. Розглянемо основні результати.

1. Важливими показниками ВТНП-датчиків є їх статичні вольт-лінійні характеристики  $U=f(h^*)$ , де  $U$  – питоме падіння напруги, мВ/м;  $h^*=h/H_{max}$ ;  $H_{max}$  – максимальне значення рівня заповнення. Створена загальна фізико-математична модель дозволила провести розрахунки цих характеристик і порівняти їх. На рисунках 5 і 6 наведено зазначені характеристики для датчика, в якому був застосований Bi2223.

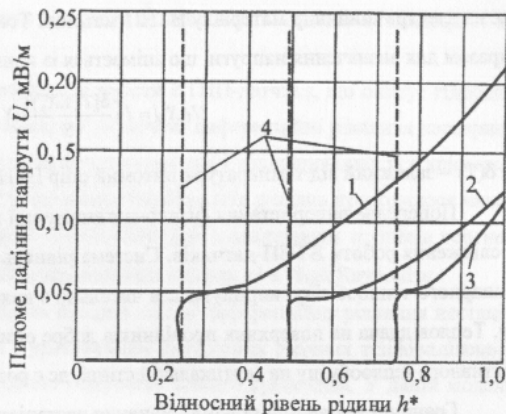


Рис. 5. Питоме падіння напруги на довгомірному ВТНП-датчику U-подібної форми, ізольованому від навколишнього середовища, при різних рівнях заповнення рідким азотом: 1 – 0,25  $H_{max}$ ; 2 – 0,5  $H_{max}$ ; 3 – 0,75  $H_{max}$ ; 4 – границі рідина-пар

З цих рисунків видно, що за наявності контакту ВТНП-датчика з навколишнім середовищем, відбувається зрушення ліній переходу в НП-стан вправо, яке супроводжується зменшенням інтегрального падіння напруги на кінцях.

2. ВТНП-датчики, які контактують з навколишнім середовищем, повинні бути спеціально таровані, оскільки у них може спостерігатися розбіжність місця переходу їх в нормальний стан з рівнем заповнення рідким азотом. Це показує залежність (рис.7)

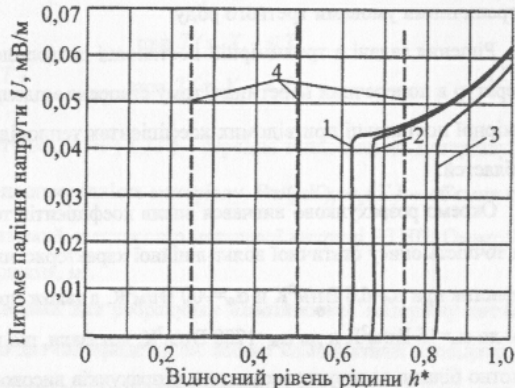


Рис. 6. Питоме падіння напруги на довгомірному ВТНП-датчику U-подібної форми, що контактує з навколишнім середовищем, при різних рівнях заповнення рідким азотом: 1 – 0,25  $H_{max}$ ; 2 – 0,5  $H_{max}$ ; 3 – 0,75  $H_{max}$ ; 4 – границі рідина-пар

$$\delta h = (h_{VTNP} - h_{LN2}) / h_{LN2} \quad (7)$$

від наведеного рівня азоту  $h^*$ , де  $h_{VTNP}$  – рівень, при якому відбувається перехід провідника в нормальний стан;  $h_{LN2}$  – рівень рідкого азоту. Як видно з графіка, на кривій є три характерні області. У 1-ій з них при зниженні  $h^*$  від 1 до 0,5 спостерігається деякий підйом на кривій, обумовлений тим, що фактично рівень переходу в НП-стан знаходиться під рівнем рідкого кріоагенту. Тут позначається підвищена вісьова теплопровідність, що сприяє надходженню

тепла з навколишнього середовища. При рівні  $0,5 \geq h^* \geq 0,05$  частина цього тепла конвективно розсіюється в парах азоту, і рівень переходу в НП-стан встановлюється над рівнем рідини. На ділянці III температура по всій довжині ВТНП вище його критичної температури  $T_c = 110K$ , і опір провідника носить резистивний характер. Тому ВТНП-датчики, які контактують з навколишнім середовищем, по-перше, потребують ретельного тарування, по-друге, повинні застосовуватися переважно в кріосудині з обсягами до 40л, що знаходяться в приміщеннях з контрольованим мікрокліматом.

3. У ході комп'ютерного моделювання вдалося виявити, що, використовуючи вставку з матеріалу з низькою теплопровідністю або, наприклад, циліндричну оболонку з більш товстими стінками з корунду (рис.8), можна створити ВТНП-датчик з сильно висловленою нелінійною характеристикою. З рис.9 видно, що при збільшенні рівня рідкого азоту вище 14 см характеристика, тобто  $U(h)$ , починає різко падати. Ця особливість дозволяє використовувати створений ВТНП-датчик в системах автоматичного заповнення ємностей до заданого рівня кріогенними рідкими продуктами (наприклад, до 14 см, як впливає з рис.9).

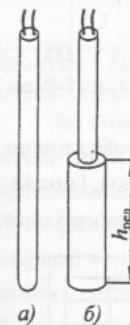


Рис.8. ВТНП-датчики: звичайний (а) і маючий релейну характеристику (б)

4. Розрахунки показали, яким чином можна підвищити точність вимірювання рівня кріорідини при використанні довгомірного ізольованого від навколишнього середовища ВТНП-датчика. Необхідно, щоб температура верхнього кінця датчика, до якого приєднується електровимірювальний ланцюг, був трохи нижче температури його НП-переходу, але при цьому був вище температури протилежного кінця. Для забезпечення роботи ВТНП-рівнеміра потрібно створити умови для переходу чутливого елемента ВТНП-провідника в нормальний стан. Один зі способів – короткочасна подача імпульсного струму з величиною рівною або навіть вище критичної (рис.10). Початок формування нормальних зон в

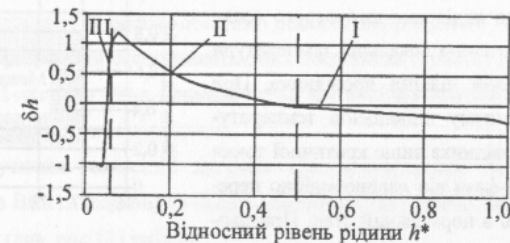


Рис.7. Відхилення в показаннях датчика рівня рідкого азоту в залежності від рівня заповнення дьюара

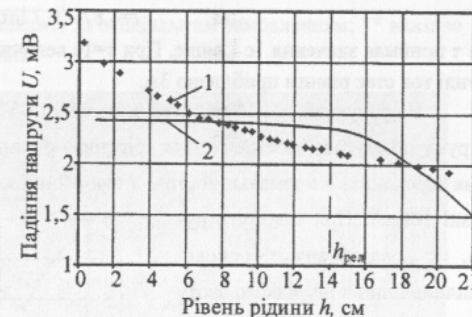


Рис.9. Робочі характеристики ВТНП-датчиків залежно від заповнення судини Дьюара кріорідиною: 1 - звичайного; 2 - з релейною характеристикою

ВТНП-датчика. Необхідно, щоб температура верхнього кінця датчика, до якого приєднується електровимірювальний ланцюг, був трохи нижче температури його НП-переходу, але при цьому був вище температури протилежного кінця. Для забезпечення роботи ВТНП-рівнеміра потрібно створити умови для переходу чутливого елемента ВТНП-провідника в нормальний стан. Один зі способів – короткочасна подача імпульсного струму з величиною рівною або навіть вище критичної (рис.10). Початок формування нормальних зон в

структурі ВТНП-матеріалу призводить до виділення джоулевого тепла та зростанню локальної температури на деякій ділянці провідника. При подальшому підвищенні температури провідника вище критичної точки ВТНП-фази він лавиноподібно переходить в нормальний стан. При цьому його електричний опір різко зростає, і з'являються омичні тепловиділення. Після подачі імпульсного струму, який ініціював появу нормальних зон, виділення тепла в ВТНП-датчику підтримується струмом нижчої величини. Такий струм забезпечує подальший рівномірний прогрів частини провідника, що знаходиться в парах криогенної рідини.

Для одного з ВТНП-датчиків були виконані розрахунки з використанням створеної фізико-математичної моделі часу його нагрівання при зменшуваному за логарифмічною залежності струмі:

$$I = 4,87 - 0,7 \ln t, \quad (8)$$

де  $t$  приймає значення 1с і вище. При  $t=1$ с величина  $I=4,87$  А. Як видно з рис.11, на 8-ій секунді ток стає рівним приблизно 3А.

На рисунках 10 і 11 наведені показники ВТНП-датчика, в якому подачею збільшеного струму примусово забезпечується збіг рівня рідини з рівнем, коли зникає НП-фаза, і провідник переходить в нормальний стан. У звичайних же умовах струм живлення підтримували на рівні 100мА. При такому струмі, як показав аналіз, основні теплоприпливи до рідкого азоту викликаються недосконалістю теплоізоляції криосудини. Дійсно, для лабораторної судини Дьюара місткістю 1,21л теплоприплив з навколишнього середовища становить 4,11Вт. При цьому теплота Джоуля в порівнянні з теплоприпливом була незначно малою (частки відсотка).

Однак у випадку використання більш досконалих криосудин, з одного боку, і більш високих струмів, з іншого - співвідношення між цими потужностями можуть змінитися так, що

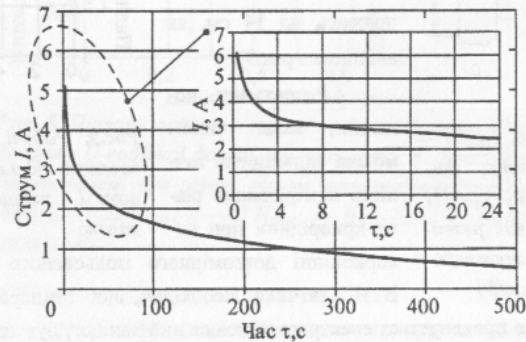


Рис.11. Характер зміни в часі струму, що подається для нагріву ВТНП-провідника до  $T=82$ К при  $h^*=0,8$



Рис.10. Значення температури на поверхні стрижня ВТНП-провідника з Bi2212, розподіленої по висоті криогенної смності при різних рівнях її заповнення, а також час, протягом якого при струмі  $I=3$ А ця температура досягається: 1 - рівень заливки 0,8, час прогріву 6с; 2 - рівень заливки 0,5, час прогріву 4,2с; 3 - рівень заливки 0,2, час прогріву 2,2с

джоулевою теплою нехтувати не вдасться. У зв'язку з цим імпульсний розігрів ВТНП-датчиків доцільно застосовувати в судинах з великими обсягами рідких криопродуктів.

У третьому розділі викладені результати експериментальних досліджень серійних і спеціально створених довгомірних ВТНП-датчиків рівня. Описано стенд для вимірювання робочих характеристик датчиків. Наведено результати їхніх досліджень.

На цьому етапі в якості чутливих елементів датчиків використовувалися ВТНП-провідники 1-го покоління з жилами з Bi2212 (серійні) і з Bi2223 (спеціально замовлені), які виготовляються ВНПМ ім. ак. Бочвара (див. рис.12 і табл.2).

Таблиця 2

Параметри досліджених ВТНП-провідників

Номер зразка	$K_3$	Конфігурація ВТНП-провідника	Кількість жил	Розмір, мм	Матеріал ВТНП/метал матриці	Крит. струм $I_c$ , А, при 77К	Крит. темпер. $T_c$ , К
1*	0,7	Круглий U-подібний	1	$\varnothing=0,4$	Bi2223/Ag	0,8...0,95	110
2*	0,4		61		Bi2223/Ag	0,74...0,85	
3*	0,4		61		Bi2223/Ag-Sn	0,5	
4*	0,6		1		Bi2223/Ag-Sn	0,5	
5	0,3	Круглий лінійний	19		Bi2212/Ag	16	82
6	0,3	Стрічковий	61	0,25x3**	Bi2212/Ag	40	82
7	0,3	Круглий скручений	19	$\varnothing=0,4$	Bi2212/Ag	16	82

Примітка: \* Дані ВТНП-провідники виготовлялися за спеціальним замовленням; \*\* вказано перетин стрічкового провідника 2-го покоління

На стенді випробовувалися датчики №№1-4 у вигляді довгомірних композитних провідників з ВТНП-фазою. Тіло провідника (матриця) складається з металу з високою теплопровідністю (срібло або сплав срібло-олово). У матриці розміщена чутлива частина датчика, що представляє гексагональну щільну упаковку мікронних ниток надпровідників Bi2223 або Bi2212.

В експериментах спочатку в ВТНП-рівнемірив використовувалися серійно вироблені датчики №№5-7. Проведені дослідження показали, що вони володіють недоліками: низьким значенням реєстрованої напруги; необхідністю у великих вимірювальних струмах і приладах для вимірювання малої напруги; наявністю високої вісьової теплопровідності, що відхиляє границю переходу в НП-стан від вимірюваного рівня рідини; виникненням термо-ЕРС, що

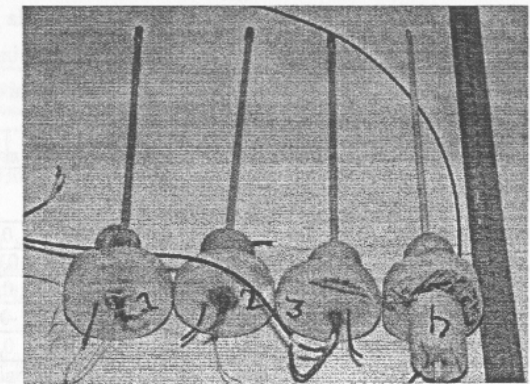


Рис.12. Фото досліджених ВТНП-датчиків (№№1-4) з Bi2223 (спецзамовлення)

В експериментах спочатку в ВТНП-рівнемірив використовувалися серійно вироблені датчики №№5-7. Проведені дослідження показали, що вони володіють недоліками: низьким значенням реєстрованої напруги; необхідністю у великих вимірювальних струмах і приладах для вимірювання малої напруги; наявністю високої вісьової теплопровідності, що відхиляє границю переходу в НП-стан від вимірюваного рівня рідини; виникненням термо-ЕРС, що

впливає на точність і стабільність вимірювання напруги та ін.

На основі зразків №№1-4 були створені  $U$ -образні ВТНП-датчики, які контактують з навколишнім середовищем. У даній роботі використовувалися провідники, виготовлені за нашим технічним умовам.

На рис.13 наведено характеристики ВТНП-датчиків, звільнених від ізоляції.

Сімейство характеристик ВТНП-датчиків в загальному вигляді описано поліномом (див. табл. 3):

$$U(h)=ah^3+bh^2+ch+d, \text{ мВ}, \quad (9)$$

де  $h$  – висота стовпа кріорідини, см.



Рис.13. Зведений графік робочих досліджуваних характеристик оголених (звільнених від корундової ізоляції) ВТНП-провідників ( $t_{oc}=+23...+25$  °C,  $I=100\text{мА}$ ): 1 – зразок №1; 2 – зразок №2; 3 – зразок №3; 4 – зразок №4

датчиків не вдалося виявити такого, який би одночасно відповідав цим умовам. Розрахунки показали, що серед датчиків, показники яких представлені на рис.13, за умовою максимуму чутливості робочої характеристики

( $\Delta U/\Delta h$ ) кращим є датчик, виготовлений з зразка №1. У цього датчика ( $\Delta U/\Delta h$ )=0,6885мВ/см; у датчиків із зразків №№2 і 3 ці характеристики складають 0,1033 і 0,6300 мВ/см, відповідно. Найбільша крутизна ( $\Delta U/\Delta h$ ) важлива для вимірювання

рівня в кріосудинах великого поперечного перетину і малої висоти.

Критерієм мінімуму теплоприпливів (внесення збурення в вимірюване середовище) відповідає датчик, виготовлений з зразка №4.

При наливанні кріогенних рідин в кріосудину або при її спорожненні важливо знати час, після закінчення якого показання ВТНП-рівнеміра будуть давати дійсні показники. Для визначення часу встановлення теплової рівноваги була проведена серія експериментів. На їх основі

Порівняння експериментальних і розрахункових даних, представлених на рис.13, показало, що їхня відмінність становить не більше 4% в середній частині графіків і не більше 13,5% – на кінцях діапазону змін  $h$ .

ВТНП-датчики, найбільш придатні для створення вимірників рівня кріорідин, повинні відповідати максимуму чутливості робочої характеристики, а також мінімуму внесення збурення в вимірюване середовище.

На жаль, серед досліджених ВТНП-

датчиків не вдалося виявити такого, який би одночасно відповідав цим умовам.

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів полінома (9)

Номер зразка	a	b	c	d	R
1	-0,0003	0,0146	-0,3295	5,7683	0,9958
2	-0,0002	0,00081	-0,2058	2,9232	0,9938
3	-0,0001	0,0059	-0,1477	2,9515	0,9848
4	$6 \cdot 10^{-5}$	-0,0007	-0,0682	2,3674	0,9982
5	$4 \cdot 10^{-5}$	0,0025	-0,1563	2,1675	0,9957

Примітка: R - достовірність апроксимації

визначили постійні часу вимірювання для кожного з датчиків, виготовлених із зразків №№1-4. У табл. 4 представлені результати дослідження часу стабілізації характеристик. У ній під  $\Delta h$  приймають різницю рівнів рідини.

Отримані розрахункові та експериментальні дані використовувалися при створенні прототипу приладу для вимірювання рівня кріогенної рідини на основі ВТНП-провідників.

На рис. 14 зображена функціональна блок-схема вимірника рівня кріогенної рідини із застосуванням ВТНП-

датчика. Пристрій складається з декількох вузлів. Розглянемо призначення кожного з них.

Джерело живлення виробляє постійний струм необхідної величини для нагріву (переведення в нормальний стан) да-

тчика і вимірювання напруги зчитування. Вимірювальний струм протягом інтервалу часу  $\tau_1'$  протікає по датчику  $R(h)$ . Отримана напруга посилюється і надходить на вхід пристрою реєстрації. Відлік відбувається через інтервали часу  $\tau_1$  від початку протікання струму по датчику. За стробу імпульсу тривалістю  $\tau=(\tau_1'-\tau_1)$  відбувається дискретизація (подання в цифровому вигляді) постійної напруги, що знімається з датчика.



Рис.14. Функціональна схема вимірника рівня кріогенної рідини

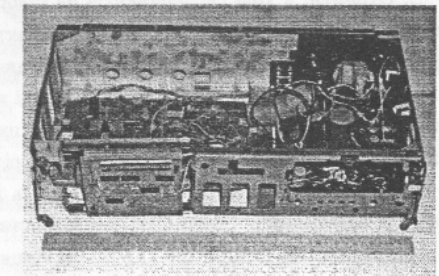


Рис.15. Зовнішній вигляд приладу зі знятою кришкою для вимірювання рівня рідкого кріоагента

Перетворювач напруги являє собою восьмирозрядний аналогово-цифровий пристрій послідовного наближення. Воно перетворює напругу, відповідне рівню рідкого кріопродукта, в двоїчний прямий код.

Пристрій візуалізації перетворює двоїчний прямий код в зручний вид індикації: стрілочний, світлодіодний або цифровий. Рис. 15 дає уявлення про зовнішній вигляд прототипу приладу для вимірювання рівня рідкого кріоагента.

Таблиця 4  
Експериментальні постійні часу вимірювання для зразків датчиків при різних змінах рівня заповнення, с

Рівні заповнення судини Дьюара	Зміна рівня $\Delta h$ , мм					
	10...22	15...30	30...60	50...92	62...112	92...115
$\Delta h=h_1-h_2$						
Зразок	12	15	30	42	50	23
1				12,3		11,6
2		8	11			
3	3,4				12,2	
4	1,2	2,3				

Отримана після налаштування приладу характеристика відображення рівня рідкого азоту світлодіодною шкалою наведена на рис. 16. З нього випливає, що показання приладу незначно відрізняються від його ідеальної характеристики.

### ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена актуальна науково-прикладна задача розробки ефективних довгомірних композитних ВТНП-датчиків і створення на їх основі прототипу вимірника рівня криогенних рідин. З урахуванням розрахункових і експериментальних результатів отримано тарировочна і робоча характе-

ристики приладу при використанні рідкого азоту (відмінність – 6...20%), розроблені рекомендації з вибору ВТНП-матеріалів в якості датчиків рівня криогенних рідин і вдосконаленню конструкції вимірювальної частини рівнеміра, що дозволяють зробити наступні висновки:

1. Вимірники рівня рідких криопродуктів в теплоізольованих ємностях можуть створюватися на основі датчиків з ВТНП-матеріалів Bi2223 і Bi2212, температури переходу яких в надпровідний стан виявляються близькими до температур зберігання рідких азоту, кисню і аргону.

2. При виборі ВТНП-провідників, призначених для вимірника рівня криогенної рідини, необхідно віддавати перевагу таким з них, у яких  $\Delta T_{\text{перех}}$  в надпровідний стан в пограничному шарі рідина-пар буде мінімально можливим.

3. Отримані в ході експериментів на створеному стенді дані відносно вольт-лінійних статичних  $U=f(h)$  і динамічних  $U=\varphi(\Delta h, \tau)$  характеристик різних ВТНП-датчиків дозволяють розробляти вторинні прилади для терморезистивних вимірників рівня рідких криопродуктів.

4. Експериментально встановлені перехідні характеристики ВТНП-датчиків при зміні рівня заповнення в ємності рідкого криопродукта, що дають можливість визначати постійні часу вимірювання, необхідні для створення рівнеміра рідких криогенних середовищ.

5. Розроблена фізико-математична модель довгомірного композитного ВТНП-датчика, що описує вольт-лінійні і динамічні характеристики таких датчиків з похибкою не більше 4% в їх середній частині і не більше 13,5% – на кінцях діапазону змін  $h$ .

6. Мінімальну інерційність відгуку на зміну рівня криогенної рідини мають конструкції з провідниками, безпосередньо контактуючими з криогенною рідиною. Термічний стан провідника в цьому випадку описується одновимірним рівнянням теплопровідності із зосередженими умовами теплообміну на поверхні окремо для рідкої і парової фаз.

7. При контакті верхньої частини датчика з навколишнім середовищем його показники залежать від параметрів цього середовища. Для зниження впливу навколишнього середовища на роботу датчиків необхідно контактну ділянку ВТНП-провідника надійно теплоізулювати або провести індивідуальну тарировку рівнеміра для використання його в приміщеннях з контрольованим мікрокліматом.

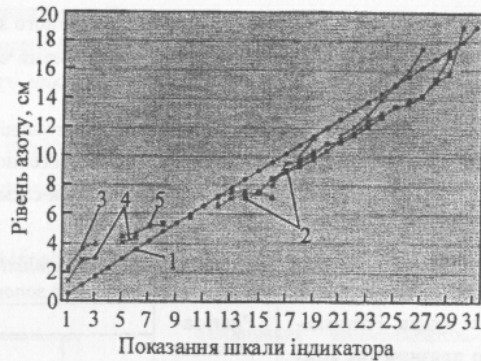


Рис.16. Знята експериментально індикаторна характеристика вторинного приладу ВТНП-рівнеміра (зразок №1): 1 - ідеальна характеристика; 2 - експеримент №1; 3 - експеримент №2; 4 - експеримент №3; 5 - експеримент №4

8. Обробка експериментальних даних дозволила виявити оптимальні типи гібридних ВТНП-датчиків за критерієм мінімуму внесення збурення в вимірюване середовище (зразок №4) або за критерієм максимуму чутливості робочої характеристики (зразок №1).

### ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, в яких опубліковані основні результати дисертації:

- Arkharov I.A., Emel'yanov V.Yu. (2000). High – Temperature Superconducting Level Gage for Cryogenic Liquid// Chemical and Petroleum Engineering. – V.36. – No9-10. – P.542-545.  
*Особистий внесок автора: зроблено припущення про можливість використання ВТНП для терморезистивного вимірювання рівня криогенних рідин.*
- Arkharov I.A., Emel'yanov V.Yu. (2002). An HTS Electronic Unit for Cryogenic Liquid Level Measurement// Chemical and Petroleum Engineering. – V.38. – No 1-2. – P. 24-27.  
*Особистий внесок автора: виготовлений і апробований у лабораторії вторинний прилад-вимірник рівня рідкого азоту, який використовує терморезистивний ВТНП-провідник.*
- Emel'yanov V.Yu., Kolosov M.A. (2008). Mathematical Simulation of a HTS Wire Cryoliquid Level Indicator //Chemical and Petroleum Engineering. – V44. – No3-4. – P.202-209.  
*Особистий внесок автора: сформульовані основні ознаки нестационарної математичної моделі процесів, що описують термічний стан ВТНП-провідника.*
- Колосов М.А., Емельянов В.Ю. Терморезистивный измеритель уровня криогенной жидкости на основе высокотемпературных сверхпроводников //Вестник МГТУ им.Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2014. – №6. – С.49-60.  
*Особистий внесок автора: представлені результати чисельного рішення системи рівнянь, що описують термічний стан ВТНП-провідника в керамічній оболонці, без неї з U-подібним і лінійним розташуванням ниток.*
- Колосов М.А., Емельянов В.Ю., Навасардян Е.С. Терморезистивный уровнемер криогенной жидкости на основе высокотемпературных сверхпроводников//Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2014. – №6. – С.116-128.  
*Особистий внесок автора: показана актуальність пошуку нових способів вимірювання рівня і розглянуто застосування ВТНП-провідників в якості вимірників рівня криогенної рідини, що використовують терморезистивних метод.*
- Колосов М.А., Емельянов В.Ю. Математичне моделювання дротяного ВТНП датчика рівня криорідини// Холодильна техніка та технологія. – 2014. – №6. – С.59-66.  
*Особистий внесок автора: чисельними методами вирішена задача нестационарного теплообміну моделі, що описує термічний стан ВТНП-провідника; отримані значення температури поверхні ВТНП-провідника в залежності від умов його експлуатації.*

### Опубліковані роботи апробаційної характеру:

- Arkharov I.A., Emel'yanov V.Yu., Navasardyan E.S. Heat Transfer Modeling and Study of HTS Conductors in Liquid Nitrogen. Characteristics evaluation for generating of the transmitter for cryogenic fluid // Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. «Cryogenics 2010». – Bratislava. – 2010. – P.180-182.
- Колосов М.А., Емельянов В.Ю. Создание и исследование терморезистивного измерителя уровня криогенной жидкости на основе высокотемпературных сверхпроводников// Технические газы. – 2014. - №6. – С.66-72 (Доповідь, заслухана фахівцями на 15-му міжнародному семінарі з проблем виробництва продуктів розділення повітря, Мінськ, 30 вересня - 3 жовтня 2014р.)

#### Патенти на винаходи за темою дисертації:

1. Устройство измерения уровня криогенной жидкости [Текст]: Патент № 2187078. Российская Федерация: МПК G01F 23/24 / Архаров И.А., Емельянов В.Ю.; заявка RU 2000129554; опубл. 27.08.2002, Бюл. №23. - 9с.

*Особистий внесок автора: запропонована U-подібна конфігурація ВТНП-провідника, що дозволяє усунути виникнення термо-ЕРС, яка знижує точність вимірювання рівня криогенної рідини.*

2. Устройство измерений уровня криогенной жидкости на базе дискретных монокристаллических высокотемпературных сверхпроводников [Текст]: Патент № 2188397. Российская Федерация: МПК G01F 23/24 / Архаров И.А., Емельянов В.Ю., Полущенко О.Л.; заявка RU 2000126574; опубл. 10.08.2002, Бюл. №22. - 8с.

*Особистий внесок автора: запропоновано спосіб вимірювання рівня криогенної рідини на основі набору ВТНП-пластин з Y123; розроблена конструкція, що мінімізує нагрів криогенної рідини.*

#### УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$C$  – теплоємність матриці;  $h$  – рівень криорідини;  $I$  – струм;  $S$  – перетин провідника;  $T$  – температура;  $U$  – напруга; ВТНП, НТНП - високо- і низькотемпературні надпровідники;  $K_3$  – коефіцієнт заповнення; НП - надпровідність; ЕРС - електрорушійна сила;  $\alpha_n$ ,  $\alpha_j$  – коефіцієнти тепловіддачі пари і рідини криоагента на поверхні датчика;  $\delta$  – питомий електроопір;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $\rho$  – густина матеріалу;  $\tau$  – час.

#### Анотація

Емельянов В.Ю. Создание и исследование прототипа измерителя уровня криогенных жидкостей на основе высокотемпературных сверхпроводников. – Рукопись. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – «Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования». – Одесская национальная академия пищевых технологий Министерства образования и науки Украины, Одесса, 2015г.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной-прикладной задачи, целью которой является изучение основных закономерностей функционирования и разработка научных принципов проектирования контактных терморезистивных датчиков уровня криогенных жидкостей, температуры нормального кипения которых составляют 70...120К, а также создание прототипа прибора для измерения уровня таких жидкостей. Построена физико-математическая модель уровнемера, в которую входят модели его стационарной и нестационарной работы. Стационарная модель характеризует гидродинамические и теплообменные процессы на его поверхности дифференциальными уравнениями неразрывности, состояния, движения сплошной среды, переноса энергии и теплопроводности в криоагенте. Решение системы уравнений проводилось в программной среде «STAR-CD». Дифференциальным уравнением описана нестационарная теплопроводность в теле датчика с учётом внутренних омических тепловыделений и теплообмена на поверхности раздельно с жидкой и паровой фазами криоагента. Уравнение с граничным условием III-его рода решалось численно с ис-

пользованием метода контрольного объёма. Решение уравнений, формирующих общую физико-математическую модель позволило более полно охарактеризовать происходящие в ВТСП-датчиках теплофизические процессы. Например, с учётом свойств нескольких типов датчиков, изготовленных из керамических купратных ВТСП-материалов Bi2212 и Bi2223, удалось рассчитать их статические вольт-линейные характеристики. Расчёты помогли определить, каким образом можно повысить точность измерения уровня криожидкости при использовании длинномерного ВТСП-датчика. В диссертации изложены результаты собственных экспериментальных исследований характеристик ВТСП-датчиков. Сравнение экспериментальных данных с расчётами показало, что их различие достигает не более 4% в средней части диапазона изменения уровня криожидкости и не более 13,5% – на его концах. В диссертации представлена разработанная функциональная схема измерителя уровня криогенной жидкости, описаны характеристики созданного прибора. Полученная после тарировки прибора характеристика измерителя уровня криожидкости незначительно отличается от его идеальной линейной характеристики.

**Ключевые слова:** Высокотемпературный сверхпроводник (ВТСП). Терморезистивный измеритель уровня жидких криопродуктов. ВТСП-датчик. Уровнемер. Жидкий азот. Вторичный прибор-измеритель уровня.

#### Анотація

Емельянов В.Ю. Створення та дослідження прототипу вимірника рівня криогенних рідин на основі високотемпературних надпровідників. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування». - Одеська національна академія харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2015р.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі, метою якої є вивчення основних закономірностей функціонування і розробка наукових принципів проектування контактних терморезистивних датчиків рівня криогенних рідин, температури нормального кипіння яких становлять 70...120К, а також створення прототипу приладу для вимірювання рівня таких рідин. Побудована фізико-математична модель рівнеміра, в яку входять моделі його стаціонарної та нестаціонарної роботи. Стаціонарна модель характеризує гідродинамічні і теплообмінні процеси на його поверхні диференціальними рівняннями нерозривності, стану, руху суцільного середовища, перенесення енергії і теплопровідності в криоагенті. Рішення системи рівнянь проводилося в програмному середовищі «STAR-CD». Диференціальним рівнянням описана нестаціонарна теплопровідність в тілі датчика з урахуванням внутрішніх омичних тепловиділень і теплообміну на поверхні роздільно з рідкою та паровою фазами криоагента. Рівняння з граничною умовою III-його роду вирішувалося чисельно з використанням методу контрольного об'єму. Рішення рівнянь, що формують загальну фізико-математичну модель, дозволило більш повно охарактеризувати що відбувається в ВТНП-датчиках теплофізичні процеси. Наприклад, з урахуванням властивостей декількох типів датчиків, виготовлених з керамічних купратних ВТНП-матеріалів Bi2212 і Bi2223, вдалося розрахувати їх статичних вольт-лінійні характеристики. Розрахунки допомогли визначити, яким чином можна підвищити точність вимірювання рівня криорідини при використан-

ні довгомірного ВТНП-датчика. У дисертації викладені результати власних експериментальних досліджень характеристик ВТНП-датчиків. Порівняння експериментальних даних з розрахунками показало, що їх відмінність сягає не більше 4% в середній частині діапазону зміни рівня кріорідини і не більше 13,5% - на його кінцях. У дисертації представлена розроблена функціональна схема вимірника рівня кріогенної рідини, описані характеристики створеного приладу. Отримана після тарировки приладу характеристика вимірника рівня кріорідини незначно відрізняється від його ідеальної лінійної характеристики.

**Ключові слова:** Високотемпературний надпровідник (ВТНП). Терморезистивний вимірник рівня рідких кріопродуктів. ВТНП-датчик. Рівнемір. Рідкий азот. Вторинний прилад-вимірник рівня.

#### Abstract

Emelyanov V.Yu. Creation and Research of Prototype Level Meter Cryogenic Liquids on the Basis of High-temperature Superconductors. – The manuscript. Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.05.14 – «Refrigerating, vacuum and compressor engineering, air-conditioning systems». - Odessa National Academy of Food Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2015.

The thesis is devoted to solving actual scientific problem, the purpose of which is to study the basic laws of functioning and development of the scientific principles of designing contact thermoresistive sensors level of cryogenic liquids, temperature normal boiling point which are 70...120K, as well as the creation of a prototype of the device for measuring the level of liquids using these sensors. The physical and mathematical model of the transmitter, which includes models of its steady and unsteady operation. Stationary model characteristics hydrodynamic and heat exchange processes on the surface of the differential equations of continuity, the state of motion of a continuous medium, energy transfer and thermal conductivity in the cooling agent. Solution of the system was carried out in a software environment «STAR-CD». Differential equation describes the unsteady thermal conductivity of in the body of the sensor, taking into account the internal ohmic heat release and heat transfer on the surface separated from the liquid and vapor phases of the cooling agent. Equation with the boundary condition III-rd kind was solved numerically using method of control volume. The solution of equations forming a common physical-mathematical model allowed a more complete characteristic of occurring in HTSC sensors thermal processes. For example, considering properties of several types of sensors made of ceramic cuprate HTSC materials Bi2212 and Bi2223 was able to calculate their static volt-linear characteristics. Calculations helped determine how to improve the accuracy of measuring the level of cryoliquid using long-length of HTSC sensor. The thesis presents the results of experimental investigations of their own characteristics of HTSC sensors. Comparison of the experimental data with the calculations showed that their difference reaches not more than 4% in the middle of the range of cryoliquid level changes and no more than 13,5% - at its ends. The thesis presents a functional diagram developed cryogenic liquid level meter, a list of features to create a device. Obtained after calibration of the device characteristics cryoliquid level gauge is slightly different from its ideal linear characteristics.

**Keywords:** High-temperature superconductors (HTSC). Thermoresistive level meter liquid cryogenic products. HTSC sensor. The transmitter. Liquid nitrogen. Secondary device-level meter.