

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Київський національний університет імені Тараса Шевченка**  
**Фізичний факультет**

**Кафедра загальної фізики**

На правах рукопису

**Магнітоопір одностінних вуглецевих нанотрубок, модифікованих  
кобальтвмісними комплексами**

**Галузь знань:** 10 Природничі науки

**Спеціальність:** 104 Фізика та астрономія

**Освітня програма:** Фізика

**Спеціалізація:** Фізика наноструктур в металах та кераміках

Кваліфікаційна робота бакалавра  
студента четвертого курсу  
Гулова Олександра

Науковий керівник  
кандидат фіз.-мат. наук,  
доцент кафедри загальної фізики  
Овсієнко І.В.

Робота заслухана на засіданні кафедри загальної фізики та рекомендована до захисту на ЕК, протокол № 12 від 11 червня 2021 р.

Завідувач кафедри



проф. Боровий М.О.

Київ-2021

**Витяг з протоколу №\_\_\_\_\_ засідання ЕК:**

**«Визнати, що студент Гулов Олександр виконав та захистив  
кваліфікаційну роботу бакалавра з оцінкою «\_\_\_\_\_»**

**Голова ЕК №\_\_\_\_\_**

\_\_\_\_\_

**16 червня 2021 р.**

## АНОТАЦІЯ

**Гулов О. А. Магнітоопір одностінних вуглецевих нанотрубок, модифікованих кобальтвмісними комплексами.**

Кваліфікаційна робота бакалавра. Галузь знань: 10 Природничі науки.

Спеціальність: 104 Фізика та астрономія. Освітня програма: Фізика.

Спеціалізація: Фізика наноструктур в металах та кераміках.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
фізичний факультет, кафедра загальної фізики. – Київ, 2021.

**Науковий керівник:** кандидат фіз.-мат. наук, доцент Овсієнко І.В.

В даній роботі розглянуто вплив поверхневої модифікації кобальтвмісними комплексами одностінних вуглецевих нанотрубок на їх електро- та магнітоопір. Показано, що модифікація одностінних вуглецевих нанотрубок кобальт-вмісними комплексами приводить до зміни їх механізмів провідності.

**Ключові слова:** Одностінні вуглецеві нанотрубки, електропровідність, модифікація, магнітоопір.

## SUMMARY

**Hulov O. A. Magnetic resistance of the single-walled carbon nanotubes, by modified cobalt-containing complexes.**

Bachelor qualification work. Field of knowledge: 10 Natural sciences.

Specialty: 104 Physics and Astronomy.

Educational program: Physics.

Specialization: Physics of nanostructures in metals and ceramics.

National Taras Shevchenko University of Kiev, Faculty of Physics, General Physics Department. – Kyiv, 2021.

**Research supervisor:** Ph.D, Ovsienko I. V.

In this work influence of superficial modification is considered by the cobalt-containing complexes of the single-walled carbon nanotubes on their electrical and magnetic resistance. It is shown that the modification of single-walled carbon nanotubes by cobalt-containing complexes leads to a change in their conduction mechanisms.

**Keywords:** SWCNT, electric conductivity, modification, magnetic resistance.

## Зміст

<b>Вступ.</b>	6
1. Огляд літератури	7
1.1. Будова та зонна структура одностінних вуглецевих нанотрубок	7
1.2. Механізми електропровідності в одностінних вуглецевих нанотрубках.	11
1.3. Ефект слабкої локалізації носіїв заряду в двовимірних та одновимірних системах	12
2. Методи дослідження та характеристика зразків	14
2.1. Отримання зразків одностінних ВНТ	14
2.2. Структура та фазовий склад отриманих зразків одностінних ВНТ	16
2.3. Виготовлення об'ємних зразків ВНТ	16
2.4. Вимірювання магнітоопору об'ємних зразків ВНТ	17
3. Експериментальні результати та їх оговорення	18
3.1. Електроопір об'ємних зразків одностінних ВНТ	18
3.2. Магнітоопір об'ємних зразків одностінних ВНТ слабкої локалізації для одновимірних систем	22
<b>Висновки</b>	26
<b>Список літератури</b>	27

## Вступ

Матеріали нанометрового масштабу - нанокристалічні феромагнітні сплави [1] , фуллерени , вуглецеві нанотрубки [2] , нанокомпозити [3]. Дані системи цікаві поєднанням певних параметрів, які важко досягти для традиційних моно - і полікристалічних структур[4]. Розмаїття вуглецевих нанотрубок і нановолокон, широкий діапазон їх властивостей та широкий спектр можливостей модифікування, дозволяє говорити про них як про основу принципово нового покоління матеріалу.

Використання вуглецевих нанотрубок в електроніці призводить до помітних зменшень розмірів електронних схем і електронних приладів. Дивовижна міцність в поєднанні з високими значеннями пружної деформації, дозволяє отримувати міцніші композитні матеріали. З одного боку, нанотрубки мають електронну провідність, яка перевищує провідність у визнаних провідників (Ag, Cu), з іншого боку, більшість трубок - це напівпровідники з шириною забороненої зони 0,1-2 eV.

Дослідження властивостей вуглецевих нанотрубок відкриває широкі перспективи для застосування.

**Метою даної роботи** є виявлення впливу поверхневої модифікації кобальтвмісними комплексами одностінних вуглецевих нанотрубок на їх електро- та магнітоопір.

## 1. Огляд Літератури

### 1.1 Будова та зонна структура одностінних вуглецевих нанотрубок

Вуглецева нанотрубка є структурою, яка являє собою згорнуту в циліндр графітову площину, що має поверхність, викладену правильними шестикутниками, з розташованими атомами вуглецю у вершинах [5]. На Рис. 1.1 схематично зображено вуглецеву нанотрубку.

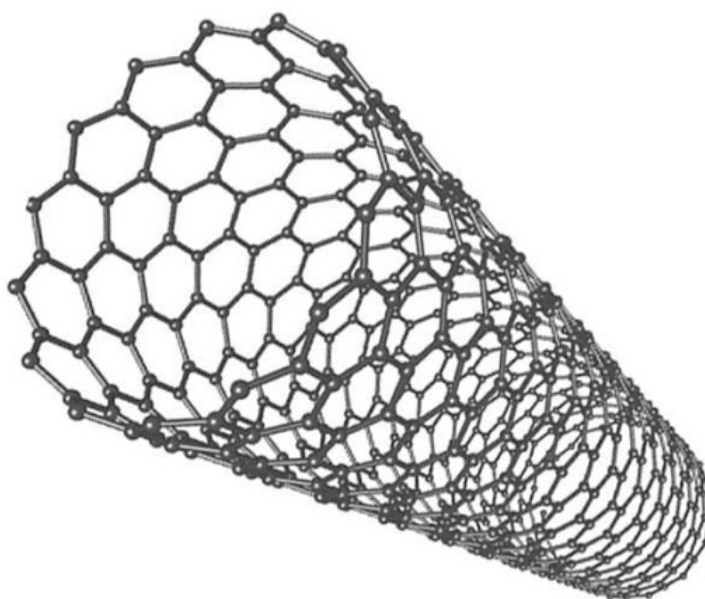


Рис. 1.1 Схематичне зображення структури вуглецевої нанотрубки.

Вуглецеві нанотрубки поділяються на одношарові та багатошарові. Одношарові, або одностінні, нанотрубки відрізняються від багатошарових значно меншим різноманіттям форм та конфігурацій [6]. Нанотрубки такого типу мають вигляд одновимірної структури, яка формується в результаті згортання графітової поверхні (рис. 1.2).

Кут орієнтації графітової площини відносно осі нанотрубки визначає її хіральність [6]. Хіральність одностінної нанотрубки позначають індексами

$(m, n)$ , які вказують координати шестикутника, що в результаті згортання площини повинен співпасти з шестикутником, який знаходиться на початку координат [8].

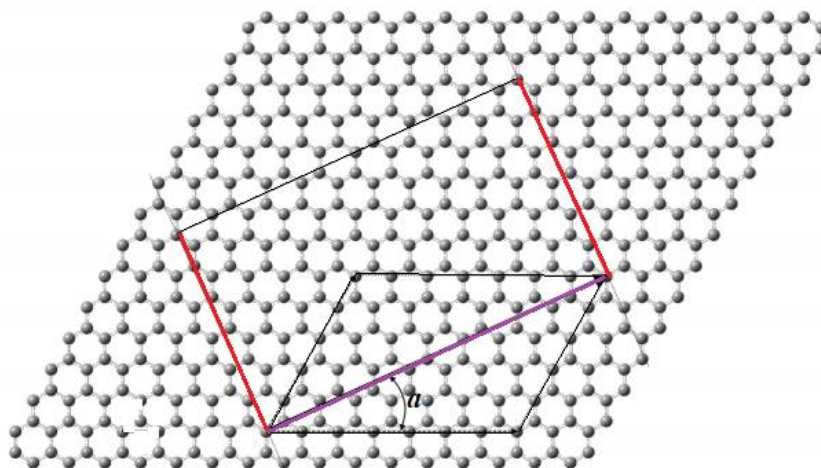


Рис .1.2 Модель структури одновимірних вуглецевих нанотрубок

Індекси хіральності  $(m, n)$  визначають діаметр  $(D)$  одностінної нанотрубки [9]. Вираз(1.1), що відображає даний зв'язок має наступний вигляд:

$$D = \sqrt{m^2 + n^2 + mn} \sqrt{\frac{3d_0}{\pi}} \quad (1.1)$$

де  $d_0 = 0,142$  нм – відстань між атомами вуглецю в графітовій площині [10].

Кут (1.2), який визначає хіральність нанотрубки, знаходиться між напрямом згортання нанотрубки і напрямом, в якому сусідні шестикутники мають загальну сторону [6]:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}n}{2m - n} \quad (1.2)$$



Граничні значення діаметру одностінної вуглецевої нанотрубки відповідають 0,3 і 5 нм. Виміряти діаметр та хіральність кута можна за допомогою просвічуючого електронного мікроскопа високої роздільної здатності [5].

За способом згортання графітової площини розрізняють три типи форм одностінних вуглецевих нанотрубок [7]:

1) Ахіральний тип (armchair). Пара сторін кожного шестикутника орієнтована перпендикулярно до осі нанотрубки (рис. 1.3).

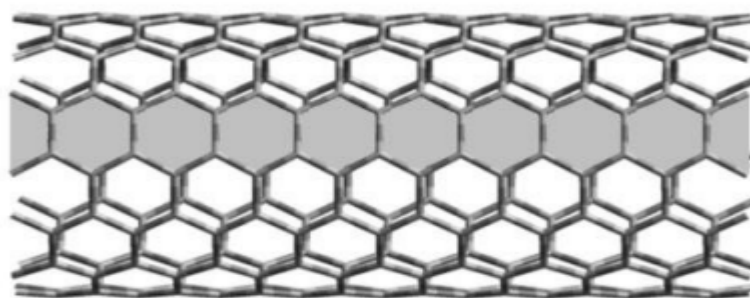


Рис. 1.3 Вуглецеві нанотрубки типу “armchair”.

2) Ахіральний тип зігзага (zigzag). Дві сторони будь-якого шестикутника орієнтовані паралельно осі нанотрубки (рис 1.4) [8].

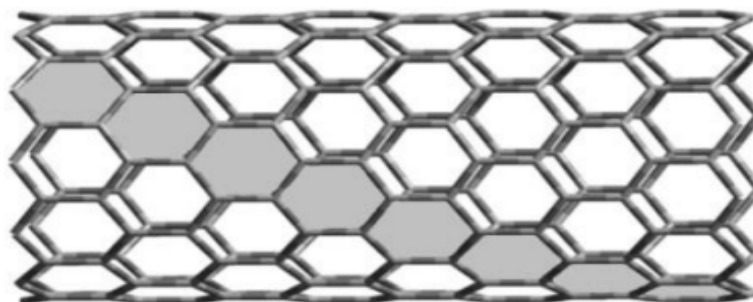


Рис. 1.1.4 Вуглецеві нанотрубки типу “zigzag”.

3) Хіральний тип. Кожна пара сторін шестикутника розміщена під кутом відмінним від  $0^\circ$  або  $90^\circ$  (рис. 1.5).

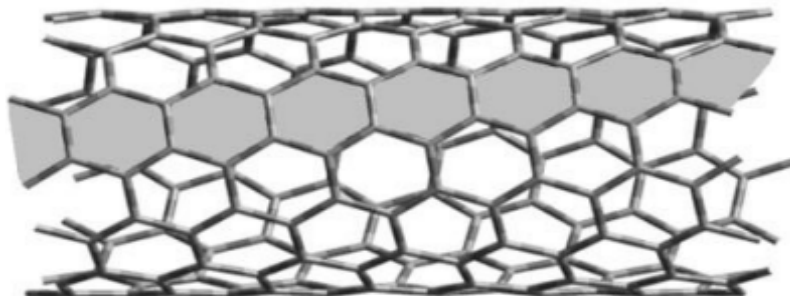


Рис. 1.5 Вуглецеві нанотрубки хірального типу.

Найбільш цікавим для розгляду серед одностінних вуглецевих нанотрубок є тип “armchair“, з хіральністю (10,10). Нанотрубки даного структурного типу мають виключно металеву провідність [9]. На рис. 1.6 представлена зонна структура та густина електронних станів металевої (а), і напівпровідникової (б) вуглецевих нанотрубок[12].

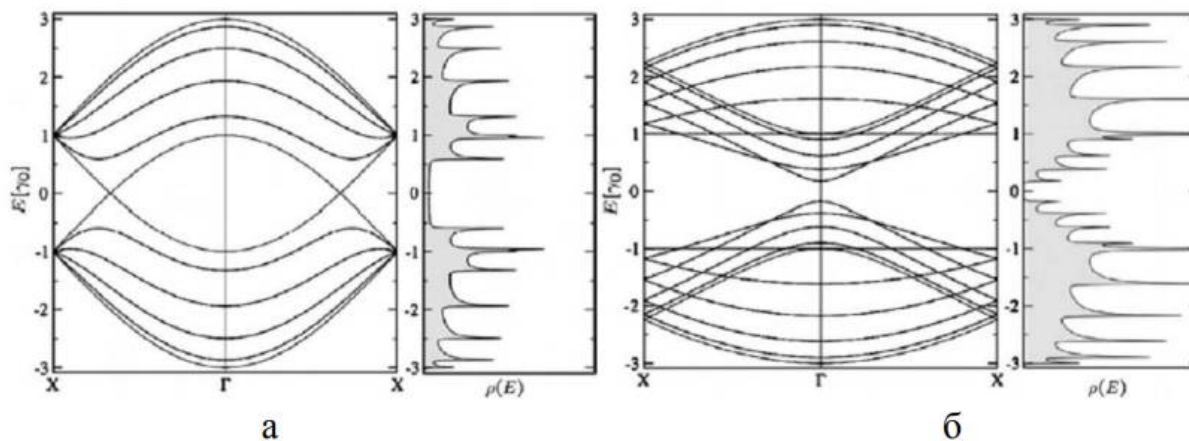


Рис. 1.6 Зонна структура та густина електронних станів металевої (а), і напівпровідникової (б) вуглецевих нанотрубок.

## 1.2 Механізми електропровідності в одностінних вуглецевих нанотрубках

Електричні властивості одностінних вуглецевих нанотрубок визначаються їх хіральністю. Група симетрії, до якої відноситься конкретна нанотрубка, характеризує її тип провідності. Це пов'язано з тим, що при зміні хіральності змінюється діаметр нанотрубок, і залежна від нього ширина забороненої зони (Рис.1.7) [13].

Транспортні властивості очищених одностінних вуглецевих нанотрубок було досліджено за допомогою чотирьохзондового методу виміру опору за різних температурних режимів [13]. Встановлено, що механізм провідності має залежність від товщини зразку (рис. 1.8).

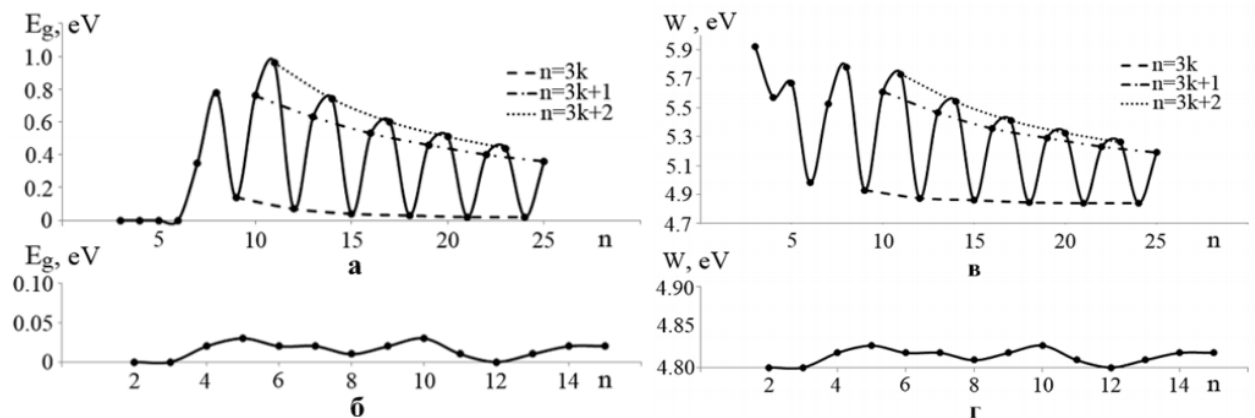


Рис. 1.7 Залежність ширини забороненої зони (а, б), і енергії роботи виходу електронів (в, г), від індексу хіральності одностінної нанотрубки типу “zigzag“ (а, в) і типу “armchair“ (б, г).

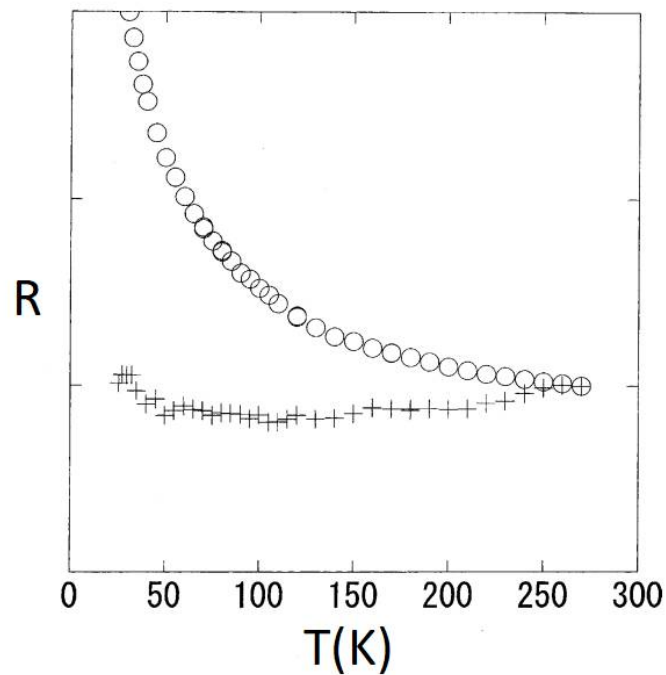


Рис. 1.8 Температурна залежність опору в одностінних вуглецевих нанотрубках.

Залежність в тонкому зразку на графіку позначено символом “○”, і відповідно символом “+” у товстому. Отже, в тоншій структурі переважає неметалічний механізм провідності, а в товщій - металічний.

### **1.3 Ефект слабкої локалізації носіїв заряду в двовимірних та одновимірних системах.**

Ефект слабкої локалізації можна описати наступним чином. Електронні хвилі, початкова точка яких (O), з довжиною хвилі порядку дебройлівської, після серії пружних розсіювань знову потрапляють в область стартової точки

(O) та інтерферують попарно [14] . Приклад подібної траєкторії руху електрону, наведено на рис. 1.9.

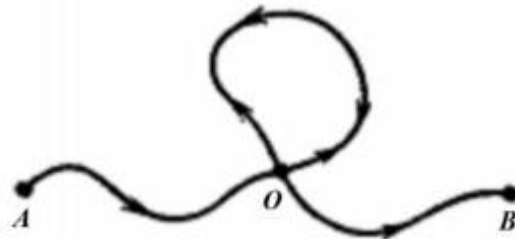


Рис. 1.9 Схематичне зображення траєкторії руху електрона, що призводить до інтерференції його хвиль.

Описаний процес інтерференції призводить до появи ефектів слабкої локалізації, та взаємодії носіїв заряду. Дані прояви полягають у виникненні від'ємного магнітоопору, тобто зменшення електроопору зразків при збільшенні індукції магнітного поля[15]. Внесок до провідності у магнітному полі за рахунок ефекту слабкої локалізації носіїв заряду у двовимірному випадку визначається як:

$$\Delta\sigma_{loc}(B) = \frac{e^2}{2\pi^2\hbar} Y\left(\frac{4eDB\tau_\varphi}{\hbar}\right) \quad (1.3)$$

$$Y(x) = \begin{cases} x^2/24, & x \geq 1 \\ \ln(x), & x \leq 1 \end{cases}$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії.

За низьких температур для вуглецевих нанотрубок має місце прояв ефектів слабкої локалізації, та взаємодії носіїв заряду. В рамках теорії слабкої

локалізації, електрична провідність(1.4) системи може бути записана у вигляді[15]:

$$\begin{aligned}\sigma(T) &= \sigma_0(T) + \sigma_q(T) \\ \sigma_q(T) &= \Delta\sigma_{loc}(T) + \Delta\sigma_{el-el}(T)\end{aligned}\quad (1.4)$$

де  $\sigma_0$  – провідність,  $\sigma_q$  – внесок до провідності за рахунок ефектів слабкої локалізації.

Для одновимірного випадку:

$$\Delta\sigma_1 = -\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \frac{ne^2}{m} \tau_0 \left( \left(\frac{\tau_\phi}{\tau_0}\right)^{1/2} - 1 \right) \quad (1.5)$$

У двовимірному випадку [16]:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{2loc}(T) &= \frac{e^2}{2\pi\hbar} \alpha \ln\left(\frac{\tau_0}{\tau_\phi}\right) \\ \text{де } \tau_\phi &= A^* T^{-p}\end{aligned}\quad (1.6)$$

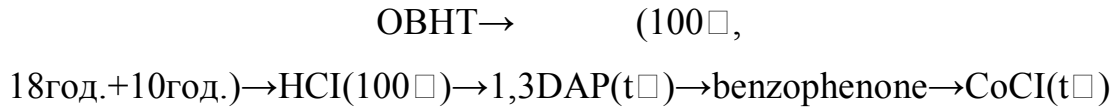
$$\Delta\sigma_{2el-el}(T) = \frac{e^2}{2\pi^2\hbar} \gamma \ln\left(\frac{k_B T \tau_0}{\hbar}\right)$$

## 2. Методи дослідження та характеристика зразків.

### 2.1 Отримання зразків одностінних ВНТ.

В якості матеріалу для модифікації вибрані вуглецеві нанотрубки, отримані каталітичним розкладанням ацетилену з використанням ітрію і

нікелю в якості каталізаторів. Модифікація одностінних вуглецевих нанотрубок кобальтвмісними комплексами відбувається наступним чином:



Процес активації поверхні ОВНТ, відбувається одночасно з обробкою зразка пероксидом водню. Залишки металевого каталізатора, та частинки неупорядкованого вуглецю, були видалені з вихідного наноматеріалу на другому етапі, кип'ятінням у соляній кислоті. На наступній стадії ОВНТ обробляли органічною сполукою, з метою утворення складних комплексів на поверхні матеріалу. В фінальному етапі, ОВНТ нагрівали в розчині хлориду кобальту, катіони якого прикріплялися через складні комплекси до поверхні ОВНТ.

На Рис. 2.1. наведені фрагменти електронно-мікроскопічних зображень вихідних (а) та модифікованих (б) ОВНТ.

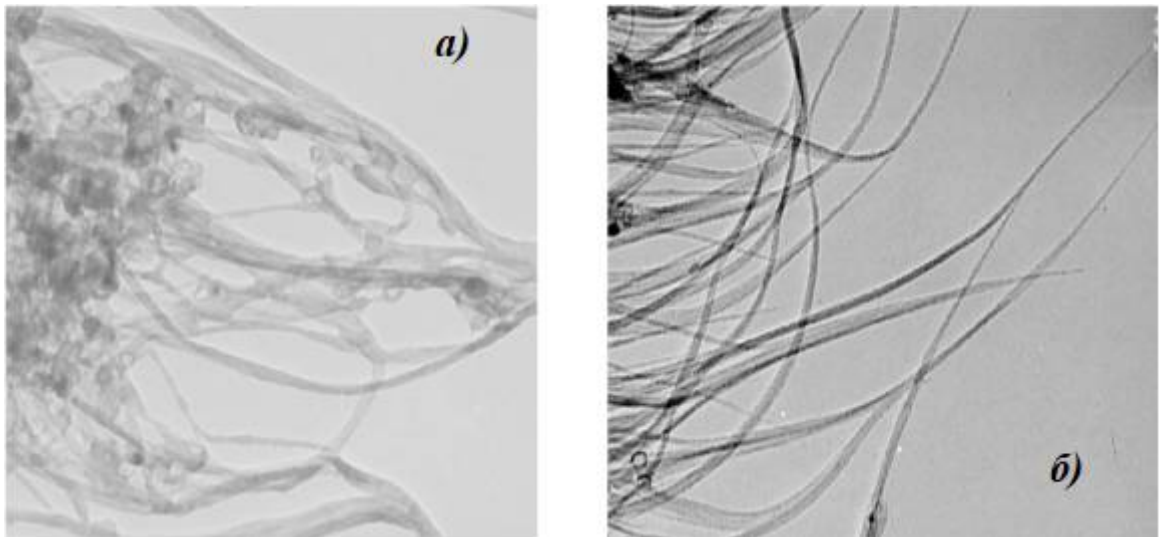


Рис. 2.1. Фрагменти зображень вихідних (а), та модифікованих (б) ОВНТ.

Як видно з рисунку "хвилястостіть" в модифікованому зразку відсутня, що свідчить про підвищення жорсткості нанотрубок, в наслідок прилягання кобальтовмісних комплексів.

## 2.2 Структура та фазовий склад отриманих зразків одностінних вуглецевих нанотрубок.

Аналізуючи графіки на рис. 2.2 знаходимо, що ліній які відповідають об'ємним графітовим структурам відсутні. Дані вуглецеві нанотрубки - одностінні, ніяких впорядкованих графітових структур не спостерігається.

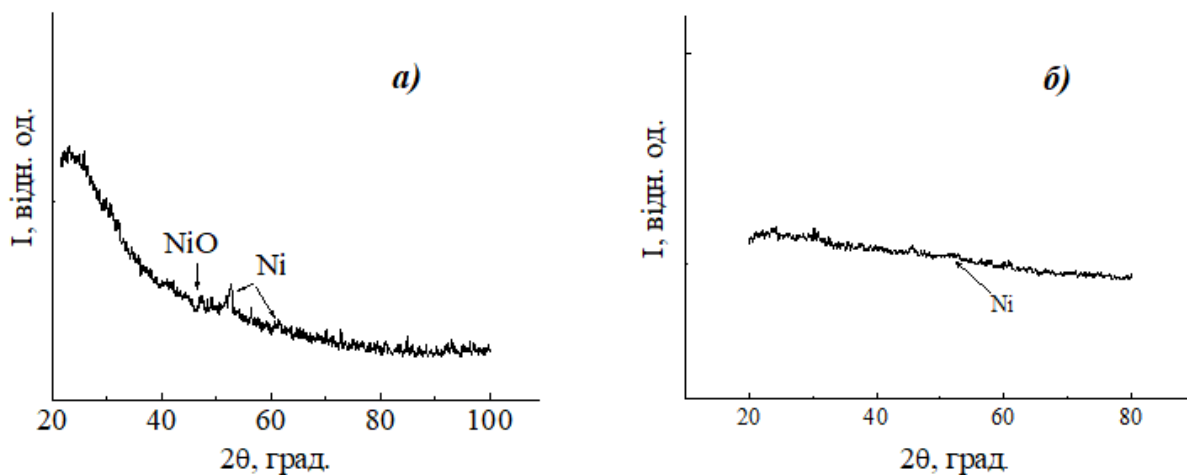


Рис. 2.2 Структурні характеристики вихідного матеріалу (а), та модифікованого (б).

## 2.3 Виготовлення об'ємних зразків вуглецевих нанотрубок.

При виготовленні об'ємних зразків, використовують зв'язуючу речовину, в якості зв'язуючої речовини виступає полівінілацетат. Виготовлення об'ємних зразків можливе і без застосування зв'язуючої речовини, що значно спрощує процес [18].

Виготовлення об'ємних зразків відбувається в декілька етапів:



1. Зважування порошку вуглецевих нанотрубок в кількості 100 мг.
2. Методом холодного пресування матеріал пресується в зразок, при тиску 50 гПа.
3. Відбувається зняття показників характеристик зразка – довжина, ширина, висота, маса, густина.

#### 2.4 Вимірювання магнітоопору об'ємних зразків вуглецевих нанотрубок.

Магнітоопір вуглецевих нанотрубок вимірюють за допомогою пристрою, схематичне зображення якого проілюстровано на рис. 2.3

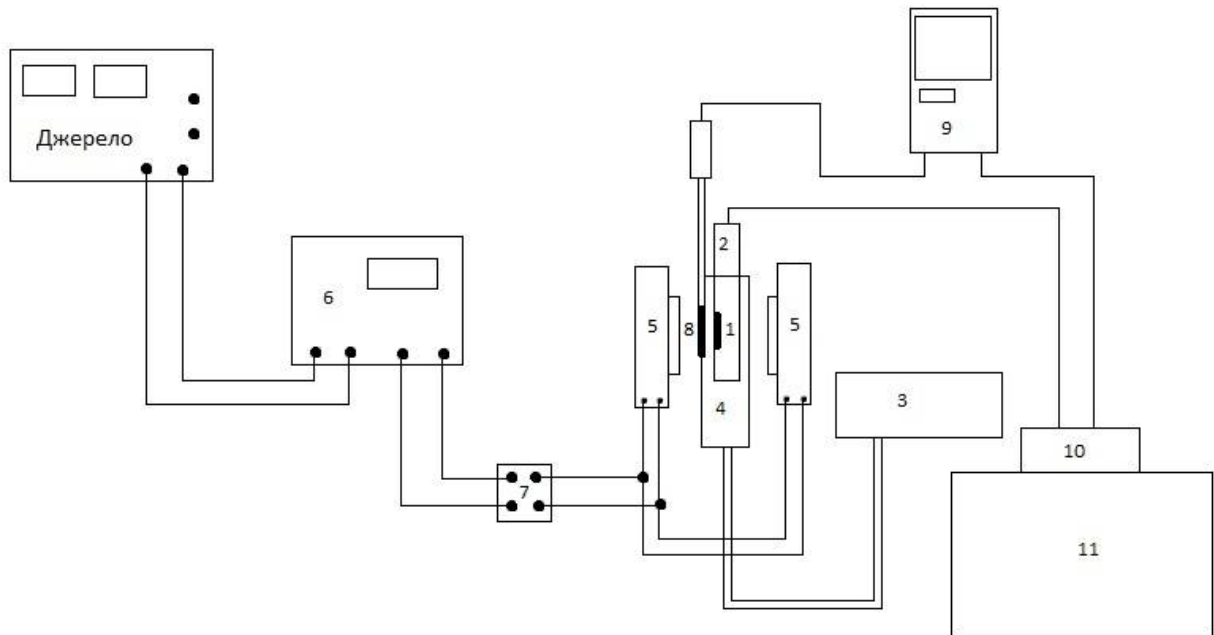


Рис. 2.3 Блок – схема установки для вимірювання магнітоопору.

Досліджуваний зразок (1) прикріплений до контактної пластини, разом з термопарою і з'єднувальними провідниками розташовується в металевому штоці (2). Ємність з рідким азотом (3), підтримує температуру штока на рівні 77К. Зразок закріплений на штоці розташований в кюветі (4), у яку по трубці подається рідкий азот. Кювета зі зразком розміщена між полюсами електромагніту (5). Управління магнітним полем здійснюється за допомогою

блоку (6). Під час вимірювань магнітне поле поступово змінюється від нуля до максимального значення (1,4~1,7 Тл) після чого знову зменшується до нуля. Перемикачем (7) здійснюється зміна полярності магнітного поля. Поряд зі зразком розташований датчик магнітної індукції (8), що з'єднаний з теслометром FH54 (9). Падіння напруг на зразку подаються на аналого-цифровий перетворювач (10), який, в свою чергу, підключений до комп'ютера (11). За отриманими даними обраховуються значення опору та магнітоопору, також паралельно фіксується значення магнітної індукції та температури.

Магнітоопір розглядають як відносну зміну електроопору в магнітному полі в порівнянні з електроопором речовини в нульовому магнітному полі [13]:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)} \quad (1.7)$$

де  $R(H)$  - електроопір у магнітному полі напруженістю  $H$ ,  $R(0)$  - електроопір у відсутності магнітного поля.

### **3. Експериментальні результати та їх обговорення**

#### **3.1 Електроопір об'ємних зразків одностінних вуглецевих нанотрубок.**

Отримана температурна залежність питомого опору вихідних ОВНТ представлена на рис. 3.1.

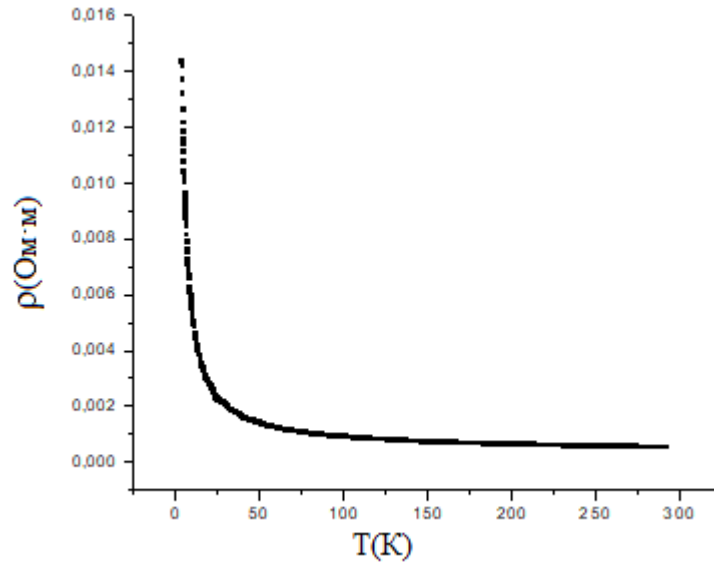


Рис 3.2 Температурна залежність питомого опору вихідних ОВНТ.

Графік залежності електричної провідності вихідних ОВНТ від температури має такий вигляд:

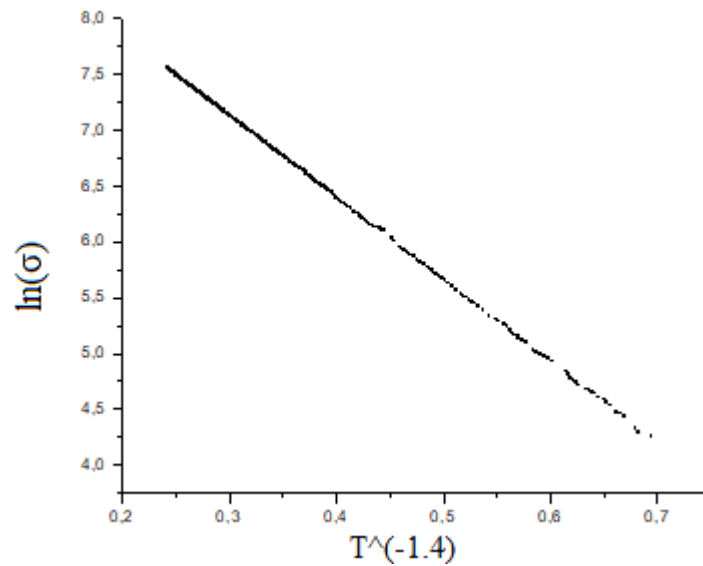


Рис. 3.3 Температурна залежність провідності вхідних ОВНТ.

Як видно з графіку для даного зразка реалізований механізм стрибкової провідності зі змінною довжиною стрибків, що узгоджується з відповідною формулою(1.8):

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(-\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{d}}\right) \quad (1.8)$$

де  $d$  - розмірність системи,  $\sigma_0 T_0$  - const.

Температурна залежність питомого опору модифікованих ОВНТ виглядає наступним чином:

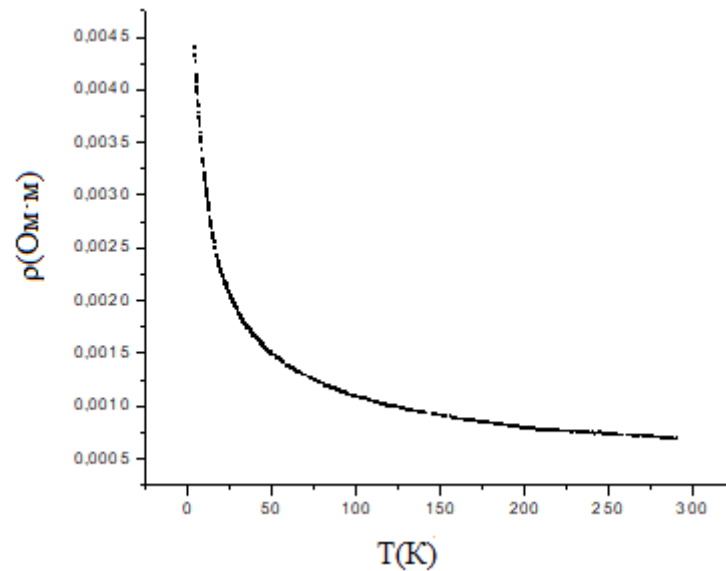


Рис. 3.1.4 Температурна залежність питомого опору модифікованих ОВНТ.

Графік залежності електричної провідності модифікованих ОВНТ від температури:

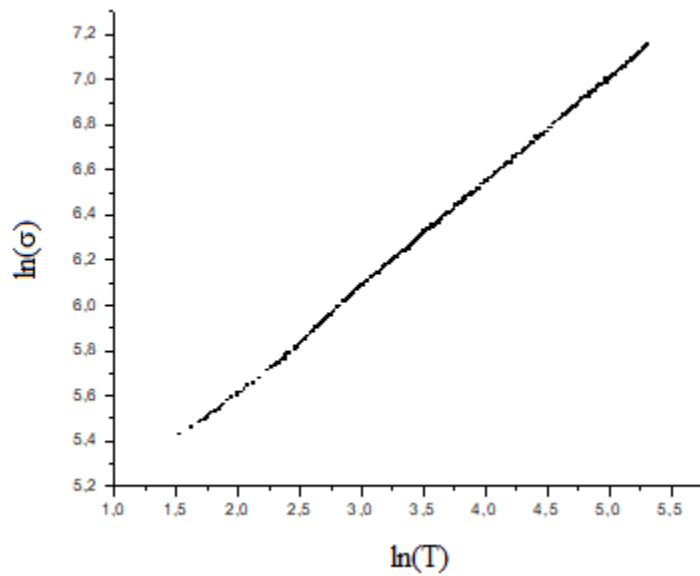


Рис. 3.1.5 Температурна залежність провідності модифікованих ОВНТ.

Модифікація ОВНТ кобальтвмісними комплексами істотно вплинула на характер температурної залежності питомого опору цих зразків, про що свідчить і температурна залежність провідності. Механізм провідності модифікованої структури добре описується в термінах степеневого температурного закону(1.9), що характерно для теорії одновимірної рідини Люттингера:

$$\rho(T) = a T^{-\beta}, \beta = \frac{g + \frac{1}{g} - 2}{8} \quad (1.9)$$

де  $g$  - Латінгерівський параметр, який характеризує міру взаємодії носіїв заряду в системі,  $a$  і  $\beta$  - const.

### 3.2 Магнітоопір об'ємних зразків одностінних вуглецевих нанотрубок.

Графік залежності магнітоопору для вхідних ОВНТ зображено на рис 3.6

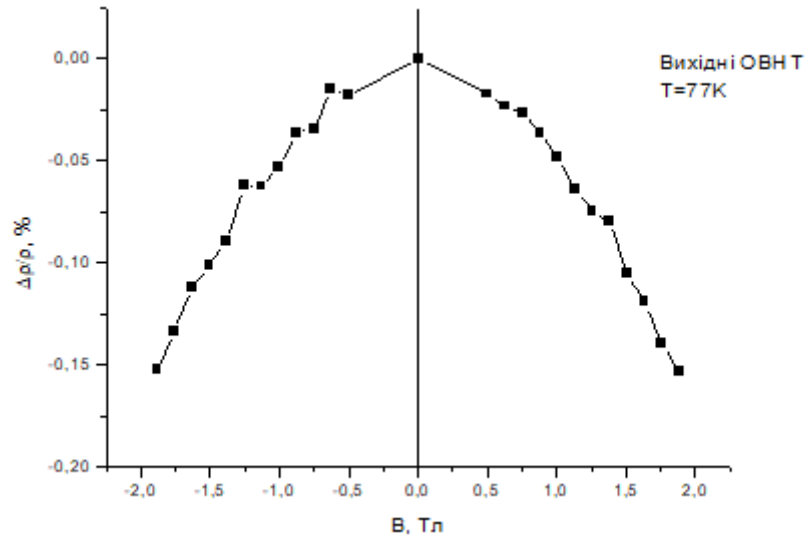


Рис 3.6 Залежність магнітоопору для вхідних ОВНТ при T=77К.

Для кімнатної температури залежність магнітоопору вхідних ОВНТ матиме наступний вигляд:

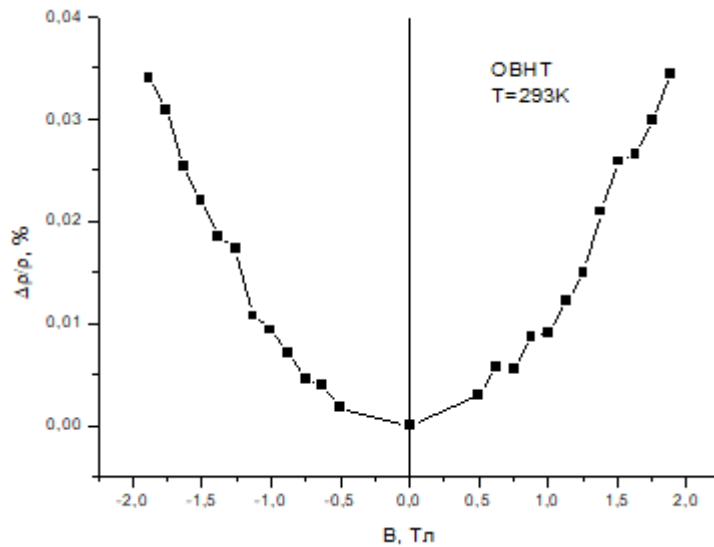


Рис 3.7 Залежність магнітоопору для вхідних ОВНТ при T=293К.

При зниженні температури знак опору змінюється на від'ємний. Для стрибкового механізму провідності магнітоопір квадратичний за полем при низких температурах.

Для модифікованого зразку залежність магнітоопору буде мати наступний вигляд:

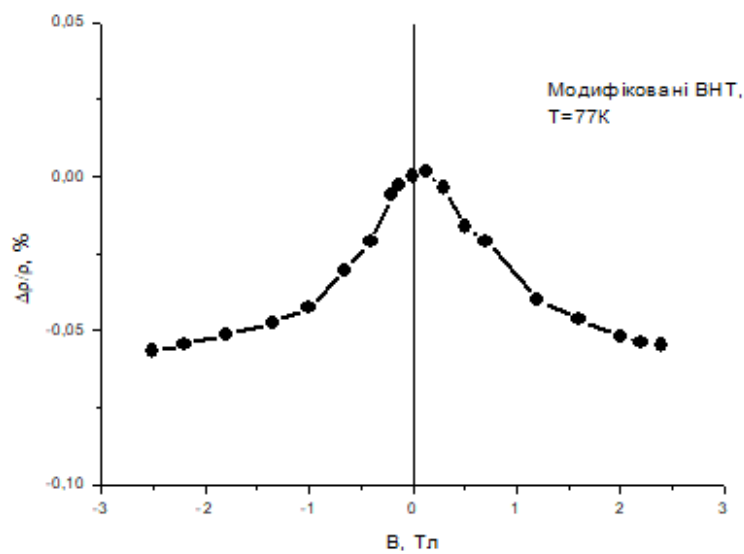


Рис. 3.8 Залежність магнітоопору для модифікованих ОВНТ при T=77K.

Для кімнатної температури залежність магнітоопору вхідних ОВНТ

матиме наступний

вигляд:

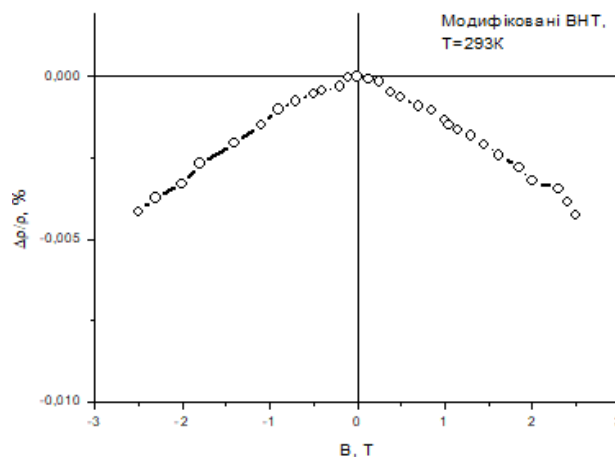


Рис 3.9. Залежність магнітоопору для модифікованих ОВНТ при T=293К.

Залежність провідності від температури для одновимірного випадку, з урахуванням добавки за рахунок ефекту слабкої локалізації [16]:

$$\sigma(0, T) = \sigma_0 - \frac{2e^2 L_\phi}{\hbar L} \quad (2.0)$$

де  $\sigma_0$  - залишкова провідність,  $L$  - довжина нанотрубки,  $L_\phi$  - відстань, на якій зберігається когерентність електронних хвиль.

Вираз для провідності в магнітному полі:

$$\sigma(B) = \sigma(0, T) - \frac{2e^2}{\hbar L} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{L_\phi^2} + \frac{e^2 B^2 \omega^2}{3\hbar^2}}} \quad (2.1)$$

де  $\omega$  - діаметр нанотрубки,  $\sigma(0, T)$  - провідність в нульовому магнітному полі при температурі  $T$ .

Формула для відносної провідності в магнітному полі має вигляд [16]:

$$\frac{\sigma(B, T) - \sigma(0, T)}{\sigma(0, T)} = \frac{2e^2}{\sigma_0 \hbar L - 2e^2 L_\phi} \times \left( L_\phi - \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{L_\phi^2} + \frac{e^2 B^2 \omega^2}{3\hbar^2}}} \right) \quad (2.2)$$

За формулою (2.2) була розрахована відносна провідність в магнітному полі, значення діаметру ВНТ ( $\sim 1$  нм) та довжини ВНТ ( $\sim 50$  нм) обиралися за даними електронної мікроскопії. Як підгоночні параметри використовувалися  $\sigma(0, T)$  та  $L_\phi$ .



Результати розрахунків наведено на рис 3.10

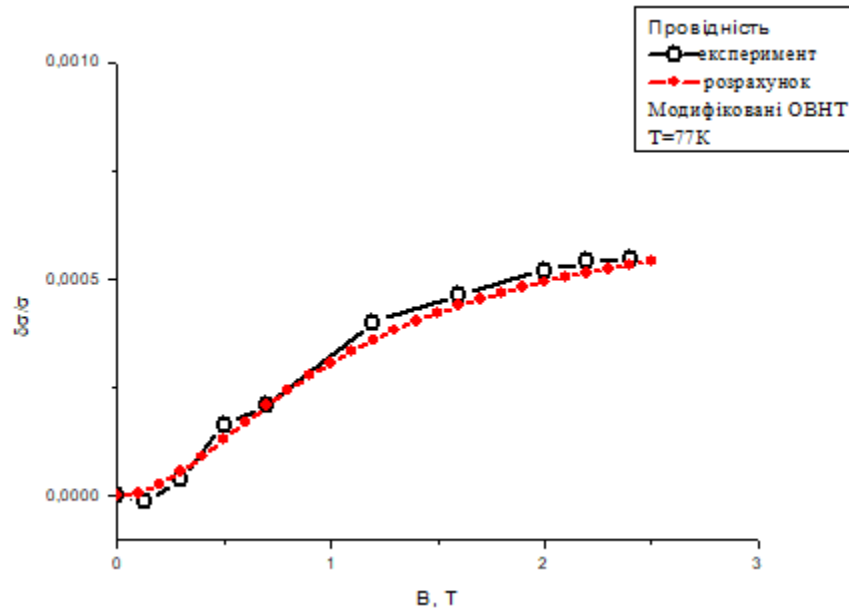


Рис. 3.10 Експериментальні та розраховані відносні провідності для модифікованих ОВНТ.

Як показали розрахунки, найкраще співпадіння з експериментальною залежністю спостерігається при  $\sigma(0, T) = 10 \text{ См}$  та  $L\varphi = 500 \text{ нм}$ . Таким чином, умова  $L\varphi \gg w$  виконується.

Провідність латінгерівської рідини для модифікованих одностінних нанотрубок розглядаємо як випадок одновимірного провідника, носії заряду рухаються в одновимірній системі.

## Висновки

Проведені експериментальні дослідження і розрахунки дозволяють зробити наступні висновки:

1) Для об'ємних зразків одностінних вуглецевих нанотрубок основним механізмом провідності є стрибова провідність із змінною довжиною стрибка для випадку трьохвимірних систем. Такий механізм провідності є характерним для неупорядкованих графітових матеріалів, а також для матів та джгутів одностінних вуглецевих нанотрубок

2) Модифікація одностінних вуглецевих нанотрубок кобальт-вмісними комплексами приводить до зміни їх механізмів провідності.

3) Провідність об'ємних зразків модифікованих одностінних вуглецевих нанотрубок описується в рамках моделі сильно взаємодіючої Латінгерівської рідини, характерної для індивідуальних одностінних вуглецевих нанотрубок. Така зміна механізмів провідності об'ємних зразків одностінних вуглецевих нанотрубок може бути пояснена створенням на поверхні нанотрубок невеликого від'ємного заряду внаслідок їх поверхневої модифікації.

### Список використаної літератури

1. Елецкий А.В., Смирнов Б.М., УФН 163(2) 33 (1993), 165 977 (1995)
2. Kratschmer W. 347 354 (1990)
3. Смоллі Р.Є., УФН (1998)
4. Керл Р.Ф., УФН (1998)
5. Харрис П., Вуглецеві нанотрубки і близькі до них структури. Нові матеріали 20 століття, Пер. з англ.; під ред. і з доп. Л.А. Чернозатонського - М.: Техносфера, с.336, (2003)
6. Елецкий А.В., Вуглецеві нанотрубки і їх емісійні властивості, Успіхи фіз. Наук, Т.172 №4, ст401-498, (2002)
7. Iijima S, Nature, 354 56 (1991)
8. Kroto H. W., Heath J. R. et al. Nature, 318, p162-163 (1985)
9. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Eklund P.C., Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes, (1996)
10. Saito R., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S., Physical Properties of Carbon Nanotubes, (1998)
12. А. В. Елецкий Углеродные нанотрубки (1997)
13. І. Г. Мірзоев Транспортні властивості провідних наносистем
14. Mohammed R. Sakr, Xuan P.A. One-dimensional Weak Localization of Electrons in a Single InAs Nanowire
15. Eric D. Black Weak Localization (2006)

16. T.A. Len1, I.V. Ovsiienko1, L.Yu. Matzui Magnetoresistance of Modified Carbon Nanotubes
17. Vovchenko L.L., L.Yu. Matzuy, M. I. Zakharenko, Semen'ko M.P., Brusilivets A. I. Thermal stability of nanocomposite materials graphite-cobalt (2004)
18. Раков Е.Г., Методи отримання вуглецевих нанотрубок, журнал Неорганічної хімії. (1999)
19. Гатиятов Р.Г., Бородін П.А., Бухарев А.А., Бізяев Д.А., Магнітомеханічні ефекти і магнітоопір Нікелієвих наноструктур, с.259-260, (2005)