

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна  
Кафедра фізики низьких температур

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з науково-педагогічної  
роботи



2021 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Процеси переносу та методи їх дослідження  
(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
галузь знань 10 природничі науки  
(шифр, назва галузі)

спеціальність 104 Фізика та астрономія  
(шифр, назва спеціальності)

освітня програма «Фізика»  
спеціалізація \_\_\_\_\_  
(шифр, назва)

вид дисципліни нормативна

факультет фізичний

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

«31» серпня 2021 року, протокол № 7.

РОЗРОБНИК ПРОГРАМИ:

Ревякіна Марина Георгіївна, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики низьких температур.

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики низьких температур

Протокол від «29» червня 2021 року № 17.

Завідувач кафедри фізики низьких температур



Валерій ШКЛОВСЬКИЙ

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету

Протокол від «31» серпня 2021 року № 1

Голова методичної комісії фізичного факультету

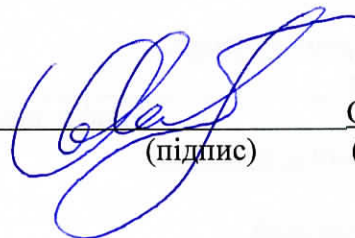


Микола МАКАРОВСЬКИЙ

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Гарант ОП



Олег ЛАЗОРЕНКО

(підпис)

(ім'я та прізвище)

## ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «Процеси переносу та методи їх дослідження» укладена відповідно до освітньої програми «Фізика» підготовки фахівців першого (бакалаврського) рівня вищої освіти (назва рівня вищої освіти, освітньо-кваліфікаційного рівня) спеціальності 104 Фізика та астрономія.

### 1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни «Процеси переносу та методи їх дослідження»: є надання студентам базових знань щодо фізичних основ процесів переносу тепла в металах, а також ознайомлення їх з основними положеннями кінетики квазічастинок в твердих тілах і методів їх експериментального дослідження.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни є послідовне викладення теплофізичних властивостей металів, детальний огляд експериментального обладнання фізичної лабораторії та комплексу знань, які дозволяють використовувати матеріали у практиці і застосування їх при розробці і проектуванні приладів і устаткування придатного для роботи в області низьких температур.

Сформувати навички самостійного навчання: вміти відшукувати потрібну інформацію з теплофізики і методів її дослідження в друкованих та електронних літературних джерелах, аналізувати, систематизувати, розуміти, тлумачити та запам'ятовувати їх, вести та самостійно доповнювати конспекти лекцій, опрацьовувати навчальну літературу, здійснювати самоконтроль якості засвоєння теоретичних знань з використанням тестів.

1.3. Кількість кредитів 4

1.4. Загальна кількість годин 120

| 1.5. Характеристика навчальної дисципліни |                                     |
|---|-------------------------------------|
| Нормативна / за вибором                   |                                     |
| Денна форма навчання                      | Заочна (дистанційна) форма навчання |
| Рік підготовки                            |                                     |
| 4-й                                       | -й                                  |
| Семестр                                   |                                     |
| 8-й                                       | -й                                  |
| Лекції                                    |                                     |
| 26 год.                                   | год.                                |
| Практичні, семінарські заняття            |                                     |
| 26 год.                                   | год.                                |
| Лабораторні заняття                       |                                     |
| год.                                      | год.                                |
| Самостійна робота                         |                                     |
| 68 год.                                   | год.                                |
| Індивідуальні завдання                    |                                     |
| 2 контрольні роботи                       |                                     |

1.6. Заплановані результати навчання: обсяг відомостей у запропонованій галузі знань, які дозволять студентам виконати кваліфікаційні роботи і у подальшому застосувати їх у науковій і викладацькій діяльності. Сформувати у студентів основні уявлення про процеси переносу тепла і заряду в металах, засоби їх експериментального вивчення за допомогою апаратури реєстрації слабких сигналів на фоні шуму у практиці фізичної лабораторії і орієнтуватись в існуючому устаткуванні для реалізації цих засобів

## 2. Тематичний план навчальної дисципліни

### Розділ 1. Явища переносу у металах

#### Тема 1. Огляд електричних і теплових властивостей металів.

Зміст. Загальні уявлення і визначення про процеси переносу заряду і тепла в металах. Теплові властивості. Квантовий осцилятор. Модель Ейнштейна. Модель Дебая.

#### Тема 2. Електронна теплоємність

Зміст. Класичний і квантовий підхід. Густина електронних станів. Електронна і решіточна теплоємності.

Тема 3. Експериментальні методи досліджень теплоємності при низьких температурах.

Зміст. Калориметри. Методи адіабатизації.

#### Тема 4. Коливання в атомних ланцюжках

Зміст. Коливання в одновимірному ланцюжку однакових атомів. Коливання в одновимірному ланцюжку атомів двох сортів. Функції розподілу фононів. Акустичні і оптичні гілки спектру.

#### Тема 5. Теплове розширення твердих тіл.

Зміст. Основні визначення. Двоатомна модель і теплове розширення. Ангармонізм. Анізотропія теплового розширення. Від'ємний КЛТР.

#### Тема 6. Закон Грюнайзена та методи вимірювання КЛТР.

Зміст. Основні термодинамічні співвідношення. Внесок електронів провідності у КЛТР. Магнітна складова КЛТР. Загальні відомості про дилатометри. Механічні і оптико-механічні методи. Оптичні методи. Рентгенівські методи. Радіочастотні методи: а) індуктивні; б) ємнісні. Прицезійна дилатометрія.

#### Тема 7. Теплопровідність твердих тіл.

Зміст. Формальний опис теплопровідності. Кінетичне рівняння Дебая. Теплопровідність решітки. Нормальні процеси. Процеси перекиду ( $U$ -процеси).

#### Тема 8. Електронна теплопровідність.

Зміст. Переніс тепла електронами. Закон Відемана-Франца. Число Лоренца. Теплопровідність чистих і «забруднених» металів. Теплопровідність надпровідників. Сплави – тверді розчини. Експериментальні методи визначення теплопровідності.

Стационарні методи. Одновісний і радіальний методи. Нестационарні методи. Імпульсні методи.

Розділ 2. Методи досліджень процесів переносу і надчутливі методи досліджень.

Тема 1. Термодинаміка і шумові характеристики вимірювальних приладів

Зміст. Теорема Котельнікова. Різні види шумів.

Тема 2. Детектори електромагнітного випромінювання (болометри)

Зміст. Фізичні основи побудови болометрів і їх практична реалізація. Надпровідні болометри.

Тема 3. Електронні мікро- і нановольтметри сталого струму

Зміст. Блок-схема мікро- і нановольтметрів сталого струму. АЦП сигналів.

Тема 4. Фотоелектричні, фазочутливі і селективні вольтметри.

Зміст. Фотоелементи. Фотоелектричні підсилювачі. Модуляційний метод вимірювань слабких сигналів. Синхронне детектування сигналів.

Тема 5. Мінімізація електромагнітних завад при використанні чутливої вимірювальної апаратури.

Зміст. Екранування, заземлення, раціональний монтаж апаратури. Кріостати для надчутливих вимірювань. Електричні вимірювання. Магнітні вимірювання. Теплофізичні вимірювання. Оптичні і рентгенівські вимірювання.

Тема 6. Фізичні основи роботи квантових інтерферометрів.

Зміст. Уявлення про слабку надпровідність. Конструктивні особливості реалізації слабких зв'язків. Фізичні процеси у двоконтактному і одноконтактному (радіочастотному) інтерферометрах. Вольт-амперні характеристики інтерферометра.

Тема 7. Технічна реалізація магнітометрів

Зміст. Блок-схеми пристроїв, за допомогою яких можливо спостерігати вольт-амперні характеристики двоконтактних і одноконтактних чутливих елементів магнітометрів. Вольтметри і амперметри на базі квантових магнітометрів.

Тема 8. Скануюча мікроскопія.

Зміст. Загальні відомості про сучасні методи дослідження наноструктур. Тунельні скануючі мікроскопи. Магніточутливі скануючі мікроскопи. Атомно-силові мікроскопи.

Тема 10. Загальні уявлення про квантову метрологію

Зміст. Переваги стандартів системи вимірювань, яка базується на квантових явищах. Використання нестационарного ефекту Джозефсона для визначення фундаментального співвідношення у фізиці  $e/h$ . Нестационарний ефект Джозефсона як еталон напруги.

Тема 11. Квантовий еталон електричного опору

Зміст. Квантовий ефект Холла і його використання в якості еталону опору.

### 3. Структура навчальної дисципліни

| Назви розділів і тем                              | Кількість годин |              |    |      |      |       |              |              |    |      |      |       |
|---|-----------------|--------------|----|------|------|-------|--------------|--------------|----|------|------|-------|
|   | денна форма     |              |    |      |      |       | заочна форма |              |    |      |      |       |
|   | усього          | у тому числі |    |      |      |       | усього       | у тому числі |    |      |      |       |
|   |                 | л            | с. | лаб. | інд. | с. р. |              | л            | п  | лаб. | інд. | с. р. |
| 1   | 2               | 3            | 4  | 5    | 6    | 7     | 8            | 9            | 10 | 11   | 12   | 13    |
| <b>Розділ 1. Фізичні основи процесів переносу</b> |                 |              |    |      |      |       |              |              |    |      |      |       |
| Тема 1.   | 7               | 1            |    |      |      | 6     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 2.   | 8               | 2            |    |      |      | 6     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 3.   | 5               | 1            | 4  |      |      |       |              |              |    |      |      |       |
| Тема 4.   | 8               | 2            |    |      |      | 6     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 5.   | 5               | 1            | 4  |      |      |       |              |              |    |      |      |       |
| Тема 6  | 8               | 2            |    |      |      | 6     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 7  | 5               | 1            | 4  |      |      |       |              |              |    |      |      |       |
| Тема 8  | 8               | 2            |    |      |      | 6     |              |              |    |      |      |       |
| Разом за розділом 1                               | 54              | 12           | 12 |      |      | 30    |              |              |    |      |      |       |
|   |                 |              |    |      |      |       |              |              |    |      |      |       |
| Тема 1.   | 8               | 1            |    |      |      | 7     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 2.   | 4               | 2            | 2  |      |      |       |              |              |    |      |      |       |
| Тема 3.   | 8               | 1            |    |      |      | 7     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 4.   | 6               | 2            | 4  |      |      |       |              |              |    |      |      |       |
| Тема 5.   | 8               | 1            |    |      |      | 7     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 6.   | 6               | 2            | 4  |      |      |       |              |              |    |      |      |       |
| Тема 7  | 8               | 1            |    |      |      | 7     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 8  | 3               | 1            | 2  |      |      |       |              |              |    |      |      |       |
| Тема 9  | 5               | 1            |    |      |      | 4     |              |              |    |      |      |       |
| Тема 10   | 3               | 1            | 2  |      |      |       |              |              |    |      |      |       |
| Тема 11   | 7               | 1            |    |      |      | 6     |              |              |    |      |      |       |
| Разом за розділом 2                               | 66              | 14           | 14 |      |      | 38    |              |              |    |      |      |       |
| <b>Усього годин</b>                               | 120             | 26           | 26 |      |      | 68    |              |              |    |      |      |       |

### 4. Теми семінарських занять

| № з/п | Назва теми   | Кількість годин |
|-------|--|-----------------|
| 1     | Квантовомеханічні уявлення про процеси переносу                                | 4               |
| 2     | Конструкція адіабатичних калориметрів  | 4               |
| 3     | Особливості стаціонарних і нестаціонарних методів вимірювання теплопровідності | 4               |
| 4     | Ділатометри  | 4               |
| 5     | Сучасна мікроскопія твердого тіла  | 4               |
| 6     | Квантова метрологія  | 6               |
|       | Разом  | 26              |

### 5. Завдання для самостійної роботи

| № з/п | Види, зміст самостійної роботи  | Кількість годин |
|-------|---|-----------------|
| 1     | Сформулювати утруднення при описі явищ переносу у класичній фізиці. Квантовомеханічні уявлення. | 5               |
| 2     | Дослідити роль явищ переносу у фізиці низьких температур  | 5               |
| 3     | Розглянути стаціонарні і нестаціонарні методи вимірювань теплопровідності                       | 6               |
| 4     | Оглянути сучасні надчутливі дилатометри   | 5               |
| 5     | Ознайомитися з приладами на основі квантової інтерферометрії                                    | 5               |
| 6     | Розглянути електротехнічні аспекти вимірювань явищ переносу                                     | 3               |
| 7     | Систематизувати вимірювальні прилади в діапазоні нанометрів.                                    | 3               |
| 8     | Підготуватися до контрольної роботи   | 10              |
| 9     | Вивчити квантові еталони фізичних величин у сучасній фізиці                                     | 3               |
| 10    | Ознайомитися з базовими явищами сучасної квантової метрології                                   | 5               |
| 11    | Розглянути схемотехніку вимірювань на змінному струмі   | 4               |
| 12    | Навести конструктивні особливості низькотемпературних калориметрів                              | 4               |
| 13    | Підготуватися до контрольної роботи   | 10              |
|       | Разом   | 68              |

### 6. Індивідуальні завдання

**7. Методи контролю:** Поточний контроль – опитування під час лекцій, семінарські заняття, контрольна робота, підсумковий контроль – залік.

### 8. Схема нарахування балів

підсумкового семестрового контролю при проведенні семестрового екзамену

| Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання |  |  |           | Екзамен   | Сума       |
|--|--|--|-----------|-----------|------------|
| Розділ 1   | Контрольні роботи, передбачені навчальним планом | Курсова робота, індивідуальне завдання | Разом     |           |            |
| T1-T11   |  |  |           |           |            |
| <b>40</b>  | <b>10</b>  | <b>10</b>                              | <b>60</b> | <b>40</b> | <b>100</b> |

T1, T2 ... – теми розділів.

### Критерій оцінювання

90-100: вчасно і згідно з вимогами виконані завдання самостійної роботи; під час опитувань і семінарських занять продемонстровано ґрунтовні знання з предмету і вміння самостійно мислити і опрацьовувати інформацію; контрольна робота виконана в повній мірі і демонструє якісні практичні навички і високий рівень теоретичних знань; залікова робота виконана в повній мірі, містить ґрунтовні відповіді і правильні розв'язки.

70-89: вчасно і згідно з вимогами виконані завдання самостійної роботи; під час опитувань продемонстровано якісні знання в предмету і вміння опрацьовувати інформацію; під час

опитування, в контрольній і заліковій роботах дано відповіді, що містять незначні помилки.

50-69: контрольна робота виконана зі значними помилками, які демонструють задовільний рівень володіння матеріалом курсу; обмежені відповіді в заліковій роботі, які містять суттєві помилки у висвітленні частини або всіх питань.

1-49: низький рівень підготовки і виконання завдань самостійної роботи; відсутність зрозумілої відповіді і розв'язків на усі питання контрольної і залікової робіт.

### Шкала оцінювання

| Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру | Оцінка                              |                                  |
|--|-------------------------------------|----------------------------------|
|  | для чотирирівневої шкали оцінювання | для дворівневої шкали оцінювання |
| 90 – 100   | відмінно                            | зараховано                       |
| 70-89  | добре                               |                                  |
| 50-69  | задовільно                          |                                  |
| 1-49   | незадовільно                        | не зараховано                    |

## 9. Рекомендована література

### Базова література

1. Ашкрофт Н. Физика твердого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мермин – М.: Мир, 1979. – Том 1. – 399 с., Том 2. – 422 с.
2. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель – М.: Наука, 1978. – 696 с.
3. Брандт Н.Б. Экспериментальные методы исследования энергетических спектров электронов и фононов в металлах / Н. Б. Брандт, С. М. Чудинов – М.: МГУ, 1983. – 405 с.
4. Киттель Ч. Элементарная физика твердого тела / Ч. Киттель – М.: Наука, 1965. – 366 с.
5. Займан Дж. Принципы теории твердого тела / Дж. Займан – М.: Мир, 1974. – 416 с.
6. Физика металлов – 1 / Под ред. Дж. Займана. – М.: Мир, 1972. – 464 с.
7. Блейкмор Дж. Физика твердого тела / Дж. Блейкмор – М.: Мир, 1988. – 608 с.
8. Каганов М.И. Квазичастицы / М. И. Каганов, И. М. Лифшиц – М.: Наука, 1976. – 80 с.
9. Каганов М. И. Электроны, фононы, магноны / М. И. Каганов – М.: Наука, 1979. – 191 с.
10. Л. И. Слабкий. Методы и приборы предельных измерений в экспериментальной физике. М.: Наука, 1973. – 272 с.
11. А.Спектор. Электрические измерения физических величин. Методы измерений. Л.: Энергоатомиздат. 1987. – 320 с.

### Допоміжна література

1. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел / С. И. Новикова – М.: Наука, 1974. – 214 с.
2. Перваков В. А. Теплофизические свойства металлов / В.А. Перваков – Х.: ХГУ, 1990. – 156 с.
3. Физика низких температур / Под ред. А. И. Шальникова. – М.: ИЛ, 1959. – 937 с.



4. Перваков В.А. Тепловое расширение твердых тел. Учебное пособие / В. А. Перваков – Х.: ХГУ, 2001. – 302 с.
5. А..Волков, Н. В. Заварицкий. Ф.Я. Надь. Электронные приборы на основе слабосвязанных сверхпроводников . М.: Советское радио, 1978. – 137 С.
6. Слабая сверхпроводимость. Квантовые интерферометры и их применение. (Сб. ст.), М.: Мир, 1980.
7. Квантовая метрология и фундаментальные константы. Сб. статей, пер. с англ., М.: Мир, 1981.
8. С8. С.И.Бондаренко, В.И.Шеремет. Применение сверхпроводимости в магнитных измерениях. Л.: Энергоатомиздат. 1982. – 131 с.
9. М. Букингем. Шумы в электронных приборах и системах. Пер. с англ. М.: Мир, 1986.
10. М.О.Оболенський, В.П.Лебедев, В.І.Білецький, А.А.Завгородній, В.В.Козинець. Практикум з фізики низьких температур. Частина 1. Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна. - 2008. - 132с.
11. Приборы и техника эксперимента . (Росія, періодичне видання)
12. Revue of scientific instruments. (США, періодичне видання)

#### **10. Посилання на інформаційні ресурси в Інтернеті, відео-лекції, інше методичне забезпечення**

1. [http://www.vargin.mephi.ru/book\\_ph\\_tvteho.html](http://www.vargin.mephi.ru/book_ph_tvteho.html)
2. [http://www.vargin.mephi.ru/book\\_phys.html](http://www.vargin.mephi.ru/book_phys.html)
3. [http://vargin.mephi.ru/book/ph\\_rzn.html](http://vargin.mephi.ru/book/ph_rzn.html)