

ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР ім. Б.І. ВЕРКІНА  
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. директора  
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України



М.І. Глушук

«10» 09 2020 р.

ПРОГРАМА

навчальної дисципліни

Сучасна фізика низьких температур

(назва навчальної дисципліни)

з галузі знань «10 Природничі науки»  
за спеціальністю «104 Фізика та астрономія».

<i>Рівень вищої освіти</i>	<u>третій (освітньо-науковий)</u>
<i>Освітня програма</i>	<u>доктор філософії</u>
<i>Форма навчання</i>	<u>денна</u>
<i>Загальний обсяг у кредитах</i>	
<i>Європейської кредитної трансферно-накопичувальної системи:</i>	<u>4 кредити ЄКТС</u>

Харків - 2020

РОЗРОБЛЕНО ТА ВНЕСЕНО:

Фізико–технічним інститутом низьких температур ім. Б. І. Веркіна  
Національної академії наук України

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

доктор фіз.- мат. наук, ст. наук. співробітник В. А. Майданов,  
доктор фіз.- мат. наук, ст. наук. співробітник В. К. Чаговець.

Програма затверджена Вченою радою Фізико–технічного інституту низьких температур  
ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р., протокол № \_\_\_.

## 1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни
		денна форма навчання
Кількість кредитів – 4	Галузі знань: - «10 Природничі науки»	Обов'язковий
Загальна кількість годин – 120 (36 аудиторних)	Спеціальність: - «104 Фізика та астрономія»	
Тижневих годин для денної форми навчання аудиторних – 2 самостійної роботи здобувача – 8	Освітньо-науковий рівень: доктор філософії	<i>Лекції, годин</i>
		30
		<i>Семінари, годин</i>
		6
		<i>Самостійна робота, годин</i>
		84
		<i>Вид контролю</i>
		іспит

## 2. Мета та завдання навчальної дисципліни

**Мета:** ознайомити аспірантів з сучасним станом, проблемами і перспективами розвитку фізики низьких температур, а також сформувати у майбутнього науковця поняття про властивості низькотемпературних систем, надати інформацію. Освітньою ціллю курсу є формування вміння у аспірантів самостійно вибирати і обґрунтовувати свій вибір щодо оптимального методу дослідження властивостей конкретного об'єкта заданої природи у процесі виконання дисертаційних робіт. В результаті вивчення даного курсу аспірант повинен знати; пояснювати основні принципи та використовувати вивчені експериментальні методи досліджень у самостійній науковій роботі.

### Завдання:

- надати аспірантам інформацію про напрями досліджень і розробок в області низьких температур;
- ознайомити з сучасними методами отримання низьких і наднизьких температур, а також методами експериментального дослідження і аналізу властивостей низькотемпературних систем і явищ;
- навчити аспірантів застосовувати базові знання в галузі низьких температур до виконання конкретних науково-дослідних робіт зі спеціальності.

У результаті вивчення курсу аспірант повинен

### знати:

- основні поняття предмету, викладені у програмі курсу
- термінологію в галузі низьких температур;
- термодинамічні основи охолодження та зрідження реальних газів;
- основні положення теорії надплинності гелію Ландау;
- фізичні властивості криогенних рідин та особливості роботи з ними;

- властивості речовин при низьких температурах та основні методи їх дослідження;
- методи та елементи низькотемпературної термометрії;
- сучасні дослідження гідродинамічних та хвильових процесів в надплинному  $^4\text{He}$  та розчинах  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ ;
- принципи роботи сучасного кріогенного обладнання та елементи кріоелектроніки.
- фізичні основи конструювання кріогенного устаткування;

#### **вміти:**

- обґрунтовано вирішувати фізичні задачі в рамках своєї спеціальності, використовуючи різнобічні міждисциплінарні знання з низьких температур;
- використовувати довідкову і навчальну літературу в галузі низьких температур, знаходити інші необхідні джерела інформації і працювати з ними.
- пояснювати основні принципи та використовувати вивчені експериментальні методи у самостійній науковій роботі.

Внаслідок вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен бути здатним продемонструвати такі **програмні результати навчання** (згідно з освітньо-науковою програмою «ФІЗИКА»):

#### **знання:**

- 1) здобуття поглиблених знань і розумінь в фізиці та споріднених областях, включаючи методики проведення експериментів та/або теоретичних наукових досліджень (ПРН-1.1);
- 2) здатність продемонструвати поглиблені знання у вибраній спеціалізації (ПРН-1.2);
- 3) здатність ясно та ефективно описувати результати наукової роботи (ПРН-1.3);
- 4) здатність вести спеціалізовані наукові семінари та публікувати наукові статті в вітчизняних та закордонних наукових журналах (ПРН-1.4);
- 5) здатність робити огляд та пошук інформації в спеціалізованій літературі, використовуючи різноманітні ресурси: журнали, бази даних, он-лайн ресурси (ПРН-1.5);
- 6) здатність підготувати та успішно захистити дисертаційну роботу на основі індивідуальних досліджень (ПРН-1.6);
- 7) досягнення відповідних знань, розумінь та здатностей використання методів аналізу даних та статистики на найбільш сучасному рівні (ПРН-1.7).

#### **уміння:**

- 1) здійснювати пошук, аналізувати і критично оцінювати інформацію з різних джерел (ПРН-2.1);
- 2) самостійно планувати та виконувати експерименти, оцінювати отримані результати (ПРН-2.2);
- 3) обирати методи і моделювати явища та процеси різної складності при вирішенні фізичних задач з урахуванням спеціалізації в конкретних галузях фізики конденсованого стану (ПРН-2.3);
- 4) поєднувати теорію і практику, а також приймати рішення та виробляти стратегію діяльності для вирішення завдань спеціалізації з урахуванням загальнолюдських цінностей, суспільних, державних та виробничих інтересів (ПРН-2.4);
- 5) застосовувати знання і розуміння для розв'язування задач синтезу та аналізу елементів та систем, характерних обраній спеціалізації (ПРН-2.5);
- 6) ефективно працювати як індивідуально, так і у складі команди (ПРН-2.6);
- 7) застосовувати системний підхід, інтегруючи знання з інших дисциплін та враховуючи нетехнічні аспекти, під час розв'язання науково-дослідних завдань з обраної спеціалізації та проведення досліджень (ПРН-2.7);
- 8) аргументувати вибір методів розв'язування спеціалізованої задачі, критично оцінювати отримані результати та захищати прийняті рішення (ПРН-2.8);
- 9) підготувати запит на отримання фінансування, звітну документацію (ПРН-2.9).
- 10) формулювати науково і технічно значиму проблематику, володіти різними формами її публічної презентації (он-лайн презентації, публічні лекції, науково-популярні тексти тощо) (ПРН-2.10).

Здобути комунікативні навички та набути навичок працювати автономно і відповідально:

- 1) ефективно спілкуватись на професійному та соціальному рівнях, включаючи усну та письмову

комунікацію іноземною мовою (ПРН-3.1);

- 2) кваліфіковано представляти та обговорювати отримані результати та здійснювати трансфер набутих знань (ПРН-3.2).
- 3) здатність адаптуватись до нових умов та самостійно приймати рішення (ПРН-4.1);
- 4) здатність усвідомлювати необхідність навчання впродовж усього життя з метою поглиблення набутих та здобуття нових фахових знань (ПРН-4.2);
- 5) здатність відповідально ставитись до виконуваної роботи та досягати поставленої мети з дотриманням вимог професійної етики (ПРН-4.3);
- 6) здатність самовдосконалюватися, нести відповідальність за новизну наукових досліджень та прийняття експертних рішень (ПРН-4.4);
- 7) здатність демонструвати розуміння засад охорони праці, електробезпеки та їх застосування (ПРН-4.5).

Вивчення навчальної дисципліни передбачає формування та розвиток у аспірантів загальних та фахових **компетентностей**:

- ЗК-1 Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу;
- ЗК-2 Здатність проведення досліджень на відповідному рівні;
- ЗК-5 Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації;
- ЗК-8 Здатність бути критичним і самокритичним;
- ЗК-9 Здатність до практичного застосування знань;
- ЗК-10 Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми;
- ЗК-11 Здатність генерувати нові ідеї (креативність).
- ЗК-12 Здатність до наукового мислення, зокрема володіння загальнонауковими (філософськими) компетентностями, спрямованими на формування системного наукового світогляду, професійної етики та загального культурного кругозору.
- ЗК-13 Здатність дотримуватись морально-етичних правил поведінки, а також академічної доброчесності, характерних для учасників академічного середовища.
- ФК-1 Концептуальні та методологічні знання щодо історії розвитку та сучасного стану наукових досліджень з основних напрямів фізики.
- ФК-2 Поглибленні спеціалізовані знання з того напрямку сучасної фізики, який був обраний для проведення власного наукового дослідження, та розуміння сучасних фізичних теорій і методів, спроможність до їхнього аналізу та ефективного застосування в практиці наукової та науково-педагогічної діяльності і проведенні досліджень.
- ФК-4 Здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукових результатів, які створюють нові знання у фізиці і дотичних до неї міждисциплінарних напрямках і можуть бути опубліковані у провідних наукових виданнях з фізики та суміжних галузей.
- ФК-5 Знання і розуміння основ методології написання пропозицій на фінансування інноваційних комплексних проектів та управління ними. Здатність реалізовувати інноваційні комплексні проекти в сфері фізики та дотичні до неї міждисциплінарні проекти, лідерство під час їх реалізації.
- ФК-6 Здатність самовдосконалюватися, презентувати результати досліджень фахівцям і нефаківцям.
- ФК-7 Здатність до формулювання наукових задач та планування стратегій їхнього розв'язання з можливістю інтеграції знань з різних наукових сфер та застосуванням системного підходу в практичній діяльності.
- ФК-10 Здатність підготувати та успішно захистити дисертаційну роботу на основі узагальнення власних експериментальних або теоретичних досліджень з фізики.
- ФК-11 Здатність інтегрувати знання з інших дисциплін, застосовувати системний підхід та враховувати комплексні аспекти при розв'язанні проблемних завдань та проведенні наукових досліджень.
- ФК-12 Знати та вміти застосовувати фундаментальні знання з фізики конденсованого стану для аналізу явищ та процесів, які відбуваються в твердих тілах і рідинах, знати основні закономірності утворення структури твердих тіл та взаємозв'язок структури з фізичними властивостями твердих тіл, вміти використовувати основні принципи сучасної фізики конденсованого стану до виконання конкретних науково-дослідних робіт зі спеціальності.
- ФК-16 Знати основні ефекти і закони як класичної низькотемпературної, так і високотемпературної

надпровідності, методи дослідження надпровідників і надпровідних структур та вміти застосовувати їх практично у науці, техніці і промисловості.

ФК-18 Знати основні напрями досліджень і розробок в області низьких температур, сучасні методи отримання низьких і наднизьких температур, а також методи експериментального дослідження і аналізу властивостей низькотемпературних систем і явищ, термодинамічні основи охолодження та зрідження реальних газів, фізичні властивості криогенних рідин та особливості роботи з ними, властивості речовин при низьких температурах та основні методи їх дослідження, методи та елементи низькотемпературної термометрії. Вміти обґрунтовано вирішувати фізичні задачі в рамках своєї спеціальності, використовуючи різнобічні міждисциплінарні знання з фізики низьких температур.

### **Пререквізити**

Для вивчення курсу необхідні знання з молекулярної фізики, термодинаміки, квантової механіки, гідродинаміки, фізики твердого тіла.

### **Постреквізити**

Основні положення навчальної дисципліни мають застосовуватися при виконанні аспірантом власних наукових досліджень та інтерпретації їх результатів.

### **3. Анотація навчальної дисципліни**

Курс «Сучасна фізика низьких температур» є курсом зі спеціалізації, який узагальнює та систематизує знання аспірантів, отримані у інших курсах, а також знайомить з новими низькотемпературними системами і явищами, фізичними методами їх створення, дослідження властивостей в умовах низьких температур.

## 4. Структура навчальної дисципліни

### Тема 1. Вступ. Основні напрямки фізики низьких температур.

Історична довідка виникнення низьких температур. Основні розділи фізики і техніки низьких температур. Розвиток низьких температур в Україні і Харкові.

### Тема 2. Фізичні основи зрідження реальних газів.

Рівняння стану ідеального і реального газу. Рівняння Ван-Дер-Ваальса. Ефект Джоуля-Томсона. Адіабатичне розширення газу з здійсненням зовнішньої роботи.

### Тема 3. Кріогенні конструкції та аналіз теплоприпливів.

Рефрижератор компресійного типу. Зріджувачі Гемпсона, Лінде і Клода. Теплоприпливи по тепловому зв'язку, тепловому випромінюванню та залишковому газу

### Тема 4. Незвичайні властивості рідкого гелію.

Щільність і теплоємність рідкого гелію. Фазова діаграма рідкого гелію,  $\lambda$  - аномалія. Теплопровідність і в'язкість гелію. Експерименти Капіци та відкриття надплинності

### Тема 5. Основи теорії надплинності гелію Ландау. Хвильові процеси у надплинному гелії.

Основні ідеї теорії надплинності. Концепція квазічастинок і енергетичний спектр надплинного гелію. Дворідинна модель - нормальна і надплинна компоненти. Критична швидкість надплинності. Дворідинна гідродинаміка і акустичні моди. Методи збудження і фізична природа різних звуків.

### Тема 6. $^3\text{He}$ - Фермі-рідина. Розчини ізотопів гелію $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ .

Одержання  $^3\text{He}$ . Основи теорії фермі-рідини Ландау. Спостереження надплинності  $^3\text{He}$  при наднизьких температурах та властивості його надплинних фаз. Фазова діаграма розчинів  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ . Надплинність розчинів. Елементарні збудження та енергетичний спектр надплинних розчинів.

### Тема 7. Квантова турбулентність надплинного гелію.

Перехід від ламінарного до турбулентного потоку у рідкому гелії. Порівняння класичної та квантової турбулентності. Механізми дисипації турбулентних потоків. Методи експериментального дослідження турбулентного стану.

### Тема 8. Лазерне охолодження.

Лазерне охолодження атомних пучків. Зупинка атомів. Магнітна відкачка атомів.

### Тема 9. Гелієві кріостати для фізичних досліджень. Кріостати випаровування.

Кріостати випаровування з  $^4\text{He}$  одноразові та безперервної роботи. Градусна камера та кріостати випаровування з  $^3\text{He}$ . Застосування адсорбційних насосів.

### Тема 10. Рефрижератори розчинення $^3\text{He}$ в $^4\text{He}$ .

Фізичні основи методу та принципова схема рефрижератора розчинення. Конструктивні особливості камери розчинення та камери випаровування. Низькотемпературні теплообмінники. Види та приклади сучасних рефрижераторів розчинення.

### Тема 11. Експериментальні методи одержання наднизьких температур.

Метод адіабатичної кристалізації  $\text{He3}$ . Ентропійна діаграма  $^3\text{He}$ . Конструкції комірки Померанчука. Метод адіабатичного розмагнічування парамагнітної солі. Охолодження за допомогою адіабатичного ядерного розмагнічування. Сучасні рефрижератори ядерного розмагнічування.

### Тема 12. Термометрія низьких та наднизьких температур. Температурні шкали.

Фізичні основи температурних вимірювань та загальні положення термометрії. Температурні шкали. Термометри опору та їх різновидність.

### Тема 13. Основні первинні термометри.

Кристалізаційні термометри з  $\text{He3}$  за кривою плавлення. Газовий термометр. Шумовий термометр.

**Тема 14.** Загальні відомості про твердий гелій та його квантові властивості.  
Методи одержання твердого гелію. Фазові Р-Т діаграми твердого  $\text{He}^4$ ,  $\text{He}^3$ , та розчинів  $\text{He}^3$ - $\text{He}^4$ .  
Інтенсивність нульових коливань та параметр Де-Бура. Основи квантової теорії А. Андрєєва та І.Лифшиця.

**Тема 15** Квантова дифузія  $^3\text{He}$  в твердих розчинах  $^3\text{He}$  в  $^3\text{He}$ .  
Використання ядерного магнітного резонансу для спостереження квантової дифузії, основні фізичні механізми квантової дифузії. Аномально швидкий масо перенос при гомогенізації розшарованого розчину



## Загальна структура навчальної дисципліни

№	Назва теми	у тому числі			
		Усього	Лекції, годин	Семінар, годин.	Самостійна робота, годин
1.	Вступ. Основні напрямки фізики низьких температур.	6	2		4
2.	Фізичні основи зрідження реальних газів.	6	2		4
3.	Кріогенні конструкції та аналіз теплоприпливів.	6	2		4
4.	Незвичайні властивості рідкого гелію.	6	2		4
5.	Основи теорії надплинності гелію Ландау. Хвильові процеси у надплинному гелії.	6	2		4
6.	$^3\text{He}$ - Фермі-рідина. Розчини ізотопів гелію $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ .	6	2		4
7.	Квантова турбулентність надплинного гелію.	6	2		4
8.	Семінар «Квантові рідини та надплинність»	10		2	8
9.	Надплинність та бозе-ейнштейнівська конденсація. Лазерне охолодження.	6	2		4
10.	Гелієві кріостати для фізичних досліджень. Кріостати випаровування.	6	2		4
11.	Рефрижератори розчинення $^3\text{He}$ в $^4\text{He}$ .	6	2		4
12.	Експериментальні методи одержання наднизьких температур.	6	2		4
13.	Семінар «Фізичні методи одержання низьких та наднизьких температур»	10		2	8
14.	Термометрія низьких та наднизьких температур. Температурні шкали.	6	2		4
15.	Основні первинні термометри.	6	2		4
16.	Загальні відомості про твердий гелій та його квантові властивості.	6	2		4
17.	Квантова дифузія $^3\text{He}$ в твердих розчинах $^3\text{He}$ в $^4\text{He}$ .	6	2		4
18.	Семінар «Квантові кристали».	10		2	8
	Усього, годин	<b>120</b>	<b>30</b>	<b>6</b>	<b>84</b>

## Теми лекційних занять

№	Назва лекції	Кількість годин
1.	Вступ. Основні напрямки фізики низьких температур.	2
2.	Фізичні основи зрідження реальних газів.	2
3.	Кріогенні конструкції та аналіз теплоприпливів.	2
4.	Незвичайні властивості рідкого гелію.	2
5.	Основи теорії надплинності гелію Ландау. Хвильові процеси у надплинному гелії.	2
6.	$^3\text{He}$ - Фермі-рідина. Розчини ізотопів гелію $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ .	2
7.	Квантова турбулентність надплинного гелію.	2
8.	Надплинність та бозе-ейнштейнівська конденсація. Лазерне охолодження.	2
9.	Гелієві кріостати для фізичних досліджень. Кріостати випаровування.	2
10.	Рефрижераторі розчинення $^3\text{He}$ в $^4\text{He}$ .	2
11.	Експериментальні методи одержання наднизьких температур.	2
12.	Термометрія низьких та наднизьких температур. Температурні шкали.	2
13.	Основні первинні термометри.	2
14.	Загальні відомості про твердий гелій та його квантові властивості.	2
15.	Квантова дифузія $^3\text{He}$ в твердих розчинах $^3\text{He}$ в $^3\text{He}$ .	2
	<b>Разом</b>	<b>30</b>

## Теми семінарських занять

№	Назва теми	Кількість годин
1.	Квантові рідини та надплинність	2
2.	Фізичні методи одержання низьких та наднизьких температур	2
3.	Квантові кристали.	2
	<b>Разом</b>	<b>6</b>

## Самостійна робота

№	Назва теми	Кількість годин
1.	Основні напрямки фізики низьких температур.	4
2.	Фізичні основи зрідження реальних газів.	4
3.	Кріогенні конструкції та аналіз теплоприпливів.	4
4.	Незвичайні властивості рідкого гелію.	4
5.	Основи теорії надплинності гелію Ландау. Хвильові процеси у надплинному гелії.	4
6.	$^3\text{He}$ - Фермі-рідина. Розчини ізотопів гелію $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ .	4

7.	Квантова турбулентність надплинного гелію.	4
8.	Підготовка до семінарського заняття «Квантові рідини та надплинність»	8
9.	Надплинність та бозе-ейнштейнівська конденсація. Лазерне охолодження.	4
10.	Гелієві кріостати для фізичних досліджень. Кріостати випаровування.	4
11.	Рефрижераторі розчинення $^3\text{He}$ в $^4\text{He}$ .	4
12.	Експериментальні методи одержання наднизьких температур.	4
13.	Підготовка до семінарського заняття «Фізичні методи одержання низьких та наднизьких температур».	8
14.	Термометрія низьких та наднизьких температур. Температурні шкали.	4
15.	Основні первинні термометри.	4
16.	Загальні відомості про твердий гелій та його квантові властивості.	4
17.	Квантова дифузія $^3\text{He}$ в твердих розчинах $^3\text{He}$ в $^3\text{He}$ .	4
18.	Підготовка до семінарського заняття . «Квантові кристали».	8
	<b>Разом</b>	<b>84</b>

## 5. Методи навчання

**МН1 – Лекції.** Лекційний матеріал охоплює центральні та найбільш складні проблеми сучасної фізики низьких температур. Простіші питання, що добре висвітлені в літературі, виносяться на самостійне вивчення.

**МН2 – Семінарські заняття.** Семінарські заняття передбачають самостійне вивчення аспірантами за завданням викладача окремих питань і тем лекційного курсу з наочним оформленням матеріалу у вигляді реферату, доповіді, повідомлення тощо. Семінарські заняття дають змогу викладачам ближче познайомитися з аспірантами, донести до них необхідну інформацію, а відтак перевірити, як вони засвоїли її, як користуються нею в навчальній і науковій роботі. Викладач має змогу враховувати теоретичну і практичну підготовку аспіранта, його індивідуальні особливості і здібності, що зумовлює підвищення рівня підготовки кожного аспіранта.

**МН4 – Самостійна робота.** Робота здобувачів носить в основному самостійний характер. Вони самостійно роблять пошук наукової літератури і опрацьовують її, консультуючись з викладачем. Таким чином вони удосконалюють набуті раніше навички роботи з літературою за фахом. Основна увага приділяється формуванню та засвоєнню базових знань в галузі низьких температур та вмінню застосовувати їх до виконання конкретних науково-дослідних робіт зі спеціальності.

**МН3, МН5** – демонстрація презентацій, використання засобів мультимедіа, дистанційні заняття з використанням комп'ютерних засобів.

## 6. Методи діагностики знань

### ФОРМИ ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ (ФО)

- ФО1** – відвідування лекцій та творчий підхід в процесі наукового пошуку (20 балів);  
**ФО2** – самостійна робота, опрацювання літератури та електронних джерел за темою дослідження (20 балів);  
**ФО4** – відповідь на семінарі та використання сучасних інформаційних технологій при підготовці відповіді (20 балів);  
**ФО5** – робота в команді при виконанні завдань самостійної роботи та на семінарі (5 балів);  
**ФО6, ФО8, ФО9, ФО10** – підготовка та оформлення реферату та презентації, використання у доповіді прикладів реальних фізичних об'єктів, що пов'язані з дисертаційним дослідженням (20 балів).

Екзамен (15 балів)

Всього: 100 балів.

### Шкала оцінювання

Сума балів	Оцінка за національною шкалою	
	для екзамену	для заліку
90 – 100	відмінно	зараховано
80-89	добре	
70-79		
60-69	задовільно	
50-59		
1-49	незадовільно	не зараховано

## 7 «Критерії оцінювання результатів навчання»

Кількість балів	Критерії оцінювання
90-100	У відповіді повністю розкрито зміст питання. Матеріал викладено логічно, аргументовано, мова є грамотною, науковий стиль викладення матеріалу, вільне володіння термінологічним апаратом дисципліни. У відповіді продемонстровано високий рівень володіння матеріалом, що входить до навчальної програми, та продемонстровано високі практичні навички.
75-89	Відповідь досить повно розкриває зміст питання або розкриває основні (найважливіші) аспекти у запитанні, слухач володіє термінологічним апаратом дисципліни. У викладеному матеріалі слухач має помилки із аргументацією відповіді, недостатня логічність та послідовність викладення матеріалу. У відповіді продемонстровано високий рівень володіння матеріалом, що було викладено на лекціях, та середній рівень володіння практичним матеріалом.
60-74	Відповідь на контрольне питання є неповною, розкриває тільки деякі аспекти навчального матеріалу. Слухач припускається помилок у використанні термінології навчальної дисципліни. Рівень володіння матеріалом, що було викладено на лекціях, додатковим та практичним матеріалом є середнім.
35-59	У відповіді допущено суттєві помилки, які свідчать про незнання лекційного матеріалу або обов'язкової літератури; слухач слабо володіє термінологією дисципліни.
1-34	Відповідь практично відсутня, слухач демонструє незнання лекційного матеріалу або обов'язкової літератури; не володіє термінологією

## 8. Навчально-методичне забезпечення

На початку семестру здобувачі отримують:

1. Робочу програму, що містить перелік тем, список рекомендованої літератури та інформаційних ресурсів, критерії та шкалу оцінювання; контрольні запитання до іспиту;

2. Пакет літератури, що містить основні підручники, навчальні та методичні посібники в електронній формі (формати .pdf та .djvu),

## 9. Питання до заліку/екзамену

### Фізика низьких температур

1. Поняття температури і градуса. Шкали температур.
2. Рівняння стану і ізотерми газу Ван-дер-Ваальса.
3. Умови зрідження газів і критичні параметри. Ефект Джоуля-Томсона. Температура інверсії. Розширення газу із здійсненням роботи.
4. Особливості фізичних властивостей твердого тіла при низьких температурах.
5. Основні властивості криогенних рідин.
6. Фазова діаграма, теплоємність і теплопровідність рідкого гелію.
7. Досліди Капіци і відкриття надтекучості.
8. Енергетичний спектр He II. Критерій надтекучості Ландау.
9. Дворідинна модель He II.
10. Термомеханічний і механо-калоричний ефекти.
11. Квантова турбулентність надплинного гелію.
12. Фазові  $P - T$  діаграми  $^4\text{He}$ ,  $^3\text{He}$  і  $T - x$  діаграми розчинів  $^3\text{He} - ^4\text{He}$ .
13. Інтенсивність нульових коливань та параметр Де-Бура.
14. Спостереження квантової дифузії. Основні фізичні механізми квантової дифузії.

### Техніка низьких температур

1. Поняття температури і градуса. Шкали температур
2. Рефрижератор компресійного типу. Принцип роботи побутового холодильника.
3. Каскадний метод зрідження газів. Зріджувач Гемпсона. Зріджувач Лінде. Зріджувач Клода.
4. Охолодження газів за рахунок здійснення роботи. Детандери.
5. Турбодетандери. Турбодетандерний зріджувач Капіци. Дросельні зріджувачі водню і гелію.
6. Теплообмінники і дроселі.
7. Гелієві і азотні дьюари. Види теплової ізоляції.
8. Гелієвий криостат для фізичних досліджень і його основні елементи.
9. Види теплопритоків в низькотемпературних конструкціях. Розрахунок теплопритоку за рахунок теплового випромінювання, по залишковому газу, по тепловому зв'язку.
10. Дросельні зріджувачі водню і гелію.
11. Криостати випаровування з  $^4\text{He}$ , одноразові та безперервної роботи.
12. Фізичні основи методу та принципова схема рефрижератора розчинення. Градусна камера.
13. Метод адіабатичної кристалізації  $^3\text{He}$ .
14. Метод адіабатичного розмагнічування парамагнітної солі.
15. Охолодження за допомогою адіабатичного ядерного розмагнічування.
16. Термометри опору та їх різновидності.

17. Кристалізаційні термометри з  $^3\text{He}$  за кривою плавлення.
18. Лазерне охолодження.

## 10. Рекомендована література

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика, т. III.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика, т. V.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика, т. VI.
4. Физика низких температур. Под редакцией А.И. Шальникова. - М.: Иностранная литература, 1959.
5. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика - М.: ГИФМЛ, 1963.
6. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. – М.: Наука, 1977.
7. Практикум із фізики низьких температур. Ч.1 Видавництво ХНУ ім. В.Н. Каразіна.
8. Різак В.М., Різак І.М., Рудавський Е.Я. Криогенна фізика і техніка. - К.: Наукова думка, 2006.
9. Методы получения и измерения низких и сверхнизких температур. Под редакцией Б.И. Веркина. – К.: Наукова думка, 1987.
10. Халатников И.М. Теория сверхтекучести. -. М.: Наука. 1971.
11. Паттерман С. Гидродинамика сверхтекучей жидкости. - М.: Мир, 1978.
12. Вентура Г., Ризегари Л. Искусство криогеники. – И.Д. «Интеллект», 2011.
13. К. Мендельсон На пути к абсолютному нулю. - М.: Атомиздат, 1971.
14. Мендельсон К. Физика низких температур. - М.: Иностранная литература, 1963.
15. Скотт, Р.Б. Техника низких температур. М.: Иностранная литература, 1959.
16. Лоунасмаа О.В. Принципы и методы получения температур ниже 1 К. - М.: Мир, 1977.
17. Роуз-Инс А. Техника низкотемпературного эксперимента. - М.: Мир, 1966.
18. Robell F. Matter and methods at low temperatures. Springer-Verlag, 1992.
19. Микулин Е.И. Криогенная техника. – М.: Машиностроение, 1969.
20. Тилли Д.Р., Тилли Дж., Сверхтекучесть и сверхпроводимость. – М.: Мир, 1977.

## Интернет-ресурси

[Low Temperature Physics \(scitation.org\) https://aip.scitation.org/journal/ltp](https://aip.scitation.org/journal/ltp)  
[Journal of Low Temperature Physics | Home \(springer.com\) https://www.springer.com/journal/10909](https://www.springer.com/journal/10909)