Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра теплофізики, молекулярної фізики та енергоефективності

“**ЗАТВЕРДЖУЮ**”

Проректор з науково-педагогічної роботи Пантелеймонов А.В.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

“\_\_\_\_\_\_”\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2020\_ р.

# Робоча програма навчальної дисциплін

# Термодинаміка енергетичних систем

*(назва навчальної дисципліни)*

рівень вищої освіти бакалавр\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

/

галузь знань \_\_\_\_\_\_10 природничі науки\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(шифр і назва)

спеціальність \_\_\_\_\_105 Прикладна фізика та наноматеріали\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(шифр і назва)

освітня програма \_\_Прикладна фізика енергетичних систем\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(шифр і назва)

Спеціалізація\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(шифр і назва)

вид дисципліни \_\_\_\_за вибором\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(обов’язкова / за вибором)

ННІ \_\_\_\_\_\_\_\_\_комп’ютерної фізики та енергетики\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

2020/2021 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження вченою радою ННІ КФЕ

“30” червня 2020 року, протокол №6-2/20

РОЗРОБНИК ПРОГРАМИ: Чаговець В.К., доктор фіз.-мат. наук, старший науковий

співробітник, професор кафедри теплофізики, молекулярної фізики та енергоефективності

Програму схвалено на засіданні кафедри теплофізики, молекулярної фізики та енергоефективності

Протокол від “30” червня 2020 року, №7/20

Завідувач кафедри Мацевитий Ю. М.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_(Мацевитий Ю. М.) (підпис) (прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією ННІ КФЕ

Протокол від “30” червня 2020 року, №6/20

Голова методичної комісії

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Лісіна О.Ю.\_\_\_\_\_

(підпис) (прізвище та ініціали)

**Вступ**

Програма навчальної дисципліни “Термодинаміка енергетичних систем” складена відповідно до освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки бакалавр, спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали, спеціалізації теплофізика та молекулярна фізика.

### **1. Опис навчальної дисципліни**

1.1. **Мета викладання навчальної дисципліни**: підготовка фахівців з прикладної фізики до роботи з кріогенними рідинами, сучасним фізичним і технічним кріогенним обладнанням, а також до розрахунків окремих вузлів і компонентів кріогенних систем.

1.2. **Основні завдання вивчення дисципліни**: забезпечення знаннями термодинамічних основ охолодження, методів скраплення газів і одержання низьких температур, фізичних властивостей речовин при низьких температурах, устрою кріогенних пристроїв і розрахунку основних теплопритоків в кріогенних системах при низьких температурах.

1.3. **Кількість кредитів**: 5.

1.4. **Загальна кількість годин**: 150.

|  |  |
| --- | --- |
| **1.5. Характеристика навчальної дисципліни** | |
| За вибором | |
| Денна форма навчання | Заочна (дистанційна) форма навчання |
| Рік підготовки | |
| 4-й | -й |
| Семестр | |
| 7-й | -й |
| Лекції | |
| 32 год. | год. |
| Практичні, семінарські заняття | |
| 32 год. | год. |
| Лабораторні заняття | |
| год. | год. |
| Самостійна робота | |
| 86 год. | год. |
| Індивідуальні завдання | |
| год. | |

**1.6. Заплановані результати навчання:**

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

**знати:** термодинамічні основи і загальні принципи одержання та вимірювання низьких температур, методи скраплення газів, фізичні властивості конденсованих систем при низьких температурах, зокрема, рідких та твердих газів і конструкційних елементів, методи розрахунків теплопритоків до кріогенних елементів.

**вміти:** застосовувати отримані знання на практиці при роботі з кріогенними рідинами і пристроями, що використовуються в сучасній фізиці та техніці, зокрема, при розрахунках низькотемпературних вузлів, кріостатів для фізичних досліджень і низькотемпературної електроніки.

**2. Тематичний план навчальної дисципліни**

### **Розділ 1**. Термодинамічні основи охолодження.

### Тема 1. Поняття температури і градуса.

Високі та низькі температури. Шкали температур. Визначення терміна «охолодження». Історія скраплення різних газів. Відкриття та скраплення гелію. Основні напрямки фізики низьких температур. Фізика низьких температур в Україні та Харкові.

*Тема 2. Рівняння стану ідеального газу.*

Параметри термодинамічного стану. Рівняння стану ідеального газу. Реальні гази. Потенціал Леннарда-Джонса. Рівняння стану газу Ван-дер-Ваальса, перша та друга поправки. Інші рівняння стану реальних газів. Ізотерми Ван-дер-Ваальса. Умови скраплення газів та критичні параметри.

*Тема 3. Ефект Джоуля –Томсона. Ізоентропійне розширення газу.*

Внутрішня енергія реального газу. Диференціний коефіцієнт Джоуля – Томсона. Зв'язок між ефектом Джоуля-Томсона і поправками в рівнянні Ван-дер-Ваальса. Крива інверсії. Ізоентропійне розширення газу.

### **Розділ 2**. Практична реалізація методів скраплення газів.

### Тема 4. Рефрижератор компресійного типу.

### Фазова діаграма речовини. Рефрижератор компресійного типу. Принцип роботи побутового холодильника. Каскадний метод скраплення газів. Скраплювач Гемпсона. Скраплювач Лінде. Дроселі та теплообмінники.

### Тема 5. Охолодження газу при виконанні зовнішньої роботи.

Розширення газу з виконанням роботи. Детандери та їх використання. Скраплювач Клода. Роботи Камерлінг-Онеса з скраплення гелію. Турбодетандер П.Л. Капиці. Отримання рідкого кисню.

***Розділ 3****. Фізичні властивості речовин при низьких температурах.*

*Тема 6****.*** *Основні властивості кріогенних рідин*.

Рідкі азот, кисень, неон, водень, гелій. Методи зберігання кріогенних рідин. Транспортні засоби для кріогенних рідин.

*Тема 7. Тверді тіла при низьких температурах*.

Механічні властивості. Модель гармонічного осцилятора. Фонони.

*Тема 8. Теплоємність твердих тіл.*

Теплоємність одноатомних газів. Класична теорія теплоємності твердих тіл. Закон Дюлонга-Пті. Модель Ейнштейна. Модель Дебая. Аномалії теплоємкості. Електронна теплоємність металів. Магнітна теплоємність. Теплоємність аморфних матеріалів.

*Тема 9. Теплопровідність твердих тіл при низьких температурах.*

Граткова провідність. Електронна провідність. Теплопровідність надпровідників. Закон Відемана-Франца. Теплопровідність та RRR. Вплив домішок на теплопровідність.

***Розділ 4.*** *Основні принципи конструювання кріогенних установок.*

*Тема 10. Гелієвий кріостат і його основні елементи*

Гелієвий кріостат і його основні елементи. Основні теплопритоки до кріогенних елементів: теплопритік по тепловому зв’язку, теплове випромінювання тіл (закон Стефана-Больцмана), теплопритік по залишковому газу.

*Тема 11. Схеми типових кріостатів для фізичних досліджень*

Схеми типових кріостатів для фізичних досліджень. Приклади розрахунків теплопритоків.

*Тема 12. Теплова ізоляція кріостатів*

Види теплової ізоляції кріостатів. Розрахунки основних теплопритоків до азотних та гелієвих камер.

*Тема 13. Розрахунки конструкції гелієвого кріостата.*

Розрахунки конструкції гелієвого кріостата для фізичних досліджень

***Розділ 5.*** *Проблема гелію.*

*Тема 14. Незвичні властивості рідкого гелію.*

Відкриття і перше скраплення гелію. Щільність і теплоємність рідкого гелію. Фазова діаграма рідкого гелію, λ – аномалія. Теплопровідність гелію. В'язкість гелію. Експеримент Капиці та відкриття надтекучості.

*Тема 15. Парадокс в'язкості, дворідинна модель.*

Парадокс в'язкості, дворідинна модель Не II Л. Тіси. Гелієва плівка. Зв'язок між теплом та потоком рідини в Не II. Термомеханічний та механокалоричний ефекти. Досліди Капиці.

*Тема 16. Теорія надтекучості Ландау.*

Основні ідеї теорії надтекучості Ландау: концепція квазічасток, енергетичний спектр, критична швидкість. Експеримент Андронікашвілі, справедливість дворідинної моделі Не II. 2-й звук.

***Розділ 6.*** *Методи отримання наднизьких температур.*

*Тема 17. Кріостати випаровування.*

Одноразові та непереривні цикли охолодження. Отримання низьких температур за допомогою кріостатів випаровування 4Не и 3Не. Градусна камера. Використання адсорбційної відкачки.

*Тема 18. Рефрижератори розчинення 3He в 4He.*

Фазова діаграма сумішей 3He-4He. Фізичні основи та принципова схема рефрижератора розчинення 3He в 4He. Термодинамічний аналіз та конструкція робочих камер рефрижератора розчинення. Типи рефрижераторів розчинення.

*Тема 19. Методи адіабатичного розмагнічування.*

Фізичні основи адіабатичного розмагнічування. Розмагнічування електронних спинів. Розмагнічування ЦМН. Основи ядерного розмагнічування. Охолодження гратки та зразка.

*Тема 20. Лазерне охолодження.*

Метод лазерного охолодження. Доплеровське охолодження та магнітне випаровування.

**3. Структура навчальної дисципліни**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Назви розділів і тем | Кількість годин | | | | | | | | | | | |
| денна форма | | | | | | заочна форма | | | | | |
| усього | у тому числі | | | | | усього | у тому числі | | | | |
| л | п | лаб. | інд. | с. р. | л | п | лаб. | інд. | с. р. |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| **Розділ 1.** Термодинамічні основи охолодження | | | | | | | | | | | | |
| Тема 1. Поняття температури і градуса | 5 | 1 | 0 |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  |
| Тема 2. Рівняння стану ідеального газу | 5 | 1 | 0 |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  |
| Тема 3. Ефект Джоуля –Томсона. | 7 | 1 | 2 |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  |
| Разом за розділом 1 | 17 | 3 | 2 |  |  | 12 |  |  |  |  |  |  |
| **Розділ 2.** Практична реалізація методів скраплення газів | | | | | | | | | | | | |
| Тема 4. Рефрижератор компресійного типу | 7 | 1 | 2 |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  |
| Тема 5. Охолодження газу при виконанні зовнішньої роботи | 7 | 1 | 2 |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  |
| Разом за розділом2 | 14 | 2 | 4 |  |  | 8 |  |  |  |  |  |  |
| **Розділ 3.** Фізичні властивості речовин при низьких температурах | | | | | | | | | | | | |
| Тема 6. Основні властивості кріогенних рідин | 8 | 2 | 2 |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  |
| Тема 7. Тверді тіла при низьких температурах | 8 | 2 | 2 |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  |
| Тема 8. Теплоємність твердих тіл | 8 | 2 | 2 |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  |
| Тема 9. Теплопровідність твердих тіл | 7 | 1 | 2 |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  |
| Разом за розділом 3 | 31 | 7 | 8 |  |  | 16 |  |  |  |  |  |  |
| **Розділ 4.** Основні принципи конструювання кріогенних установок. | | | | | | | | | | | | |
| Тема 10. Гелієвий кріостат і його основні елементи | 9 | 2 | 2 |  |  | 5 |  |  |  |  |  |  |
| Тема 11. Типові кріостати для фізичних досліджень. | 9 | 2 | 2 |  |  | 5 |  |  |  |  |  |  |
| Тема 12. Теплова изоляція кріостатів. | 8 | 1 | 2 |  |  | 5 |  |  |  |  |  |  |
| Тема 13. Розрахунки конструкції гелієвого кріостата | 8 | 1 | 2 |  |  | 5 |  |  |  |  |  |  |
| Разом за розділом 4 | 34 | 6 | 8 |  |  | 20 |  |  |  |  |  |  |
| **Розділ 5.** Проблема гелію | | | | | | | | | | | | |
| Тема 14. Незвичні властивості рідкого гелію. | 8 | 2 | 2 |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  |
| Тема 15. Парадокс в'язкості, дворідинна модель Не II. . | 7 | 2 |  |  |  | 5 |  |  |  |  |  |  |
| Тема 16. Теорія надтекучості Ландау. | 7 | 2 |  |  |  | 5 |  |  |  |  |  |  |
| Разом за розділом 5 | 22 | 6 | 2 |  |  | 14 |  |  |  |  |  |  |
| **Розділ 6.** Методи отримання наднизьких температур | | | | | | | | | | | | |
| Тема 17. Кріостати випаровування | 8 | 2 | 2 |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  |
| Тема 18. Рефрижератори розчинення 3He в 4He | 8 | 2 | 2 |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  |
| Тема 19. Методи адіабатичного розмагнічування. | 8 | 2 | 2 |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  |
| Тема 20. Лазерне охолодження. | 8 | 2 | 2 |  |  | 4 |  |  |  |  |  |  |
| Разом за розділом 6 | 32 | 8 | 8 |  |  | 16 |  |  |  |  |  |  |
| Усього годин | **150** | **16** | **32** |  |  | **86** |  |  |  |  |  |  |

**4. Теми практичних занять**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| №  з/п | Назва теми | Кількість  годин |
| 1 | Диференціальний коефіцієнт Джоуля – Томсона. | 2 |
| 2 | Методи скраплення газів. | 2 |
| 3 | Детандери та їх використання | 2 |
| 4 | Властивості кріогенних рідин. | 2 |
| 5 | Властивості конструкційних матеріалів. | 2 |
| 6 | Теплоємність твердих тіл. | 2 |
| 7 | Теплопровідність твердих тіл | 2 |
| 8 | Основні елементи гелієвих кріостатів | 2 |
| 9 | Теплова изоляція кріостатів. | 2 |
| 10 | Методи розрахунків теплопритоків до кріогенних елементів | 2 |
| 11 | Розрахунки конструкції гелієвого кріостата | 2 |
| 12 | Властивості рідкого гелію. | 2 |
| 13 | Кріостати випаровування | 2 |
| 14 | Рефрижератори розчинення 3He-4He. | 2 |
| 15 | Адіабатичне розмагнічування. | 2 |
| 16 | Лазерне охолодження. | 2 |
|  | Разом | 32 |

**5. Завдання для самостійної робота**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| №  з/п | Види, зміст самостійної роботи | Кількість  годин |
| 1 | Вивчити термодинамічні основи охолодження. | 12 |
| 2 | Вивчити методи реалізації скраплення газів. | 8 |
| 3 | Вивчити фізичні властивості кріогенних рідин та методи практичної роботи з ними. Тверді тіла при низьких температурах. | 16 |
| 4 | Вивчити основні типи кріогенних установок та принципи їх конструювання. | 20 |
| 5 | Вивчити властивості рідкого гелію. Теорія надплинності Ландау. | 14 |
| 6 | Ознайомитись з методами отримання наднизьких температур | 16 |
|  | Разом | 86 |

**6. Індивідуальні завдання**

Індивідуальні завдання не передбачено.

**7. Методи контролю**

Система рейтингових балів та критерії оцінювання:

1. Експрес-контроль (ваговий бал - 20) проводиться з метою перевірки якості роботи студента на практичних заняттях в аудиторії. Тривалість експрес-контролю 5-10 хвилин. Кожен експрес-контроль включає 2 простих завдання, за кожну правильну відповідь студент отримує 1 бал. Відсутність студента на занятті або невиконання експрес-контролю приносить студенту 0 балів.
2. Екзаменаційна робота (ваговий бал - 40). Необхідною умовою допуску студента до екзамену з дисципліни є позитивний рейтинг з усіх форм семестрової атестації, але не менше 30 балів.

Екзаменаційний білет містить два теоретичних питання і одну задачу.

Критерії оцінювання:

* Теоретичні питання оцінюються в 10 балів кожен, при неповній або частково помилковій відповіді – 5 балів, при відсутності відповіді – 0 балів.
* Повністю розв’язана задача оцінюється в 20 балів;
* Задача розв’язана з несуттєвими помилками оцінюється в 15 бали (незначні помилки в арифметичних розрахунках);
* Частково розв’язана задача оцінюється в 10 балів (правильно обрана логіка рішення та формули але грубі помилки в розрахунках);
* Часткове розв’язана задача оцінюється в 5 балів (правильно обрана логіка рішення, зовсім відсутні розрахунки);
* Нерозв’язана задача оцінюється в 0 балів.

Форма підсумкового контролю знань – екзамен.

**8. Схема нарахування балів**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання | | | | | | | | | | | | | Екзамен | Сума |
| Роз  діл  1 | Роз  діл  2 | | Роз  діл  3 | | Роз  діл  4 | | Роз  діл  5 | | Роз  діл  6 | Контрольна робота, передбачена навчальним планом | Індивідуальне завдання | Разом |  |  |
| 10 | 10 | 10 | | 10 | | 10 | | 10 | | – | – | 60 | 40 | 100 |

**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**

**Основна 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. Кріогенна 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. Вентура Г., Ризегари Л. Искусство криогеники. – И.Д. «Интеллект», 2011.
11. Тилли Д.Р., Тилли Дж., Сверхтекучесть и сверхпроводимость. – М.: Мир, 1977.

**Допоміжна література**

1. Мендельсон К. На пути к абсолютному нулю. - М.: Атомиздат, 1971.
2. Мендельсон К. Физика низких температур. - М.: Иностранная литература,, 1963.
3. Скотт, Р.Б. Техника низких температур. М.: Иностранная литература, 1959.
4. Лоунасмаа О.В. Принципы и методы получения температур ниже 1 К. - М.: Мир, 1977.
5. Роуз-Инс А. Техника низкотемпературного эксперимента. - М.: Мир, 1966.
6. Pobell F. Matter and methods at low temperatures. Springer-Verlag, 1992.
7. Микулин Е.И. Криогенная техника. – М.: Машиностроение, 1969.

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

1. Бібліотеки ХНУ ім. В. Н. Каразіна (www-library.univer.kharkov.ua/ukr).
2. Мережа Internet.