

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра теплофізики, молекулярної фізики та енергоефективності

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з науково-педагогічної
роботи Антон ПАНТЕЛЕЙМОНОВ



_____ 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 теплофізики, молекулярної фізики та енергоефективності

Юрій МАЦЕВИТИЙ

Програму погоджено з гарантом освітньої програми

Прикладна фізика енергетичних систем

Костянтин НСМЧЕНКО

Програму погоджено методичною комісією ННІ КФЕ

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

Голова методичної комісії ННІ КФЕ

Ольга ЛІСІНА

ВСТУП

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

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. **Мета викладання навчальної дисципліни:** підготовка фахівців з прикладної фізики до роботи з криогенними рідинами, сучасним фізичним і технічним криогенним обладнанням, а також до розрахунків окремих вузлів і компонентів криогенних 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 криогенних пристроїв і розрахунку основних теплопритоків в криогенних 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.
у тому числі 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 криогенних елементів.

вміти: застосовувати отримані знання на практиці при роботі з криогенними рідинами і пристроями, що використовуються в сучасній фізиці та техніці, зокрема, при розрахунках низькотемпературних вузлів, криостатів 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. Диференціальний 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 криогенних рідин.

Рідкі азот, кисень, неон, водень, гелій. Методи зберігання криогенних рідин. Транспортні засоби для криогенних 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 теплоємності. 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 криогенних установок.

Тема 10. Гелієвий криостат і його основні елементи

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

Тема 11. Схеми типових криостатів для фізичних досліджень

Схеми типових криостатів 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 квазічастинок, 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 неперервні цикли охолодження. Отримання низьких температур за допомогою кріостатів випаровування ^4He и ^3He . 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 ґратки та зразка.

Тема 20. Лазерне охолодження.

Метод лазерного охолодження. Доплерівське 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 розділом 2	14	2	4			8						
Розділ 3. Фізичні властивості речовин при низьких температурах												
Тема 6. Основні властивості криогенних 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 криогенних установок.												
Тема 10. Гелієвий криостат і його основні елементи	9	2	2			5						
Тема 11. Типові криостати для фізичних досліджень.	9	2	2			5						
Тема 12. Теплова ізоляція криостатів.	8	1	2			5						
Тема 13. Розрахунки конструкції гелієвого криостата	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,	7	2				5						

дворідинна модель He II .												
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	32	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 ізоляція 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 роботи

№ 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	20

	конструювання.	
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 навчання

Пояснювально-ілюстративний метод.

Пояснення педагога. Самостійна робота.

8. Методи контролю

Система рейтингових балів та критерії оцінювання:

1. Експрес-контроль (ваговий бал - 10) 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 кожен 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 балів (незначні помилки в арифметичних розрахунках);

- Частково розв'язана задача оцінюється в 10 балів (правильно обрана логіка рішення та формули але грубі помилки в розрахунках);

- Частково 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.

9. Схема нарахування балів

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

Критерії оцінювання навчальних досягнень

Загальні критерії оцінювання

I рівень оцінювання (задовільно). Відповідь студента при відтворенні навчального матеріалу елементарна, зумовлюється початковими уявленнями про предмет вивчення.

Студент відтворює основний навчальний матеріал, здатний виконувати завдання за зразком, володіє елементарними вміннями навчальної діяльності.

II рівень - достатній (добре). Студент знає істотні ознаки понять, явищ, закономірностей, зв'язків між ними, а також самостійно застосовує знання в стандартних ситуаціях, володіє розумовими операціями, вміє робити висновки, виправляти допущені помилки. Відповідь повна, правильна, логічна, обґрунтована.

III рівень - високий (відмінно). Студент здатний самостійно здійснювати основні види навчальної діяльності. Знання студента є глибокими, міцними, узагальненими; студент вміє застосовувати знання творчо, його навчальна діяльність позначена вмінням самостійно оцінювати різноманітні життєві ситуації, явища, факти, виявляти і відстоювати особисту позицію.

Вивчення дисципліни у вищих навчальних закладах I-II рівнів акредитації повинно дати не тільки певну суму знань, а й підготувати студентів для освоєння обраної професії та допомоги формувати світогляд.

Складовими навчальних досягнень студентів є вміння відтворювати отриману інформацію, знаходити нову, оцінювати її та застосовувати в стандартних і не стандартних ситуаціях.

Тому потрібно оцінювати:

- 1) рівень володіння теоретичними знаннями;
- 2) рівень вмінь використовувати теоретичні знання під час розв'язування задач;
- 3) рівень володіння практичними уміннями та навичками, які виявляються під час виконання практичних робіт;
- 4) оцінювання творчих робіт студентів (рефератів, експериментальних робіт, особливо пов'язаних з майбутньою професією).

I Оцінювання рівня теоретичних знань.

Відповідь з теорії може складатися:

- 1) з викладу теоретичного матеріалу;
- 2) формування правил, законів, закономірностей;
- 3) із завдань на вибір правильної відповіді

При оцінюванні відповідей з теорії враховується:

- 1) обсяг відтвореної інформації та її співвідношення до обсягу повної інформації з даного питання;
- 2) обсяг додаткової інформації, здобутої студентом, та доцільність її використання;
- 3) частота допомоги викладача;
- 4) кількість похибок (помилочок, недоліків, неточностей) у відповіді;
- 5) логічний зв'язок відтвореної інформації.

II Оцінювання рівня вмінь використовувати знання при розв'язанні практичних задач

У процесі оцінювання задача розбивається на окремі логічні кроки та операції; кожному з яких залежно від їх складності та значущості дається певна кількість балів або їх частина.

При оцінюванні вмінь та знань студента треба користуватися такими критеріями та характеристиками рівнів.

Середній рівень (задовільно) передбачає вміння розв'язувати задачі репродуктивного характеру, тобто за готовою логічною схемою знайти вірне рішення.

Достатній рівень (добре) передбачає розв'язування задач на 4-6 логічних кроків репродуктивного характеру, розв'язання яких потребує практичного застосування набутих знань з обґрунтуванням процесу міркувань без допомоги викладача.

Високий рівень (відмінно) передбачає розв'язання стандартних задач оригінальним способом або самостійне розв'язання нестандартних задач на 4 та більше кроків.

Критерії оцінювання знань студентів на заліку

Характеристики критеріїв оцінювання знань	За державною (національною) шкалою	За 100 бальною шкалою
Характеризується знаннями суттєвих ознак, понять, явищ, закономірностей, зв'язків між ними. Студент самостійно засвоює знання у стандартних ситуаціях, володіє розумовими операціями (аналізом, синтезом, узагальненням, порівнянням, абстрагуванням), уміє робити висновки, виправляти допущені помилки. навчальна діяльність позначена уміннями самостійно оцінювати різноманітні життєві ситуації, явища, факти, виявляти і відстоювати особистісну позицію.	Зараховано	50-100
Незнання значної частини навчального матеріалу, суттєві помилки у відповідях на питання, невміння застосувати теоретичні положення при розв'язанні практичних задач.	Не зараховано з можливістю повторного складання заліку	25-49
Незнання значної частини навчального матеріалу, суттєві помилки у відповідях на питання, невміння орієнтуватися при розв'язанні практичних задач, незнання основних фундаментальних положень.	Не зараховано з обов'язковим повторним вивченням навчальної дисципліни	1-24

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

10. Рекомендована література

Основна література

- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика, т. III.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика, т. V.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика, т. VI.
- Физика низких температур. Под редакцией А.И. Шальникова. - М.: Иностранная литература, 1959.
- Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика - М.: ГИФМЛ, 1963.
- Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. – М.: Наука. 1977.
- 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. 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. Лоунасама О.В. Принципы и методы получения температур ниже 1 К. - М.: Мир, 1977.
5. Роуз-Инс А. Техника низкотемпературного эксперимента. - М.: Мир, 1966.
6. Robell F. Matter and methods at low temperatures. Springer-Verlag, 1992.
7. Микулин Е.И. Криогенная техника. – М.: Машиностроение, 1969.

10. Посилання 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.