

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Кафедра «Аерокосмічної теплотехніки» (№ 205)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми



Сергій ГУБІН

(підпис)

(ім'я та прізвище)

« 31 » 08 2024 р.

СИЛАБУС ОBOB'ЯЗKОВОЇ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Технічна термодинаміка

(назва навчальної дисципліни)

Галузь знань: 14 Електрична інженерія

(шифр і найменування галузі знань)

Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код та найменування спеціальності)

Освітня програма: Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергій

(найменування освітньої програми)


Форма навчання: **денна**

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

Силабус введено в дію з 01.09.2024 року

Харків – 2024 р.

Розробник: Зав. кафедрою 205, д-р техн. наук, Павло ГАКАЛ
(посада, науковий ступінь і вчене звання ім'я та прізвище)




(підпис)

Силабус навчальної дисципліни розглянуто на засіданні кафедри аерокосмічної теплотехніки (№ 205)

Протокол № 1 від «30» серпня 2024 р.

Завідувач кафедри д-р техн. наук, доцент
(науковий ступінь і вчене звання)



(підпис)

Павло ГАКАЛ
(ім'я та прізвище)

Погоджено з представником здобувачів освіти:



(підпис)

Артем ШЕЛЕСТ
(ім'я та прізвище)

1. Загальна інформація про викладача



Гакал Павло Григорович, д.т.н., доцент. З 2004 року викладає в університеті наступні дисципліни:

- моделювання та розрахунків процесів в енергетичних системах;
- системи забезпечення теплового режиму.

Напрями наукових досліджень: інженерний синтез теплоенергетичних систем для об'єктів аерокосмічної техніки.

2. Опис навчальної дисципліни

Семестр, в якому викладається дисципліна – 3, 4 семестр.

Обсяг дисципліни:

9 кредитів ЄКТС (270 годин), у тому числі аудиторних – 120 годин, самостійної роботи здобувачів – 150 годин.

Форми здобуття освіти

Денна, дистанційна.

Дисципліна – обов'язкова.

Види навчальної діяльності – лекції, самостійна робота здобувача.

Види контролю – поточний, модульний та підсумковий (семестровий) контроль (іспит).

Мова викладання – українська.

Необхідні обов'язкові попередні дисципліни (пререквізити) – фізика, вступ до фаху.

Необхідні обов'язкові супутні дисципліни (кореквізити) – гідрогазодинаміка, основи енергозберігаючих технологій.

3. Мета та завдання навчальної дисципліни

Вивчення навчальної дисципліни «Технічна термодинаміка» полягає в формуванні системи знань, способів діяльності та творчих здібностей з математичних методів моделювання термодинамічних процесів в теплоенергетичних об'єктах.

Завдання

Вивчити основні положення технічної термодинаміки, вміти використовувати їх для вирішення інженерних завдань в теплоенергетичній галузі.

Після опанування дисципліни здобувач набуде наступні **компетентності**:

Загальні компетентності:

- ЗК01. Здатність до абстрактного мислення, аналізу і синтезу.
- ЗК02. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

Фахові компетентності:

- ФК02. Здатність вирішувати практичні задачі із залученням методів математики, фізики та електротехніки.

Очікується, що після опанування дисципліни здобувачем будуть досягнуті наступні програмні результати навчання і він буде:

- ПР20 - Здатність продемонструвати знання і розуміння фундаментальних математичних і фізичних принципів, що лежать в основі роботи пристроїв нетрадиційної та відновлювальної енергетики.

4. Програма навчальної дисципліни

Змістовний модуль 1. Концептуально-методологічний базис термодинаміки.

Тема 1. Основні визначення технічної термодинаміки. Поняття термодинамічної системи, класифікація термодинамічних систем. Поняття термодинамічного процесу та їх класифікація, термодинамічний цикл. Параметри стану: термічні та калоричні параметри стану.

- *Форма занять: лекція, самостійна робота.*
- *Обсяг аудиторного навантаження: 2-4 години.*
- *Обсяг самостійної роботи здобувачів: 2-5 годин.*
- *Обов'язкові предмети та засоби (обладнання, устаткування, матеріали, інструменти): відсутні.*

Тема 2. Термічні параметри стану. Калоричні параметри стану. Структура рівняння стану. Рівняння стану для ідеального газу. Теплоємність. Визначення теплоємності за молекулярно-кінетичною теорією. Суміші ідеальних газів.

- *Форма занять: лекція, самостійна робота.*
- *Обсяг аудиторного навантаження: 4-6 годин.*
- *Обсяг самостійної роботи здобувачів: 2-5 годин.*
- *Лабораторні роботи: «Ізотермне стиснення вуглекислого газу», «Аналіз продуктів згоряння як суміші ідеальних газів».*
- *Обов'язкові предмети та засоби (обладнання, устаткування, матеріали, інструменти): засоби вимірювання, обладнання для стиснення газу, камера згоряння, паливо.*

Тема 3. Параметри процесу: робота і теплота. Перший закон термодинаміки для закритої системи. Дві форми запису першого закону термодинаміки. Закон Джоуля. Рівняння Майєра. Характеристичні функції. Рівняння Максвелла.

- *Форма занять: лекція, самостійна робота.*
- *Обсяг аудиторного навантаження: 4-6 годин.*
- *Обсяг самостійної роботи здобувачів: 2-5 годин.*
- *Лабораторні роботи: «Визначення повноти згоряння палива в камері згоряння», «Заповнення вакуумованого резервуару».*
- *Обов'язкові предмети та засоби (обладнання, устаткування, матеріали, інструменти): засоби вимірювання, вакуумний насос, камера згоряння, паливо.*

Тема 4. Формулювання другого закону термодинаміки. Цикл Карно. Теорема Карно. Ентропія і другий закон. Основна термодинамічна тотожність – об'єднання першого і другого законів термодинаміки.

- *Форма занять: лекція, самостійна робота.*
- *Обсяг аудиторного навантаження: 4-6 годин.*
- *Обсяг самостійної роботи здобувачів: 2-5 годин.*
- *Обов'язкові предмети та засоби (обладнання, устаткування, матеріали, інструменти): немає.*

Підготовка до модульного контролю.

Змістовий модуль № 2. Процеси у термомеханічних системах.

Тема 5. Алгоритм аналізу термодинамічного процесу. Ізохорний процес. Ізобарний процес. Ізотермічний процес. Адіабатний процес. Політропний процес і його узагальнююче значення. Основні групи термодинамічних процесів.

- *Форма занять: лекція, самостійна робота.*
- *Обсяг аудиторного навантаження: 4-6 годин.*
- *Обсяг самостійної роботи здобувачів: 2-5 годин.*
- *Лабораторні роботи: «Процеси в резервуарі, звідки витікає газ», «Стиснення повітря в циліндрі поршневого двигуна».*
- *Обов'язкові предмети та засоби (обладнання, устаткування, матеріали, інструменти): засоби вимірювання, вакуумний насос, дизельний двигун.*

Тема 6. Рівняння першого закону термодинаміки для потоку. Повні параметри. Рівноважна течія газу зі звершенням технічної роботи. Робота стиснення газу в ідеальних компресорах об'ємного і динамічного типу. Багатоступеневі компресори. Вентилятори і насоси. Термодинамічний аналіз ідеальних компресорів і детандерів. Вплив нерівноважності на процеси стиснення і розширення в компресорах і детандерах. Дійсна робота реальних компресорів і детандерів.

- *Форма занять: лекція, самостійна робота.*
- *Обсяг аудиторного навантаження: 4-6 годин.*
- *Обсяг самостійної роботи здобувачів: 2-5 годин.*
- *Лабораторні роботи: «Енергобаланс вихрової труби.», «Енергобаланс в турбохолодильнику».*
- *Обов'язкові предмети та засоби (обладнання, устаткування, матеріали, інструменти): засоби вимірювання, вихрова труба, турбохолодильник.*

Тема 7. Процеси в дифузорах та соплах. Термодинамічний розрахунок витікання газу через звужуючий насадок. Криза течії. Швидкість звуку. Нерівноважна течія в каналах з раптовою зміною перерізу. Адіабатне дроселювання і його використання для підвищення або зниження температури газу. Диференційний та інтегральний дросель-ефекти. Термодинаміка процесу змішування в ємкості. Змішання і розділення потоків газу. Термодинамічний аналіз камер згоряння і рекуперативних теплообмінників.

- *Форма занять: лекція, самостійна робота.*
- *Обсяг аудиторного навантаження: 4-6 годин.*
- *Обсяг самостійної роботи здобувачів: 2-5 годин.*
- *Обов'язкові предмети та засоби (обладнання, устаткування, матеріали, інструменти): немає.*

Підготовка до модульного контролю.

Змістовий модуль № 3. Системи з фазовими переходами. Вологе повітря.

Тема 8. Особливості опису систем з фазовими переходами. Рівняння перерозподілу фаз. Правило фаз Гіббса. Фазові діаграми. Межові криві, критична точка. Тепловий ефект фазового переходу. Параметри фаз на межовій кривій. Рівняння Клапейрона-Клаузіуса. Питомий об'єм, ентальпія та ентропія пари та рідини на межовій кривій. Двофазова зона. Ступінь сухості. Термодинамічні властивості недогрітої рідини. Обчислення ентальпії та ентропії. Теплоємність недогрітої рідини, вплив на неї температури і тиску. Термодинамічні властивості перегрітої пари. Таблиці та діаграми термодинамічних властивостей фаз. Вологе повітря. Калоричні властивості вологого повітря. I-d діаграма вологого повітря. Термодинамічні процеси у вологому повітрі.

- *Форма занять: лекція, самостійна робота.*
- *Обсяг аудиторного навантаження: 4-6 годин.*
- *Обсяг самостійної роботи здобувачів: 2-5 годин.*
- *Обов'язкові предмети та засоби (обладнання, устаткування, матеріали, інструменти): немає.*

Підготовка до модульного контролю.

Змістовий модуль №4. Цикли теплосилових установках та холодильних установок, теплових насосів

Тема 9. Теплова машина; визначення її структури з використанням першого і другого законів термодинаміки. Прямий і обернений цикли, тепловий двигун і тепловий насос. Вплив нерівноважності на ефективність циклів. Цикл Карно та його ККД. Методи порівняння рівноважних циклів. Цикли газотурбінних установок. Цикл Брайтона як основа робочого процесу ГТУ. Регенеративний цикл. ГТУ з проміжним охолодженням і підігрівом робочого тіла. ГТУ замкнутого циклу. Цикли газотурбінних авіаційних двигунів: турбореактивного, турбогвинтового, турбовального, двоконтурного, з форсажною камерою. Загальне правило одержання високоефективного циклу теплового двигуна. Індикаторна діаграма теплового двигуна періодичної дії; перехід від неї до термодинамічного аналогу. Цикли двигунів: Отто, Дизеля, Тринклера; їх ККД та співставлення. Цикли паротурбінних установок. Цикл Ренкіна простий і з перегрівом пари. Вплив параметрів циклу та властивостей робочого тіла на ефективність циклу Ренкіна. Когенераційний цикл. Бінарні цикли. Комбіновані газопаротурбінні установки. ГТУ у складі паротурбінної установки. ГТУ з впорскуванням води або пари. Утилізаційний цикл.

- *Форма занять: лекція, самостійна робота.*
- *Обсяг аудиторного навантаження: 4-6 годин.*
- *Обсяг самостійної роботи здобувачів: 2-5 годин.*
- *Обов'язкові предмети та засоби (обладнання, устаткування, матеріали, інструменти): немає.*

Тема 10. Загальні відомості про холодильні та теплонасосні установки. Цикли повітряної та парокомпресійної холодильних установок. Теплонасосні установки.

- *Форма занять: лекція, самостійна робота.*
- *Обсяг аудиторного навантаження: 4-6 годин.*
- *Обсяг самостійної роботи здобувачів: 2-5 годин.*
- *Обов'язкові предмети та засоби (обладнання, устаткування, матеріали, інструменти): немає.*

Підготовка до модульного контролю.

5. Індивідуальні завдання.

Учебний план передбачає виконання в якості індивідуального завдання 2 розрахункових робіт. Витрати часу на їх виконання складають 20 та 28 годин відповідно за рахунок обсягу самостійної роботи. Результати виконання робіт студент подає у вигляді пояснювальних записок обсягом біля 5...10 сторінок.

Перша розрахункова робота має на меті закріпити відповідні теоретичні знання і отримати необхідні навички практичних розрахунків термодинамічних параметрів суміші продуктів згоряння ракетного двигуна.

Вхідні дані: тиск, температура, об'ємні долі продуктів згоряння. Треба визначити: газову сталу суміші, масові долі продуктів згоряння, теплоємність продуктів згоряння та суміші, показник ізоентропи, густину та питомий об'єм суміші, молекулярну масу продуктів згоряння та суміші.

Роботу виконують протягом шостого-десятого тижнів третього семестру; на одинадцятий тиждень призначений її прийом. Бали за розрахункову роботу нараховують згідно якості та своєчасності її виконання.

Друга розрахункова робота має на меті закріпити відповідні теоретичні знання і отримати необхідні навички практичних розрахунків термодинамічних процесів. З огляду на майбутній фах темою розрахункових робіт є термодинамічний аналіз циклу турбореактивного двигуна.

Оскільки дисципліна «Технічна термодинаміка» розглядає ідеалізовані робочі процеси теплових машин та їх вузлів, в згаданій роботі усі розрахунки виконують відповідно до оборотних (рівноважних) процесів і станів.

Вхідні дані: параметри оточуючого середовища, швидкість потоку повітря, повна температура на вході в турбіну, масова витрата повітря.

Розглядаються повні параметри. Треба визначити оптимальну ступінь стиснення в компресорі, що забезпечує максимальну роботу двигуна; для визначеної оптимальної ступені стиснення в компресорі обчислити термічні та калоричні параметри в характерних розтиних двигуна та побудувати цикли в $p-v$, $T-s$, $i-s$ координатах для повністю зворотних процесів та процесів з урахуванням втрат (незворотних). Також розраховуються інтегральні параметри двигуна з зворотними та незворотними процесами.

Роботу виконують протягом десятого-чотирнадцятого тижнів четвертого семестру; на п'ятнадцятий тиждень призначений її прийом. Бали за розрахункову роботу нараховують згідно якості та своєчасності її виконання.

6. Методи навчання

Словесні, наочні, практичні.

7. Методи контролю

Поточний контроль (теоретичне опитування, виконання лабораторних робіт й розв'язання практичних завдань), модульний контроль (тестування за розділами курсу) та підсумковий (семестровий) контроль (іспит).

8. Критерії оцінювання та розподіл балів, які отримують студенти

Семестр №3

Складові навчальної роботи	Бали за одне заняття (завдання)		Кількість занять (завдань)	Сумарна кількість балів	
	min	max		min	max
Змістовний модуль 1					
Робота на лекціях	0	0.5	8	0	4
Виконання і захист лабораторних робіт	1	2	4	4	8
Модульний контроль	20	30	1	20	30
Змістовний модуль 2					
Робота на лекціях	0	0.5	4	0	2
Виконання і захист лабораторних робіт	1	2	4	4	8
Модульний контроль	20	30	1	20	30
Виконання і захист РР	12	18	1	12	18
Усього за семестр				60	100

Семестр №4

Складові навчальної роботи	Бали за одне заняття (завдання)		Кількість занять (завдань)	Сумарна кількість балів	
	min	max		min	max
Змістовний модуль 3					
Робота на лекціях та практичних робіт заняттях	0	0.5	12	0	6
Виконання і захист лабораторних робіт	1	2	4	4	8
Модульний контроль	20	25	1	20	25
Змістовний модуль 4					
Робота на лекціях	0	0.5	12	0	6
Модульний контроль	20	29	1	20	29

Виконання і захист лабораторних робіт	1	2	4	4	8
Виконання і захист РР	12	18	1	12	18
Усього за семестр				60	100

Прийнята шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка для екзамену, курсового проекту (роботи), практики
90-100	Відмінно
75-89	Добре
60-74	Задовільно
01-59	незадовільно з можливістю повторного складання

За виконання лабораторних робіт студент в залежності від оцінки отримує від 4 до 8 балів.

За розрахункову роботу студент в залежності від якості виконання роботи та відповідей на запитання у усній формі отримує наступні оцінки:

- «задовільно» - робота виконана та оформлена, студент відповідає на питання, які відносяться до роботи з помилками, але логіка відповідей правильна – 12 балів.
- «добре» - робота виконана та оформлена, студент відповідає на питання з незначними помилками- 16 балів.
- «відмінно» - робота виконана та оформлена, студент відповідає на питання - 18 балів.

Семестровий контроль (іспит/залік) проводиться у разі відмови студента від балів поточного тестування й за наявності допуску до іспиту/заліку.

Допуском до іспиту/заліку є здача усіх лабораторних робіт та розрахункової роботи.

Під час складання семестрового іспиту студент має можливість отримати максимум 100 балів.

Модульний контроль та іспит проводиться у вигляді тестування. Тест включає теоретичні, у відповідності до модуля, та практичні завдання.

Для отримання позитивної оцінки студент повинен підтвердити знання та отримані навички, які дозволять розробляти змістові та математичні моделі термодинамічних процесів в теплоенергетичних об'єктах.

Студент повинен вміти:

- Визначати термічні параметри стану в термодинамічному процесі, зміну калоричних параметрів стану в термодинамічному процесі.
- Визначати місцеположення, величини і джерела термодинамічної неефективності в системі.
- Аналізувати основні термодинамічні характеристики стану і процесу за допомогою методів диференціального числення.
- Графічно зображувати процеси в термодинамічних координатах. Скласти енергобаланси процесів і аналізувати належність процесу до певної групи.
- Використовувати таблиці, діаграми та ЕОМ програми теплофізичних властивостей для розрахунку термодинамічних процесів.

- Розраховувати параметри процесів витікання, дроселювання, нагнітання та розширення без урахування і з урахуванням незворотності.
- Розраховувати параметри процесів стиснення та розширення газів в компресорах та детандерах. Враховувати вплив незворотності на ефективність процесів стиснення та розширення в компресорах та детандерах.
- Складати матеріальні, енергетичні баланси та розраховувати величини потоків енергії, які входять в рівняння енергетичного балансу. Визначати незворотності та їх вплив на термодинамічну ефективність теплових процесів та теплових машин і відносні ККД обладнання з урахуванням незворотності процесів.
- Використовуючи діаграми вологого повітря виконувати аналітичні розрахунки для вологого повітря.
- Розраховувати параметри процесів в системах з фазовим перетворенням.
- Розраховувати параметри термодинамічних циклів теплових двигунів, холодильних установок та теплових насосів;
- Складати матеріальні, енергетичні баланси та розраховувати величини потоків енергії, які входять в рівняння енергетичного балансу. Визначати незворотності та їх вплив на термодинамічну ефективність теплових процесів та теплових машин і відносні ККД обладнання з урахуванням незворотності процесів.

Критерії оцінювання роботи здобувача протягом семестру

Семестр №3

Задовільно (60-74). Показати мінімум знань та умінь. Здати лабораторні роботи, захистити розрахункову роботу та здати тестування.

Знати термічні параметри стану, основні термодинамічні процеси, рівняння стану для ідеального газу, суміші ідеальних газів, калоричні параметри стану, параметри процесу (робота і теплота, теплоємності), перший закон термодинаміки для закритої системи, рівняння Майера, цикл Карно, алгоритм аналізу термодинамічного процесу, рівняння першого закону термодинаміки для потоку, повні параметри, термодинамічний аналіз компресорів і детандерів, дійсну роботу компресорів і детандерів, термодинамічний розрахунок витікання газу, швидкість звуку, диференційний та інтегральний дросель-ефекти.

Уміти: визначати термічні та калоричні параметри стану, розраховувати основні термодинамічні характеристики процесу, графічно зображувати процеси в термодинамічних координатах, розраховувати параметри процесу витікання, стиснення та розширення газів в компресорах та детандерах, визначати відносні ККД обладнання з урахуванням незворотності процесів.

Добре (75-89). Твердо знати мінімум. Здати лабораторні роботи, захистити розрахункову роботу та здати тестування. Уміти: визначати місцеположення, величини і джерела термодинамічної неефективності, використовувати таблиці, діаграми теплофізичних властивостей для розрахунку термодинамічних процесів, розраховувати параметри суміші ідеальних газів, параметри реальних газів.

Відмінно (90-100). Здати всі контрольні точки з оцінкою «відмінно». Досконально знати всі теми та уміти застосовувати їх.

Семестр №4

Задовільно (60-74). Показати мінімум знань та умінь. Здати лабораторні роботи, захистити розрахункову роботу та здати тестування.

Знати правило фаз Гіббса, рівняння Клапейрона-Клаузіуса, термічні та калоричні параметри двофазової зони. властивості вологого повітря, I-d діаграма вологого повітря, термодинамічні процеси у вологому повітрі, цикл Брайтона, цикли Отто, Дизеля, Тринклера, їх ККД та співставлення, цикли паротурбінних установок, цикли повітряної та парокомпресорної холодильних установок.

Уміти: виконувати розрахунки процесів у вологому повітрі, у системах з фазовим перетворенням, розраховувати параметри термодинамічних циклів теплових двигунів, холодильних установок та теплових насосів;

Добре (75-89). Твердо знати мінімум. Здати лабораторні роботи, захистити розрахункову роботу та здати тестування. Уміти: складати матеріальні, енергетичні баланси та розраховувати величини потоків енергії, які входять в рівняння енергетичного балансу, визначати ККД обладнання з урахуванням незворотності процесів.

Відмінно (90-100). Здати всі контрольні точки з оцінкою «відмінно». Досконально знати всі теми та уміти застосовувати їх.

9. Політика навчального курсу

Відпрацювання пропущених занять відбувається відповідно до розкладу консультацій, за попереднім погодженням з викладачем. Питання, що стосуються академічної доброчесності, розглядає викладач або за процедурою, визначеною у Положенні про академічну доброчесність.

10. Методичне забезпечення та інформаційні ресурси

Підручники, навчальні посібники, навчально-методичні посібники, конспекти лекцій, методичні рекомендації з проведення лабораторних робіт тощо, які видані в Університеті знаходяться за посиланням:

- http://library.khai.edu/catalog?clear_all_params=0&mode=KNMZ&lang=ukr&caller_mode=SearchDocForm&ext=no&theme_path=0&themes_basket=&ttp_themes_basket=&disciplinerearch=no&top_list=1&fullsearch fld=&author fld=%D0%A0%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2&docname fld=&docname_cond=beginwith&theme_context=%D0%A0%D1%96%D0%B7%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F+%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B2&theme_cond=all_theme&theme_id=0&is_ttp=0&combiningAND=0&step=20&tpage=1
- Або на сайті кафедри <https://khaikaf205.wixsite.com/main>
- Сторінка дисципліни знаходиться за посиланням: <https://mentor.khai.edu/course/view.php?id=1232>

11. Рекомендована література

Базова

1. Буляндра, О. Ф. Технічна термодинаміка: Підруч. для студентів енерг. спец. вищ. навч. закладів. – К.: Техніка, 2001. – 320 с.: іл. – Бібліогр.: с. 315. ISBN 966-575-103-4.
2. FUNDAMENTALS OF THERMODYNAMICS / C. BORGNAKKE, R. E. SONNTAG. - University of Michigan (Seventh edition), ISBN-13 978-0-470-04192-5

3. Єпіфанов, К. С. Термодинаміка і теплообмін. Ч. 1. Технічна термодинаміка [Текст] : консп. лекцій / К. С. Єпіфанов. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського “Харків. авіац. ін-т”, 2021. – 96 с.
4. Єпіфанов, К. С. Технічна термодинаміка. Навчальний посібник до лабораторних робіт за дисципліною «Технічна термодинаміка» [Текст] : К. С. Єпіфанов.– Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського “Харків. авіац. ін-т”, 2021. – 85 с.
5. Єпіфанов, К. С. Термодинаміка і теплообмін. Навчальний посібник до виконання розрахункових робіт [Текст] / К. С. Єпіфанов, М. В. Амброжевич. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського “Харків. авіац. ін-т”, 2022. – 129 с.
6. Беляев Н.М. Термодинамика. Киев: Вища школа, 1987 – 344 с.

Допоміжна

1. Приходько М. А., Герасимов Г. Г. Термодинаміка та теплопередача. Навчальний посібник – Рівне: НУВГП, 2008. – 210 с.
2. Конспект лекцій з термодинаміки /Укл.: Тельний А. П., Кавера О. Л. – Донецьк: ДонНТУ. – 2010. – 58 с.
3. Теплохолодотехніка. Навчальний посіб./ Василенко С. М., Павелко В. І., Форсюк А. В., Масліков М. М., Іващенко Н. В., Барановська С. В. – К.: Видавництво Ліра-К, 2019. – 258 с.
4. Мороз, І. О. Основи термодинаміки: Навч. посіб. для студентів ВНЗ України. – Суми: СумДПУ ім. А. С. Макаренка, 2009. – 180 с.