



Національний технічний університет України
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»



Кафедра фізики
енергетичних систем

Термодинаміка газового потоку

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

1. Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>10 Природничі науки</i>
Спеціальність	<i>105 Прикладна фізика та наноматеріали</i>
Освітня програма	<i>Прикладна фізика</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>Очна (денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>2 курс, весняний семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>4 кредити, 120 годин, 36 годин лекції, 18 годин практичних, 66 самостійна робота</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Залік, модульна контрольна робота, розрахунково-графічна робота</i>
Розклад занять	<i>http://ipt.kpi.ua/navchalnij-protses</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лектор: доцент, к.ф.-м.н., Гільчук Андрій Володимирович, моб. (096)9378658, a.v.gilchuk@gmail.com Практичні: доцент, к.ф.-м.н., Гільчук Андрій Володимирович, моб. (096)9378658, a.v.gilchuk@gmail.com</i>
Розміщення курсу	<i>https://do.ipk.kpi.ua/course/view.php?id=1898</i>

2. Програма навчальної дисципліни

1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Термодинаміка газового потоку є базовою дисципліною енергетичного циклу в системі підготовки бакалаврів і магістрів за спеціальністю «Прикладна фізика і наноматеріали». Вона дає основні знання про термодинамічні процеси в газовому потоці. Термодинаміка газового потоку – наука про процеси, що відбуваються в газовому потоці в процесі його руху та методи їх наближеного опису. Дана інформація широко використовується при проектуванні теплових установок та двигунів. Викладання дисципліни включає лекції та практичні заняття.

Метою кредитного модуля є формування у студентів здатностей: отримання професійних знань в області законів руху газового потоку для розрахунків параметрів газового потоку в елементах енергетичного устаткування; отримання професійних знань в області перетворення теплової енергії в механічну, розрахунку циклів і їх оптимізації, отримані знання дають можливість виконувати дослідження фізичних процесів в енергетичних установках.

Згідно з вимогами програми навчальної дисципліни студенти після засвоєння кредитного модуля мають продемонструвати такі результати навчання:

знання закономірностей руху газу в умовах перетворення теплової енергії в механічну, аналізу термодинамічних циклів теплових машин;

вміння самостійно формулювати, аналізувати і вирішувати завдання руху газового потоку в елементах енергетичного устаткування;

досвід розрахунку термодинамічних циклів і дослідження процесів перетворення теплоти в механічну енергію в поршневих і авіаційних двигунах, перетворення механічної енергії в холодильних машинах, теплових насосах.

Загальні компетентності (ЗК)

ЗК9 Здатність працювати автономно

Фахові компетентності (ФК)

ФК7 Здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та математичного моделювання в професійній діяльності.

ФК11 Здатність використовувати знання основ професійно-орієнтованих дисциплін для виконання наукових досліджень, розв'язання практичних проблем прикладної фізики та для самостійного опанування нових технологій, в тому числі із суміжних галузей, застосовувати отримані знання і практичні навички для прийняття інноваційних рішень при розв'язанні складних практичних задач або в навчанні, зокрема, високих фізичних технологій та/або фізики живих систем та/або фізики енергетичних систем.

Програмні результати навчання (ПРН)

ПРН6 Відшукувати необхідну науково-технічну інформацію в науковій літературі, електронних базах, інших джерелах, оцінювати надійність та релевантність інформації.

ПРН7 Класифікувати, аналізувати та інтерпретувати науково-технічну інформацію в галузі прикладної фізики.

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Для освоєння курсу студенти повинні мати базові знання по дисциплінах «Математичний аналіз», «Загальна фізика. Механіка», «Загальна фізика. Термодинаміка і молекулярна фізика». Дисципліна слугує основою для курсу «Термодинаміка циклів».

3. Зміст навчальної дисципліни

Розділ 1. Термодинамічна система.
Тема 1.1. Параметри стану і термодинамічний процес.
Тема 1.2. Рівняння стану ідеального і реального газу.
Розділ 2. Перший закон термодинаміки.
Тема 2.1. Внутрішня енергія, робота і теплота.
Тема 2.2. Основні термодинамічні процеси.
Розділ 3. Другий закон термодинаміки.

Тема 3.1. Цикл Карно і термічний ККД.
Тема 3.2. Оборотні і необоротні цикли.
Тема 3.3. Ентропія і T-S діаграма
Тема 3.4. Нерівноважні процеси.
Розділ 4. Основні рівняння термодинаміки газового потоку.
Тема 4.1. Основні рівняння: нерозривності, енергії, 1 закону термодинаміки, Бернуллі.
Тема 4.2. Параметри адіабатного загальмованого потоку.
Модульна контрольна робота
Розділ 5. Розгін і гальмування газового потоку.
Тема 5.1. Газодинамічні функції.
Тема 5.2. Перебіг в соплі Лавалю. Умови розгону і гальмування потоку.
Розділ 6. Ідеальні цикли теплових двигунів.
Тема 6.1. Цикли поршневих двигунів.
Тема 6.2. Цикли реактивних двигунів.
Розділ 7. Термодинаміка реальних газів.
Тема 7.1. Фазові і ентропійні діаграми.
Тема 7.2. Дроселювання газу.
Розділ 8. Цикли холодильних установок
Тема 8.1. Загальні положення. Цикл повітряної холодильної установки.
Тема 8.2. Цикл парової компресійної холодильної установки.
Тема 8.3. Глибоке охолодження. Теплові насоси.
Залік

4. Навчальні матеріали та ресурси

Основні

1. Халатов А.А., Гільчук А.В., Кохтич Л.М. Термодинаміка газового потоку. К.: Політехніка, 2020. - 253 с.

Додаткові

1. Кириллін В.А., Сичев В.В., Шейндлін А.Е. Технічна термодинаміка. М.: Енергія, 1974. – 436 с.
2. Мухачев Г.А., Щукін В.К. Термодинаміка і теплопередача. М. Вища школа: 1991. – 480 с.
3. Беляев Н.М. Термодинаміка. К.: Вища школа. 1987. – 342 с.
4. Болгарський А.В. і ін. Збірка завдань по термодинаміці і теплопередачі. М.: Вища школа. 1987. – 342 с.

5. Навчальний контент

6. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні заняття

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, завдання на СРС з посиланням на літературу)
1	Предмет і місце дисципліни «Термодинаміка газового потоку» в області фізико-технічних проблем енергетики. Роль предмету в розумінні явищ природи і розвитку енергетики. Структура курсу. Параметри стану і термодинамічна система. Термодинамічний процес. Теплоємність газу. Теплоємність процесу.

Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 4-10], [3, стор. 3-15], [2, стор. 5-15], [4, стор. 4-5].
Завдання на СРС:	Основи молекулярно-кінетичної теорії
2	Рівняння стану ідеального газу. Універсальна газова постійна. Газова постійна і її фізичний сенс. Значення газової постійної для різних газів. Окремі випадки рівняння стану ідеального газу. Рівняння стану реального газу. Аналіз рівняння Ван-дер-Ваальса. Газові суміші.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 10-21], [2, стор. 15-21], [3, стор. 15-29].
Завдання на СРС:	параметр стисливості різних речовин
3	Зміст першого закону термодинаміки. Внутрішня енергія, робота і теплота, ентальпія.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 24-36], [2, стор. 21-28], [3, стор. 47-53].
Завдання на СРС:	Поняття тиску і температури
4	Ізохорний, ізобарний, ізотермічний адіабатний процес. Показник адіабати. Політропні процеси, показник політропи. Зображення термодинамічних процесів в P-V діаграмі
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 185-205], [2, стор. 47-60], [3, стор. 70-83].
Завдання на СРС:	Термодинамічні процеси в T-S та i-S діаграмі.
5	Поняття циклу. Формулювання другого закону термодинаміки. Термічний ККД циклу теплового двигуна. Цикл Карно і його властивості. Термічний ККД циклу Карно.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 40-67], [2, стор. 61-68], [3, стор. 89-94].
Завдання на СРС:	Прямі і зворотні цикли, теорема Карно. Узагальнений цикл Карно. Середньоінтегральна температура процесу
6	Властивості оборотних і необоротних циклів. Інтеграл Клаузіуса. Ентропія і її зміна в оборотних і необоротних процесах.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 43-47], [2, стор. 79-90], [3, стор. 86-89, 95-98].
Завдання на СРС:	Оборотні і необоротні цикли. Види незворотностей. Статистичний сенс ентропії. Властивості ентропії. Ентропія ізольованої системи
7	Ентропія ізольованої системи. Ентропія як міра безповоротності процесів в ізольованій системі. Втрати корисної роботи в необоротних процесах. Координати T-S. Основні термодинамічні процеси в T-S діаграмі. Узагальнений цикл Карно. Координати i-S. Нерівноважні процеси.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 57-74], [2, стор. 74-77, 79-90], [3, стор. 95-98].
Завдання на СРС:	Рівняння для розрахунку роботи, підведеної і відведеної теплоти в термодинамічних процесах
8	Рівняння нерозривності. Рівняння збереження енергії. Рівняння першого закону термодинаміки. Узагальнене рівняння Бернуллі.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 233-241], [2, стор. 42-46], [3, стор. 177-180].
Завдання на СРС:	Рівняння Нав'є-Стокса
9	Параметри адіабатного загальмованого потоку. Критичні параметри потоку. Рівняння збереження енергії в параметрах загальмованого потоку. Окремі випадки рівняння збереження енергії. Зміна повної температури і повного тиску в газовому потоці.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 257-258], [2, стор. 126-128], [3, стор. 186-187].
Завдання на СРС:	Методи вимірювання тиску і температури. Повна і статична температура. Повний тиск. Робота компресора і турбіни в параметрах загальмованого потоку.

10	Газодинамічні функції. Число Маха і приведена швидкість. Критична швидкість. Відносні параметри. Приведена витрата і газодинамічна функція витрати.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 237-241], [2, стор. 124-125], [3, стор. 181-182].
Завдання на СРС:	Параметри адіабатного загальмованого потоку. Критичні параметри потоку. Практичне використання газодинамічних функцій
11	Форма каналу, необхідна для розгону і гальмування газового потоку. Ідеальна течія газу в соплах. Ідеальна течія газу в соплі, що звужується, і соплі Лавалю. Особливості розгону і гальмування газу при різних діях.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 241-257], [2, стор. 128-135], [3, стор. 181-186].
Завдання на СРС:	Побудова профілю сопла Лавалю. Розрахунок параметрів потоку в критичному перетині сопла
12	Цикл з підведенням тепла при $P = \text{const}$ (Дизеля). Цикл з підведенням тепла при $V = \text{const}$ (Отто). Порівняння циклів. Робота і ККД циклів..
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 276-286], [2, стор. 248-154], [3, стор. 267-277].
Завдання на СРС:	Робота циклу Отто, Дизеля, Ренкіна
13	Цикл Брайтона, робота і ККД циклу. Оптимальні параметри циклу Брайтона. Цикл ракетного двигуна.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 286-309], [2, стор. 156-161], [3, стор. 277-297].
Завдання на СРС:	Робота циклу Брайтона
14	Основні визначення – параметри насичення, насичена і суха насичена пара. Перегріта пара і ступінь сухості пари. Фазова p - t діаграма, правило фаз Гіббса. Потрійна точка. Фазова діаграма P - V . Критичні параметри речовини. Ентропійні діаграми.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 104-121], [2, стор. 191-193], [3, стор. 149-158].
Завдання на СРС:	Фазові переходи першого і другого роду. Співвідношення Клапейрона–Клаузіуса та Еренфеста
15	Дроселювання газу, ефект Джоуля-Томсона. Зміна ентальпії при дроселюванні. Цикл Ренкіна і його ККД.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 205-215, 311-318], [2, стор. 135-137], [3, стор. 192-197, 290-306].
Завдання на СРС:	Параметри дроселювання потоку
16	Загальні положення, холодильний коефіцієнт. Холодильні агенти. Холодовиробництво. Зворотний цикл Карно. Компресійні холодильні установки. Цикл повітряної холодильної установки. Недоліки повітряних холодильних установок.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 370-373], [2, стор. 174-177], [3, стор. 322-324].
Завдання на СРС:	Розрахунок циклу пароконденсаторної холодильної установки
17	T - S – діаграма. Відведена і підведена теплота. Холодильний коефіцієнт. Переваги і недоліки. Основні хладагенти.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 377-384], [2, стор. 177-178], [3, стор. 324-326].
Завдання на СРС:	Магнітокалоричний ефект.
18	Цикли глибокого холоду: методи Лінді і Клода. Аналіз T - S діаграми. Цикл теплового насоса і його аналіз. Коефіцієнт перетворення. Застосування теплових насосів в системах опалювання.
Література:	Осн. [1], дод. [1, стор. 392-398], [2, стор. 178-179], [3, стор. 326-329].
Завдання на СРС:	Новітні напрямки створення холодильних установок

СРС:

Практичні заняття

№ з/п	Назва теми заняття
1	Рівняння стану ідеального газу. Газові суміші
Література:	Осн. [1], дод. [4, стор. 5-9]
Завдання на СРС:	Основи молекулярно-кінетичної теорії
2	Основні термодинамічні процеси. Зміна внутрішньої енергії, роботи, теплоти і ентальпії
Література:	Осн. [1], дод. [4, стор. 36-49]
Завдання на СРС:	Термодинамічні процеси в T-S та i-S діаграмі
3	Зміна ентропії в термодинамічних процесах, T-S діаграма
Література:	Осн. [1], дод. [4, стор. 50-57]
Завдання на СРС:	Оборотні і необоротні цикли. Види незворотностей. Статистичний сенс ентропії. Властивості ентропії. Ентропія ізольованої системи
4	Основні рівняння термогазодинаміки газового потоку і їх застосування
Література:	Осн. [1], дод. [4, стор. 91-98]
Завдання на СРС:	Методи вимірювання тиску і температури. Повна і статична температура. Повний тиск.
5	Перебіг газу через дозвукове і надзвукове сопло Лавалю
Література:	Осн. [1], дод. [4, стор. 91-98]
Завдання на СРС:	Побудова профілю сопла Лавалю. Розрахунок параметрів потоку в критичному перетині сопла
6	Цикли поршневих і реактивних двигунів, робота циклу і його ККД
Література:	Осн. [1], дод. [4, стор. 78-90]
Завдання на СРС:	Робота циклу Отто, Дизеля, Ренкіна, Брайтона
7	Фазові і ентропійні діаграми. Дроселювання газу
Література:	Осн. [1], дод. [4, стор. 66-77]
Завдання на СРС:	Параметри дроселювання потоку
8	Цикли холодильних установок. Холодильний коефіцієнт і холодовиробництво
Література:	Осн. [1], дод. [4, стор. 66-77]
Завдання на СРС:	Розрахунок циклу парокомпресорної холодильної установки

7. Самостійна робота студента/аспіранта

№ з/п	Назви тем і питань, що виносяться на самостійне опрацювання та посилання на навчальну літературу
1	Основи молекулярно-кінетичної теорії; тиск, температура, параметр стисливості різних речовин.
2	Прямі і зворотні цикли, теорема Карно.
3	Оборотні і необоротні цикли. Види незворотностей. Статистичний сенс ентропії. Властивості ентропії. Ентропія ізольованої системи.
4	Термодинамічні процеси в T-S та i-S діаграмі. Рівняння для розрахунку роботи, підведеної і відведеної теплоти в термодинамічних процесах.
5	Узагальнений цикл Карно. Середньоінтегральна температура процесу.

6	Рівняння Нав'є-Стокса.
7	Методи вимірювання тиску і температури. Повна і статична температура. Повний тиск. Параметри адіабатного загальмованого потоку. Критичні параметри потоку
8	Робота компресора і турбіни в параметрах загальмованого потоку. Практичне використання газодинамічних функцій.
9	Побудова профілю сопла Лавалю. Розрахунок параметрів потоку в критичному перетині сопла
10	Робота циклу Отто, Дизеля, Брайтона, розрахунок їх ККД. Оптимальні параметри циклу Брайтона.
11	Фазові переходи першого і другого роду. Співвідношення Клапейрона–Клаузіуса та Еренфеста
12	Розрахунок циклу Ренкіна. Параметри дроселювання потоку. Розрахунок циклу парокомпресорної холодильної установки.
13	Новітні напрямки створення холодильних установок.

3. Політика та контроль

8. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Відвідування занять

Відвідування всіх лекцій і всіх практичних занять оцінюються в 18 балів (Лекції – 9 балів, практичні заняття – 9 балів).

Заохочення

Найкращий конспект лекцій – до 5 балів, участь у факультетській олімпіаді по фізиці – від 5 до 10 балів залежно від результату, за наявності підтверджуючих документів. Участь в конференції – 10 балів.

Пропущені контрольні заходи

Результат модульної контрольної роботи для студента(-ки), який не з'явився на контрольний захід, є нульовим. У такому разі, студент(-ка) має можливість написати модульну контрольну роботу, але максимальний бал за неї буде дорівнювати 50% від загальної кількості балів. Повторне написання модульної контрольної роботи не допускається.

Тематичне завдання, яке подається на перевірку з порушенням терміну виконання, не оцінюється.

Календарний рубіжний контроль

Проміжна атестація студентів (далі – атестація) є календарним рубіжним контролем. Метою проведення атестації є підвищення якості навчання студентів та моніторинг виконання графіка освітнього процесу студентами ¹.

Критерій		Перша атестація	Друга атестація
Термін атестації ²		8-ий тиждень	16-ий тиждень
Умови	Поточний рейтинг ³	≥ 10 балів	≥ 30 балів

¹ Рейтингові системи оцінювання результатів навчання: Рекомендації до розроблення і застосування. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 20 с.

² Там само.

³ Там само.

отримання атестації	Поточний контрольний захід	Модульна контрольна робота	+	+
	Поточний контрольний захід	Захист РГР	+	+

Академічна доброчесність

Політика та принципи академічної доброчесності визначені у розділі 3 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

Норми етичної поведінки

Норми етичної поведінки студентів і працівників визначені у розділі 2 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

Процедура оскарження результатів контрольних заходів

Студенти мають можливість підняти будь-яке питання, яке стосується процедури контрольних заходів та очікувати, що воно буде розглянуто згідно із наперед визначеними процедурами.

Студенти мають право оскаржити результати контрольних заходів, але обов'язково аргументовано, пояснивши з яким критерієм не погоджуються відповідно до оціночного листа та/або зауважень.

Дистанційне навчання (необов'язковий пункт)

Дистанційне навчання здійснюється через ZOOM, Telegram, електронну пошту тощо. Проводяться заняття онлайн, надаються всі необхідні матеріали, видаються завдання для самостійної роботи з можливістю консультування з викладачем, подальша їх перевірка та оцінювання.

9. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Видами контролю успішності засвоєння матеріалу є оцінка за відвідування лекцій і практичних занять, відповіді і рішення завдань на практичних заняттях, модульну контрольну роботу (МКР), виконання і захист розрахунково-графічної роботи та семестровий контроль (залік).

Відвідування лекцій і практичних занять

Відвідування всіх лекцій і всіх практичних занять оцінюються в 18 балів (Лекції – 9 балів, практичні заняття – 9 балів). Відсутність на лекції і практичному занятті без поважних причин (-1) бал. Максимальна кількість балів – 18.

Відповіді і рішення завдань на практичних заняттях

Максимальна кількість балів – 12. За неправильну відповідь знімається (-1) бал, за неправильне рішення задачі знімається (-1) бал. Не повна відповідь і не повне рішення задачі – знімається (-0,5) балу.

Модульна контрольна робота (МКР)

Модульна контрольна робота проводиться після вивчення 4 теми в письмовому вигляді і складається з теоретичних питань і задачі.

Максимальна кількість балів за контрольну роботу – 20 балів.

- вичерпна відповідь – 20 балів;
- відповідь з незначними неточностями – 15-19 балів;
- неповна відповідь та незначні помилки – 10 – 15 балів;

- грубі помилки – 1-9
- незадовільна відповідь – 0 балів.

Виконання і захист розрахунково-графічної роботи (РГР)

Кожному студенту видається індивідуальний варіант по розрахунку параметрів циклів двигунів внутрішнього згоряння. Виконана РГР надсилається на перевірку, після чого відбувається її захист. Захист полягає в тому, що студент має пояснити значення основних величин, що використовуються при розрахунку, пояснити логіку їх обчислення, відповісти на теоретичні питання пов'язані з темою РГР. Максимальний бал 20.

Умови допуску до заліку

Обов'язкова умова допуску до заліку		Критерій
1	Поточний рейтинг	RD \geq 30
2	Модульна контрольна робота	Виконана
3	Розрахунково-графічна робота	Виконана і захищена

Семестровий контроль (залік)

Залік проводиться в усній формі, підготовка відповіді і рішення задачі подаються у письмовій формі.

Квиток включає 3 завдання – 2 теоретичних питання і 1 завдання. Максимальна кількість балів: 2 теоретичних питання – 20 балів.

Рішення задачі – 10 балів.

Додаткове питання (1), повна відповідь – 5 балів.

Максимальний бал за кожне завдання відповідає повній відповіді, відповідному курсу лекцій. Середній – при правильній відповіді допущені неprincipпові помилки.

Остаточна оцінка **RD** є сумою рейтингових балів отриманих за поточний контроль та балів отриманих за залік після співбесіди зі студентом.

№	Контрольний захід	Бал
1	Відвідування лекцій і практичних занять	18
2	Відповіді і вирішення завдань на практичних заняттях	12
3	Модульна контрольна робота	20
4	Розрахунково-графічна робота	20
7	Залік	30
	Всього	100

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено доцент, к.ф.-м.н, Гільчук Андрій Володимирович

Ухвалено кафедрою фізики енергетичних систем (протокол № 2 від 4 вересня 2020 року)

Затверджено Вченою радою ФТІ (протокол № 7/1 від 7 вересня 2020 року)