



Технічна термодинаміка.

Частина 2. Термодинамічні процеси та цикли

Робоча програма навчальної дисципліни (силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Перший (бакалаврський)
Галузь знань	14 Електрична інженерія
Спеціальність	143 Атомна енергетика
Освітня програма	Атомні електричні станції
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	очна(денна)
Рік підготовки, семестр	II курс, весняний семестр
Об'єм дисципліни	5,0 кредитів ЄКТС (150 годин), 36 години лекцій, 36 годин практичні заняття, 78 годин самостійної роботи
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Екзамен/модульна контрольна робота
Розклад занять	http://roz.kpi.ua/
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: к.т.н, доц. Воробйов Микита Валерійович, vorobiov.nikv@gmail.com Практичні заняття: к.т.н, доц. Воробйов Микита Валерійович, vorobiov.nikv@gmail.com
Розміщення курсу	https://campus.kpi.ua/

Програма навчальної дисципліни

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

Си́лабус навчальної дисципліни «Технічна термодинаміка» складено відповідно до освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів за спеціальністю 143 Атомні електричні станції.

«Технічна термодинаміка» належить до циклу дисциплін професійної та практичної підготовки і є однією з найважливіших складових теоретичних основ теплотехніки і являється фундаментом прикладних дисциплін в фаховій підготовці інженерів теплоенергетичних спеціальностей.

Предметом навчальної дисципліни «Технічна термодинаміка» є фізична сутність та закономірності процесів енергетичних, в основному тепломеханічних, взаємодій і перетворень, а також пов'язаними з цими процесами властивостей робочих тіл.

Метою кредитного модуля є формування у студентів таких компетенцій:

– Здатність використовувати аналітичні та експериментальні методи, а також методи моделювання для вирішення професійних завдань (ФК 10).

– Здатність розробляти енергозберігаючі технології та енергоощадні заходи під час проектування та експлуатації енергетичного і теплотехнологічного обладнання для об'єктів атомної енергетики (ФК 14).

Набуті знання забезпечують подальше успішне засвоєння студентами спеціальних дисциплін. В наслідок вивчення курсу студенти набувають наступних програмних результатів навчання:

– Знання і розуміння математики, фізики, хімії та інженерних наук на рівні, необхідному для досягнення результатів освітньої програми, в тому числі певна обізнаність в останніх досягненнях в галузі (ПРН 1).

– Обирати і застосовувати типові аналітичні, розрахункові та експериментальні методи для розв'язування складних спеціалізованих задач і практичних проблем у галузі атомної енергетики; правильно інтерпретувати результати виконаних досліджень та розрахунків (ПРН 3).

– Здійснювати розрахунки об'єктів атомно-енергетичного комплексу, виробів, процесів і систем в галузі атомної енергетики, що задовольняють конкретні технічні, економічні, законодавчі та інші вимоги; обрання і застосовування адекватної методології проектування (ПРН 5).

- Застосовувати загальне і спеціалізоване програмне забезпечення, а також навички програмування для вирішення професійних завдань в галузі атомної енергетики (ПРН 6).
- Знати і розуміти основні характеристики, сферу застосування та обмеження обладнання, матеріалів та інструментів, інженерних технологій і процесів, що використовуються при вирішенні професійних завдань (ПРН 12).
- Знання і розуміння інженерних дисциплін на рівні, необхідному для досягнення інших результатів освітньої програми, в тому числі певна обізнаність в останніх досягненнях атомної енергетики (ПРН 20).

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

Пререквізити: Технічна термодинаміка. Частина 1. Закони термодинаміки. Властивості робочих тіл (рідин газів).

Постреквізити: Теорія теплообміну, Турбіни АЕС, а також дисципліни циклу професійної підготовки (вільного вибору), для засвоєння матеріалу яких необхідні знання закономірностей енергетичних процесів, а також пов'язаними з цими процесами властивостей робочих тіл.

3. Зміст навчальної дисципліни

Розділ 8. Термодинаміка потоку.

Тема 8.1. Основні закономірності процесу течії.

Рівняння першого закону термодинаміки для потоку. Спрощення виразу за різних умов. Соплова та дифузійна течія. Швидкість течії та секундна витрата. Критична швидкість та критичне відношення тисків. Швидкість звуку. Параметри гальмування.

Тема 8.2. Витікання із простого сопла.

Витікання газу через канали різної форми без урахування тертя. Залежність форми каналу від режиму течії. Витікання газу, через сопло, що звужується. Критична швидкість.

Тема 8.3. Перехід через швидкість звуку.

Сопло Лавалю. Надзвукове сопло. Витікання із врахуванням тертя. Розрахунок витікання водяної пари.

Тема 8.4. Дроселювання газів і парів.

Ефект Джоуля-Томпсона. Диференціальний та інтегральний дросельний ефект. Поняття про температуру інверсії. Крива інверсії.

Розділ 9. Основи процесу нагнітання.

Тема 9.1. Поршневий компресор.

Робоча діаграма компресора. Робота компресора. Ізотермічне, адіабатне та політропне стиснення. Термодинамічне обґрунтування багатоступеневого стиснення.

Тема 9.2. Типи компресорів.

Робота компресора в різних процесах нагнітання (ізотермічному, адіабатному, політропному). Одноступеневі і багатоступеневі компресори. Робота компресора з урахуванням тертя. Відносний внутрішній коефіцієнт корисної дії. Проміжне охолодження компресора. Об'ємний к.к.д. компресора.

Розділ 10. Цикли паросилових (паротурбінних) установок.

Тема 10.1. Простий ідеальний та реальний цикл для ПСУ.

Простий ідеальний та реальний цикл ПСУ – цикл Ренкіна, його особливості та характеристики. Основні принципи класифікації циклів теплових машин: за призначенням, за діапазоном температур, за напрямом здійснення циклу. Ідеальний тепломеханічний цикл. Поняття про тепломеханічні цикли (ТМЦ) та теплосилові установки (ТСУ). Класифікація циклів по прояву необоротностей. Простий ідеальний цикл та оцінка його ефективності по енергетичним показникам.

Тема 10.2. Принципова схема паросилової установки. Термічний коефіцієнт корисної дії циклу Ренкіна. Тепловий і енергетичний баланс паросилової установки. Вплив параметрів пари на термічний коефіцієнт корисної дії циклу. Цикл із проміжним перегрівом пари. Цикл із регенеративним підігрівом води живлення. Теплофікаційні цикли. Оцінка ефективності реального циклу. Внутрішні та зовнішні необоротності. Оцінка внутрішніх необоротностей за допомогою відносного внутрішнього ККД циклу.

Тема 10.3. Основні способи підвищення ефективності циклів.

Термодинамічні основи теплофікації. Комбіноване виробництво теплоти і електроенергії на ТЕЦ, термодинамічне обґрунтування. Основні схеми ТЕЦ. Теплофікація і екологія. Загальні відомості про ТЕС, ТЕЦ і АЕС. Цикли атомних електричних станцій.

Розділ 11. Цикли газотурбінних установок.

Тема 11.1. Парогазові цикли.

Ексергетичний аналіз циклів паросилових та газотурбінних установок. Динаміка регулювання газової турбіни. Схема газотурбінної установки та аналіз циклу із ізобарним підведенням теплоти. Термічний коефіцієнт корисної дії циклу газотурбінної установки. Загальні відомості про ГТУ. Цикли ГТУ з ізобарним та ізохорним

підведенням теплоти, адіабатним та ізотермічним стисненням в компресорі. Тепломеханічний коефіцієнт ідеального циклу ГТУ, залежність його від ступені підвищення тиску. Відношення роботи компресора до роботи турбіни в ідеальному циклі. Вплив необоротності адіабатних процесів стиснення і розширення на показники ефективності реального циклу ГТУ.

Тема 11.2. Методи підвищення к.к.д. циклів ГТУ.

Підвищення початкової температури газу перед турбіною. ГТУ з регенеративним підігрівом. ГТУ з регенеративним підігрівом і багатоступінчатим стисненням та розширенням робочого тіла. Замкнуті схеми ГТУ.

Розділ 12. Бінарні цикли.

Тема 12.1. Бінарні цикли.

Ртутно-водяний цикл. Цикли атомних електричних станцій. Ексергетичний аналіз циклів паросилових установок. Динаміка регулювання парової турбіни. Схема та аналіз циклу із ізобарним підведенням теплоти. Термічний коефіцієнт корисної дії циклу.

Розділ 13. Цикли двигунів внутрішнього згоряння

Тема 13.1. Цикли ДВЗ.

Внутрішній відносний і внутрішній абсолютний коефіцієнт корисної дії. Ексергетичний метод аналізу циклів. Принцип роботи двигунів внутрішнього згоряння, індикаторна діаграма. Основні цикли двигунів внутрішнього згоряння, термічний коефіцієнт корисної дії. Зображення циклів. Ідеальні цикли ДВЗ з ізохорним, ізобарним і змішаним підведенням теплоти. Аналіз факторів, які впливають на ефективність циклів ДВЗ. Реальні цикли ДВЗ. Поняття про цикли прямооточних, турбореактивних і реактивних двигунів.

Розділ 14. Цикли холодильних машин.

Тема 14.1. Цикли холодильних установок.

Застосування 1-го та 2-го законів термодинаміки до зворотних циклів і основні висновки. Оборотний цикл Карно для холодильних і теплонасосних установок. Ідеальний зворотний цикл Карно. Вплив необоротностей в процесах теплообміну при кінцевій різниці температур на ефективність зворотних циклів. Способи зниження цих необоротностей. Особливості реалізації зворотних циклів та вплив необоротностей на їх ефективність. Тема 14.2. Цикли повітряної і парової компресорної установки.

Повітряна холодильна установка. Парокомпресорна холодильна установка. Характеристика холодильних агентів. Поняття про абсорбційні та пароежекторні холодильні установки.

Розділ 15. Цикл теплового насосу

Тема 15.1. Цикл теплового насосу.

Аналогія циклів холодильних установок (повітряної і парової компресорної установки) та циклу теплового насосу. Теплонасосні установки. Особливості циклів ТНУ. Застосування ТНУ в системах тепlopостачання, теплохолодopостачання та кондиціювання повітря. Економія палива при використанні ТНУ в порівнянні з електронагрівачем, районною котельнею.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова (підручники, навчальні посібники) література.

1. Константинов С.М. Технічна термодинаміка. – К.: Політехніка, 2001. – 368 с.
2. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка. – К.: Техніка, 2001. - 320 с.
3. Пеньков В.І. Технічна термодинаміка. – Рівне: НУВГП, 2010. - 209 с.
4. Дубровська В.В., Шкляр В.І. Термодинаміка та теплообмін. – К.: НТУУ «КПІ», Вид-во «Політехніка», 2016. – 152 с.

Додаткова (монографії, статті, документи, електронні ресурси) література.

5. Василенко С.М. Теплохолодотехніка. – К.: Вид-во Ліра-К, 2019. – 258 с.
6. Мінаковський В.М., Соломаха А.С.. Технічна термодинаміка. Приклади, задачі та типові розрахунки. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – 172 с.
7. Приходько М.А., Герасимов Г.Г. Термодинаміка та теплопередача. - Рівне: НУВГП, 2008. - 250 с.
8. Шестаков В.Л. Термодинаміка. - Рівне: НУВГП, 2009. - 150 с.
9. Desmet B. Thermodynamics of Heat Engines. - ISTE Ltd 2022. - Library of Congress Control Number: 2022941652. – 528 p.
10. Baehr H.D., Kabelac S. Thermodynamic. – Springer-Lehrbuch, 2022. - ISBN: 978-3-642-24161-1. – 520 p.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Згідно навчального плану для опанування матеріалу дисципліни передбачено лекційні та практичні заняття

Зміст навчальної роботи	СРС
Лекція 1. Розділ 8. Термодинаміка потоку. Теми 8.1 і 8.2. Основні закономірності процесу течії. Рівняння першого закону термодинаміки для потоку. Спрощення виразу за різних умов. Соплова та дифузійна течія. Швидкість течії та секундна витрата. Критична швидкість та критичне відношення тисків. Швидкість звуку. Параметри гальмування. Витікання із простого сопла. Витікання газу через канали різної форми без урахування тертя. Залежність форми каналу від режиму течії. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].	Рівняння першого закону термодинаміки для потоку. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].
Практичне заняття 1. Розділ 8. Термодинаміка потоку. Теми 8.1 і 8.2. Основні термодинамічні процеси з ідеальними та реальними робочими тілами. Основні закономірності процесу течії. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].	Опрацювання пройденого на матеріалі і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 2. Розділ 8. Теми 8.3, 8.4. Витікання газу, через сопло, що звужується. Критична швидкість. Перехід через швидкість звуку. Сопло Лавалю. Надзвукове сопло. Витікання із врахуванням тертя. Розрахунок витікання водяної пари. Дроселювання газів і парів. Ефект Джоуля-Томпсона. Диференціальний та інтегральний дросельний ефект. Поняття про температуру інверсії. Крива інверсії. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].	Витікання газу через канали різної форми. Витікання пари через канали різної форми. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].
Практичне заняття 2. Розділ 8. Теми 8.3, 8.4. Основні термодинамічні процеси з ідеальними та реальними робочими тілами. Витікання газу через канали різної форми без урахування тертя. Залежність форми каналу від режиму течії. Витікання газу, через сопло, що звужується. Критична швидкість. Перехід через швидкість звуку. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].	Опрацювання пройденого на матеріалі і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 3. Розділ 9. Тема 9.1. Поршневий компресор. Робоча діаграма компресора Індикаторна діаграма ідеального компресора. Робота компресора. Ізотермічне, адіабатне та політропне стиснення. Індикаторна діаграма реального компресора. Термодинамічне обґрунтування багатоступеневого стиснення. Типи компресорів. Робота компресора в різних процесах нагнітання (ізотермічному, адіабатному, політропному). Одноступеневі і багатоступеневі компресори. Робота компресора з урахуванням тертя. Відносний внутрішній коефіцієнт корисної дії. Проміжне охолодження компресора. Об'ємний к.к.д. компресора. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].	Робота компресора в різних процесах нагнітання (ізотермічному, адіабатному, політропному). Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].
Практичне заняття 3. Розділ 9. Тема 9.1. Поршневий компресор. Робоча діаграма компресора Індикаторна діаграма ідеального компресора. Робота компресора. Ізотермічне, адіабатне та політропне стиснення. Індикаторна діаграма реального компресора. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].	Опрацювання пройденого на матеріалі і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 4. Розділ 9. Тема 9.2. Термодинамічне обґрунтування багатоступеневого стиснення. Типи компресорів. Робота компресора в різних процесах нагнітання (ізотермічному, адіабатному, політропному). Одноступеневі і багатоступеневі компресори. Робота компресора з урахуванням тертя. Відносний внутрішній коефіцієнт корисної дії. Проміжне охолодження компресора. Об'ємний к.к.д. компресора. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].	Робота компресора з урахуванням тертя. Відносний внутрішній коефіцієнт корисної дії. Проміжне охолодження компресора. Об'ємний к.к.д. компресора. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].
Практичне заняття 4. Розділ 9. Тема 9.2. Одноступеневі і багатоступеневі компресори. Робота компресора з урахуванням тертя. Відносний внутрішній коефіцієнт корисної дії. Проміжне охолодження компресора. Об'ємний к.к.д. компресора. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].	Опрацювання пройденого на матеріалі і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 5. Розділ 10. Тема 10.1. Цикли паросилових (паротурбінних)	Простий ідеальний та реальний

установок. Простий ідеальний та реальний цикл Карно для ПСУ. Простий ідеальний та реальний цикл ПСУ – цикл Ренкіна, його особливості та характеристики. Основні принципи класифікації циклів теплових машин: за призначенням, за діапазоном температур, за напрямом здійснення циклу. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [Л1, 2].	цикл Карно для ПСУ. Простий ідеальний та реальний цикл ПСУ. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].
Практичне заняття 5. Розділ 10. Тема 10.1. Цикли паросилових (паротурбінних) установок. Простий ідеальний та реальний цикл ПСУ – цикл Ренкіна, його особливості та характеристики. Основні принципи класифікації циклів теплових машин: за призначенням, за діапазоном температур, за напрямом здійснення циклу. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].	Опрацювання пройденого на матеріалі і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 6. Розділ 10. Тема 10.1. Ідеальний тепломеханічний цикл. Поняття про тепломеханічні цикли (ТМЦ) та теплосилові установки (ТСУ). Простий ідеальний цикл та оцінка його ефективності по енергетичним показникам. Принципова схема паросилової установки. Термічний коефіцієнт корисної дії циклу Ренкіна. Тепловий і енергетичний баланс паросилової установки. Вплив параметрів пари на термічний коефіцієнт корисної дії циклу. Оцінка внутрішніх необоротностей за допомогою відносного внутрішнього ККД циклу $\eta_{\text{ТМЦ}}^{\text{ос}}$. Основні способи підвищення ефективності циклів. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Оцінка ефективності реального циклу. Внутрішні та зовнішні необоротності. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].
Практичне заняття 6. Розділ 10. Тема 10.1. Ідеальний тепломеханічний цикл. Поняття про тепломеханічні цикли (ТМЦ) та теплосилові установки (ТСУ). Простий ідеальний цикл та оцінка його ефективності по енергетичним показникам. Принципова схема паросилової установки. Термічний коефіцієнт корисної дії циклу Ренкіна. Тепловий і енергетичний баланс паросилової установки. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Опрацювання пройденого на матеріалі і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 7. Розділ 10. Тема 10.2. Енергетичні та ексергетичні баланси простої паросилової установки (ПСУ). Схема простої паросилової установки. Удосконалення циклів ПСУ. Підвищення робочих параметрів пари. Цикл з проміжним (повторним) перегрівом пари. Цикл з проміжним перегрівом пари як засіб підвищення початкового тиску пари. Вибір тиску для процесу повторного перегріву. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Енергетичні та ексергетичні баланси простої паросилової установки (ПСУ). Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].
Практичне заняття 7. Розділ 10. Тема 10.2. Удосконалення циклів ПСУ. Підвищення робочих параметрів пари. Цикл з проміжним (повторним) перегрівом пари. Цикл з проміжним перегрівом пари як засіб підвищення початкового тиску пари. Вибір тиску для процесу повторного перегріву. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Опрацювання пройденого на матеріалі і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 8. Розділ 10. Тема 10.2. Удосконалення циклів ПСУ. Підвищення робочих параметрів пари. Цикл з проміжним (повторним) перегрівом пари. Цикл з проміжним перегрівом пари як засіб підвищення початкового тиску пари. Вибір тиску для процесу повторного перегріву. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Цикл з проміжним (повторним) перегрівом пари. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].
Практичне заняття 8. <u>Перша частина модульної контрольної роботи.</u> Розділ 10. Тема 10.2. Підвищення робочих параметрів пари. Цикл з проміжним (повторним) перегрівом пари. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Опрацювання пройденого на матеріалі і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 9. Розділ 10. Тема 10.3. Удосконалення циклів ПСУ. Регенеративні цикли ПСУ. Поняття про регенерацію. Ідеальний регенеративний цикл. Регенеративний цикл з ступеневим підігрівом живильної води. Аналіз впливу температури живильної води і кількості і типу регенера-	Аналіз впливу температури живильної води і кількості і типу регенеративних підігрівачів на ефективність регенеративного

тивних підігрівачів на ефективність регенеративного циклу. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	циклу. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].
Практичне заняття 9. Розділ 10. Тема 10.3. Удосконалення циклів ПСУ. Регенеративні цикли ПСУ. Поняття про регенерацію. Ідеальний регенеративний цикл. Регенеративний цикл з ступеневим підігрівом живильної води. Аналіз впливу температури живильної води і кількості і типу регенеративних підігрівачів на ефективність регенеративного циклу. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Опрацювання пройденого на матеріалі і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 10. Розділ 10. Тема 10.3. Термодинамічні основи теплофікації. Комбіноване виробництво теплоти і електроенергії на ТЕЦ, термодинамічне обґрунтування. Основні схеми ТЕЦ. Теплофікація і екологія. Комбіноване виробництво теплоти і електроенергії на ТЕЦ. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Комбіноване виробництво теплоти і електроенергії на ТЕЦ. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].
Практичне заняття 10. Розділ 10. Тема 10.3. Термодинамічні основи теплофікації. Комбіноване виробництво теплоти і електроенергії на ТЕЦ, термодинамічне обґрунтування. Основні схеми ТЕЦ. Теплофікація і екологія. Комбіноване виробництво теплоти і електроенергії на ТЕЦ. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Опрацювання пройденого на матеріалі і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 11. Розділ 11. Тема 11.1. Цикли ГТУ і методи підвищення їх ефективності. Простий цикл ГТУ. Загальні відомості про ГТУ. Цикли ГТУ з ізобарним та ізохорним підведенням теплоти, адіабатним та ізотермічним стисненням в компресорі. Тепло механічний коефіцієнт ідеального циклу ГТУ, залежність його від ступені підвищення тиску. Відношення роботи компресора до роботи турбіни в ідеальному циклі. Вплив необоротності адіабатних процесів стиснення і розширення на показники ефективності реального циклу ГТУ. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Цикли ГТУ з ізобарним та ізохорним підведенням теплоти, адіабатним та ізотермічним стисненням в компресорі. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].
Практичне заняття 11. Розділ 11. Тема 11.1. Основні термодинамічні процеси з ідеальними та реальними робочими тілами. Витікання газу через канали різної форми без урахування тертя. Залежність форми каналу від режиму течії. Витікання газу, через сопло, що звужується. Критична швидкість. Перехід через швидкість звуку. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Опрацювання пройденого на матеріалі і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 12. Розділ 11. Тема 11.2. Цикли ГТУ і методи підвищення їх ефективності. Методи підвищення к.к.д. циклів ГТУ. Методи підвищення к.к.д. циклів ГТУ. Підвищення початкової температури газу перед турбіною. ГТУ з регенеративним підігрівом. Оптимальний ступінь підвищення тиску. ГТУ з регенеративним підігрівом і багатоступінчастим стисненням та розширенням робочого тіла. Замкнуті схеми ГТУ. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].	Цикли ГТУ з ізобарним та ізохорним підведенням теплоти, адіабатним та ізотермічним стисненням в компресорі з регенеративним підігрівом. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].
Практичне заняття 12. Розділ 11. Тема 11.2. Цикли ГТУ і методи підвищення їх ефективності. Методи підвищення к.к.д. циклів ГТУ. Підвищення початкової температури газу перед турбіною. ГТУ з регенеративним підігрівом. Оптимальний ступінь підвищення тиску. ГТУ з регенеративним підігрівом і багатоступінчастим стисненням та розширенням робочого тіла. Замкнуті схеми ГТУ. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].	Опрацювання пройденого на матеріалі і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 13. Розділ 12. Тема 12.1. Бінарні цикли. Ртутно-водяний цикл. Цикли атомних електричних станцій. Ексергетичний аналіз циклів паросилових установок. Динаміка регулювання парової турбіни. Схема та аналіз циклу із ізобарним підведенням теплоти. Термічний коефіцієнт корисної дії циклу. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Ртутно-водяний цикл. Ексергетичний аналіз циклів. Динаміка регулювання парової турбіни. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].
Практичне заняття 13. Розділ 12. Тема 12.1. Бінарні цикли. Ртутно-	Опрацювання пройденого на

водяний цикл. Цикли атомних електричних станцій. Ексергетичний аналіз циклів паросилових установок. Динаміка регулювання парової турбіни. Схема та аналіз циклу із ізобарним підведенням теплоти. Термічний коефіцієнт корисної дії циклу. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	матеріалу і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 14. Розділ 13. Тема 13.1. Цикли двигунів внутрішнього згоряння. Внутрішній відносний і внутрішній абсолютний коефіцієнт корисної дії. Ексергетичний метод аналізу циклів. Принцип роботи двигунів внутрішнього згоряння, індикаторна діаграма. Основні цикли двигунів внутрішнього згоряння, термічний коефіцієнт корисної дії. Зображення циклів. Цикли ДВЗ. Ідеальні цикли ДВЗ з ізохорним, ізобарним і змішаним підведенням теплоти. Аналіз факторів, які впливають на ефективність циклів ДВЗ. Реальні цикли ДВЗ. Поняття про цикли прямооточних, турбореактивних і реактивних двигунів. [1, 2].	Ідеальні цикли ДВЗ з ізохорним, ізобарним і змішаним підведенням теплоти. Аналіз факторів, які впливають на ефективність циклів ДВЗ. Реальні цикли ДВЗ. Поняття про цикли прямооточних, турбореактивних і реактивних двигунів. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].
Практичне заняття 14. Розділ 13. Тема 13.1. Цикли двигунів внутрішнього згоряння. Внутрішній відносний і внутрішній абсолютний коефіцієнт корисної дії. Ексергетичний метод аналізу циклів. Принцип роботи двигунів внутрішнього згоряння, індикаторна діаграма. Основні цикли двигунів внутрішнього згоряння, термічний коефіцієнт корисної дії. Зображення циклів. Цикли ДВЗ. Ідеальні цикли ДВЗ. Реальні цикли ДВЗ. Поняття про цикли прямооточних, турбореактивних і реактивних двигунів. [1, 2].	Опрацювання пройденого на матеріалу і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 15. Розділ 13. Тема 13.1. Цикли ДВЗ і реактивних двигунів. Цикли ДВЗ. Ідеальні цикли ДВЗ з ізохорним, ізобарним і змішаним підведенням теплоти. Аналіз факторів, які впливають на ефективність циклів ДВЗ. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Ідеальні цикли ДВЗ з ізохорним, ізобарним і змішаним підведенням теплоти. Реальні цикли ДВЗ. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].
Практичне заняття 15. Друга частина модульної контрольної роботи. Розділ 13. Тема 13.1. Цикли ДВЗ. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Опрацювання пройденого на матеріалу і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 16. Розділ 14. Тема 14.1 Цикли холодильних машин. Цикли холодильних установок. Застосування 1-го та 2-го законів термодинаміки до зворотних циклів і основні висновки. Оборотний цикл Карно для холодильних і теплонасосних установок. Ідеальний зворотний цикл Карно. [1, 2].	Цикли холодильних машин. Оборотний цикл Карно для холодильних і теплонасосних установок. Ідеальний зворотний цикл Карно. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].
Практичне заняття 16. Розділ 14. Тема 14.1. Цикли холодильних установок. Застосування 1-го та 2-го законів термодинаміки до зворотних циклів і основні висновки. Оборотний цикл Карно для холодильних і теплонасосних установок. Ідеальний зворотний цикл Карно. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Опрацювання пройденого на матеріалу і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 17. Розділ 14. Тема 14.2. Цикли холодильних установок. Вплив необоротностей в процесах теплообміну при кінцевій різниці температур на ефективність зворотних циклів. Способи зниження цих необоротностей. Особливості реалізації зворотних циклів та вплив необоротностей на їх ефективність. Цикли повітряної і парової компресорної установки. Характеристика холодильних агентів. Поняття про абсорбційні та пароежекторні холодильні установки [1, 2].	Цикли холодильних машин. Вплив необоротностей в процесах теплообміну при кінцевій різниці температур на ефективність зворотних циклів. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].

Практичне заняття 17. Розділ 14. Тема 14.2. Цикли холодильних установок. Цикли повітряної і парової компресорної установки. Характеристика холодильних агентів. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1, 2].	Опрацювання пройденого на матеріалі і вирішення задач ДЗ за [1, 2].
Лекція 18. Розділ 15. Тема 15.1. Цикл теплового насосу. Аналогія циклів холодильних установок (повітряної і парової компресорної установки) та циклу теплового насосу. Цикл теплового насосу. Теплонасосні установки. Особливості циклів ТНУ. Застосування ТНУ в системах тепlopостачання, теплохолодопостачання та кондиціювання повітря. Економія палива при використанні ТНУ в порівнянні з електронагрівачем, районною котельнею. Література: [1].	Особливості циклів ТНУ. Література, що рекомендується, для вивчення курсу: [1].
Практичне заняття 18. Розділ 15. Тема 15.1. Теплонасосні установки. Особливості циклів ТНУ. Застосування ТНУ в системах тепlopостачання, теплохолодопостачання та кондиціювання повітря. Економія палива при використанні ТНУ в порівнянні з електронагрівачем, районною котельнею. Література: [1].	Опрацювання пройденого на матеріалі і вирішення задач ДЗ за [1, 2].

6. Самостійна робота студента

Завдання для самостійної роботи студента вказані в таблиці в п.5 відповідно до навчальних тижнів та запланованих навчальних занять. Термін виконання кожного завдання складає до двох тижнів з моменту видачі. Окрім цього можна додати такі теми до самостійної роботи з лекційних занять для студентів, які мали штрафні бали і бажають підвищити свій підсумковий рейтинг:

1. Цикл з проміжним (повторним) перегрівом пари.
2. Цикл з проміжним перегрівом пари як засіб підвищення початкового тиску пари. Вибір тиску для процесу повторного перегріву. Література: [1].
3. Особливості проміжного перегріву пари в циклах АЕС. Література: [1].
4. Цикл ПСУ з двома регенеративними підігрівачами змішувального типу. Література: [1].
5. Цикл ПСУ з двома регенеративними підігрівачами поверхневого типу. Література: [1].
6. Когенерація, тригенерація Література: [1].
7. Цикл МГД - генератора.
8. Ексергія і енергія різних енергоресурсів системи. Ексергетичний баланс поточних процесів та його складові.
9. Показники ефективності процесів, ексергетичний к.к.д.
10. Вплив необоротностей на втрати ексергії при спалюванні палив, в процесах теплообміну при кінцевій різниці температур між тілами та внаслідок тертя в робочому тілі. Література: [1].

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Викладачі курсу очікують від студентів активного залучення та безпосередньої участі у опануванні дисципліни, зокрема:

- відвідування занять, дотримання правил поведінки на заняттях (активність, уникнення телефонних розмов під час аудиторних занять, зосередженість на матеріалі заняття, відключення телефонів, використання відповідних засобів для оперативного пошуку інформації); регулярний перегляд повідомлень та виконання призначених завдань; регулярний перегляд та обробка повідомлень на електронну пошту;
- оперативне реагування на запити та питання викладача;
- самостійне оформлення та виконання необхідних розрахунків, побудова графіків та написання висновків до роботи; дотримання узгоджених з викладачем правил підготовки, та подальшого виправлення (у разі необхідності) завдань; індивідуальний їх захист.
- вчасною здачею індивідуальних завдань є захист отриманих результатів згідно розкладу.
- розуміння та дотримання рейтингової системи оцінювання (PCO);
- дотримання політики дедлайнів та перескладань;
- дотримання політики щодо академічної доброчесності;
- інші вимоги, що не суперечать законодавству України та нормативним документам університету.

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

Поточний контроль: опитування за темами, МКР

Календарний контроль: провадиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Семестровий контроль: Екзамен. Студенти, що набрали протягом семестру необхідну кількість балів $r_c \geq 0,4R_c$ ($r_c \geq 24$) допускаються до екзамену.

Сума максимальних вагових балів контрольних заходів протягом семестру складає :

$$R = R_c = \sum r_k = 60 \text{ балів.}$$

Розмір шкали PCO з кредитного модуля у 4-му семестрі формується як сума вагових балів контрольних заходів протягом семестру R_c та вагового балу екзамену $R_e = 40$.

$$R = R_c + R_e = 50 + 50 = 100$$

Студенти, які набрали протягом семестру рейтинг з кредитного модуля менше $0,4R_c$ ($r_c < 24$), зобов'язані до початку екзаменаційної сесії підвищити його, інакше вони не допускаються до екзамену і мають академічну заборгованість.

Шкала балів за відповідні рівні оцінювання з кожного виду контролю.

Вид занять	Кількість занять	Характер виконання	Кількість балів	Сума
Лекції	18	робота на занятті	1	18
Практичні заняття	16	робота на занятті	0,5	8
Домашні завдання	16	виконання	0,5	8
Модульна контрольна робота	1	виконання	8	8
СРС	16	виконана СРС	0,5	8
Сума за семестр				50
Іспит (екзамен)	1	виконання і захист		50
Загальна сума вагових балів контрольних заходів				100

1. Модульна контрольна робота. (8 балів)

Складається МКР із двох частин відповідно до термінів рубіжного атестаційного контролю. Містить три завдання з теорії і практики. - одна задача і два теоретичних питання. Кожне питання оцінюється за 8 бальною шкалою. Підсумкова оцінка виводиться як середньоарифметична. Кожна частина МКР також оцінюється за 8 бальною шкалою, а підсумкова оцінка виводиться як середньоарифметична

«відмінно», повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – 7-8 балів;

«добре», достатньо повна відповідь (не менше 75% потрібної інформації), або повна відповідь з незначними помилками – 5-6 балів;

«задовільно», неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації) та незначні помилки – 3-4 бали;

«незадовільно», незадовільна відповідь (не відповідає вимогам) – 0-2 балів.

2. Практичне заняття (0,5 бала):

«відмінно», творче розкриття питань, вільне володіння матеріалом – 0,5 балів;

«добре», глибоке розкриття питань – 0,4 балів;

«задовільно», не достатньо повне розкриття питань, достатня робота на практичному занятті – 0,3 бали.

3. Виконання самостійної роботи.

Лекційний курс, завдання на срс за кожне завдання по 0,5 бала:

«зараховано», виконання завдання у строк – 0,5 бали;

«зараховано», завдання виконано, але не у строк – 0,3 бала.

5. Домашні завдання.

«відмінно», творче розкриття питань, вільне володіння матеріалом – 0,5 бали;

«добре», глибоке розкриття питань – 0,4 бали;

«задовільно», не достатньо повне розкриття питань, достатня робота на практичному занятті – 0,3 бали.

6. Заохочувальні і штрафні бали.

Передбаченні заохочення за наступні досягнення:

Ведення конспекту лекцій – до 10 балів

Критерії екзаменаційного оцінювання

Ваговий бал екзамену $R_e = 50$ балів. Екзаменаційний білет містить три завдання, з них два теоретичних і одне практичне. Кожне із завдань оцінюється за 50 бальною шкалою, як це наведено нижче, а підсум-

кова оцінка виводиться як середньоарифметична. Приклад екзаменаційного завдання наведений в Додатку 2.

- 50-48 балів – студент демонструє повні і міцні знання навчального матеріалу в заданому обсязі, необхідний рівень умінь і навичок, правильно і обґрунтовано приймає необхідні рішення в різних нестандартних ситуаціях.
- 47-44 балів – студент засвоює в повному обсязі робочу програму кредитного модуля, правильно і обґрунтовано використовує знання для вирішення стандартних і деяких нестандартних завдань.
- 43-37 балів – студент засвоює в повному обсязі робочу програму кредитного модуля, уміє використовувати знання для вирішення стандартних завдань.
- 36-29 балів – студент засвоїв основний матеріал, уміє використовувати знання для вирішення стандартних завдань, але допускає неточності, що не є перешкодою для подальшого навчання.
- 25-28 балів – студент засвоїв слабо основний матеріал, дає неповні відповіді на запитання, при застосуванні знань для вирішення стандартних завдань допускає помилки, які може виправити після додаткових запитань або зауважень викладача.
- <24 балів – незасвоєння окремих розділів робочої програми кредитного модуля, нездатність застосувати знання на практиці, що робить неможливим розв'язування найпростіших стандартних завдань; потрібна додаткова робота над матеріалом кредитного модуля.

Для виставлення оцінок до екзаменаційної відомості рейтингові бали переводяться у традиційні оцінки відповідно до таблиці (рейтингова шкала $R = 100$, $R_c = 60$)

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

Процедура оскарження результатів контрольних заходів

Студенти мають право і можливість підняти будь-яке питання, яке стосується процедури контрольних заходів та очікувати, що воно буде розглянуто згідно із наперед визначеними процедурами (детальніше: https://osvita.kpi.ua/2020_7-170, https://document.kpi.ua/files/2020_7-170.pdf).

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

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>).

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

1. Дистанційне навчання:

В умовах дистанційного режиму організація освітнього процесу здійснюється з використанням технологій дистанційного навчання: платформи дистанційного навчання «Сікорський» та «Електронний кампус». Навчальний процес у дистанційному режимі здійснюється відповідно до затвердженого розкладу навчальних занять. Заняття проходять з використанням сучасних ресурсів проведення онлайн-зустрічей (організація відео-конференцій на платформі Zoom).

2. Навчання в умовах правового режиму воєнного стану:

- передбачає проведення усіх видів занять дистанційно (з використанням синхронної або асинхронної моделі освітньої взаємодії), у відповідності до Регламенту організації освітнього процесу в дистанційному режимі та Положення про дистанційне навчання в КПІ ім. Ігоря Сікорського;
- кінцеві терміни виконання індивідуальних завдань і завдань самостійної роботи переносяться на кінець семестру (з обов'язковим виконанням і захистом);
- у рейтингову систему оцінювання вносяться зміни стосовно нарахування штрафних балів за не своєчасне виконання завдань: штрафні бали не нараховуються.

3. Для студентів існує можливість зарахування (у вигляді додаткових балів до рейтингу до 10 ба-

лів):

- сертифікатів проходження дистанційних чи онлайн курсів за тематикою дисципліни;
- сертифікатів, які підтверджують участь у науково–практичних і наукових конференціях за тематикою дисципліни.

Додаток 1

Перелік екзаменаційних питань

1. Основні закономірності процесу течії.
2. Рівняння першого закону термодинаміки для потоку. Спрощення виразу за різних умов.
3. Соплова та дифузійна течія. Швидкість течії та секундна витрата. Критична швидкість та критичне відношення тисків. Швидкість звуку.
4. Параметри гальмування. Витікання із простого сопла. Витікання газу через канали різної форми без урахування тертя. Залежність форми каналу від режиму течії.
5. Витікання газу, через сопло, що звужується. Критична швидкість.
6. Перехід через швидкість звуку. Сопло Лавалю. Надзвукове сопло.
7. Витікання із врахуванням тертя. Розрахунок витікання водяної пари.
8. Дроселювання газів і парів. Ефект Джоуля-Томпсона. Диференціальний та інтегральний дросельний ефект. Поняття про температуру інверсії. Крива інверсії.
9. Поршневий компресор. Робоча діаграма компресора. Робота компресора. Ізотермічне, адіабатне та політропне стиснення.
10. Термодинамічне обґрунтування багатоступеневого стиснення. Типи компресорів. Робота компресора в різних процесах нагнітання (ізотермічному, адіабатному, політропному).
11. Одноступеневі і багатоступеневі компресори. Робота компресора з урахуванням тертя. Відносний внутрішній коефіцієнт корисної дії. Проміжне охолодження компресора. Об'ємний к.к.д. компресора.
12. Простий ідеальний та реальний цикл Карно для ПСУ.
13. Простий ідеальний та реальний цикл ПСУ – цикл Ренкіна, його особливості та характеристики.
14. Основні принципи класифікації циклів теплових машин: за призначенням, за діапазоном температур, за напрямом здійснення циклу.
15. Ідеальний тепломеханічний цикл. Поняття про тепломеханічні цикли (ТМЦ) та теплосилові установки (ТСУ). Простий ідеальний цикл та оцінка його ефективності по енергетичним показникам.
16. Принципова схема паросилової установки. Термічний коефіцієнт корисної дії циклу Ренкіна. Тепловий і енергетичний баланс паросилової установки.
17. Вплив параметрів пари на термічний коефіцієнт корисної дії циклу.
18. Цикл із проміжним перегрівом пари.
19. Цикл із регенеративним підігрівом води живлення.
20. Теплофікаційні цикли. Оцінка ефективності реального циклу. Внутрішні та зовнішні необоротності.
21. Основні способи підвищення ефективності циклів.
22. Термодинамічні основи теплофікації. Комбіноване виробництво теплоти і електроенергії на ТЕЦ, термодинамічне обґрунтування.
23. Основні схеми ТЕЦ. Теплофікація і екологія. Загальні відомості про ТЕС, ТЕЦ і АЕС.
24. Парогазові цикли.
25. Цикли атомних електричних станцій. Ексергетичний аналіз циклів паросилових та газотурбінних установок. Динаміка регулювання газової турбіни.

26. Схема газотурбінної установки та аналіз циклу із ізобарним підведенням теплоти. Термічний коефіцієнт корисної дії циклу газотурбінної установки.
27. Загальні відомості про ГТУ. Цикли ГТУ з ізобарним та ізохорним підведенням теплоти, адіабатним та ізотермічним стисненням в компресорі.
28. Тепломеханічний коефіцієнт ідеального циклу ГТУ, залежність його від ступені підвищення тиску. Відношення роботи компресора до роботи турбіни в ідеальному циклі.
29. Вплив необоротності адіабатних процесів стиснення і розширення на показники ефективності реального циклу ГТУ.
30. Методи підвищення к.к.д. циклів ГТУ. Підвищення початкової температури газу перед турбіною.
31. ГТУ з регенеративним підігрівом. ГТУ з регенеративним підігрівом і багатоступінчастим стисненням та розширенням робочого тіла. Замкнуті схеми ГТУ.
32. Бінарні цикли. Ртутно-водяний цикл.
33. Цикли атомних електричних станцій. Ексергетичний аналіз циклів паросилових установок. Динаміка регулювання парової турбіни.
34. Схема та аналіз циклу із ізобарним підведенням теплоти. Термічний коефіцієнт корисної дії циклу.
35. Внутрішній відносний і внутрішній абсолютний коефіцієнт корисної дії. Ексергетичний метод аналізу циклів.
36. Принцип роботи двигунів внутрішнього згоряння, індикаторна діаграма. Основні цикли двигунів внутрішнього згоряння, термічний коефіцієнт корисної дії.
37. Зображення циклів. Цикли ДВЗ. Ідеальні цикли ДВЗ з ізохорним, ізобарним і змішаним підведенням теплоти.
38. Аналіз факторів, які впливають на ефективність циклів ДВЗ. Реальні цикли ДВЗ.
39. Поняття про цикли прямоточних, турбореактивних і реактивних двигунів.
40. Цикли холодильних установок.
41. Застосування 1-го та 2-го законів термодинаміки до зворотних циклів і основні висновки.
42. Оборотний цикл Карно для холодильних і теплонасосних установок.
43. Ідеальний зворотний цикл Карно. Вплив необоротностей в процесах теплообміну при кінцевій різниці температур на ефективність зворотних циклів. Способи зниження цих необоротностей.
44. Особливості реалізації зворотних циклів та вплив необоротностей на їх ефективність.
45. Цикли повітряної і парової компресорної установки. Характеристика холодильних агентів. Поняття про абсорбційні та пароежекторні холодильні установки.
46. Аналогія циклів холодильних установок (повітряної і парової компресорної установки) та циклу теплового насоса.
47. Цикл теплового насоса. Теплонасосні установки. Особливості циклів ТНУ.
48. Застосування ТНУ в системах тепlopостачання, теплохолодопостачання та кондиціювання повітря.
49. Економія палива при використанні ТНУ в порівнянні з електронагрівачем, районною котельнею.

Приклад екзаменаційного білету

„Технічна термодинаміка – 2. Закони термодинаміки. Властивості робочих тіл (рідин газів)”.

- 1. Рівняння Першого закону термодинаміки для потоку робочого тіла. Види необоротностей. Аналітичний вираз та складові рівняння.*
- 2. Цикл Ренкіна на перегрітій парі: основні елементи, складові, процеси. Зображення циклу в $P-v$, $T-s$, $h-s$ координатах. Теплота і робота циклу. Коефіцієнт корисної дії.*
- 3. В циклі повітряної холодильної машини параметри робочого тіла перед компресором: тиск $P_1 = 0.1$ МПа, температура $t_1 = -10^\circ\text{C}$. Параметри перед детандером: тиск $P_3 = 0.3$ МПа, температура $t_3 = 10^\circ\text{C}$. Визначити холодильний коефіцієнт циклу, холодопродуктивність і роботу, яка витрачається на здійснення циклу 1 кг робочого тіла. Запропонувати шляхи оптимізації роботи холодильної машини.*

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено доцентом, к.т.н., Воробйовим Микитою Валерійовичем

Ухвалено: кафедрою АЕ (протокол № 26 від 23.06. 2025 р.)

Погоджено: Методичною комісією НН ІАТЕ (протокол № 9 від 27. 06. 2025 р.)

