



Теплообмін і гідродинаміка в енергетичному устаткуванні

Робоча програма навчальної дисципліни (силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Другий (магістерський)</i>
Галузь знань	<i>G Інженерія, виробництво та будівництво</i>
Спеціальність	<i>G4 Енерговиробництво</i>
Спеціалізація	<i>G4.02 Теплоенергетика</i>
Освітня програма	<i>ОПП Інженерія енергогенеруючого обладнання та системи термостабілізації</i>
Статус дисципліни	<i>нормативна</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>I курс, осінній</i>
Об'єм дисципліни	<i>5 кредитів ЄКТС (150 годин), 46 години лекцій, 14 годин практичні заняття, 90 годин самостійної роботи</i>
Семестровий контроль/контрольні заходи	<i>екзамен, модульна контрольна робота</i>
Розклад занять	http://roz.kpi.ua/
Мова викладання	<i>українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: д.т.н., професор, Туз Валерій Омелянович, valeriituz56@gmail.com Практичні, комп'ютерний практикум: Федоров Дмитро Олегович, Лабораторні: не передбачено
Розміщення курсу	https://campus.kpi.ua , https://do.ipk.kpi.ua/ , https://drive.google.com/drive/

Програма навчальної дисципліни

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

Предмет навчальної дисципліни процеси теплообміну і гідродинаміки в енергетичному устаткуванні

Сучасні енергетичні ядерні та теплові установки проектується при умові забезпечення максимально високого коефіцієнту корисної дії установки. Одним і найбільш раціональним способом досягнення цієї мети – забезпечення максимально високих початкових параметрів робочого тіла, що обмежується, перш за все, допустимим діапазоном роботи конструкційних матеріалів. Визначення інтегральних і локальних характеристик теплоносіїв дає можливість обрати конструкційні матеріали і забезпечити ресурс експлуатації обладнання.

Метою навчальної дисципліни є формування здатностей (компетентностей), які студент набуде після вивчення дисципліни:

Здатність застосовувати спеціалізовані концептуальні знання, що включають сучасні ФК 1 наукові здобутки в сфері енергетичного машинобудування.

Здатність критично осмислювати проблеми і перспективи розвитку у сфері енергетичного машинобудування та дотичних міждисциплінарних проблем ФК 2

Здатність аналізувати, оцінювати та застосовувати науково-технічну інформацію в галузі енергетичного машинобудування ФК 4

Згідно з вимогами освітньо-наукової програми студента після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі програмні результати навчання:

Застосовувати спеціалізовані концептуальні знання, що включають сучасні наукові ПРН 1 здобутки, а також критичне осмислення сучасних проблем у галузі енергетичного машинобудування для розв'язування складних задач професійної діяльності

Формулювати і розв'язувати складні інженерні, виробничі та/або дослідницькі задачі ПРН 3 під час проектування, виготовлення і експлуатації енергетичного обладнання та створення конкурентоспроможних розробок, втілення результатів у інноваційних проектах.

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

Дисципліна базується на базових знаннях теорії тепломасообміну і гідродинаміки.

Дисципліни, які базуються на результатах навчання з даної дисципліни: Комп'ютерне моделювання процесів в енергетичному обладнанні.

3. Зміст навчальної дисципліни

Тема 1. Тепловиділення в активній зоні реактора

Тема 2. Рівняння теплопровідності і методи його рішення

Тема 3. Конвективний тепло- і масообмін

Тема 4. Застосування теорії турбулентності в задачах теплообміну в енергетичному обладнанні.

Тема 5. Теплообмін в трубах круглого перерізу при турбулентному русі рідини з постійними теплофізичними властивостями

Тема 6. Гідродинаміка двофазних потоків

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова (підручники, навчальні посібники) література.

1. Василенко С.М., Українець А.І., Олішевський В.В. Основи тепломасообміну/ С.М. Василенко, А.І.Українець, В.В.Олішевський — К.: НУХТ, 2004. — 250 с.
<http://dspace.nuft.edu.ua/bitstream/123456789/6932/3/04%20Vasylenko%20Osnovu%20teplomasoobminu.pdf>
2. Туз В.О. Гідродинаміка і тепломасообмін газорідинних потоків на капілярно-пористих структурах: монографія/ В.О.Туз, Н.Л. Лебедь / Харків: ФОП Бровін О.В., 2018. 220с.

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

1. Schlichting, H. (1979). Boundary layer theory. Seventh edition. (Seventh edition ed.): McGraw-Hill.
https://www.academia.edu/9580267/Boundary_Layer_Theory_BY_DR_Hermann_Schlichting
2. Mass transfer, Thomas K. Sherwood, Robert L. Pigford, and Charles R. Wilke, McGraw-Hill Book Company (1975). 677 pages
3. Tuz V. O. Evaporative cooling of the liquid film in slot channels with capillary-porous walls under natural convection/ V. O. Tuz, N. L. Lebed, O.M. Tarasenko. – Thermal Science and Engineering Progress. – 18 (2020). –2020. – 100527
4. Tuz V. O. Heat and mass transfer during adiabatic fluid boiling in channels of contact exchangers/ V. O. Tuz, N. L. Lebed. – Applied Thermal Engineering. – 185. –2021. – 116383

Інформаційні ресурси

1. Кампус <http://login.kpi.ua>.
2. Науково-технічна бібліотека КПІ ім. Ігоря Сікорського <http://library.kpi.ua>.

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

При вивченні дисципліни використовуються репродуктивний та евристичний навчання та метод проблемного викладення.

Згідно навчального плану для опанування матеріалу дисципліни передбачено лекційні заняття

Лекційні заняття

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
1.	<u>Лекція 1.</u> Вступ. Основні способи відведення теплоти від ТВЕЛів реакторів різних конструкцій. Основна задача теплового розрахунку реактора. Парогенератори: теплообмінні апарати в технологічних схемах АЕС, температурні режими поверхонь нагріву.
Тема 1. Тепловиділення в активній зоні реактора.	
2.	<u>Лекція 2.</u> Розподіл тепловиділення в активній зоні. Розподіл густини нейтронного потоку. Вплив конструкційних матеріалів, регулюючих і аварійних стрижнів, теплоносія на розподіл густини нейтронного потоку в активній зоні. Завдання на СРС: Вплив конструкційних матеріалів, регулюючих і аварійних стрижнів, теплоносія на розподіл густини нейтронного потоку в активній зоні.
3.	<u>Лекція 3</u> Рівняння теплопровідності для стаціонарних і нестаціонарних процесів. Умови однозначності. Особливості граничних умов в щільних ТВЗ. Деякі перетворення рівняння теплопровідності. Теплоносії в ядерних енергетичних установках. Критерії вибору теплоносія. Основні переваги і недоліки води, газів і рідких металів. Завдання на СРС: Виникнення неоднорідності в рівняннях теплопровідності. Параметри теплоносіїв в різних типах реакторних установок
Тема 2. Рівняння теплопровідності і методи його рішення.	
4.	<u>Лекція 4</u> Розрахунок температурних полів в ТВЕЛ з урахуванням залежності коефіцієнта теплопровідності від температури. Двовірні стаціонарні задачі теплопровідності. Завдання на СРС: Одновірне температурне поле при неоднорідному розподілі внутрішніх джерел теплоти. Наближені методи розв'язання задачі.
5.	<u>Лекція 5</u> Температурне поле в ТВЕЛах при неоднорідних граничних умовах. Розподіл інтенсивності тепловіддачі по поверхні елемента. Температурне поле в тепловиділяючому пучці ТВЕЛів при наявності охолоджуючих труб. Завдання на СРС: Температурне поле у пошкоджені ТВЕЛі.
Тема 3. Конвективний тепло- і масообмін.	
6.	<u>Лекція 6</u> Основні положення теорії пограничного шару. Дифузія і теплопровідність. Математичний опис конвективного теплообміну. Диференціальні рівняння тепловіддачі, енергії, руху та нерозривності. Теплообмін в трубі круглого перерізу при стабілізованій ламінарній течії і граничних умовах першого роду. Основні умови. Рівняння енергії. Приведена довжина труби.

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	Завдання на СРС: Умови однозначності. Початкова ділянка і ділянка стабілізованого теплообміну.
7.	<u>Лекція 7</u> Теплообмін в трубі круглого перерізу при граничних умовах II роду. Теплообмін при постійній густині теплового потоку на стінці. Теплообмін на стабілізованій ділянці. Теплообмін в трубі круглого перерізу при змінній по довжині густини теплового потоку на стінці. Дискретизація ділянки труби. Теплообмін в поздовжньо обтічних решітках стрижнів. Постановка спряженої задачі. Неоднорідність розподілу теплового потоку в трикутних і квадратних решітках. Завдання на СРС: Теплообмін на початковій ділянці. Середньо інтегральне значення температури і розподіл локальних значень в різних перерізах труби при теплообміні. Вплив на теплообмін геометричних характеристик ТВЗ.
8.	<u>Лекція 8</u> Теплообмін і гідродинаміка при змінних теплофізичних властивостях теплоносія. Характер зміни властивостей від параметрів крапельних рідин і газів. Теплообмін і гідравлічний опір при в'язкісно-гравітаційному русі теплоносія. Вплив направлення вектора швидкості вимушеного руху і термогравітаційних сил на інтенсивність теплообміну. Характерні випадки. Завдання на СРС: В'язкісна течія крапельної рідини зі змінною в'язкістю.
Тема 4. Застосування теорії турбулентності в задачах теплообміну в енергетичному обладнанні	
9.	<u>Лекція 9</u> Параметри турбулентного потоку. Пульсаційні і осереднені значення величин параметрів турбулентного потоку. Осереднені рівняння нерозривності, руху і енергії для турбулентних потоків. Зведення системи осереднених рівнянь турбулентності. Градієнтний характер турбулентного переносу – гіпотеза Бусінеска. Кінематичний коефіцієнт турбулентного переносу кількості руху, коефіцієнт турбулентного переносу кількості теплоти. Завдання на СРС: Турбулентні напруження і турбулентне перенесення теплоти. Турбулентне число Прандтля.
10.	<u>Лекція 10</u> Теорія шляху перемішування. Аналогія між процесом турбулентного (молярного) і молекулярного переносу. Константа турбулентності. Особливості гідродинаміки при русі теплоносія в трубах і каналах. Профіль швидкості в турбулентному потоці. Розподіл дотичного напруження по перерізу труби. Завдання на СРС: Положення теорії Кармана.
11.	<u>Лекція 11</u> Модель турбулентності Прандтля. Причина відхилення значень теоретичного профілю швидкості від реального. Рівняння для профілю швидкості, коефіцієнта турбулентного переносу імпульсу і турбулентного числа Прандтля. Модифікація двохшарової схеми потоку. Буферний прошарок. Результати дослідження Рейхардта, Ван Дріса. Практичне застосування результатів досліджень. Завдання на СРС: В'язкий прошарок. Підготовка до МКР частина 1.
Тема 5. Теплообмін в трубах круглого перерізу при турбулентному русі рідини з постійними теплофізичними властивостями.	
12.	<u>Лекція 12</u>

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	Стабілізований теплообмін при постійній густині теплового потоку на стінці. Умови однозначності. Рівняння енергії. Визначення температурного поля та інтенсивності теплообміну. Модульна контрольна робота. Частина I Завдання на СРС: Зв'язок між розподілом теплового потоку, температурним полем і гідродинамічними характеристиками потоку.
13.	<u>Лекція 13</u> Наближений метод розрахунку турбулентного переносу. Модель Рейнольдса. Двошарова модель. Формула Прандтля для тепловіддачі при турбулентному русі в трубах. Аналогія Рейнольдса. Стабілізований теплообмін при постійній густині теплового потоку. Рівняння енергії з урахуванням теплового потоку. Вплив турбулентного числа Прандтля на температурне поле в перерізі труби. Співставлення теоретичних розрахунків з експериментальними дослідженнями. Завдання на СРС: Особливості теплообміну для рідких металів.
14.	<u>Лекція 14</u> Теплообмін на термічній початковій ділянці. Рівняння енергії і граничні умови. Вплив теплофізичних властивостей теплоносія на теплообмін на початковій ділянці. Вплив числа Рейнольдса на теплообмін на початковій ділянці. Теплообмін при постійному розподілу температури стінки. Рівняння енергії і граничні умови при $Pr_T \approx 1$. Залежність локального числа Nu від чисел Re і Pr_T. Граничні значення Nu при $Pr_T > 0,7$ і $T_c = const$. Завдання на СРС: Довжина термічної початкової ділянки. Вплив термічної початкової ділянки на середню тепловіддачу.
15.	<u>Лекція 15</u> Течія і теплообмін на гідродинамічній початковій ділянці. Вплив на характер течії на гідродинамічній початковій ділянці конструкції вхідної початкової ділянки, степеню турбулентності і числа Re. Вхід теплоносія в канал через сопло при однорідному профілю швидкості. Розвиток профілю швидкості. Критичні числа Re. Гідрравлічний опір на початковій гідродинамічній ділянці. Вхід з відривом. Теплообмін при змінній по довжині каналу густини теплового потоку. Метод суперпозиції для турбулентної стабілізованої течії рідини. Завдання на СРС: Вплив на інтенсивність теплообміну при змінній густині теплового потоку теплофізичних властивостей теплоносія.
16.	<u>Лекція 16</u> Теплообмін та гідрравлічний опір в круглих трубах при турбулентному русі рідини зі змінними фізичними властивостями. Закономірності течії і теплообміну при неоднорідному розподілі густини у турбулентному потоці. Теплообмін та гідрравлічний опір при турбулентному русі рідини зі змінною в'язкістю. Залежність теплофізичних властивостей рідини від температури. Вплив напрямку теплового потоку на інтенсивність теплообміну і гідрравлічний опір. Завдання на СРС: Аналіз аналітичних рішень. Особливості теплообміну і гідродинаміки при течії рідких металів.
17.	<u>Лекція 17</u> Теплообмін і гідрравлічний опір при русі газу зі змінними теплофізичними властивостями. Вибір чисел подібності для опису процесу конвективного теплообміну. Вплив напрямку теплового потоку на інтенсивність тепловіддачі.

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	Завдання на СРС: Аналіз результатів експериментальних досліджень по теплообміну і аеродинаміці в трубах і каналах.
18.	<u>Лекція 18</u> Теплообмін в однофазній області біля критичної точки. Перспективи впровадження ЯЕУ на надвисокі та понадкритичні параметри. Фізичні властивості води біля критичної точки. Зона великих теплоємностей. Квазістаціонарна турбулентна течія в трубах при наявності термогравітаційних сил і термічного прискорення.
19.	<u>Лекція 19</u> Особливості режиму турбулентної течії води в області біля критичної точки. Розподіл втрат тиску. Режими нормального теплообміну. Завдання на СРС: Режими з погіршеним теплообміном і фактори, які впливають на інтенсивність процесів теплообміну і гідродинаміки.
20.	<u>Лекція 20</u> Теплообмін при русі газу, який дисоціює. Поле концентрації можливих хімічних з'єднань в суміші газоподібного теплоносія. Розрахункові залежності для визначення інтенсивності теплообміну для невірноваженого газу, який дисоціює. Завдання на СРС: Вплив швидкості хімічних реакцій на теплообмін.
Тема 6. Гідродинаміка двофазних потоків	
21.	<u>Лекція 21</u> Параметри, які характеризують двофазні потоки. Характерні режими течії. Зв'язок кількісних показників з місцевими параметрами течії. Зміна параметрів потоку при постійній густині теплового потоку. Розподіл фаз по перерізу каналу. Вологообмін при дисперсно-кільцевому режимі течії. Виникнення хвильового руху рідкої фази. Вплив структури двофазного потоку на теплообмін. Умови існування крапель. Розподіл швидкості у двофазному потоці. Завдання на СРС: Діаграма режимів течії. Дійсний об'ємний паровміст.
22.	<u>Лекція 22</u> Перепад тиску при русі двофазного потоку. Фактори, які впливають на гідравлічний опір. Метод Матінеї-Локарта. Границі застосування. Криза гідравлічного опору. Практичне застосування методики розрахунку гідравлічних опорів при русі пароводяних потоків.. Завдання на СРС: Підготовка до МКР частина II.
23.	<u>Лекція 23</u> Критичне витікання двофазного потоку. Можливі режими течії при пошкодженні обладнання ЯЕУ. Кільцева модель витікання. Швидкість зниження тиску в ємності при витіканні теплоносія у стані насичення. Модульна контрольна робота. Частина II

Практичні заняття

№ з/п	Назва теми практичного заняття та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
1.	<u>Практичне заняття 1.</u>

№ з/п	Назва теми практичного заняття та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	<i>Закони збереження. Диференціальні рівняння тепломасообміну. Основи чисельних методів розрахунку.</i>
2.	<u>Практичне заняття 2.</u> <i>Основні співвідносності між теплогідрравлічними параметрами. Існуючі методики розрахунку розподілу параметрів по перерізу ТВЗ.</i>
3.	<u>Практичне заняття 3.</u> <i>Задача температурного поля ТВЕЛ. Комп'ютерне моделювання теплообміну у MatLab. Створення об'єкту. Завдання граничних умов.</i>
4.	<u>Практичне заняття 4.</u> <i>Створення розрахункової сітки. Рішення задачі. Пост розрахункова обробка результатів чисельного моделювання.</i>
5.	<u>Практичне заняття 5.</u> <i>Теплогідравлічний код RELAP. Область застосування та філософія моделювання. Базові поняття будови та архітектури коду.</i>
6.	<u>Практичне заняття 6.</u> <i>Завдання файлу вхідних даних. Структура та обробка. Основні компоненти коду. Розробка моделі трубки Едвардса.</i>
7.	<u>Практичне заняття 7.</u> <i>Рішення задачі. Построзрахункова обробка результатів моделювання витоку.</i>

6. Самостійна робота студента

Для опанування матеріалу дисципліни передбачено виконання завдань на самостійне опрацювання матеріалу по лекційній частині курсу і практичних завдань. Завдання видаються після кожної лекції і практичного заняття, строк задачі – не пізніше ніж через тиждень після видачі завдання.

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед студентом:

- готовність відповідей при опитуванні;
- необхідне виконання таких вимог: активність, підготовка коротких доповідей чи текстів, відключення мобільних телефонів; відповідно до завдання викладача використання засобів зв'язку для пошуку інформації в Інтернеті;
- заохочувальні бали надаються у відповідності до «системи оцінювання результатів навчання», штрафні бали є засобом протидії плагіату та несвоєчасному виконанню завдань;
- політика дедлайнів та перескладань полягає у виконанні поточних модульних робіт, завдань практичних занять і СРС до початку сесії;
- політика щодо академічної доброчесності відповідає загальним положенням, прийнятим у «КПІ ім. Сікорського» (детальніше: <https://kpi.ua/code>);
- політика навчальної дисципліни спрямована на розвиток індивідуальних здібностей в напрямку набуття компетентностей щодо створення та модернізації сучасних енергетичних систем, унікального обладнання в енергетичній галузі, а також в напрямку розширення сфер застосування отриманих знань, умінь і досвіду;

- за бажанням студентів, допускається вивчення матеріалу за допомогою онлайн-курсів за тематикою, яка відповідає тематиці конкретних занять.

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

Види контролю знань студента з дисципліни:

- відповіді на практичних заняттях;
- виконання МКР;
- календарний контроль (проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог PCO);
- відповідь на екзамені.

Рейтинг студента з дисципліни складається з балів, які він отримує за:

- 1) дві відповіді в середньому кожного студента на практичних заняттях (на одному занятті опитуються приблизно 2 студенти; при середній чисельності групи 10 осіб і семи практичних занять (14 годин) отримуємо: $2 \cdot 7 / 10 \approx 2$ відповіді);
- 2) виконання завдань СРС з лекційної частини курсу;
- 3) виконання завдань СРС з практичної частини курсу;
- 4) виконання однієї МКР;
- 5) відповідь на екзамені при виконанні умов допуску.

За результатами навчальної роботи за перші 7 тижнів «ідеальний студент» має набрати 12 балів. На першій атестації (8-й тиждень) студент отримує «атестовано», якщо його поточний рейтинг не менше 7 балів.

За результатами 13 тижнів навчання «ідеальний студент» має набрати 40 балів. На другій атестації (14-й тиждень) студент отримує «атестовано», якщо його поточний рейтинг не менше 24.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання

1. Робота на практичних заняттях (відповіді)

Ваговий бал — 5. Максимальна кількість балів студента на всіх заняттях: $r_1 = 5 \text{ балів} \times 2 = 10 \text{ балів}$.

Критерії оцінювання:

5 балів — повна вірна відповідь на поставлене запитання; **4 бали** — відповідь має несуттєві неточності; **3 бали** — неповна відповідь; **2 бали** — наявність несуттєвих помилок в неповній відповіді, **1 бал** — наявність суттєвих помилок в неповній відповіді, **0 балів** — відсутність відповіді.

2. Виконання завдань СРС з лекційної частини курсу

Ваговий бал — 1. Максимальна кількість балів студента за двадцять завдань (завдання СРС видаються після лекції, строк задачі завдання — не пізніше ніж через тиждень): $r_2 = 1 \text{ бал} \times 20 = 20 \text{ балів}$. Виконане завдання надається викладачу у вигляді конспекту, виконання завдань СРС обов'язкове.

Критерії оцінювання:

1 бал — у повному об'ємі і вчасно надане завдання; **0 балів** — не надане завдання.

3. Виконання завдань СРС з практичної частини курсу

Максимальна кількість балів за виконання всіх завдань: $r_3 = 10$. Завдання для виконання СРС видається студенту після кожного практичного заняття, строк задачі завдання — не пізніше ніж через тиждень. Виконання завдань є обов'язковим.

Критерії оцінювання:

9...10 балів — виконання завдань у повному об'ємі, творчий підхід до виконання завдання, без помилок; **7...8 балів** — виконання завдань у повному об'ємі, без помилок; **5...6 балів** — виконання завдань у повному об'ємі, з деякими неточностями; **3...4 бали** — виконання завдань у повному

об'ємі, з незначними неточностями; **0...2 балів** — виконання завдання не у повному об'ємі, з грубими помилками — робота не зарахована.

Заохочувальні бали

- участь у наукових та/або науково-практичних конференціях, семінарах, симпозиумах по тематиці дисципліни — **5 балів**

4. Модульна контрольна робота (МКР)

Виконується дві частини МКР. Ваговий бал МКР: $r_4 = 2 \times 5 = 10$ балів.

Критерії оцінювання:

5 балів — повна вірна відповідь, творче виконання завдання; **4 бали** — відповідь має несуттєві неточності; **3 бали** — неповна відповідь; **0...2 балів** — наявність суттєвих помилок у неповній відповіді або відсутність відповіді.

5. Екзаменаційна робота

Екзамен проводиться у письмово-усній формі. Екзаменаційне завдання складається з трьох теоретичних питань. Перелік теоретичних питань наведений у додатку до силабусу дисципліни. Перші два теоретичних питання оцінюються по 15 балів, а третє — 20 балів. Тобто, максимальна кількість балів за виконання завдання **15+15+20 = 50 балів**.

Критерії оцінювання:

Кожне питання екзаменаційної роботи оцінюється згідно до системи оцінювання:

- повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) — **13...15 балів (18...20 балів)**;
- достатньо повна відповідь (не менше 70% потрібної інформації, або незначні неточності) — **10...12 балів (14...17 балів)**;
- неповна відповідь, рішення з помилками (не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки) — **5...9 балів (10...13 балів)**;
- незадовільна відповідь (менше 60% потрібної інформації та суттєві помилки) — менше **6 балів (9 балів)**;
- відсутність відповіді — **0 балів**.

Розрахунок шкали рейтингу з дисципліни (R_d):

Сума вагових балів контрольних заходів в семестрі (стартовий рейтинг) складає:

$$R_i = r_1 + r_2 + r_3 + r_4.$$

де r_i — рейтингові або вагові бали за кожний вид робіт з дисципліни.

Максимально можливий стартовий рейтинг: $R_c = 10+20+10+10 = 50$ балів.

Необхідною умовою допуску до екзамену є стартовий рейтинг не менше $0,5 \times R_c = 25$ балів, при умові зарахування всіх завдань СРС.

Студенти, які набрали в семестрі рейтинг з дисципліни менше, ніж 25 балів, або не виконали умов допуску, зобов'язані до початку екзаменаційної сесії підвищити його, інакше вони не допускаються до екзамену з цієї дисципліни і мають академічну заборгованість.

Екзаменаційна складова R_E шкали дорівнює: **$R_E = 50$ балів**

Таким чином, максимальна кількість балів при здачі екзамену за рейтинговою шкалою з дисципліни складає

$$R_D = R_c + R_E = 50 + 50 = 100 \text{ балів.}$$

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою

<i>Кількість балів</i>	<i>Оцінка</i>
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно

За рішенням кафедри, згідно Тимчасового регламенту проведення семестрового контролю в дистанційному режимі (Наказ № 7/86 від 08.05 2020 року), допускається застосувати підхід щодо виставлення оцінки з кредитного модуля «автоматом» шляхом пропорційного перерахунку стартових балів у підсумкові за 100–бальною шкалою. При цьому обов'язковим залишається виконання аспірантом умов допуску до екзамену. Аспірантам, які набрали фактичний стартовий рейтинг не менший, ніж 0,9 від максимально можливого (тобто $R_c \geq 45$), екзаменатор може запропонувати виставити оцінку «Дуже добре». Найвища оцінка «автоматом» не виставляється.

Переведення стартових балів у підсумкові здійснюється за формулою

$$R = 50 + \frac{50 \cdot (R_i - R_D)}{(R_c - R_D)},$$

де R – оцінка за 100–бальною шкалою;

R_i – сума балів, набраних аспірантом продовж семестру;

R_c – максимальна сума вагових балів контрольних заходів продовж семестру;

R_D – бал допуску до екзамену.

Аспіранти, які хочуть підвищити оцінку з кредитного модуля, виконують екзаменаційну роботу. При цьому переведення стартових балів у підсумкові не здійснюється.

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 20 балів):

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

Додаток 1

Список теоретичних питань на екзамен

1. Розподіл тепловиділення в активній зоні. Розподіл густини нейтронного потоку. Вплив конструкційних матеріалів, регулюючих і аварійних стрижнів, теплоносія на розподіл густини нейтронного потоку в активній зоні.
2. Теплоносії в ядерних енергетичних установках. Критерії вибору теплоносія. Основні переваги і недоліки води, газів і рідких металів. Параметри теплоносіїв в різних типах реакторних установок.
3. Рівняння теплопровідності для стаціонарних і нестаціонарних процесів. Умови однозначності. Особливості граничних умов в щільних ТВЗ. Деякі перетворення рівняння теплопровідності. Виникнення неоднорідності в рівняннях теплопровідності.
4. Розрахунок температурних полів в ТВЕЛ з урахуванням залежності коефіцієнта теплопровідності від температури. Одномірне температурне поле при неоднорідному розподілі внутрішніх джерел теплоти.
5. Двовірні стаціонарні задачі теплопровідності. Температурне поле в тепловиділяючому пучці ТВЕЛів при наявності охолоджуючих труб. Наближені методи розв'язання задачі.
6. Температурне поле в ТВЕЛах при неоднорідних граничних умовах. Розподіл інтенсивності тепловіддачі по поверхні елемента. Температурне поле у пошкодженому ТВЕЛі.
7. Основні положення теорії пограничного шару. Дифузія і теплопровідність. Математичний опис конвективного теплообміну. Диференціальні рівняння тепловіддачі, енергії, руху та нерозривності. Умови однозначності.
8. Теплообмін в трубі круглого перерізу при стабілізованій ламінарній течії і граничних умовах першого роду. Основні умови. Рівняння енергії. Приведена довжина труби. Початкова ділянка і ділянка стабілізованого теплообміну.
9. Теплообмін в трубі круглого перерізу при граничних умовах II роду. Теплообмін при постійній густині теплового потоку на стінці. Теплообмін на стабілізованій ділянці.
10. Теплообмін в трубі круглого перерізу при змінній по довжині густини теплового потоку на стінці. Дискретизація ділянки труби. Середньо інтегральне значення температури і розподіл локальних значень в різних перерізах труби при теплообміні.
11. Теплообмін в поздовжньо обтічних решітках стрижнів. Постановка спряженої задачі. Неоднорідність розподілу теплового потоку в трикутних і квадратних решітках. Вплив на теплообмін геометричних характеристик ТВЗ.
12. Теплообмін і гідродинаміка при змінних теплофізичних властивостях теплоносія. Характер зміни властивостей від параметрів крапельних рідин і газів. В'язкісна течія крапельної рідини зі змінною в'язкістю.
13. Теплообмін і гідравлічний опір при в'язкісно-гравітаційному русі теплоносія. Вплив направлення вектора швидкості вимушеного руху і термогравітаційних сил на інтенсивність теплообміну. Характерні випадки.

14. Параметри турбулентного потоку. Пульсаційні і осереднені значення величин параметрів турбулентного потоку. Осереднені рівняння нерозривності, руху і енергії для турбулентних потоків. Турбулентні напруження і турбулентне перенесення теплоти.
15. Зведення системи осереднених рівнянь турбулентності. Градієнтний характер турбулентного переносу – гіпотеза Бусінеска. Кінематичний коефіцієнт турбулентного переносу кількості руху, коефіцієнт турбулентного переносу кількості теплоти. Турбулентне число Прандтля.
16. Теорія шляху перемішування. Аналогія між процесом турбулентного (молярного) і молекулярного переносу. Константа турбулентності. Положення теорії Кармана.
17. Особливості гідродинаміки при русі теплоносія в трубах і каналах. Профіль швидкості в турбулентному потоці. Розподіл дотичного напруження по перерізу труби. Модель турбулентності Прандтля. Причина відхилення значень теоретичного профілю швидкості від реального. В'язкий прошарок.
18. Рівняння для профілю швидкості, коефіцієнта турбулентного переносу імпульсу і турбулентного числа Прандтля. Модифікація двошарової схеми потоку. Буферний прошарок. Результати дослідження Рейхардта, Ван Дріса. Практичне застосування результатів досліджень.
19. Стабілізований теплообмін при постійній густині теплового потоку на стінці. Умови однозначності. Рівняння енергії. Визначення температурного поля та інтенсивності теплообміну. Зв'язок між розподілом теплового потоку, температурним полем і гідродинамічними характеристиками потоку.
20. Наближений метод розрахунку турбулентного переносу. Модель Рейнольдса. Двошарова модель. Формула Прандтля для тепловіддачі при турбулентному русі в трубах. Аналогія Рейнольдса. Особливості теплообміну для рідких металів.
21. Стабілізований теплообмін при постійній густині теплового потоку. Рівняння енергії з урахуванням теплового потоку. Вплив турбулентного числа Прандтля на температурне поле в перерізі труби. Співставлення теоретичних розрахунків з експериментальними дослідженнями.
22. Теплообмін на термічній початковій ділянці. Рівняння енергії і граничні умови. Вплив теплофізичних властивостей теплоносія на теплообмін на початковій ділянці. Вплив числа Рейнольдса на теплообмін на початковій ділянці. Довжина термічної початкової ділянки.
23. Теплообмін при постійному розподілу температури стінки. Рівняння енергії і граничні умови при $Pr_T \approx 1$. Залежність локального числа Nu від чисел Re і Pr_T . Граничні значення Nu при $Pr_T > 0,7$ і $T_c = \text{const}$. Вплив термічної початкової ділянки на середню тепловіддачу.
24. Течія і теплообмін на гідродинамічній початковій ділянці. Вплив на характер течії на гідродинамічній початковій ділянці конструкції вхідної початкової ділянки, степеню турбулентності і числа Re . Вхід теплоносія в канал через сопло при однорідному профілю швидкості. Розвиток профілю швидкості. Критичні числа Re . Гідравлічний опір на початковій гідродинамічній ділянці. Вхід з відривом.
25. Теплообмін при змінній по довжині каналу густини теплового потоку. Метод суперпозиції для турбулентної стабілізованої течії рідини. Вплив на інтенсивність теплообміну при змінній густини теплового потоку теплофізичних властивостей теплоносія.
26. Теплообмін та гідравлічний опір в круглих трубах при турбулентному русі рідини зі змінними фізичними властивостями. Закономірності течії і теплообміну при неоднорідному розподілі густини в турбулентному потоці. Аналіз аналітичних рішень.
27. Теплообмін та гідравлічний опір при турбулентному русі рідини зі змінною в'язкістю. Залежність теплофізичних властивостей рідини від температури. Вплив напряму теплового по-

току на інтенсивність теплообміну і гідравлічний опір. Особливості теплообміну і гідродинаміки при течії рідких металів.

28. Теплообмін і гідравлічний опір при русі газу зі змінними теплофізичними властивостями. Вибір чисел подібності для опису процесу конвективного теплообміну. Вплив напрямку теплового потоку на інтенсивність тепловіддачі. Аналіз результатів експериментальних досліджень по теплообміну і аеродинаміці в трубах і каналах.
29. Теплообмін в однофазній області біля критичної точки. Перспективи впровадження ЯЕУ на надвисокі та понадкритичні параметри. Фізичні властивості води біля критичної точки. Зона великих теплоємностей. Квазістаціонарна турбулентна течія в трубах при наявності термोगравітаційних сил і термічного прискорення.
30. Особливості режиму турбулентної течії води в області біля критичної точки. Розподіл втрат тиску. Режими нормального теплообміну. Режими з погіршеним теплообміном і фактори, які впливають на інтенсивність процесів теплообміну і гідродинаміки.
31. Теплообмін при русі газу, який дисоціює. Поле концентрації можливих хімічних з'єднань в суміші газоподібного теплоносія. Розрахункові залежності для визначення інтенсивності теплообміну для неврівноваженого газу, який дисоціює. Вплив швидкості хімічних реакцій на теплообмін.
32. Параметри, які характеризують двофазні потоки. Характерні режими течії. Зв'язок кількісних показників з місцевими параметрами течії. Зміна параметрів потоку при постійній густині теплового потоку. Діаграма режимів течії.
33. Розподіл фаз по перерізу каналу. Вологообмін при дисперсно-кільцевому режимі течії. Виникнення хвильового руху рідкої фази. Вплив структури двофазного потоку на теплообмін. Умови існування крапель. Розподіл швидкості в двофазному потоці. Дійсний об'ємний паровміст.
34. Перепад тиску при русі двофазного потоку. Фактори, які впливають на гідравлічний опір. Метод Матінеллі-Локарта. Границі застосування. Криза гідравлічного опору. Практичне застосування методики розрахунку гідравлічних опорів при русі пароводяних потоків.
35. Критичне витікання двофазного потоку. Можливі режими течії при пошкодженні обладнання ЯЕУ. Кільцева модель витікання. Швидкість зниження тиску в ємності при витіканні теплоносія у стані насичення.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено *д.т.н., професором, Тузом Валерієм Омеляновичем*

ас. Федоровим Дмитром Олеговичем

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

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