



# Теплообмін і гідродинаміка в енергетичному устаткуванні

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Другий (магістерський)</i>
Галузь знань	<i>14 Електрична інженерія</i>
Спеціальність	<i>142 Енергетичне машинобудування</i>
Освітня програма	<i>ОПП Інженерія і комп'ютерні технології теплоенергетичних систем</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>I курс, осінній</i>
Об'єм дисципліни	<i>6 кредитів ЄКТС (180 годин), 72 години лекцій, 18 годин практичні заняття, 90 годин самостійна робота</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>екзамен, модульна контрольна робота</i>
Розклад занять	<i><a href="http://rozklad.kpi.ua/">http://rozklad.kpi.ua/</a></i>
Мова викладання	<i>українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лектор: д.т.н., професор, Туз Валерій Омелянович, <a href="mailto:valeriituz56@gmail.com">valeriituz56@gmail.com</a> Практичні, комп'ютерний практикум: Федоров Дмитро Олегович, Лабораторні: не передбачено</i>
Розміщення курсу	<i><a href="https://campus.kpi.ua">https://campus.kpi.ua</a>, <a href="https://drive.google.com/drive/u/1/my-drive">https://drive.google.com/drive/u/1/my-drive</a></i>

### 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 аспірант набуває після вивчення дисципліни:

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

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 студенти після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі програмні результати навчання:

Застосовувати спеціалізовані концептуальні знання, що включають сучасні наукові здобутки, а також критичне осмислення сучасних проблем у галузі енергетичного машинобудування для розв'язування складних задач професійної діяльності. ПРН1  
Формулювати і розв'язувати складні інженерні, виробничі та/або дослідницькі задачі під час проектування, виготовлення і експлуатації енергетичного обладнання та створення конкурентоспроможних розробок, втілення результатів у інноваційних проектах. ПРН3

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

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

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

Тема 1. Тепловідлення 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. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание/ А.Д.Зимон. — М.: Химия, 1974. — 414 с.
2. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник/ Е.В.Аметистов и др.; Под общ. ред. В.А.Григорьева и В.М.Зорина. — М: Энергоиздат, 1982. — 512 с.

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

1. Гохштейн А.Я. Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция/ А.Я. Гохштейн. — М: ВО Наука, 1976. — 400 с.
2. Кутателадзе С.С. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах/ С.С.Кутателадзе, В.Е.Накоряков. — Новосибирск: ВО "Наука", 1984. — 302 с.
3. Кутателадзе С.С. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое/ С.С.Кутателадзе, А.И.Леонтьев. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 320 с.
4. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Часть II/ Р.И.Нигматулин. —М: "Наука", 1987. — 360 с.
5. Гешев П.И. Тепломассообмен при контакте горячего газа со стекающей плёнкой жидкости / П.И.Гешев, О.П.Ковалёв, О.Ю.Цвелодуб, Ю.В.Якубовский// ИФЖ. — 1984. — Т. 46, № 3. — С. 428-432.
6. Безродный М.К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах/М.К.Безродный, И.Л.Пиоро, Т.О.Костюк. — К.: Факт, 2003. — 480 с.
7. Наврузов Ю.В. Критический перегрев и работа флуктуационного образования парового зародыша в насыщенном пористом слое/ Ю.В.Наврузов, В.Ф.Присняков, В.Н.Серебрянский // Аэрогазодинамика и нестационарный теплообмен. —К.: Наук. думка, 1983. — С. 80-88.
8. Теория тепломассообмена/ [под ред. А.И.Леонтьева] . — М.: МГТУ им.Баумана, 1997. — 683 с.
9. Ганчев Б.Г. Охлаждение элементов ядерных реакторов стекающими плёнками/ Б.Г.Ганчев. - М.: Энергоатомиздат, 1987. — 192 с.

**Навчальний контент**

**5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)**

*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.	<p><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.                      Література: основна – [1], с. 5-11;</p>
<b>Тема 1. Тепловиділення в активній зоні реактора.</b>	
2.	<p><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.                      Література: основна – [1], с. 17-22;                      Завдання на СРС: Вплив конструкційних матеріалів, регулюючих і аварійних стрижнів, теплоносія на розподіл густини нейтронного потоку в активній зоні.                      Література: основна – [8], додаткова – [9].</p>
3.	<p><u>Лекція 3</u>                      Теплоносії в ядерних енергетичних установках. Критерії вибору теплоносія. Основні переваги і недоліки води, газів і рідких металів.                      Література: основна – [1], с. 22-24;                      Завдання на СРС: Параметри теплоносіїв в різних типах реакторних установок.                      Література: основна – [8], додаткова – [9].</p>
<b>Тема 2. Рівняння теплопровідності і методи його рішення.</b>	
4.	<p><u>Лекція 4</u>                      Рівняння теплопровідності для стаціонарних і нестаціонарних процесів. Умови однозначності. Особливості граничних умов в щільних ТВЗ. Деякі перетворення рівняння теплопровідності.                      Література: основна – [1], с. 24-35;                      Завдання на СРС: Виникнення неоднорідності в рівняннях теплопровідності.</p>
5.	<p><u>Лекція 5</u>                      Розрахунок температурних полів в ТВЕЛ з урахуванням залежності коефіцієнта теплопровідності від температури.                      Література: основна – [1], с. 42-46;                      Завдання на СРС: Одномірне температурне поле при неоднорідному розподілі внутрішніх джерел теплоти.</p>
6.	<p><u>Лекція 6</u>                      Двомірні стаціонарні задачі теплопровідності. Температурне поле в тепловиділяючому пучці ТВЕЛів при наявності охолоджуючих труб.</p>

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	Література: основна – [1], с. 56-59; Завдання на СРС: Наближені методи розв'язання задачі.
7.	<u>Лекція 7</u> Температурне поле в ТВЕЛах при неоднорідних граничних умовах. Розподіл інтенсивності тепловіддачі по поверхні елемента. Література: основна – [1], с. 59-66; Завдання на СРС: Температурне поле у пошкодженому ТВЕЛі.
<b>Тема 3. Конвективний тепло- і масообмін.</b>	
8.	<u>Лекція 8</u> Основні положення теорії пограничного шару. Дифузія і теплопровідність. Математичний опис конвективного теплообміну. Диференціальні рівняння тепловіддачі, енергії, руху та нерозривності. Література: основна – [1], с. 77-87; Завдання на СРС: Умови однозначності.
9.	<u>Лекція 9</u> Теплообмін в трубі круглого перерізу при стабілізованій ламінарній течії і граничних умовах першого роду. Основні умови. Рівняння енергії. Приведена довжина труби. Література: основна – [1], с. 101-112; Завдання на СРС: Початкова ділянка і ділянка стабілізованого теплообміну.
10.	<u>Лекція 10</u> Теплообмін в трубі круглого перерізу при граничних умовах II роду. Теплообмін при постійній густині теплового потоку на стінці. Теплообмін на стабілізованій ділянці. Література: основна – [1], с. 11-118; Завдання на СРС: Теплообмін на початковій ділянці.
11.	<u>Лекція 11</u> Теплообмін в трубі круглого перерізу при змінній по довжині густини теплового потоку на стінці. Дискретизація ділянки труби. Література: основна – [1], с. 119-123; Література: основна – [8], додаткова – [9]. Завдання на СРС: Середньо інтегральне значення температури і розподіл локальних значень в різних перерізах труби при теплообміні.
12.	<u>Лекція 12</u> Теплообмін в поздовжньо обтічних решітках стрижнів. Постановка спряженої задачі. Неоднорідність розподілу теплового потоку в трикутних і квадратних решітках. Література: основна – [1], с. 129-134; Завдання на СРС: Вплив на теплообмін геометричних характеристик ТВЗ.
13.	<u>Лекція 13</u> Теплообмін і гідродинаміка при змінних теплофізичних властивостях теплоносія. Характер зміни властивостей від параметрів крапельних рідин і газів. Література: основна – [1], с. 134-139; Завдання на СРС: В'язкісна течія крапельної рідини зі змінною в'язкістю.
14.	<u>Лекція 14</u> Теплообмін і гідравлічний опір при в'язкісно-гравітаційному русі теплоносія. Вплив

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	направлення вектора швидкості вимушеного руху і термогравітаційних сил на інтенсивність теплообміну. Характерні випадки. Література: основна – [1], с. 139-147;
<b>Тема 4. Застосування теорії турбулентності в задачах теплообміну в енергетичному обладнанні</b>	
15.	<u>Лекція 15</u> Параметри турбулентного потоку. Пульсаційні і осереднені значення величин параметрів турбулентного потоку. Осереднені рівняння нерозривності, руху і енергії для турбулентних потоків. Література: основна – [1], с. 148-157; Завдання на СРС: Турбулентні напруження і турбулентне перенесення теплоти.
16.	<u>Лекція 16</u> Зведення системи осереднених рівнянь турбулентності. Градієнтний характер турбулентного переносу – гіпотеза Бусінеска. Кінематичний коефіцієнт турбулентного переносу кількості руху, коефіцієнт турбулентного переносу кількості теплоти. Література: основна – [1], с. 158-165; Завдання на СРС: Турбулентне число Прандтля.
17.	<u>Лекція 17</u> Теорія шляху перемішування. Аналогія між процесом турбулентного (молярного) і молекулярного переносу. Константа турбулентності. Література: основна – [1], с. 165-169; Завдання на СРС: Положення теорії Кармана.
18.	<u>Лекція 18</u> 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. Література: основна – [1], с. 169-173; Завдання на СРС: В'язкий прошарок.
19.	<u>Лекція 19</u> 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. Література: основна – [1], с. 173-177; Завдання на СРС: Підготовка до МКР частина 1.
<b>Тема 5. Теплообмін в трубах круглого перерізу при турбулентному русі рідини з постійними теплофізичними властивостями.</b>	
20.	<u>Лекція 20</u> Стабілізований теплообмін при постійній густині теплового потоку на стінці. Умови однозначності. Рівняння енергії. Визначення температурного поля та інтенсивності теплообміну. <b>Модульна контрольна робота. Частина I</b> Література: основна – [1], с. 177-182;

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	Завдання на СРС: Зв'язок між розподілом теплового потоку, температурним полем і гідродинамічними характеристиками потоку.
21.	<p><u>Лекція 21</u></p> <p>Наближений метод розрахунку турбулентного переносу. Модель Рейнольдса. Двошарова модель. Формула Прандтля для тепловіддачі при турбулентному русі в трубах. Аналогія Рейнольдса.</p> <p>Література: основна – [1], с. 182-185;</p> <p>Завдання на СРС: Особливості теплообміну для рідких металів.</p>
22.	<p><u>Лекція 22</u></p> <p>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.</p> <p>Література: основна – [1], с. 185-194;</p>
23.	<p><u>Лекція 23</u></p> <p>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.</p> <p>Література: основна – [1], с. 194-199;</p> <p>Завдання на СРС: Довжина термічної початкової ділянки.</p>
24.	<p><u>Лекція 24</u></p> <p>Теплообмін при постійному розподілу температури стінки. Рівняння енергії і граничні умови при <math>Pr_T \approx 1</math>. Залежність локального числа <math>Nu</math> від чисел <math>Re</math> і <math>Pr_T</math>. Граничні значення <math>Nu</math> при <math>Pr_T &gt; 0,7</math> і <math>T_c = const</math>.</p> <p>Література: основна – [1], с. 199-203;</p> <p>Завдання на СРС: Вплив термічної початкової ділянки на середню тепловіддачу.</p>
25.	<p><u>Лекція 25</u></p> <p>Течія і теплообмін на гідродинамічній початковій ділянці. Вплив на характер течії на гідродинамічній початковій ділянці конструкції вхідної початкової ділянки, ступеню турбулентності і числа <math>Re</math>. Вхід теплоносія в канал через сопло при однорідному профілю швидкості. Розвиток профілю швидкості. Критичні числа <math>Re</math>. Гідрравлічний опір на початковій гідродинамічній ділянці. Вхід з відривом.</p> <p>Література: основна - [1], с. 203-210;</p>
26.	<p><u>Лекція 26</u></p> <p>Теплообмін при змінній по довжині каналу густині теплового потоку. Метод суперпозиції для турбулентної стабілізованої течії рідини.</p> <p>Література: основна – [1], с. 210-213;</p> <p>Завдання на СРС: Вплив на інтенсивність теплообміну при змінній густині теплового потоку теплофізичних властивостей теплоносія.</p>
27.	<p><u>Лекція 27</u></p> <p>Теплообмін та гідрравлічний опір в круглих трубах при турбулентному русі рідини зі змінними фізичними властивостями. Закономірності течії і теплообміну при</p>

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	неоднорідному розподілі густини в турбулентному потоці. Література: основна – [1], с. 234-240; Завдання на СРС: Аналіз аналітичних рішень.
28.	<u>Лекція 28</u> Теплообмін та гідравлічний опір при турбулентному русі рідини зі змінною в'язкістю. Залежність теплофізичних властивостей рідини від температури. Вплив напрямку теплового потоку на інтенсивність теплообміну і гідравлічний опір. Література: основна – [1], с. 240-242; Завдання на СРС: Особливості теплообміну і гідродинаміки при течії рідких металів.
29.	<u>Лекція 29</u> 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. Література: основна – [1], с. 242-253; Завдання на СРС: Аналіз результатів експериментальних досліджень по теплообміну і аеродинаміці в трубах і каналах.
30.	<u>Лекція 30</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. Література: основна – [1], с. 253-256;
31.	<u>Лекція 31</u> Особливості режиму турбулентної течії води в області біля критичної точки. Розподіл втрат тиску. Режими нормального теплообміну. Література: основна – [1], с. 256-264; Завдання на СРС: Режими з погіршеним теплообміном і фактори, які впливають на інтенсивність процесів теплообміну і гідродинаміки.
32.	<u>Лекція 32</u> 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. Література: основна – [1], с. 264-268; Завдання на СРС: Вплив швидкості хімічних реакцій на теплообмін.
<b>Тема 6. Гідродинаміка двофазних потоків</b>	
33.	<u>Лекція 33</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. Література: основна – [1], с. 354-362; Завдання на СРС: Діаграма режимів течії.

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
34.	<u>Лекція 34</u> 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. Література: основна – [1], с. 362-367; Завдання на СРС: Дійсний об'ємний паровміст.
35.	<u>Лекція 35</u> 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.. Література: основна – [1], с. 367-373; Завдання на СРС: Підготовка до МКР частина II.
36.	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. <b>Модульна контрольна робота.</b> Частина II Література: основна – [1], с. 373-379;

### 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>  Література: Завдання на СРС:
2.	
3.	
4.	
5.	
6.	
7.	
8.	
9.	

### **6. Самостійна робота**

Для опанування матеріалу дисципліни передбачено виконання завдань на самостійне опрацювання матеріалу. Завдання СРС видаються після кожної лекції, строк задачі завдання – не пізніше ніж через тиждень.



## 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед студентом:

- обов'язкове відвідування лекцій, а також 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», штрафні бали є засобом протидії плагіату та несамостійному виконанню робіт;
- політика дедлайнів та перескладань полягає у виконанні поточних модульних робіт і реферату 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 англійських онлайн-курсів за тематикою, яка відповідає тематиці конкретних занять.

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

Види контролю знань студентів з дисципліни:

- відповіді на лекційних заняттях;
- виконання МКР (дві частини);
- відповідь на екзамені – максимально 50 балів.

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

- 1) чотири відповіді в середньому кожного студента на практичних заняттях (на одному занятті опитуються приблизно 2 студенти; при середній чисельності групи 10 осіб і дев'яти практичних занять (18 годин);
- 2) виконання завдань СРС;
- 3) виконання і захист розрахункової роботи;
- 4) виконання однієї МКР;
- 5) відповідь на екзамені при виконанні умов допуску.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання

### 1. Робота на практичних заняттях

Ваговий бал — 5. Максимальна кількість балів студента на всіх заняттях:  $r_1=5$  балів  $\times 4 = 20$  балів.

Критерії оцінювання:

**5 балів** — повна вірна відповідь на поставлене запитання; **4 бали** — відповідь має несуттєві похибки; **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

Ваговий бал — 1. Максимальна кількість балів студента тридцять завдань (завдання СРС видаються після кожної лекції, строк задачі завдання – не пізніше ніж через тиждень):  $r_2=1$  бал  $\times 30 = 30$  балів. Виконане завдання надається викладачу у вигляді конспекту, виконання завдань СРС обов'язкове.

*Критерії оцінювання:*

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

**Штрафні бали:**

— несвоєчасне представлення виконаного завдання СРС без поважної причини (хвороба) — **1 бал**.

**Заохочувальні бали**

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

### **3. Модульна контрольна робота (МКР)**

Проводиться дві частини МКР. Ваговий бал кожної частини — 5. Максимальна кількість балів за МКР дорівнює  $r_3=5 \times 2 = 10$  балів.

*Критерії оцінювання:*

**5 балів** — повна вірна відповідь на завдання; **4 бали** — відповідь має несуттєві помилки; **3 бали** — неповна відповідь; **0...2 балів** — наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді, МКР не зараховано.

### **4. Відповіді на екзамені**

Екзамен проводиться у письмово-усній формі. Екзаменаційний білет складається з двох теоретичних питань і одного практичного завдання. Перелік питань наведений у додатку до силабусу дисципліни. Перші два теоретичних питання оцінюються по 15 балів, а третє завдання — 20 балів. Тобто, максимальна кількість балів за виконане завдання **15+15+20 = 50 балів**.

*Критерії оцінювання:*

Кожне питання екзаменаційної роботи оцінюється згідно до системи оцінювання:

— правильне раціональне рішення, або повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) — **13...15 (18...20) балів**;

— достатньо повна відповідь, правильне рішення (не менше 70% потрібної інформації, або незначні неточності) — **10...12 (14...17) балів**;

— неповна відповідь, рішення з помилками (не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки) — **7...9 (11...13) балів**;

— незадовільна відповідь, або відсутність рішення (менше 60% потрібної інформації та помилки) — менше **6 (10) балів**.

**Штрафні бали:**

— додаткове питання з тем лекційного курсу та практичних занять отримують студенти, які не брали участі у роботі певного заняття. Незадовільна відповідь з додаткового питання знижує загальну оцінку на **3 бали**.

### **Розрахунок шкали рейтингу з дисципліни ( $R_d$ ):**

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

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

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

**Максимально можливий стартовий рейтинг:  $R_c = 20+30= 50$  балів.**

Необхідною умовою допуску до екзамену є позитивна оцінка з виконання всіх завдань СРС, та стартовий рейтинг не менше  $0,5 \times R_c = 25$  балів.

Студенти, які набрали в семестрі рейтинг з дисципліни менше, ніж 25 балів або не виконали умов допуску на екзамен, 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 заліку 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

<b>Кількість балів</b>	<b>Оцінка</b>
------------------------	---------------

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

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 студентом 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 студентом продовж семестру;

$R_c$  – максимальна сума вагових балів контрольних заходів продовж семестру;

$R_D$  – бал допуску до екзамену.

Студенти, 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 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.

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. 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;

**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

- потоків 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 термогравітаційних 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 Матіеллі-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 АЕС і ІТФ (протокол № 21 від 23.06.2021 р.)

**Погоджено** Методичною комісією факультету (протокол № 11 від 24.06.2021 р.)