



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>143 Атомна енергетика</i>
Освітня програма	<i>ОНП Атомні електричні станції</i>
Статус дисципліни	<i>вибіркова</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>II курс, осінній</i>
Об'єм дисципліни	<i>6 кредитів ЄКТС (180 годин), 72 години лекцій, 18 годин практичні заняття, 90 годин самостійної роботи</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>екзамен, розрахункова робота, 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://drive.google.com/drive/u/1/my-drive , https://do.ipk.kpi.ua/ , https://drive.google.com/drive/u/2/folders/1OC-CEUvYb-vIAi85rTLF18Jrm57BORxQ

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 набуває після вивчення дисципліни:

Здатність розробляти, досліджувати та застосовувати фізичні, математичні та комп'ютерні моделі, розрахункові методи та спеціалізоване програмне забезпечення для розв'язання наукових задач атомної енергетики. ФК 01

Здатність застосовувати отримані спеціалізовані концептуальні знання та навички при проектуванні та експлуатації обладнання та систем ФК 03

Здатність демонструвати знання характеристик специфічних матеріалів, обладнання, процесів та продуктів в галузі атомної енергетики, умов їх використання та відповідних обмежень ФК 08

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

Демонструвати спеціалізовані концептуальні знання з атомної енергетики, набуті у процесі навчання та/або професійної діяльності, у тому числі знання і розуміння новітніх досягнень, які забезпечують здатність до інноваційної та дослідницької діяльності ПРН 02

Застосовувати отримані знання для аналізу інженерних об'єктів, процесів і методів атомної енергетики ПРН 06

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: виконання магістерської дисертації.

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. 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
3. Mass transfer, Thomas K. Sherwood, Robert L. Pigford, and Charles R. Wilke, McGraw-Hill Book Company (1975). 677 pages

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

1. Безродный М.К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах/М.К.Безродный, И.Л.Пиоро, Т.О.Костюк. — К.: Факт, 2003. — 480 с. (рос. мова)
2. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание/ А.Д.Зимон. — М.: Химия, 1974. — 414 с. (рос. мова)
3. Гохштейн А.Я. Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция/ А.Я. Гохштейн. — М: ВО Наука, 1976. — 400 с. (рос. мова)
4. Кутателадзе С.С. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах/ С.С.Кутателадзе, В.Е.Накоряков. — Новосибирск: ВО "Наука", 1984. — 302 с. (рос. мова)

5. Кутателадзе С.С. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое/ С.С.Кутателадзе, А.И.Леонтьев . — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 320 с. (рос. мова)
6. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Часть II/ Р.И.Нигматулин. -М: "Наука", 1987. — 360 с. (рос. мова)
7. Гешев П.И. Теплообмен 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. (рос. мова)
8. 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.
9. Теория теплообмена/ [под ред. А.И.Леонтьева] . — М.: МГТУ им.Баумана, 1997. — 683 с. (рос. мова)
10. Ганчев Б.Г. Охлаждение элементов ядерных реакторов стекающими плёнками/ Б.Г.Ганчев. - М.: Энергоатомиздат, 1987. — 192 с. (рос. мова)

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.	<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> Теплоносії в ядерних енергетичних установках. Критерії вибору теплоносія. Основні переваги і недоліки води, газів і рідких металів. Завдання на СРС: Параметри теплоносії в різних типах реакторних установок
Тема 2. Рівняння теплопровідності і методи його рішення.	
4.	<u>Лекція 4</u> Рівняння теплопровідності для стаціонарних і нестаціонарних процесів. Умови однозначності. Особливості граничних умов в щільних ТВЗ. Деякі перетворення рівняння теплопровідності. Завдання на СРС: Виникнення неоднорідності в рівняннях теплопровідності.
5.	<u>Лекція 5</u> Розрахунок температурних полів в ТВЕЛ з урахуванням залежності коефіцієнта теплопровідності від температури.

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	Завдання на СРС: Одномірне температурне поле при неоднорідному розподілі внутрішніх джерел теплоти.
6.	<u>Лекція 6</u> Двомірні стаціонарні задачі теплопровідності. Температурне поле в тепловиділяючому пучці ТВЕЛів при наявності охолоджуючих труб. 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. Завдання на СРС: Температурне поле у пошкодженому ТВЕЛі.
Тема 3. Конвективний тепло- і масообмін.	
8.	<u>Лекція 8</u> Основні положення теорії пограничного шару. Дифузія і теплопровідність. Математичний опис конвективного теплообміну. Диференціальні рівняння тепловіддачі, енергії, руху та нерозривності. 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. 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. 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. 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. 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. 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 направлення вектора швидкості вимушеного руху і термогравітаційних сил на інтенсивність теплообміну. Характерні випадки.
Тема 4. Застосування теорії турбулентності в задачах теплообміну в енергетичному обладнанні	
15.	<u>Лекція 15</u>

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	<p>Параметри турбулентного потоку. Пульсаційні і осереднені значення величин параметрів турбулентного потоку. Осереднені рівняння нерозривності, руху і енергії для турбулентних потоків.</p> <p>Завдання на СРС: Турбулентні напруження і турбулентне перенесення теплоти.</p>
16.	<p><u>Лекція 16</u></p> <p>Зведення системи осереднених рівнянь турбулентності. Градієнтний характер турбулентного переносу – гіпотеза Бусінеска. Кінематичний коефіцієнт турбулентного переносу кількості руху, коефіцієнт турбулентного переносу кількості теплоти.</p> <p>Завдання на СРС: Турбулентне число Прандтля.</p>
17.	<p><u>Лекція 17</u></p> <p>Теорія шляху перемішування. Аналогія між процесом турбулентного (молярного) і молекулярного переносу. Константа турбулентності.</p> <p>Завдання на СРС: Положення теорії Кармана.</p>
18.	<p><u>Лекція 18</u></p> <p>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.</p> <p>Завдання на СРС: В'язкий прошарок.</p>
19.	<p><u>Лекція 19</u></p> <p>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.</p> <p>Завдання на СРС: Підготовка до МКР частина 1.</p>
<p>Тема 5. Теплообмін в трубах круглого перерізу при турбулентному русі рідини з постійними теплофізичними властивостями.</p>	
20.	<p><u>Лекція 20</u></p> <p>Стабілізований теплообмін при постійній густині теплового потоку на стінці. Умови однозначності. Рівняння енергії. Визначення температурного поля та інтенсивності теплообміну.</p> <p>Модульна контрольна робота. Частина I</p> <p>Завдання на СРС: Зв'язок між розподілом теплового потоку, температурним полем і гідродинамічними характеристиками потоку.</p>
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>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</p>

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	поле в перерізі труби. Співставлення теоретичних розрахунків з експериментальними дослідженнями.
23.	<u>Лекція 23</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. Завдання на СРС: Довжина термічної початкової ділянки.
24.	<u>Лекція 24</u> Теплообмін при постійному розподілу температури стінки. Рівняння енергії і граничні умови при $Pr_T \ll 1$. Залежність локального числа Nu від чисел Re і Pr_T . Граничні значення Nu при $Pr_T > 0,7$ і $T_c = \text{const}$. Завдання на СРС: Вплив термічної початкової ділянки на середню тепловіддачу.
25.	<u>Лекція 25</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.
26.	<u>Лекція 26</u> 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 густини теплового потоку теплофізичних властивостей теплоносія.
27.	<u>Лекція 27</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. Завдання на СРС: Аналіз аналітичних рішень.
28.	<u>Лекція 28</u> 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: Особливості теплообміну і гідродинаміки при течії рідких металів.
29.	<u>Лекція 29</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. 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.

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	Зона великих теплоємностей. Квазістаціонарна турбулентна течія в трубах при наявності термогравітаційних сил і термічного прискорення.
31.	<u>Лекція 31</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.
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. Завдання на СРС: Вплив швидкості хімічних реакцій на теплообмін.
Тема 6. Гідродинаміка двофазних потоків	
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. Завдання на СРС: Діаграма режимів течії.
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 у двофазному потоці. 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 Матінелли-Локарта. Границі застосування. Криза гідравлічного опору. Практичне застосування методики розрахунку гідравлічних опорів при русі пароводяних потоків.. Завдання на СРС: Підготовка до МКР частина II.
36.	<u>Лекція 36</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> Закони збереження. Диференціальні рівняння тепломасообміну. Основи чисельних методів розрахунку.
2.	<u>Практичне заняття 2.</u>

№ з/п	Назва теми практичного заняття та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	<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.</i>
7.	<u>Практичне заняття 7.</u> <i>Розробка моделі тестової задачі тест Едвардса-Обрайна.</i>
8.	<u>Практичне заняття 8.</u> <i>Рішення задачі. Пост розрахункова обробка результатів моделювання витоку.</i>
9.	<u>Практичне заняття 9.</u> <i>Модульна контрольна робота.</i>

6. Самостійна робота студента

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

Для виконання розрахункової роботи на тему «Розробка розрахункової моделі теплообмінного апарату», згідно варіанту, кожному студенту видається завдання (див. Додаток 1). Виконання та захист розрахункової роботи оцінюється згідно РСО (див. п.8)

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;
- виконання та захист РР;
- календарний контроль
- 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 восьми практичних заняття (16 годин) отримуємо: $2 \times 8 / 10 = 2$ відповіді);
- 2) виконання завдань СРС з лекційної частини курсу;
- 3) виконання завдань СРС з практичної частини курсу;
- 4) виконання однієї МКР;
- 5) виконання та захист РР;
- 6) відповідь на екзамені при виконанні умов допуску.

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

Критерій	Перший	Другий
Термін	8-й тиждень	14-й тиждень
Умови отримання позитивного результату	якщо поточний рейтинговий бал складає не менше 50% від максимально можливого балу на момент календарного контролю	якщо поточний рейтинговий бал складає не менше 50% від максимально можливого балу на момент календарного контролю

Система рейтингових балів та критерії оцінювання

1. Робота на практичних заняттях

Ваговий бал — 5. Максимальна кількість балів студента за відповіді на 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 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 з лекційної частини курсу

Ваговий бал — 0,5. Максимальна кількість балів студента за двадцять завдань (завдання СРС видаються після лекції, строк задачі завдання – не пізніше ніж через тиждень): $r_2 = 0,5 \text{ бал} \times 20 = 10 \text{ балів}$. Виконане завдання надається викладачу у вигляді конспекту, виконання завдань СРС обов'язкове.

Критерії оцінювання:

0,5 балів — у повному об'ємі і вчасно надане завдання; **0 балів** — не вчасно надане завдання.

Штрафні бали:

- несвоєчасне представлення виконаного завдання СРС без поважної причини (хвороба) нараховується штрафний **1 бал**.

3. Виконання та захист РР

Максимальна кількість балів за виконання розрахункової роботи **15 балів** і за захист **5 балів**, тобто: сумарна кількість балів дорівнює $r_3 = 20$. Завдання для виконання розрахункової роботи видається студенту на початку семестру, строк захисту – останнє практичне заняття. Оформлення звіту з виконання розрахункової роботи згідно вимогам ДСТУ 8302:2015. Захист розрахункової роботи на останньому практичному занятті. *Виконання завдань і захист розрахункової роботи обов'язкове.*

Критерії оцінювання (виконання розрахункової роботи):

14...15 балів — виконання завдань у повному об'ємі, творчий підхід до виконання завдання, без помилок і у строк; **12...13 балів** — виконання завдань у повному об'ємі, без помилок і у строк; **10...11 балів** — виконання завдань у повному об'ємі, з деякими неточностями, у строк; **6...9 бали** — виконання завдань у повному об'ємі, з незначними неточностями, затримка у виконанні завдання; **0...5 балів** — виконання завдання не у повному об'ємі, з грубими помилками, затримка у виконанні завдання – робота не зарахована.

Критерії оцінювання (захист розрахункової роботи):

5 балів — повна вірна відповідь на поставлені запитання за темою розрахункової роботи; **4 бали** — відповідь має несуттєві похибки; **3 бали** — неповна відповідь; **2 бали** — наявність несуттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді, **0...1 бали** — наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді, захист не зараховано

Штрафні бали:

- несвоєчасне представлення виконаного завдання та/або захист РР без поважної причини (хвороба) нараховується штрафний **1 бал**.

Заохочувальні бали

- за активну участь на заняттях — до **5 балів за семестр** (при умові виконання РР).

4. Модульна контрольна робота (МКР)

Ваговий бал МКР: $r_4 = 10$ балів.

Критерії оцінювання:

10 балів — повна вірна відповідь, творче виконання завдання; **8...9 балів** — відповідь має несуттєві неточності; **5...7 балів** — неповна відповідь; **0...4 балів** — наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді, МКР не зараховано.

5. Екзаменаційна робота

Екзамен проводиться у письмово-усній формі. Екзаменаційне завдання складається з двох теоретичних питань. Перелік теоретичних питань наведений у додатку до силабусу дисципліни. Виконання теоретичних питань оцінюються по 10 балів, загальна сума множиться на коефіцієнт 2,5. Тобто, максимальна кількість балів за виконане завдання $(10+10) \cdot 2,5 = 50$ балів.

Критерії оцінювання:

Кожне питання екзаменаційної роботи оцінюється згідно до системи оцінювання:

- правильне раціональне рішення, або повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – **9...10 балів**;
- достатньо повна відповідь, правильне рішення (не менше 70% потрібної інформації, або незначні неточності) – **7...8 балів**;
- неповна відповідь, рішення з помилками (не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки) – **5...6 балів**;
- незадовільна відповідь, або відсутність рішення (не менше 50% потрібної інформації та помилки) – менше **5 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:

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

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

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

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

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

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 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

Завдання для виконання розрахункової роботи

Виконується підготовка вхідного файлу коду Relap, розрахункової моделі теплообмінного апарату та аналіз режимів його роботи, за № Варіанту згідно таблиці початкових та граничних умов, нижче.

№	t'_1 [K]	t'_2 [K]	Схема
1	313	283	прямоточна
2	323	288	прямоточна
3	333	293	прямоточна
4	343	298	прямоточна
5	353	303	прямоточна
6	363	308	прямоточна
7	313	283	протитечії
8	323	288	протитечії
9	333	293	протитечії
10	343	298	протитечії
11	353	303	протитечії
12	363	308	протитечії

, де t'_1 та t'_2 початкові температури теплоносіїв. Інші конструктивні та робочі характеристики теплообмінного апарату надаються на заняттях.

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 $Pr_T \ll 1$. 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 густині теплового потоку. Метод суперпозиції для турбулентної стабілізованої течії рідини. Вплив на інтенсивність теплообміну при змінній густині 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 напрямку теплового потоку 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

теплого 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 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 № 19 від 17. 05. 2023 р.)

Погоджено методичною комісією НН ІАТЕ (протокол № 9 від 26. 05. 2023 р.)