



Теплогідравличні процеси в енергетичних установках

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	бакалавр
Галузь знань	14 Електрична інженерія
Спеціальність	143 Атомна енергетика
Освітня програма	Атомні електричні станції
Статус дисципліни	Вибіркові
Форма навчання	очна(денна)
Рік підготовки, семестр	4 курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	4 кредитів, 120 годин, 36 годин лекцій, 18 годин практичних, 66 годин СРС
Семестровий контроль/ контрольні заходи	МКР, РР, Залік
Розклад занять	rozklad.kpi.ua
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: <i>д.т.н, Кравець Володимир Юрійович, kravetz_kpi@ukr.net</i> Практичні: <i>д.т.н, Кравець Володимир Юрійович, kravetz_kpi@ukr.net</i> Лабораторні: - не передбачено
Розміщення курсу	Посилання на дистанційний ресурс: https://campus.kpi.ua , https://do.ipk.kpi.ua/mod/resource/view.php?id=90678 https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74282

Програма навчальної дисципліни

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

Сучасний стан світової енергетики показує, що процеси теплообміну при генерації парової фази застосовуються практично всюди, де йдеться про виробіток теплової та електричної енергії. Теплові та атомні електричні станції виробляють електроенергію шляхом подачі на турбіни генераторів перегрітої пари під великим тиском. Тому знання про отримання парової фази необхідно для проектування та підтримки ефективної роботи теплових і атомних електричних станцій. Також існує достатньо велика кількість сучасних теплообмінних пристроїв де використовується процес передачі теплової енергії шляхом генерації парової фази. Використання такого принципу передачі теплової енергії застосовується як в наземної так і космічної техніки.

Предметом навчальної дисципліни є опанування сучасних методів проектування нових видів теплообмінних пристроїв з використанням процесів генерації пари як у великої енергетиці, так при розробці ефективних випарно-конденсаційних систем, таких як теплові труби і термосифони

Метою навчальної дисципліни є формування у студентів наступних фахових здібностей (компетентностей):

Здатність розробляти та впроваджувати заходи з підвищення надійності та ядерно-радіаційної безпеки при проектуванні та експлуатації обладнання атомно-енергетичного комплексу. ФК 2

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

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

Знати, розуміти і застосовувати нормативні документи, стандарти інженерної практики і правила техніки безпеки при вирішенні професійних завдань. ПР 9

Знати і розуміти основні характеристики, сферу застосування та обмеження обладнання, матеріалів та інструментів, інженерних технологій і процесів, що використовуються при вирішенні професійних завдань. ПР 12

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

Пререквізити: технічна термодинаміка, математичні методи та моделі, технологія теплоносіїв, тепломасообмін, енергетичні ядерні реактори, теплообмін при фазових перетвореннях, гідрогазодинаміка.

Постреквізити: дипломне проектування, дисципліни, які пов'язані з проектуванням та підтримкою ефективної роботи теплових і атомних електричних станцій.

3 Зміст навчальної дисципліни

Розділ 1. Фізика процесів генерації парової фази

Тема 1.1. Механізм процесу теплообміну при бульбашковому та плівковому кипінні

Розділ 2. Теплогідрравлічні режими двофазних потоків

Тема 2.1. Структурні зміни пароводяного потоку в парогенеруючих елементах

Тема 2.2. Фізичні особливості процесів гідродинаміки та теплообміну у парогенеруючих каналах

Розділ 3. Рух двофазного потоку у парогенеруючих каналах

Тема 3.1. Основи розрахунку гідравлічного опору каналів ядерних реакторів в умовах руху через них однофазних потоків

Тема 3.2. Основи розрахунку гідравлічного опору каналів ядерних реакторів в умовах руху через них двофазних потоків

Тема 3.3. Теплогідрравлічна розвірка паралельних каналів

Тема 3.4. Безрозмірне рівняння гідравлічної діаграми

Тема 3.5. Аналіз впливу конструктивних особливостей елемента на теплогідрравлічну розвірку

Тема 3.6. Особливості гідродинаміки колекторних систем

Розділ 4. Невимушена циркуляція теплоносія в циркуляційних контурах енергетичних установок

Тема 4.1. Визначення рушійного та корисного напорів циркуляції

Тема 4.2. Оцінка надійності невимушеної циркуляції

Розділ 5. Вимушена циркуляція теплоносія в циркуляційних контурах енергетичних установок

Тема 5.1. Гідродинамічні характеристики поверхонь, що обігріваються

Тема 5.2. Методи запобігання пульсацій теплоносія в циркуляційних контурах енергетичних установок

Розділ 6. Процеси теплопереносу у випарювальних елементах енергетичних установок Тема 6.1. Теплообмін на занурених парогенеруючих поверхнях тепловіддачі

Тема 6.2. Теплообмін у парогенеруючих каналах в умовах вимушеного руху теплоносія

Розділ 7. Визначення гранично допустимих теплових навантажень поверхонь тепловіддачі у високофорсованих теплообмінних апаратах

Тема 7.1. Механізм кризи тепловіддачі при кипінні теплоносія на занурених поверхнях тепловіддачі

Тема 7.2. Критична густина теплового потоку при кипінні теплоносія на занурених поверхнях тепловіддачі

Тема 7.3 Критична густина теплового потоку при кипінні теплоносія у парогенеруючих каналах в умовах вимушеного руху теплоносія

4. Навчальні матеріали та ресурси

Основна література

Базова література

1. Каденко І.М., Харитонов О.М., Ермоленко Р.В. Основи теплогідроліки ядерних енергетичних установок. Навчальний посібник / Київ: Київський університет. 2010. – 359 с.
<http://atom.univ.kiev.ua/books/tg.pdf>
2. Теплогідролічні процеси в енергетичних установках. Розрахункова робота [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньо-професійною програмою «Атомні електричні станції», спеціальністю 143 «Атомна енергетика» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. Ю. Кравець, Є. С. Алексеїк, О. С. Алексеїк. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,13 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 49 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48478>
3. Чепурний М. М. Теплові розрахунки парогенераторів. [Навчальний посібник] / М. М. Чепурний, Д. В. Степанов, Є. С. Корженко. – Вінниця: ВНТУ, 2006. - 155 с.

Допоміжна література

1. Кравець В.Ю Процеси теплообміну у мініатюрних випарно-конденсаційних системах охолодження/ В.Ю. Кравець – Харків. ФОП Бровін О.В., 2018. -288 с.
2. Kravets V.Yu. Heat transfer processes in miniature evaporation-condensation cooling systems Kyiv: Interservice, 2023. – 204 p ISBN 978-966-999-367-0.
3. Melnyk, R., Kravets, V., Lipnitskyi, L., Danylovych, A. Heat Transfer Intensity at Water Boiling on the Surface of a Capillary Structure Under Subatmospheric Pressure // Eastern-European Journal of Enterprise Technologiesthis, 2021, 3/8 (111) , pp. 35–41.
4. Yu.E.Nikolaenko, D.V.Pekur, V.M.Sorokin, V.Yu.Kravets, R.S.Melnyk, L.V.Lipnitskyi, A.S.Solomakha Experimental study on characteristics of gravity heat pipe with threaded evaporator // Thermal Science and Engineering Progress Volume 26, 1 December 2021, 101107

Навчальний контент

5.Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Оскільки дисципліна „Теплогідравлічні процеси в енергетичних установках” пов’язана із дисциплінами професійної підготовки, то її викладання є запорукою подальшого засвоєння студентами спеціальних фахових дисциплін, та формування базових основ професійної діяльності.

Для кращого засвоєння навчального матеріалу рекомендується проводити лекції з використанням наочних засобів навчання (показ слайдів, робота з роздаточним матеріалом); практичні заняття рекомендується проводити після вивчення певної частини курсу лекцій.

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
Розділ 1. Фізика процесів генерації парової фази	
1.	Тема 1.1. Механізм процесу теплообміну при пливковому та плівковому кипінні. ЛЕКЦІЯ 1. Закономірність зародження, зростання, відриву та руху парових бульбашок. Механізм процесу теплообміну при пливковому кипінні. Крива кипіння. СРС: Інтенсивність теплообміну при кипінні у великому об’ємі. Теплообмін при плівковому кипінні.
Розділ 2. Теплогідролічні режими двофазних потоків	
2.	Тема 2.1. Структурні зміни пароводяного потоку в парогенеруючих елементах. ЛЕКЦІЯ 2.Параметри двофазного потоку. Гомогенний, гетерогенний і адіабатний потоки. СРС: Режим руху.
3.	Тема 2.2. Фізичні особливості процесів гідродинаміки та теплообміну у парогенеруючих каналах. ЛЕКЦІЯ 3. Диференційні рівняння гідродинаміки. Основні числа подоби, що характеризують гідродинаміку і теплообмін двофазного потоку. СРС: Розподіл швидкості в перерізі труби при ламінарному та турбулентному рухах.
Розділ 3. Рух двофазного потоку у парогенеруючих каналах	
4.	Тема 3.1. Основи розрахунку гідравлічного опору каналів ядерних реакторів в умовах руху через них однофазних потоків.

	ЛЕКЦІЯ 4. Рух однофазної рідини, що не стискається у трубах. Коефіцієнти опору у трубах. СРС: Залежність коефіцієнтів опору від характеру течії.
5.	Тема 3.2. Основи розрахунку гідравлічного опору каналів ядерних реакторів в умовах руху через них двофазних потоків. ЛЕКЦІЯ 5. Особливості руху двофазної рідини в каналах енергетичних установок СРС: Місцеві опори.
6.	Тема 3.3. Теплогідравлічна розвірка паралельних каналів. ЛЕКЦІЯ 6. Основні передумови для аналітичного дослідження теплогідравлічної надійності системи паралельних парогенеруючих каналів. СРС: Коефіцієнти теплової і гідравлічної розвірки.
7.	Тема 3.4. Безрозмірне рівняння гідравлічної діаграми. ЛЕКЦІЯ 7. Вивід безрозмірного рівняння гідравлічної діаграми (БРГД). СРС: Конструктивно витратний параметр. Фізичний сенс.
8.	Тема 3.5. Аналіз впливу конструктивних особливостей елементу на теплогідравлічну розвірку. ЛЕКЦІЯ 8. Можливість використання БРГД для аналізу впливу режимних факторів на теплогідравлічну розвірку. СРС: Умови розвитку екстремальних значень коефіцієнта теплової розвірки.
9.	Тема 3.6. Особливості гідродинаміки колекторних систем. ЛЕКЦІЯ 9. Особливості гідродинаміки колекторів, які роздають та збирають потік. СРС: Характер течії в колекторах.
Розділ 4. Невимушена циркуляція теплоносія в циркуляційних контурах енергетичних установок	
10	Тема 4.1. Визначення рушійного та корисного напорів циркуляції. ЛЕКЦІЯ 10. Рушійний напір. Корисний напір. СРС: Швидкість циркуляції.
11	Тема 4.2. Оцінка надійності невимушеної циркуляції. ЛЕКЦІЯ 11. Гідродинамічна характеристика труби при підйомному та опускному руху двофазного потоку. Швидкість підживлення. СРС: Режим застою циркуляції.
РОЗДІЛ 5 Вимушена циркуляція теплоносія в циркуляційних контурах енергетичних установок	
12	Тема 5.1. Гідродинамічні характеристики поверхонь, що обігріваються. ЛЕКЦІЯ 12. Основні передумови для аналітичного дослідження системи паралельних парогенеруючих каналів СРС: Гідродинамічна нестабільність.
13	Тема 5.2. Методи запобігання пульсацій теплоносія в циркуляційних контурах енергетичних установок. ЛЕКЦІЯ 13. Характер пульсацій потоку в парогенеруючих трубах. Вільні коливання. Пульсації при постійної тепловіддачі. СРС: Період і амплітуда пульсацій.
Розділ 6. Процеси теплопереносу у випарювальних елементах енергетичних установок	
14	Тема 6.1. Теплообмін на занурених парогенеруючих поверхнях тепловіддачі. ЛЕКЦІЯ 14. Вплив деяких факторів на інтенсивність теплообміну при бульбашковому кипінні (тиск, рівень гравітації, висота рівня рідини, орієнтація у просторі, шорсткість). СРС: Розрахункові формули.
15	Тема 6.2. Теплообмін у парогенеруючих каналах в умовах вимушеного руху теплоносія. ЛЕКЦІЯ 15. Вплив швидкості рідини і паровмісту потоку на інтенсивність теплообміну при бульбашковому кипінні. Процеси теплообміну в дисперсно-кільцевому потоці. Інтенсивність теплообміну при кипінні в умовах направлено руху рідини. СРС: Теплообмін при кипінні рідини, що не догріта.

Розділ 7. Визначення гранично допустимих теплових навантажень поверхонь тепловіддачі у високофорсованих теплообмінних апаратах	
16	Тема 7.1. Механізм кризи тепловіддачі при кипінні теплоносія на занурених поверхнях тепловіддачі. ЛЕКЦІЯ 16. Теплова та гідродинамічна теорії кризи теплообміну при кипінні рідини на занурених поверхнях теплообміну. СРС: Нестійкість по Гельмгольцу. Нестійкість по Тейлору.
17	Тема 7.2. Критична густина теплового потоку при кипінні теплоносія на занурених поверхнях тепловіддачі. ЛЕКЦІЯ 17. Вплив режимних параметрів на критичний тепловий потік при кипінні насиченої рідини. Рівняння для розрахунку критичній густині теплового потоку. СРС: Вплив недогріву рідини до температури насичення на критичну густину теплового потоку.
18	Модульна контрольна робота

6. Практичні заняття

Основна ціль практичних занять - **уміння** студентами розраховувати гідравлічні опори при русі однофазного та двофазного потоків у парогенеруючих каналах; розраховувати процеси теплопереносу у випарних елементах енергетичних установок.

Студенти мають набути **навички** аналізу структурних змін та особливостей теплогідравлічних режимів двофазних потоків; аналізувати теплогідравлічні процеси при русі потоків в паралельних каналах і особливості гідродинаміки в колекторних системах.

Практичні заняття проводяться з метою закріплення теоретичного матеріалу. Можливі теми практичних занять:

№ з/п	Назва теми заняття та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
Розділ 2. Теплогідравлічні режими двофазних потоків	
1.	Тема 2.2. Фізичні особливості процесів гідродинаміки та теплообміну у парогенеруючих каналах Диференційні рівняння гідродинаміки. Основні числа подоби, що характеризують гідродинаміку двофазного потоку. СРС: Розподіл швидкості в перерізі труби при ламінарному та турбулентному рухах.
Розділ 3. Рух двофазного потоку у парогенеруючих каналах	
2.	Тема 3.1. Основи розрахунку гідравлічного опору каналів ядерних реакторів в умовах руху через них однофазних потоків Рух однофазної рідини, що не стискається у трубах. Коефіцієнти опору у трубах. Залежність коефіцієнтів опору від характеру течії. СРС: Залежність коефіцієнтів опору від характеру течії.
3.	Тема 3.2. Основи розрахунку гідравлічного опору каналів ядерних реакторів в умовах руху через них двофазних потоків Особливості руху двофазної рідини в каналах енергетичних установок СРС: Місцеві опори.
Розділ 4. Аналітичний метод оцінки тепло гідравлічної надійності прямоточних поверхонь нагріву	
4.	Тема 3.6. Особливості гідродинаміки колекторних систем Особливості гідродинаміки колекторів, які роздають та збирають потік. Характер течії в колекторах. СРС: Характер течії в колекторах.
Розділ 4. Невимушена циркуляція теплоносія в циркуляційних контурах енергетичних установок	

5.	Тема 4.1. Визначення рушійного та корисного напорів циркуляції Рушійний напір. Корисний напір. Швидкість циркуляції. СРС: Вибір емпіричної формули.
Розділ 5. Вимушена циркуляція теплоносія в циркуляційних контурах енергетичних установок	
6.	Тема 5.2. Методи запобігання пульсацій теплоносія в циркуляційних контурах енергетичних установок Характер пульсацій потоку в парогенеруючих трубах. Вільні коливання. Пульсації при постійної тепловіддачі. СРС: Період і амплітуда пульсацій.
Розділ 6. Процеси теплопереносу у випарювальних елементах енергетичних установок	
7.	Тема 6.1. Теплообмін на занурених парогенеруючих поверхнях тепловіддачі Вплив деяких факторів на інтенсивність теплообміну при пазирковому кипінні (тиск, рівень гравітації, висота рівня рідини, орієнтація у просторі, шорсткість). Розрахункові формули. СРС: Розрахункові формули.
Розділ 7. Визначення гранично допустимих теплових навантажень поверхонь тепловіддачі у високофорсованих теплообмінних апаратах	
8.	Тема 7.1. Механізм кризи тепловіддачі при кипінні теплоносія на занурених поверхнях тепловіддачі Теплова та гідродинамічна теорії кризи теплообміну при кипінні рідини на занурених поверхнях теплообміну. Нестійкість по Гельмгольцу. Нестійкість по Тейлору. СРС: Нестійкість по Гельмгольцу. Нестійкість по Тейлору.
9.	Тема 7.2. Критична густина теплового потоку при кипінні теплоносія на занурених поверхнях тепловіддачі Вплив режимних параметрів на критичний тепловий потік при кипінні насиченої рідини. Рівняння для розрахунку критичній густини теплового потоку. Вплив недогріву рідини до температури насичення на критичну густину теплового потоку. СРС: Вплив недогріву рідини до температури насичення на критичну густину теплового потоку

7. Самостійна робота студента

№ з/п	Назва теми, що виноситься на самостійне опрацювання	Кількість годин СРС
1.	Інтенсивність теплообміну при кипінні у великому об'ємі. Теплообмін при плівковому кипінні.	3
2.	Режими руху рідини у трубах.	3
3.	Розподіл швидкості в перерізі труби при ламінарному та турбулентному рухах.	4
4.	Залежність коефіцієнтів опору від характеру течії.	4
5.	Місцеві опори.	3
6.	Коефіцієнти теплової і гідравлічної розвірки.	4
7.	Конструктивно витратний параметр. Фізичний сенс.	3
8.	Умови розвитку екстремальних значень коефіцієнта теплової розвірки.	3
9.	Характер течії в колекторах.	3
10.	Швидкість циркуляції.	3
11.	Режим застою циркуляції.	3
12.	Гідродинамічна нестабільність	3
13.	Період і амплітуда пульсацій	3

14	Розрахункові формули інтенсивності тепловіддачі при кипінні у великому об'ємі.	4
15	Теплообмін при кипінні рідини, що не догріта.	4
16	Нестійкість по Гельмгольцу. Нестійкість по Тейлору.	4
17	Підготовка до МКР	4
18	Підготовка до заліку.	8

Політика та контроль

8. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед студентом:

- готовність відповідей при опитуванні;
- 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.

Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Види контролю знань студентів з дисципліни:

- календарний контроль;
- відповіді на лекційних заняттях;
- виконання МКР;
- виконання і захист РР;
- відповідь на заліку.

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

- 1) в середньому п'ять відповідей кожного студента на заняттях (на одному занятті опитуються приблизно 2 студенти; при середній чисельності групи 10 осіб і 25 занять (36 години лекції і 18 годин практичних занять) отримуємо: $2 \cdot 27 / 10 \approx 5$ відповідей);
- 2) виконання завдань СРС;
- 3) виконання МКР;
- 4) виконання і захист РР;
- 5) відповідь на заліку.

1. Опитування на лекційних заняттях

Ваговий бал — 1. Максимальна кількість балів студента на всіх заняттях: $r_1 = 2 \text{ бал} \times 5 = \mathbf{10 \text{ балів}}$.

Критерії оцінювання:

2 балів — повна вірна відповідь, 1 бал — вірна відповідь, але містить несуттєві помилки; 0 балів — відсутність вірної відповіді.

2. Виконання завдань СРС

Ваговий бал — 1 (за кожне завдання). Максимальна кількість балів (завдання СРС видаються після кожної лекції, строк задачі завдання – не пізніше ніж через тиждень): $r_2 = 1 \text{ бал} \times$

16 = **16 балів**. Виконане завдання надається викладачу у вигляді конспекту, виконання завдань СРС обов'язкове.

Критерії оцінювання:

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

3. Модульна контрольна робота (МКР)

Максимальна кількість балів за МКР (три питання оцінюються по 10 балів) : $r_3 = 30$ балів.

Критерії оцінювання:

10 балів — повна вірна відповідь на завдання; 8...9 балів — відповідь має несуттєві помилки; 5...7 балів — неповна відповідь; 0...4 балів — наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді.

4. Виконання і захист РР

Максимальна кількість балів за виконання РР дорівнює 34 бали, захист – 10 балів, отже $r_4 = 34 + 10 = 44$ бали.

Критерії оцінювання виконання РР :

34 бали — повністю вірно виконане завдання, оформлено згідно вимог; **30...33 бали** — повністю вірно виконане завдання, але щодо оформлення є зауваження; **20...29 балів** — виконане завдання має несуттєві помилки, які не потребують виправлення; **10...19 балів** — виконане завдання має помилки, які потребують виправлення; **0...9 балів** — виконане завдання має суттєві помилки, робота не зарахована, потребує перероблення.

Критерії оцінювання захисту розрахункової роботи:

10 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, **0...1 бали** — наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді, захист не зараховано

5. Відповіді на заліку

Залік проводиться в усній формі за м'якою системою РСО. Білет складається з трьох теоретичних питань. Перелік питань наведений у додатку до силабусу дисципліни. Перші два теоретичних питання оцінюються по 15 балів, а третє – 10 балів. Тобто, максимальна кількість балів за виконане завдання **15+15+10 = 40 балів**.

Критерії оцінювання:

Кожне питання залікової роботи оцінюється згідно до системи оцінювання:

- повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – **14...15 (10) балів**;
- достатньо повна відповідь (не менше 70% потрібної інформації, або незначні неточності) – **11...13 (9) балів**;
- неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки) – **6...10 (7...8) балів**;
- незадовільна відповідь (менше 60% потрібної інформації та помилки) – менше **5 (6) балів**.

Розрахунок шкали рейтингу з дисципліни (R_D):

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

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

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

Максимально можливий стартовий рейтинг: $R_c = 10 + 16 + 30 + 44 = 100$ балів.

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

Якщо в продовж семестру студент отримав більше 60 балів, він має право отримати оцінку «автоматом» згідно таблиці відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою (див. нижче).

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

Залікова складова R_E шкали дорівнює: $R_E = 40$ балів.

Таким чином, максимальна кількість балів при здачі заліку за рейтинговою шкалою з дисципліни (у рейтингових балах не враховуються бали за відповіді на заняттях і виконання завдань МКР) складає:

$$R_D = R_c + R_E = 60 + 40 = 100 \text{ балів.}$$

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>).

10. 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.

Перелік питань до модульної контрольної роботи

1. Процеси зародження, зростання, відриву та руху парових бульбашок.
 - гомогенне та гетерогенне зародження парових бульбашок, критичний радіус зародка парового пузиря, фазова діаграма рідини; - пульсації температури поверхні нагріву під зростаючій паровій бульбашки, баланс сил, що діють на парову бульбашку, швидкість зростання парових пазирів, формула Фритца.
2. Механізм процесу теплообміну при бульбашковому кипінні. Крива кипіння.
 - загальні залежності для коефіцієнтів тепловіддачі при бульбашковому кипінні;- фактори, які впливають на інтенсивність тепловіддачі при кипінні у великому об'ємі
3. Теплообмін при плівковому кипінні.
4. Параметри двофазного потоку.
 - гомогенний, гетерогенний и адіабатний потоки, масова витрата суміші, витратний масовий паровміст и витратний масовий вміст рідини; - витратний об'ємний паровміст и витратний об'ємний вміст рідини, витратна густина потоку и істинна густина потоку; - середня масова швидкість, швидкість циркуляції, приведені швидкості рідкої і парової фаз, істинні швидкості рідкої і парової фаз, істинна середня швидкість потоку, витратна середня швидкість потоку і відносна швидкість фаз
5. Режимы течії
 - класифікація режимів течії, змінення ϕ , T_c , T по довжині труби, що обігривається; - додаткові течії в горизонтальних трубах, діаграма режимів течії для вертикального пароводяного потоку.
6. Густина критичного теплового потоку при кипінні рідини на поверхні теплообміну у великому об'ємі
 - механізм процесу, вплив тиску, вплив рівня гравітації; - вплив відкладень и шорсткості поверхні, кількісні залежності для розрахунку критичної густини теплового потоку; - вплив недогріву, вплив розмірів поверхні теплообміну; - нестійкості по Тейлору и Гельмгольцу, критична довжина хвилі.
7. Критичні теплові потоки при кипінні в круглих трубах и кільцевих каналах
 - криза першого и другого роду; - вплив масової швидкості, вплив тиску; - вплив недогріву, вплив діаметра; - кількісні залежності для розрахунку критичної густини теплового потоку при кипінні в трубах, що рівномірно обігриваються.
8. Поняття о пасивних замкнених випарувально-конденсаційних системах
 - термосифони; - теплові труби.

Перелік теоретичних питань до залікової роботи

1. Закономірність зародження, зростання, відриву та руху парових бульбашок.
 - гомогенне та гетерогенне зародження парових бульбашок, критичний радіус зародка парового пузиря, фазова діаграма рідини;
 - пульсації температури поверхні нагріву під зростаючій паровій бульбашки, баланс сил, що діють на парову бульбашку, швидкість зростання парових пазирів, формула Фритца.
2. Механізм процесу теплообміну при пазирковому кипінні. Крива кипіння.
 - загальні залежності для коефіцієнтів тепловіддачі при пазирковому кипінні
 - фактори, які впливають на інтенсивність тепловіддачі при кипінні у великому об'ємі
3. Теплообмін при плівковому кипінні
4. Параметри двохфазного потоку
 - гомогенний, гетерогенний и адіабатний потоки, масова витрата суміші, витратний масовий паровміст и витратний масовий вміст рідини;
 - витратний об'ємний паровміст и витратний об'ємний вміст рідини, витратна густина потоку и істинна густина потоку;

- середня масова швидкість, швидкість циркуляції, приведені швидкості рідкої і парової фаз, істинні швидкості рідкої і парової фаз, істинна середня швидкість потоку, витратна середня швидкість потоку і відносна швидкість фаз

5. Режими течії

- класифікація режимів течії, змінення ϕ , T_c , T по довжині труби, що обігривається;
- додаткові течії в горизонтальних трубах, діаграма режимів течії для вертикального пароводяного потоку

6. Диференціальні рівняння гідродинаміки

- рівняння руху в проекціях на вісі координат (рівняння Нав'є-Стокса);
- рівняння нерозірваності, що виражає закон збереження матерії;
- рівняння енергії, що виражає закон збереження енергії;
- рівняння профілю швидкості на ділянці гідродинамічної стабілізації при ламінарній і турбулентній течії, рівняння руху для парової фази;
- рівняння не розірваності для парової фази.

7. Основні числа подоби, що характеризують гідродинаміку двофазного потоку

- число Фруда, його фізичний сенс, число Рейнольдса, його фізичний сенс;
- число Ейлера, його фізичний сенс, комплекс Кутателадзе.

8. Гідравлічні опори

- перепад тиску в каналі ΔP , утрата тиску від тертя;
- утрата тиску в місцевих опорах, нівелірний перепад тиску;
- утрата тиску від прискорення потоку, поняття гідравлічної характеристики, вплив нівелірної частини.

9. Рух рідини, що не стискається в трубах і коефіцієнти опору труб

- схема розвитку течії на початковій ділянці
- залежність коефіцієнта опору труби від числа Рейнольдса
- коефіцієнти опору при ламінарному і турбулентному режимах течії

10. Методика розрахунку контуру з натуральною циркуляцією

- схема простого циркуляційного контуру, рушійний напір, корисний напір, швидкість циркуляції

11. Оцінка надійності натуральної циркуляції

- важкий контур, режим застою циркуляції, перекидання циркуляції.

12. Гідравлічна і теплова нерівномірність паралельно включених труб

- теплова розвірка, коефіцієнт теплової нерівномірності, коефіцієнт конструктивної нерівномірності;
- коефіцієнт гідравлічної нерівномірності, коефіцієнт колекторної нерівномірності
- коефіцієнт гідравлічної розвірки, коефіцієнт теплової розвірки
- зв'язок між тепловою і гідравлічною розвітками;
- безрозмірне рівняння гідравлічної діаграми, коефіцієнт сумарної нерівномірності, конструктивно - витратний параметр.

13. Методи попередження пульсацій теплоносія в циркуляційних контурах енергетичних установок

- характер пульсацій потоку в трубах де виникає пара, вільні коливання, пульсація потоку.

14. Теплообмін на занурених парогенеруючих поверхнях тепловіддачі

- вплив тиску, явище гістерезису, вплив рівня гравітації;
- вплив орієнтації тепловіддаючої поверхні, вплив рівня рідини, вплив шорсткості;
- вплив теплофізичних властивостей тепловіддаючої поверхні
- формула Кутателадзе, формула Толубинського.

15. Тепловіддача в пучках гладких і оребрених труб

- вплив ряду, вплив оребрення, кипіння на поверхні з пористим покриттям.

16. Теплообмін при бульбашковому кипінні в умовах направленої руху рідини

- вплив швидкості рідини, вплив паровмісту потоку;

- процеси обміну в дисперсно-кільцевому шарі, формули для розрахунку інтенсивності теплообміну при бульбашковому кипінні в умовах руху рідини.

17. Густина критичного теплового потоку при кипінні рідини на поверхні теплообміну у великому об'ємі

- механізм процесу, вплив тиску, вплив рівня гравітації;
- вплив відкладень и шорсткості поверхні, кількісні залежності для розрахунку критичної густини теплового потоку

- вплив недогріву, вплив розмірів поверхні теплообміну;
- нестійкості по Тейлору и Гельмгольцу, критична довжина хвилі.

18. Критичні теплові потоки при кипінні в круглих трубах и кільцевих каналах

- криза першого и другого роду;
- вплив масової швидкості, вплив тиску;
- вплив недогріву, вплив діаметра;
- кількісні залежності для розрахунку критичної густини теплового потоку при кипінні в трубах, що рівномірно обігріваються

19. Поняття о пасивних замкнених випарувально-конденсаційних системах

- термосифони
- теплові труби

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено професором каф. АЕ, д.т.н., Кравцем Володимиром Юрійовичем

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

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