



# Методи інтенсифікації процесів тепло- і масообміну в гетерогенних системах

## Робоча програма навчальної дисципліни (силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Третій (освітньо-науковий)</i>
Галузь знань	<i>14 Електрична інженерія</i>
Спеціальність	<i>142 Енергетичне машинобудування</i>
Освітня програма	<i>ОНП Енергетичне машинобудування</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна, навчальні дисципліни для здобуття глибоких знань зі спеціальності</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>1 курс, осінній</i>
Об'єм дисципліни	<i>3 кредити ЄКТС (90 годин), 39 годин лекції, 51 година самостійної роботи</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>екзамен, модульна контрольна робота</i>
Розклад занять	<a href="http://roz.kpi.ua/">http://roz.kpi.ua/</a>
Мова викладання	<i>українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: <i>д.т.н., професор, Туз Валерій Омелянкович, <a href="mailto:valeriituz56@gmail.com">valeriituz56@gmail.com</a></i> Практичні / Семінарські: <i>не передбачено</i> Лабораторні: <i>не передбачено</i>
Розміщення курсу	<a href="https://campus.kpi.ua">https://campus.kpi.ua</a> , <a href="https://do.ipk.kpi.ua/">https://do.ipk.kpi.ua/</a> , <a href="https://drive.google.com/drive/u/2/folders/1OC-CEUvYb-vIAi85rTLF18Jrm57BORxO">https://drive.google.com/drive/u/2/folders/1OC-CEUvYb-vIAi85rTLF18Jrm57BORxO</a>

### Програма навчальної дисципліни

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

Предмет навчальної дисципліни процеси тепло- і масообміну в гетерогенних системах

Запорукою надійної і безпечної експлуатації складного енергетичного обладнання є необхідність забезпечення відповідного температурного режиму, який в значній мірі залежить від особливостей гідродинаміки і теплообміну в умовах конвекції і фазових перетворень. Для запобігання пошкодження обладнання, що приводить до значних матеріальних втрат, необхідно вміти визначати і аналізувати не тільки інтегральні, але і локальні характеристики процесів.

Наявність паро-газорідних потоків в елементах енергетичного обладнання потребує застосування специфічних методів для визначення умов і характеристик процесів тепломасообміну і гідродинаміки. Не вірна оцінка показників реального стану процесів в обладнанні може призвести до погіршення техніко-економічних характеристик і виникненню аварійних ситуацій. Розуміння особливостей тепломасообміну і гідродинаміки гетерогенних систем дає можливість управляти цими процесів.

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

Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.	ЗК 2
Здатність генерувати нові ідеї.	ЗК4
Здатність ініціювати, розробляти і реалізовувати комплексні інноваційні проєкти у сфері енергетичного машинобудування та дотичні до неї міждисциплінарні проєкти.	ФК4
Здатність формулювати наукову проблему (задачу), що має теоретичне та практичне значення в галузі енергетичного машинобудування, визначати шляхи її вирішення із залученням сучасних теоретичних та експериментальних методів та інформаційних технологій	ФК5

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

Мати передові концептуальні та методологічні знання з енергетичного машинобудування і на межі предметних галузей, а також дослідницькі навички, достатні для проведення наукових і прикладних досліджень на рівні останніх світових досягнень, отримання нових знань та/або здійснення інновацій. ПРН 1

Формулювати і перевіряти гіпотези; використовувати для обґрунтування висновків належні докази, зокрема, результати теоретичного аналізу, експериментальних досліджень і математичного та/або комп'ютерного моделювання, наявні літературні дані. ПРН 3

Глибоко розуміти сучасні проблеми науково-технічного розвитку науки і техніки враховуючи світові досягнення в галузях енергетики та енергетичного машинобудування з урахуванням техніко-економічних і екологічних напрямів, знати і застосовувати сучасні технології енерго- та ресурсозбереження. ПРН 8

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

Пререквізити: знання теорії тепломасообміну та гідродинаміки.

Постреквізити: Моделювання тривимірних задач гідродинаміки і теплообміну в енергетичному устаткуванні; дисципліни за темою дисертації (вибіркові компоненти освітньої програми).

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

### РОЗДІЛ 1 Гідростатика двофазних систем

Тема 1.1 Поверхнева енергія і поверхневий натяг

Тема 1.2 Хвильовий рух рідини

Тема 1.3. Рух окремих крапель і бульбашок.

Тема 1.4. Адіабатні газорідинні потоки. Парорідинні потоки в умовах теплообміну.

### РОЗДІЛ 2 Гідродинаміка плівкових двофазних систем

Тема 2. 1. Гідродинаміка в плівкових тепломасообмінних апаратах

Тема 2. 2. Гідродинамічні кризові явища в плівкових тепломасообмінних апаратах

### РОЗДІЛ 3. Тепломасообмін у плівкових двофазних системах.

Тема 3. 1. Випарне охолодження в плівкових тепломасообмінних апаратах

Тема 3.2. Охолодження газового потоку ізотермічною плівкою в плівкових тепломасообмінних апаратах

Тема 3. 3. Тепломасообмін при адіабатному закипанні рідини в плівкових апаратах

## **4. Навчальні матеріали та ресурси**

Базова (підручники, навчальні посібники) література.

1. Туз В.О. Гідродинаміка і тепломасообмін газорідинних потоків на капілярно-пористих структурах: монографія/ В.О.Туз, Н.Л. Лебедь / Харків: ФОП Бровін О.В., 2018. 220с.
2. Кравець В.Ю Процеси теплообміну у мініатюрних випарно-конденсаційних системах охолодження: монографія / В.Ю. Кравець – Харьков. ФОП Бровін О.В., 2018.
3. Ромась М.І. Основи Гідрохімія водних об'єктів атомної і теплової енергетики: монографія/ М.І. Ромась — К.: ВПЦ Київський університет, 2002. 532 с.

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

1. Чейлітко А.О. Формування теплофізичних властивостей елементів конструкцій теплового захисту шляхом створення прогнозованих пористих структур: монографія / А.О. Чейлітко — Запоріжжя: ЗДІА, 2017. 318 с.
2. Василенко С.М. Основи тепломасообміну/ С.М. Василенко, А.І.Українець, В.В.Олішевський — К.: НУХТ, 2004. — 250 с.  
<https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/6932/3/04%20Vasylenko%20Osnovu%20teploomasobminu.pdf>
3. Tuz V. O. Evaporative cooling of the liquid film in slot channels with capillary-porous walls under natural convection/ V. O. Tuz, N. L. Lebed, O.M. Tarasenko. – Thermal Science and Engineering Progress. – 18 (2020). –2020. – 100527
4. Tuz V. O. Heat and mass transfer during adiabatic fluid boiling in channels of contact exchangers/ V. O. Tuz, N. L. Lebed. – Applied Thermal Engineering. – 185. –2021. – 116383

## 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.	<b>ВСТУП</b> <b>Лекція 1.</b> Предмет та задачі курсу. Теорія тепломасообміну і її місце в загальній системі наук. Явища тепломасообміну двофазних систем в енергетиці. Огляд методів дослідження тепломасообміну. Основні поняття та визначення.
<b>РОЗДІЛ 1. Гідростатика двофазних систем</b>	
2.	<b>Тема 1.1 Поверхнева енергія і поверхневий натяг</b> <b>Лекція 2.</b> Енергія Гельмгольца поверхні розділу фаз. Умови змочування рідиною твердої поверхні. Крайовий кут змочування. Гідрофобні та гідрофільні поверхні. <b>СРС:</b> Рівняння рівноваги поверхні розділу фаз.
3.	<b>Лекція 3.</b> Висота підйому рідини в капілярах. Кривизна поверхні розділу фаз. Вісесиметричні рівноважні поверхні розділу. Вплив зовнішніх сил на форму поверхні розділу. Граничні точки ділянок рівноваги. <b>СРС:</b> Передвідривні розміри крапель, бульбашок.
4.	<b>Тема 1.2 Хвильовий рух рідини</b> <b>Лекція 4.</b> Математичний опис хвильового руху ідеальної рідини. Відхилення від рівноваги. Внутрішні та зовнішні збурення. Стоячі та прогресуючі гравітаційні хвилі. Швидкість розповсюдження хвиль. Швидкість розповсюдження хвиль.
5.	<b>Лекція 5.</b> Капілярні та капілярно-гравітаційні хвилі. Кривизна поверхні розділу фаз. Капілярна постійна. Умови виникнення гравітаційних хвиль. Швидкість прогресуючої хвилі. Хвилі кінцевої амплітуди. Нестійкість Тейлора. <b>СРС:</b> Критична довжина хвилі. Критична швидкість нестабільності Гельмгольца.
6.	<b>Тема 1.3. Рух окремих крапель і бульбашок</b> <b>Лекція 6.</b> Методи подібності в двофазних системах. Умови сферичності краплі або бульбашки. Швидкість руху краплі або бульбашки при $Re < 1$ . <b>СРС:</b> Швидкість підйому газової бульбашки в рідині.
7.	<b>Лекція 7.</b> Особливості руху крапель у газовому потоці. Коефіцієнт опору руху. Швидкість падіння при $Re > 20$ . Умови деформації крапель. Швидкість витання краплі. Схлопування або розширення бульбашки в рідині. Рівняння Релея. Врахування стискає мості рідини. Виникнення кавітаційних розривів бульбашок. Основні визначення. Дійсні та приведені характеристики двофазного потоку. Фактор ковзання. Режими течії двофазних потоків. Особливості руху в вертикальних каналах. Горизонтальні та нахилені канали, розшарування потоку. Діаграми режимів течії двофазних потоків. Дійсний об'ємний паровміст адіабатних двофазних потоків. <b>СРС:</b> Гідравлічний опір газорідних потоків.
8.	<b>Тема 1.4. Адіабатні газорідні потоки. Парорідні потоки в умовах теплообміну</b> <b>Лекція 8.</b> Основні визначення. Дійсні та приведені характеристики двофазного потоку. Фактор ковзання. Режими течії двофазних потоків. Особливості руху в вертикальних каналах. Горизонтальні та нахилені канали, розшарування потоку. Діаграми режимів течії двофазних потоків. Дійсний об'ємний паровміст адіабатних двофазних потоків. <b>СРС:</b> Гідравлічний опір газорідних потоків.
9.	<b>Лекція 9.</b> Зміна параметрів потоку по довжині обігріває мого каналу. Зв'язок масового витратного паровмісту з середньомасовою ентальпією потоку. Режими течії і зміна параметрів потоку по довжині каналу, який обігрівається. Паровміст не адіабатних потоків. Методика визначення паровмісту в неврівноваженому потоці. <b>Модульна контрольна робота.</b> Частина I
10.	<b>Лекція 10.</b> Гідравлічний опір двофазних потоків в умовах теплообміну. Вплив випаровування і конденсації на гідравлічний опір. Втрати тиску на прискорення. Критичне витікання двофазних сумішей. Швидкість звуку. Вплив геометрії каналу на характеристики потоку. Методика розрахунку параметрів процесу.
<b>РОЗДІЛ 2. Гідродинаміка плівкових двофазних систем</b>	
11.	<b>Тема 2. 1. Гідродинаміка в плівкових тепломасообмінних апаратах</b>

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	<b>Лекція 11.</b> Експериментальне дослідження гідродинаміки плівкової течії в каналах з капілярно-пористим покриттям. Закономірності течії гравітаційної плівки рідини у вертикальних каналах. <b>СРС:</b> Характерні стадії плівкової течії рідини в залежності від густини зрошення.
12.	<b>Лекція 12.</b> Дослідження стійкості течії гравітаційно стікаючої плівки рідини в двофазних системах. Гідродинамічна криза захлинання двофазної системи. Диференціальні рівняння руху і нерозривності для рідкої і газової фаз. Рівняння хвильової поверхні розділу фаз і граничні умови. Критичне значення довжини хвилі у момент втрати стійкості руху. Критерій стійкості хвильового руху. <b>СРС:</b> Критерій стійкості хвильового руху.
13.	<b>Тема 2. 2. Гідродинамічні кризові явища в плівкових тепломасообмінних апаратах</b> <b>Лекція 13.</b> Експериментальне дослідження гідродинаміки плівкової течії в каналах з капілярно-пористим покриттям. Закономірності течії гравітаційної плівки рідини у вертикальних каналах. Характерні стадії плівкової течії рідини в залежності від густини зрошення. Гідродинамічні характеристики двофазних систем в каналах з капілярно-пористим покриттям тепломасообмінних апаратів. Визначення порушення стійкості режимів руху двофазного потоку. <b>СРС:</b> Карти режимів течії.
14.	<b>Лекція 14.</b> Гідродинаміка плівкової течії при густині зрошення близької до мінімальної. Мінімальна густина зрошення при гравітаційній течії плівки рідини по вертикальних поверхнях з капілярно-пористим покриттям. Змочуваність і адгезія плівки рідини на стінці каналу з капілярно-пористим покриттям. Динаміка взаємодії плівки рідини і газового потоку у вертикальних каналах при густині зрошення, близькій до $\Gamma_{\min 2}$ .
<b>РОЗДІЛ 3. Тепломасообмін у плівкових двофазних системах.</b>	
<b>Тема 3. 1. Випарне охолодження в плівкових тепломасообмінних апаратах</b>	
15.	<b>Лекція 15.</b> Тепло- і масообмін плівки рідини при протитоковому русі газу в каналах з капілярно-пористим покриттям. Інтенсивність процесів тепло- і масообміну в каналах з капілярно-пористим покриттям при випарному охолодженні рідини. Початкова теплова ділянка. <b>СРС:</b> Вплив режимних параметрів і конструктивних характеристик на процеси тепло- і масообміну при охолодженні газу ізотермічною плівкою.
16.	<b>Лекція 16.</b> Тепло- і масообмін гравітаційної плівки і висхідного потоку газу. Інтенсивність процесів тепло- і масообміну в каналах з капілярно-пористим покриттям при охолодженні газу ізотермічною плівкою. Початкова теплова ділянка. <b>СРС:</b> Початкова теплова ділянка.
17.	<b>Тема 3.2. Охолодження газового потоку ізотермічною плівкою в плівкових тепломасообмінних апаратах</b> <b>Лекція 17.</b> Тепломасообмін при природній конвекції уздовж вертикальних стінок. Особливості процесів тепло- і масообміну при випарному охолодженні плівки рідини при природній конвекції.
18.	<b>Лекція 18.</b> Експериментальне дослідження процесів тепло- і масообміну при випарному охолодженні плівки в каналах контактних апаратів в умовах природної конвекції.
19.	<b>Тема 3. 3. Тепломасообмін при адіабатному закипанні рідини в плівкових апаратах</b> <b>Лекція 19.</b> Фізичні основи процесу адіабатного закипання рідини і інтенсифікація процесів теплообміну. Вплив режимних параметрів і геометричних характеристик контактного апарату на тепло- і масообмін при адіабатному закипанні рідини. Вдосконалення методик розрахунку тепломасообмінних апаратів.
20.	<b>Лекція 20.</b> <b>Модульна контрольна робота. Частина II</b>

## 6. Самостійна робота аспіранта

Для самостійного опанування виносяться певні питання (див. п.5). Виконання завдання є обов'язковим і оцінюється згідно рейтингової системи оцінювання.

Для підвищення рейтингових балів аспірантам пропонується виконання реферату (додаткові бали до рейтингу). Тема реферату обирається аспірантом.

№ з/п	Тема реферату
1.	Газорідинні системи. Рівняння руху і суцільності в однофазній області. Механічна взаємодія на межі розділу фаз. Стрибок тиску на межі розділу фаз. Основні параметри газорідинного потоку.

№ з/п	Тема реферату
2.	Рівняння суцільності, руху, енергії. Хвилі. Внутрішні масштаби і стійкість структур газорідних систем.
3.	Рух одиночних бульбашок. Вільний безінерційний рух сферичної частинки у в'язкій рідині. Модель квазіпотенціального обтікання сфери.
4.	Дифузійні і теплові потоки до бульбашок і крапель, які рухаються. Локалізація дифузійних опорів. Зовнішній масо- і теплообмін при малих швидкостях витання бульбашок. Масовіддача від твердої сферичної частинки, що рухається в стоксовському режимі. Масообмін всередині бульбашок.
5.	Витікання газу в рідину. Розміри бульбашки, яка відривається від отвору. Швидкість витікання газу через великий отвір. Утворення стійкої газової подушки під отвором дірчастого листа. Витікання у в'язке середовище. Зростання газової бульбашки на стінці, яка непроникнена.
6.	Режим відтискання рідини від проникної поверхні. Струмине витікання газу в рідину. Динамічний шар слабо взаємодіючих сферичних бульбашок. Динамічний шар.
7.	Тепловіддача від мікропористої поверхні до рідини, яка барботується газом. Захоплення газу рідиною воронкою. Турбулентний пограничний шар рідини з бульбашковим газонасиченням.
8.	Квазігомогенний рух газорідної суміші. Швидкість звуку в гомогенній суміші. Основні квазіодномірні рівняння гомогенної суміші. Рівняння руху квазірівноважної парорідної суміші. Лінійна акустика гомогенної суміші. Квазігомогенну поток в трубах. Місцеві гідравлічні опори.
9.	Структура потоку у вертикальних трубах. Модель бульбашкового і снарядного режимів течії. Модель дисперсно-кільцевого режиму течії. Симетричний ламінарно-ламинарний і ламінарно-турбулентний рух. Ламінарно-бульбашковий рух у вертикальній трубі. Симетричний турбулентно-турбулентний рух.
10.	Хвильові процеси на межі розділу двох рідин. Збурення на поверхні розділу двох напівобмежених просторів, заповнених нев'язкими рідинами різної густини. Збурення на межі двох плоскопаралельних потоків нев'язких рідин. Довгі гравітаційні хвилі на мілкій воді. Кінематичні хвилі.
11.	Хвилі на поверхні тонких плівок рідини.
12.	Гідродинаміка і теплообмін при вільному стіканні плівок рідини і відсутності фазових переходів. Стабілізована течія на вертикальній стінці. Ламінарний пограничний шар на початковій ділянці рідкої плівки. Тепломасообмін в ламінарній плівці рідини.
13.	Неізотермічна абсорбція на початковій ділянці ламінарної плівки рідини. Тепломасообмін у стабілізованій турбулентній плівці рідини. Зовнішній тепломасообмін в турбулентній плівці. Мінімальна густина зрошення і термічна нестабільність плівки. Плівкова і крапельна конденсація пари на твердих поверхнях. Основні рівняння теплообміну при плівковій конденсації чистого пара.
14.	Ламінарна течія конденсату по вертикальній стінці в нерухомій парі. Ламінарна течія конденсату по вертикальній стінці в потоці пари при постійному коефіцієнті тертя на межі розділу. Ламінарний плин конденсату на зовнішній поверхні горизонтальних циліндрів в нерухомому парі. Турбулентний плин конденсату на вертикальній стінці.
15.	Конденсація струменю пари у великому об'ємі рідини. Конденсація нерухомої пари на поверхні вільно падаючого циліндричного струменя. Конденсація нерухомої пари на поверхні плоского струменя. Конденсація на струмені рідини, який швидко рухається.
16.	Динаміка сферичних бульбашок в рідині. Ізотермічне розширення і схлопування газової бульбашки. Динаміка парової бульбашки в рідині. Вплив нерівноважного випаровування на динаміку парової бульбашки. Динаміка парових бульбашок, що генеруються на одиночному центрі пароутворення.
17.	Хвильові процеси в газорідних системах. Бульбашки газу в нестисливій нев'язкій рідині. Хвильові рівняння для середовища без дисипації енергії.
18.	Хвильові рівняння для середовища з дисипативними ефектами. Осциляторна ударна хвиля. Чисельне рішення рівняння Кортвега - де Вріза - Бюргерса.
19.	Ударні хвилі помірної і великої інтенсивності. Експериментальні дані про поширення збурень тиску в рідині з бульбашками газу.
20.	Теплові процеси в хвильовій динаміці бульбашкових систем.
21.	Врахування стисливості рідини. Двоххвильове рівняння.
22.	Акустика і нелінійні хвилі у парорідному середовищі. Двох температурна модель і дисперсійні співвідношення. Основні критерії хвильових процесів і експериментальне дослідження хвиль. Лінійні і нелінійні хвилі.
23.	Тепловіддача при розвиненому бульбашковому кипінні на твердих поверхнях нагріву. Два основних

№ з/п	Тема реферату
	режими кипіння. Умови закипання на твердій поверхні нагрівання. Тепловий підшарок в рідині.
24.	Коефіцієнт тепловіддачі при розвиненому кипінні і у насиченій рідині, яка вільно конвектує. Тепловіддача при бульбашковому кипінні у вимушеному потоці насиченої рідини. Термогідродинамічні кризи кипіння. Чотири основні механізми криз режиму кипіння. Критерій гідродинамічної стійкості пристінного киплячого шару при вільній конвекції в великому об'ємі насиченої рідини.
25.	Кризи кипіння у великому об'ємі насиченої рідини, яка вільно конвектує. Критерій гідродинамічної стійкості пристінного киплячого шару при великих швидкостях течії насиченої рідини. Вплив середньої температури рідини на критичний тепловий потік. Третя криза кипіння.
26.	Плівкове кипіння. Два основних види плівкового кипіння. Закон випаровування рідкої навіски на поверхні нагрівання і форми рідких сфероїдів. Тепловіддача до плоского сфероїду. Тепловіддача при плівковому кипінні на вертикальній поверхні і на горизонтальних циліндрах у великому об'ємі рідини. Плівкове кипіння на зверненої вгору горизонтальній поверхні, яка занурена у великий об'єм насиченої рідини. Розвинуте турбулентне кипіння на вертикальній поверхні при вільній конвекції насиченої рідини.
27.	Адгезія і відрив крапель у повітряному потоці. Осадження крапель на перешкоди, що знаходяться в повітряному потоці. Коефіцієнт захоплення. Контакт крапель з поверхнею перешкоди. Видалення рідини, яка прилипла. Видалення рідини, яка прилипла, повітряним потоком.
28.	Особливості адгезії і відриву бульбашок. Адгезія і відрив бульбашок. Крайовий кут бульбашок і його гістерезис. Можливість розрахунку крайового кута. Площі контакту бульбашки з твердою поверхнею і крайовий кут. Динамічний гістерезис крайового кута. Скочування бульбашок з похилої поверхні. Ковзання бульбашок. Деякі інші випадки.
29.	Розтікання крапель. Фактор розтікання. Вплив маси крапель на їх розтікання. Розтікання і властивості рідини. Кінетика процесу розтікання. Стадії процесу розтікання краплі, автофобність.
30.	Коефіцієнт розтікання. Коефіцієнт розтікання і кінетика процесу. Удар і розтікання крапель. Стадії процесу розтікання. Можливість відскоку частини краплі при ударі. Визначення діаметра площі контакту краплі з твердою поверхнею.

## Політика та контроль

### 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед аспірантом:

- 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 навчання», штрафні бали є засобом протидії плагіату та несвоєчасному виконанню завдань;
- 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 аспірантів, 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 аспірантів з дисципліни:

- відповіді на лекційних заняттях;
- виконання МКР (дві частини);
- відповідь на екзамені.

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

- 1) в середньому чотири відповіді кожного аспіранта на лекційних заняттях (на одному занятті опитуються приблизно 2 аспіранти; при середній чисельності групи 10 осіб і дев'ятнадцяти лекційних заняттях (39 годин) отримуємо:  $2 \cdot 19 / 10 \approx 4$  відповіді);
- 2) виконання завдань СРС;
- 3) виконання МКР (дві частини);
- 4) відповідь на екзамені.

### Система рейтингових балів та критерії оцінювання

#### **1. Робота на лекційних заняттях**

Ваговий бал — 3. Максимальна кількість балів аспіранта на всіх заняттях:  $r_1 = 3 \text{ бали} \times 4 = \mathbf{12 \text{ балів}}$ .

*Критерії оцінювання:*

**3 бали** — повна вірна відповідь на поставлене запитання; **2 бали** — відповідь містить несуттєві помилки; **1 бал** — неповна відповідь; **0 балів** — наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді.

#### **2. Виконання завдань СРС**

Ваговий бал — 2 (за кожне завдання). Максимальна кількість балів (завдання СРС видаються після лекції, строк задачі завдання – не пізніше ніж через тиждень):  $r_2 = 2 \text{ бали} \times 10 = \mathbf{20 \text{ балів}}$ . Виконане завдання надається викладачу у вигляді конспекту, виконання завдань СРС обов'язкове.

*Критерії оцінювання:*

**2 бали** — в повному об'ємі і вчасно надане завдання; **1 бал** — не в повному об'ємі, але 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**;
- виконання і захист реферату — **5 балів**.

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

Проводиться дві частини МКР. Ваговий бал кожної частини — 9. Максимальна кількість балів за МКР дорівнює  $r_4 = 9 \times 2 = \mathbf{18 \text{ балів}}$ .

*Критерії оцінювання:*

**9 балів** — повна вірна відповідь на завдання; **8...7 балів** — відповідь має несуттєві помилки; **6...4 балів** — 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 трьох теоретичних питань. Перелік питань наведений у додатку до силабусу дисципліни. Перші два теоретичних питання оцінюються по 15 балів, а третє – 20 балів. Тобто, максимальна кількість балів за виконане завдання  $\mathbf{15+15+20 = 50 \text{ балів}}$ .

*Критерії оцінювання:*

Кожне питання екзаменаційної роботи оцінюється згідно до системи оцінювання:

- повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – **13...15 (18...20) балів**;
- достатньо повна відповідь (не менше 70% потрібної інформації, або незначні неточності) – **10...12 (14...17) балів**;
- неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки) – **7...9 (11...13) балів**;
- незадовільна відповідь (менше 60% потрібної інформації та помилки) – менше **6 (10) балів**.

#### **Штрафні бали:**

- додаткове питання з тем лекційного курсу отримують аспіранти, 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:

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

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

**Максимально можливий стартовий рейтинг:  $R_c = 12+20+18 = 50 \text{ балів}$ .**

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

Аспіранти, які набрали в семестрі рейтинг з дисципліни менше, ніж 25 балів, 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 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**

Аспіранти 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://osvita.kpi.ua/2020_7-170), [https://document.kpi.ua/files/2020\\_7-170.pdf](https://document.kpi.ua/files/2020_7-170.pdf)).

Аспіранти 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 аспірантів існує можливість зарахування (у вигляді додаткових балів до рейтингу до 20 балів):

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

## Додаток 1

### Список питань на екзамен

1. Явища тепломасообміну двофазних систем в енергетиці.
2. Енергія Гельмгольца поверхні розділу фаз.
3. Умови змочування рідиною твердої поверхні. Рівняння рівноваги поверхні розділу фаз.
4. Вплив зовнішніх сил на форму поверхні розділу. Граничні точки ділянок рівноваги. Передвідривні розміри крапель, бульбашок.
5. Математичний опис хвильового руху ідеальної рідини.
6. Внутрішні та зовнішні збурення. Швидкість розповсюдження хвиль.
7. Капілярні та капілярно-гравітаційні хвилі. Капілярна постійна.
8. Умови виникнення гравітаційних хвиль.
9. Нестійкість Тейлора. Критична довжина хвилі.
10. Критична швидкість нестабільності Гельмгольца.
11. Методи подібності в двофазних системах.
12. Особливості руху крапель у газовому потоці. Коефіцієнт опору руху.
13. Умови деформації крапель. Швидкість витання краплі.
14. Схлопування або розширення бульбашки в рідині. Рівняння Релея.
15. Дійсні та приведені характеристики двофазного потоку.
16. Фактор ковзання. Режими течії двофазних потоків.
17. Особливості руху в вертикальних каналах.
18. Горизонтальні та нахилені канали, розшарування потоку.
19. Діаграми режимів течії двофазних потоків.
20. Гідравлічний опір газорідних потоків.
21. Зміна параметрів потоку по довжині обігріває мого каналу. Зв'язок масового витратного паровмісту з середньомасовою ентальпією потоку
22. Гідравлічний опір двофазних потоків в умовах теплообміну.
23. Критичне витікання двофазних сумішей. Швидкість звуку.
24. Динаміка взаємодії газового потоку з плівкою рідини.
25. Основні чинники, що визначають нижню границю діапазону навантажень контактних тепломасообмінних апаратів.
26. Гідродинамічна криза захливання двофазної системи.
27. Диференціальні рівняння руху і нерозривності для рідкої і газової фаз.
28. Критичне значення довжини хвилі у момент втрати стійкості руху. Критерій стійкості хвильового руху.
29. Гідродинамічні характеристики двофазних систем в каналах з капілярно-пористим покриттям тепломасообмінних апаратів.
30. Порушення стійкості режимів руху двофазного потоку. Карти режимів течії.
31. Гідродинаміка плівкової течії при густині зрошування близької до мінімальної. Змочуваність і адгезія плівки рідини на стінці каналу з капілярно-пористим покриттям..
32. Тепло- і масообмін плівки рідини при протитоковому русі газу в каналах з капілярно-пористим покриттям. Початкова тепла ділянка.
33. Вплив режимних параметрів і конструктивних характеристик на процеси тепло- і масообміну при випарному охолодженні плівки рідини і вимушеній конвекції газу.
34. Вплив режимних параметрів і конструктивних характеристик на процеси тепло- і масообміну при охолодженні газу ізотермічною плівкою.
35. Особливості процесів тепло- і масообміну при випарному охолодженні плівки рідини при природній конвекції.

36. Фізичні основи процесу адіабатного закипання рідини і інтенсифікація процесів теплообміну.
37. Вплив режимних параметрів і геометричних характеристик тепломасообмінних апаратів на процеси при адіабатному закипанні рідини.

**Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):**

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

**Ухвалено** кафедрою АЕС і ІТФ (протокол № 15/а від 30. 06. 2022 р.)

**Погоджено** Методичною комісією ТЕФ (протокол № 9 від 30. 06. 2022 р.)