



# Кінетика фазових перетворень в енергетично- му обладнанні

## Робоча програма навчальної дисципліни (силабус)

Реквізити навчальної дисципліни	
Рівень вищої освіти	Третій (освітньо-науковий)
Галузь знань	14 Електрична інженерія
Спеціальність	142 Енергетичне машинобудування
Освітня програма	ОНП Енергетичне машинобудування
Статус дисципліни	Нормативна, навчальні дисципліни для здобуття глибинних знань зі спеціальності
Форма навчання	очна (денна)
Рік підготовки, семестр	1 курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	4 кредити, 120 годин, 54 години лекцій, 66 годин СРС
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Екзамен/модульна контрольна робота,
Розклад занять	<a href="http://roz.kpi.ua/">http://roz.kpi.ua/</a>
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: д.т.н, Кравець Володимир Юрійович, <a href="mailto:kravetz_kpi@ukr.net">kravetz_kpi@ukr.net</a> Практичні / Семінарські: не передбачено Лабораторні: не передбачено
Розміщення курсу	Посилання на дистанційний ресурс: <a href="https://campus.kpi.ua">https://campus.kpi.ua</a> , <a href="https://do.ipk.kpi.ua/mod/resource/view.php?id=90678">https://do.ipk.kpi.ua/mod/resource/view.php?id=90678</a>

### Програма навчальної дисципліни

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

При вивченні курсу «Кінетика фазових перетворень в енергетичному обладнанні» програма спрямована на формування таких компетентностей здобувачів вищої освіти третього рівня, що уможливають їх всебічний професійний, інтелектуальний, соціальний та творчий розвиток з урахуванням нових реалій і викликів сьогодення для здійснення інженерної, науково-дослідницької та інноваційної (в т.ч. міжнародної) діяльності. Здобувачі вищої освіти третього рівня мають можливість здобути знання із суміжних галузей, опанувати сучасні комп'ютерні засоби проектування та моделювання процесів та інші освітні компоненти завдяки можливості формування гнучкої індивідуальної траєкторії навчання.

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

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

Здатність до досягнення підсумкової мети дослідження - практичного впровадження або перспективи такого в ракурсі теоретичної науки ФК6

Здатність використовувати новітні досягнення сучасної науки і передових технологій в наукових дослідженнях ФК8

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

Планувати і виконувати експериментальні та/або теоретичні дослідження з енергетичного машинобудування та дотичних міждисциплінарних напрямів з використанням сучасних інструментів, критично аналізувати результати власних досліджень і результати інших дослідників у контексті усього комплексу сучасних знань щодо досліджуваної проблеми ПРН 5

На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розробляти та реалізовувати наукові та/або інноваційні інженерні проекти, які дають можливість переосмислити наявне та створити нове цілісне знання та/або професійну практику і розв'язувати значущі наукові та технологічні проблеми у сфері енергетичного машинобудування з дотриманням норм академічної етики ПРН 7

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

Пререквізити: знання теорії теплообміну та гідродинаміки.

Постреквізити: Теорія переносу; дисципліни за темою дисертації (вибіркові компоненти освітньої програми), робота над дисертацією.

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

Розділ 1. Фізика процесів генерації парової фази

Тема 1.1. Механізм процесу теплообміну при пазирковому та плівковому кипінні

Розділ 2. Основи теорії замкнених випарувально-конденсаційних систем

Тема 2.1. Класифікація та основні відомості про випарувально-конденсаційні системи

Тема 2.2. Основні характеристики випарувально-конденсаційних систем

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

Базова (підручники, навчальні посібники) література.

1. Каденко І.М., Харитонов О.М., Єрмоленко Р.В. Основи теплогідравліки ядерних енергетичних установок. Навчальний посібник / Київ: Київський університет. 2010. – 359 с.

<http://atom.univ.kiev.ua/books/tg.pdf>

2. Кравець В.Ю. Процеси теплообміну у мініатюрних випарно-конденсаційних системах охолодження / В.Ю. Кравець – Харків. ФОП Бровін О.В., 2018. -288 с.

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

1. Kravets, V., Aleksei, Y., Aleksei, O., Khairnasov, S., Baturkin, V., Ho, T., Celotti, L. Heat pipes with variable thermal conductance property for space applications // Journal of Mechanical Science and Technology Volume 31, Issue 6, 1 June 2017, pp 2613-2620.

2. 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 Technologiethis, 2021, 3/8 (111) , pp. 35–41.

3. Теплогідравлічні процеси в енергетичних установках. Розрахункова робота [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів 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>

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)**

#### **Лекційні заняття**

#### **Розділ 1. Фізика процесів генерації парової фази**

**Тема 1.1. Механізм процесу теплообміну при пазирковому та плівковому кипінні**

**ЛЕКЦІЯ 1.** Закономірність зародження, зростання, відриву та руху парових бульбашок.

**ЛЕКЦІЯ 2.** Динаміка зростання бульбашок, що зростають в об'ємі рідини.

**ЛЕКЦІЯ 3.** Пульсації температури поверхні під паровою бульбашкою при її зростанні.

**ЛЕКЦІЯ 4.** Відривні діаметри парових бульбашок при кипінні однокомпонентної рідини.

**ЛЕКЦІЯ 5.** Сили, які розвиває між фазна поверхня парової бульбашки при її зростанні.

**ЛЕКЦІЯ 6.** Фактори, що визначають температурний режим поверхонь нагріву в стислих умовах паротворення

**ЛЕКЦІЯ 7.** Умови паротворення в пористій поверхні.

**ЛЕКЦІЯ 8.** Вплив деяких факторів на інтенсивність теплообміну при пазирковому кипінні (тиск, рівень гравітації, висота рівня рідини, орієнтація у просторі, шорсткість).

**ЛЕКЦІЯ 9.** Вплив швидкості рідини і паровмісту потоку на інтенсивність теплообміну при пазирковому кипінні. Процеси теплообміну в дисперсно-кільцевому потоці. Інтенсивність теплообміну при кипінні в умовах направленої руху рідини.

**ЛЕКЦІЯ 10.** І Механізм кризи тепловіддачі при кипінні теплоносія на занурених поверхнях тепловіддачі. Теплова та гідродинамічна теорії кризи теплообміну при кипінні рідини на занурених поверхнях теплообміну.

**ЛЕКЦІЯ 11.** Вплив режимних параметрів на критичний тепловий потік при кипінні насиченої рідини. Рівняння для розрахунку критичної густини теплового потоку.

**ЛЕКЦІЯ 12.** Природа кризи теплообміну при кипінні в каналах. Криза теплообміну другого роду при кипінні у круглих трубах.

### ***Модульна контрольна робота. 1 частина***

#### **Розділ 2. Основи теорії замкнених випарувально-конденсаційних систем**

##### ***Тема 2.1. Класифікація та основні відомості про випарувально-конденсаційні системи.***

**ЛЕКЦІЯ 14.** Принцип роботи випарно-конденсаційних систем. Процеси, що мають місце в тепловій трубі. Класифікація теплових труб: за принципом роботи, за типом капілярної структури; за робочим температурним діапазоном.

**ЛЕКЦІЯ 15.** Матеріали, що використовуються при виготовленні теплових труб. Теплоносії, їх характеристики, межі застосування. Теплофізичні основи вибору теплоносіїв для теплових труб.

**ЛЕКЦІЯ 16.** Капілярні структури: Порошкові, сітчасті, металоволокневі. Особливості виготовлення. Переваги та недоліки.

**ЛЕКЦІЯ 17.** Звичайні теплові труби. Мініатюрні і мікротеплові труби. Конструкція. Особливості роботи. Газорегульовані теплові труби. Контурні теплові труби. Пульсаційні теплові труби. Конструкція. Особливості роботи.

**ЛЕКЦІЯ 18.** Термосифони. Конструкції. Особливості виготовлення. Переваги та недоліки. Область використання.

##### ***Тема 2.2. Основні характеристики випарувально-конденсаційних систем.***

**ЛЕКЦІЯ 19.** Геометричні та транспортні характеристики капілярно-пористих структур. Ефективний діаметр пір. Проникність.

**ЛЕКЦІЯ 20.** Термічний опір теплової труби, термосифона, його складові. Залежність термічного опору від геометричних та режимних параметрів.

**ЛЕКЦІЯ 21.** Явища, що спричиняють виникнення кризових явищ у тепловій трубі. Вплив геометричних та режимних параметрів на теплопередавальні характеристики теплових труб.

**ЛЕКЦІЯ 22.** Пульсаційні явища в двофазних термосифонах.

**ЛЕКЦІЯ 23.** Теплопередавальні характеристики пульсаційних теплових труб в залежності від робочих параметрів.

**ЛЕКЦІЯ 24.** Максимальна теплопередавальна здатність теплових труб. Капілярне обмеження потужності, яка передається. Рівняння балансу тисків у тепловій трубі.

**ЛЕКЦІЯ 25.** Теплообмін в зоні випаровування теплових труб.

**ЛЕКЦІЯ 26.** Коефіцієнт заповнення в термосифонах. Його вплив на максимальний тепловий потік і термічний опір.

**ЛЕКЦІЯ 27.** ***Модульна контрольна робота. 2 частина***  
Підведення підсумків, обговорення рейтингу.

## **6. Самостійна робота аспіранта**

### **Теми самостійної роботи до лекційних занять:**

1. Інтенсивність теплообміну при кипінні у великому об'ємі. Теплообмін при плівковому кипінні.
2. Поняття про гідродинамічну стійкість системи паралельних парогенеруючих каналів.
3. Інтенсивність теплообміну при кипінні на пористій поверхні
4. Поверхневий натяг і поверхнева енергія. Теплові труби зі складеною та комбінованою капілярною структурою.
5. Сумісність корпусу теплових труб та теплоносіїв.

6. Комбіновані капілярні структури.
7. Баланс тиску в теплових трубах. Умова роботи пульсаційної теплової труби.
8. Максимальний капілярний тиск. Вплив пористості капілярної структури на термічний опір
9. Вплив пористості капілярної структури і довжин зон теплообміну на максимальні теплові потоки.
10. Амплітуда температурних пульсацій в зоні нагріву термосифона. Вплив кута нахилу на максимальний тепловий потік.
11. Вплив кількості витків на максимальний тепловий потік.
12. Зміна тиску пари по довжині труби. Вплив теплофізичних характеристик теплоносіїв на коефіцієнт тепловіддачі

## 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 двадцяти шести лекційних занять (52 годин) отримуємо:  $2 \cdot 26 / 10 \approx 4$  відповіді);
- 2) виконання завдань СРС;
- 3) виконання МКР (дві частини);
- 4) відповідь на екзамені.

#### 1. Опитування на лекційних заняттях

Ваговий бал — 5. Максимальна кількість балів аспіранта на всіх заняттях:  $r_1 = 5 \text{ балів} \times 4 = 20 \text{ балів}$ .

Критерії оцінювання:

**5 балів** — повна вірна відповідь на поставлене питання; **4 бали** — відповідь містить несуттєві помилки; **3 бали** — неповна відповідь; **1...2 бала** — наявність суттєвих помилок в неповній відповіді; **0 балів** — відсутність відповіді.

#### 2. Виконання завдань СРС

Ваговий бал — 1 (за кожне завдання). Максимальна кількість балів (завдання СРС видаються після лекції, строк задачі завдання – не пізніше ніж через тиждень):  $r_2 = 1 \text{ бал} \times 12 = 12 \text{ балів}$ . Виконане завдання надається викладачу у вигляді конспекту, виконання завдань СРС обов'язкове.

Критерії оцінювання:

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

### **Штрафні бали:**

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

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

Проводиться дві частини МКР. Ваговий бал кожної частини — 9. Максимальна кількість балів за МКР дорівнює  $r_3 = 9 \times 2 = 18$  балів.

#### **Критерії оцінювання:**

**9 балів** — повна вірна відповідь на завдання; **7...8 балів** — відповідь має несуттєві помилки; **4...6 балів** — неповна відповідь; **0...3 бала** — 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 **15+15+20 = 50 балів**.

#### **Критерії оцінювання:**

Кожне питання екзаменаційної роботи оцінюється згідно до системи оцінювання:

- повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – **13...15 (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:  $R_c = 20+12+18 = 50$  балів.**

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

Аспіранти, які набрали у 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 можли-

вого (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. 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. Принцип роботи випарно-конденсаційних систем. Процеси, що мають місце в тепловій трубі.
2. Класифікація теплових труб: за принципом роботи, за типом капілярної структури; за робочим температурним діапазоном.
3. Матеріали, що використовуються при виготовленні теплових труб. Теплоносії, їх характеристики, межі застосування.
4. Капілярні структури: Порошкові, сітчасті, металоволокневі. Особливості виготовлення. Переваги та недоліки.
5. Газорегульовані теплові труби. Конструкція. Особливості роботи.
6. Контурні теплові труби. Конструкція. Особливості роботи.
7. Пульсаційні теплові труби. Конструкція. Особливості роботи.
8. Термосифони. Конструкції. Особливості виготовлення. Переваги та недоліки. Область використання.
9. Термічний опір теплової труби, його складові. Залежність термічного опору від геометричних та режимних параметрів.
10. Термічний опір термосифона, його складові. Залежність термічного опору від геометричних та режимних параметрів.
11. Пульсаційні явища в двофазних термосифонах.

12. Коефіцієнт заповнення в термосифонах. Його вплив на максимальний тепловий потік і термічний опір.
13. Вплив кута нахилу на максимальний тепловий потік теплових труб і термосифонів.
14. Методи виготовлення теплових труб і термосифонів.
15. Вплив теплофізичних характеристик теплоносіїв на коефіцієнт тепловіддачі в зонах теплообміну термосифонів і теплових труб.
16. Звичайні теплові труби. Мініатюрні і мікротеплові труби. Конструкція. Особливості роботи.
17. Межі теплопередавальної здатності теплових труб.
18. Умови виникнення пробки конденсату в мініатюрних термосифонах.
19. Вплив геометричних характеристик елементів теплової труби на перехідне число Рейнольдса. Перехід від ламінарного характеру течії до турбулентного.
20. Залежність швидкості течії пари від теплового потоку і властивостей теплоносія.

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

**Складено** професором каф. АЕС і ІТФ, д.т.н., Кравцем Володимиром Юрійовичем

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

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