



# СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Другий (магістерський)</i>
Галузь знань	<i>10 Природничі науки</i>
Спеціальність	<i>105 Прикладна фізика та наноматеріали</i>
Освітня програма	<i>Прикладна фізика</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>очна(денна) /дистанційна</i>
Рік підготовки, семестр	<i>6 курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>120 годин, лекційні заняття: 36 годин, практичні заняття: 18 годин, СРС: 66 годин</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Залік</i>
Розклад занять	<i>Лекції (36 годин) кожний тиждень, практичні (18 годин) раз на 2 тижні</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: к.т.н., Панченко Надія Анатоліївна, <a href="mailto:napanchenko-ipt@lll.kpi.ua">napanchenko-ipt@lll.kpi.ua</a> , <a href="http://phes.ipt.kpi.ua/panchenko-nadiya-anatoliyivna">http://phes.ipt.kpi.ua/panchenko-nadiya-anatoliyivna</a> Практичні: к.т.н., Панченко Надія Анатоліївна, <a href="mailto:napanchenko-ipt@lll.kpi.ua">napanchenko-ipt@lll.kpi.ua</a> , <a href="http://phes.ipt.kpi.ua/panchenko-nadiya-anatoliyivna">http://phes.ipt.kpi.ua/panchenko-nadiya-anatoliyivna</a>
Розміщення курсу	Посилання на дистанційний ресурс Classroom <a href="https://classroom.google.com/c/MTI5OTYyMDAyNjI1?cjc=3rcyjds">https://classroom.google.com/c/MTI5OTYyMDAyNjI1?cjc=3rcyjds</a>

### Програма навчальної дисципліни

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

Курс «Системи охолодження високотемпературних енергетичних установок» є одним з розділів професійної підготовки фізико-енергетичного циклу. Основною метою навчальної дисципліни «Системи охолодження високотемпературних енергетичних установок» є отримання студентами професійних знань в області систем охолодження високотемпературних енергетичних установок. Прослухавши курс студенти повинні вміти самостійно формулювати, аналізувати і вирішувати задачі теплообміну в системах охолодження елементів високотемпературного енергетичного устаткування.

Відповідність формування у студентів компетентностей:

**ЗДАТНІСТЬ:**

- отримання професійних знань в області систем охолодження високотемпературних енергетичних установок;

- виконання досліджень фізичних процесів в енергетичних установках;
- розрахунку систем охолодження елементів енергетичних установок;
- ЗК2 Здатність до навчання та самоаналізу (пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел);
- ЗК5 Здатність до використання інформаційних і комунікаційних технологій;
- ФК2 Здатність до безперервного поглиблення фундаментальних знань та систематичного вивчення та аналізу нової науково-технічної інформації, світового досвіду в галузі прикладної фізики;
- ФК10 Здатність використовувати знання про фізичну природу об'єктів у роботах по створенню нових приладів, апаратури, обладнання, матеріалів і речовин, зокрема, наноматеріалів;
- ФК11 Здатність до аналізу фізичних принципів функціонування інформаційних процесів та фізичних системах, в т.ч. в енергетиці та біофізиці.

Після засвоєння навчальної дисципліни студенти мають продемонструвати такі результати навчання:

#### **ЗНАННЯ:**

- закономірностей теплообміну в складних термогазодинамічних процесах;
- ПРН 1 Знання сучасної фізики на рівні, достатньому для розв'язання практичних проблем прикладної фізики
- ПРН 11 Вміння знаходити науково-технічну інформацію з різних джерел з використанням сучасних інформаційних технологій;
- ПРН 13 Вміння використовувати сучасні методи і технології наукової комунікації українською та іноземними мовами, вміння читати та розуміти фахові англомовні джерела.

#### **УМІННЯ:**

- самостійно формулювати, аналізувати і вирішувати задачі теплообміну в системах охолодження елементів високотемпературного енергетичного устаткування;
- УМ 13 Розраховувати параметри енергетичних установок;
- УМ 14 Ставити та виконувати задачі розробки енергетичних установок з необхідними параметрами.

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

Вивчення курсу «Системи охолодження високотемпературних енергетичних установок» базується на таких курсах: «Термодинаміка газового потоку», «Фізика», «Фізика суцільних середовищ», «Основи теорії пограничного шару», «Основи конвективного теплообміну», «Газодинаміка», « Спецглави теорії теплообміну».

Курс «Системи охолодження високотемпературних енергетичних установок» є елементом підготовки спеціалізованих дисциплін фізико-енергетичного циклу, що забезпечує індивідуальну наукову роботу студентів в рамках магістерських робіт та ін.

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

### **Розділ 1 Системи охолодження газових турбін.**

Тема 0. Вступ.

Тема 1. Газові турбіни та тенденції їх розвитку.

Тема 2. Системи охолодження високотемпературних газотурбінних двигунів і газотурбінних установок.

### **Розділ 2 Внутрішнє охолодження лопаток газових турбін**

Тема 3. Технології внутрішнього охолодження.

Тема 4. Зовнішній теплообмін.

Тема 5. Циклонне та вихрове охолодження.

### **Розділ 3 Зовнішнє охолодження лопаток газових турбін**

Тема 6. Зовнішнє плівкове охолодження.

Тема 7. Розрахунок плівкового охолодження.

Тема 8. Профільовані отвори.

Тема 9. Антивихорові отвори.

Тема 10. Отвори в поверхневих заглибленнях.

Тема 11. Всерединістіночне охолодження.

Тема 12. Узагальнення проблематики.

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

### **Базова**

1. Теплообмін та газодинаміка поверхнево-вихорових систем плівкового охолодження лопаток високотемпературних газотурбінних двигунів : звіт про науково-дослідну роботу (остаточний) / Міністерство освіти і науки України, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" ; керівник НДР А.А. Халатов. Київ, 2017. 221 сторінка, 181 рисунок, 52 джерела. (бібліотека кпі, кафедра та на гугл-диску викладача)
2. Теорія теплових двигунів. Термогазодинамічний розрахунок газотурбінних двигунів [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл./ Терещенко Ю. М. [та ін.] ; за ред. проф. Ю. М. Терещенка. - К. : Вид-во Нац. авіац. ун-ту "НАУ-друк", 2009. - 327 с. (бібліотека кпі, кафедра)

### **Допоміжна**

1. Han Je-Chin. Gas turbine heat transfer and cooling technology. Second Edition/ Je-Chin Han, Sandip Dutta, Srinath Ekkad // CRC Press/Taylor & Francis, 2013. – 869 pages. ISBN 9781439855683 ( гугл-диск викладача)
2. Вихровые технологии аэротермодинамики в энергетическом газотурбостроении / Халатов А.А./ Институт технической теплофизики НАН Украины.– Киев, – 2008. – 292 с.– ISBN 978-966-02-4917-2. (бібліотека та на кафедрі)
3. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил: монография / А.А. Халатов, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский, С.Б. Резник .– Киев: НТУУ «КПИ», Изд-во «Политехника», 2016. Т. 10 : Перспективные схемы пленочного охлаждения. – 238 с.– ISBN 978-966-622-785-3. (бібліотека та на кафедрі)
4. Теплообмен и гидродинамика при циклонном охлаждении лопаток газовых турбин / А.А. Халатов, В.В. Романов, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский, С.Д. Северин/ Институт технической теплофизики НАН Украины.– Киев, 2010. Т. 9. – 317 с.– ISBN 978-966-02-5694-1. (бібліотека та на кафедрі)

5. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов / В.И. Локай, М.Н. Бодунов, В.В. Жуйков, А.В. Щукин. – М.: Машиностроение, 1985. – 216 с.
6. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей [Текст] / Под ред. С.М. Шляхтенко. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1987. — 568 с.
7. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. [Текст] / А.А. Иноземцев, М.А. Нехамкин, В.Л. Сандрацкий. — М.: Машиностроение, 2008. — Т. 2. — 366 с.
8. Локай В.И. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов [Текст] / В.И. Локай, В.А. Максимова, Б.В. Стрункин. — М.: Машиностроение, 1979. — 477 с.
9. Репухов В.М. Тепловая защита стенки вдувом газа [Текст] / В.М. Репухов. — Киев: Наукова Думка, 1977. — 216 с.
10. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы [Текст] / Э.П. Волчков. — Новосибирск : Издательство «Наука», Сибирское отделение, 1983. — 240с.

#### Навчальний контент

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

№ з/п	<b>Назва теми лекції та перелік основних питань</b> (перелік дидактичних засобів, завдання на СРС з посиланням на літературу)
<b>1.</b>	<b>Системи охолодження газових турбін.</b> Вступ. Місце курсу в системі підготовки магістра. План і зміст курсу. Газові турбіни в енергетиці і авіації.
<b>2.</b>	<b>Газові турбіни та тенденції їх розвитку.</b> Цикл Брайтона (ккд та робота циклу). Основні елементи газової турбіни. Тенденції розвитку газових турбін. Ріст температури та ступеня стискання. Вимоги до матеріалів (високотемпературні сплави, обмеження за температурою). Газотурбобудування в Україні.
<b>3.</b>	<b>Системи охолодження високотемпературних газотурбінних двигунів і газотурбінних установок.</b> Відкриті та закриті схеми охолодження. Охолоджувальні елементи газової турбіни.
<b>4.</b>	<b>Внутрішнє і зовнішнє охолодження лопаток газотурбінних установок.</b> Розвиток систем конвективного та конвективно-плівкового охолодження. Вплив охолодження на ККД газової турбіни.
<b>5.</b>	<b>Внутрішнє охолодження лопаток газових турбін.</b> Особливості охолодження соплових і робочих лопаток. Діаграма інтенсифікація теплообміну.
<b>6.</b>	<b>Технології внутрішнього охолодження.</b> Методи охолодження різних ділянок лопатки. Схема руху охолоджувача в лопатках з внутрішнім охолодженням. Конструкції лопаток з внутрішньою системою охолодження. Мікрооребріння каналів внутрішнього охолодження.
<b>7.</b>	<b>Зовнішній теплообмін.</b>

	<i>Розподіл коефіцієнта тепловіддачі по контуру лопатки. Найбільш напружені точки. Зовнішня тепловіддача. Середня тепловіддача. Вхідна кромка лопатки. Вихідна кромка лопатки. Торцева поверхня соплового апарату.</i>
<b>8.</b>	<b><i>Циклонне та вихрове охолодження.</i></b> <i>Циклонне та вихрове охолодження. Концепція закрутки потоку. Двовимірні схеми циклонного охолодження. Тривимірні схеми циклонного охолодження. Лопатка з циклонним охолодженням. Вихрові матриці при внутрішньому охолодженні лопаток газових турбін.</i>
<b>9.</b>	<b><i>Зовнішнє охолодження лопаток газових турбін.</i></b> <i>Плівкове охолодження та його ефективність, коефіцієнт тепловіддачі. Традиційні схеми плівкового охолодження, їх переваги та недоліки. Розрахунок плівкового охолодження (щілина та дискретні отвори).</i>
<b>10.</b>	<b><i>Зовнішнє плівкове охолодження.</i></b> <i>Способи підвищення ефективності охолодження за рахунок зміни геометрії вдуву. Перехід до щілини. Фактори, що мають вплив на ефективність плівкового охолодження. Перспективні схеми плівкового охолодження.</i>
<b>11.</b>	<b><i>Розрахунок плівкового охолодження.</i></b> <i>Вхідна кромка лопатки. Вихідна кромка лопатки. Торцева поверхня соплового апарату.</i>
<b>12.</b>	<b><i>Розрахунок плівкового охолодження.</i></b> <i>Робоча лопатка з плівковим охолодженням. Багатощіливе плівкове охолодження.</i>
<b>13.</b>	<b><i>Профільовані отвори.</i></b> <i>Профільовані отвори. Геометрична форма отворів. Переваги та недоліки таких схем. Фізична структура потоку за профільованими отворами.</i>
<b>14.</b>	<b><i>Антивихорові отвори.</i></b> <i>Антивихорові отвори. Геометричні параметри систем парних отворів. Використання додаткових антивихорових отворів. Нові схеми антивихорових отворів.</i>
<b>15.</b>	<b><i>Отвори в поверхневих заглибленнях.</i></b> <i>Отвори в поверхневих заглибленнях. Подача охолоджувача у траншею, кратери різної форми та заглиблення напівсферичної форми.</i>
<b>16.</b>	<b><i>Всерединістіночне охолодження.</i></b> <i>Всерединістіночне охолодження. Лопатка з охолодженням всередині стінки.</i>
<b>17.</b>	<b><i>Узагальнення проблематики.</i></b> <i>Порівняння перспективних схем плівкового охолодження.</i>
<b>18.</b>	<b><i>Підсумки.</i></b>

Основні завдання циклу практичних занять направлені на закріплення теоретичних знань, отриманих на лекціях і прищеплюють навички їх використання при вирішенні практичних завдань.

№ з/п	Назва теми заняття
1.	Газові турбіни та тенденції їх розвитку.
2.	Системи охолодження ГТД та ГТУ.
3.	Внутрішнє охолодження лопаток газових турбін.
4.	Циклонне та вихрове охолодження. Контрольна робота 1.
5.	Зовнішнє плівкове охолодження.
6.	Розрахунок плівкового охолодження.
7.	Перспективні схеми плівкового охолодження.
8.	Перспективні схеми плівкового охолодження.
9.	Узагальнення проблематики. Контрольна робота 2.

## 6. Самостійна робота студента/аспіранта

Самостійна робота, а саме певна частка навчального матеріалу, на який виділено лише години СРС не передбачена.

На самостійну роботу відводяться наступні види завдань:

- обробка і осмислення інформації, отриманої безпосередньо на заняттях;
- робота з відповідними джерелами та особистим конспектом лекцій;
- виконання підготовчої роботи до практичних занять та до написання МКР;
- підготовка до складання заліку.

## Політика та контроль

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

Система вимог, які викладач ставить перед студентом:

- відвідування лекцій, практичних занять, а також відсутність на них, не оцінюється. Однак, студентам рекомендується відвідувати заняття (як лекцій, так і практичних);
- активність на практичних та лекційних заняттях, підготовка коротких доповідей на практичні заняття, використання засобів зв'язку – дистанційний ресурс Google Classroom та інші інтернет ресурси, що надає викладач тощо);
- заохочувальні бали за конспект лекційних занять (Мають бути законспектовані всі лекції власноруч, після перевірки конспекту лекційних занять конспект позначається для запобігання його передачі іншим студентам) – 2 б., участь у міжнародних, всеукраїнських та/або інших заходах та/або конкурсах (за тематикою навчальної дисципліни) – до 5 б. Штрафні бали за порушення термінів виконання завдань (за кожну роботу) – 2 б. ;
- результат модульної контрольної роботи для студента(-ки), який не з'явився на контрольний захід, є нульовим. У такому разі, студент(-ка) має можливість написати модульну контрольну роботу, але максимальний бал за неї буде дорівнювати 50% від

загальної кількості балів. Повторне написання модульної контрольної роботи не допускається;

- дотримання стандартів академічної доброчесності.

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

Вказуються всі види контролю та бали за кожен елемент контролю:

*Поточний контроль: опитування за темою заняття. Максимальна кількість балів – 36.*

*Календарний контроль: провадиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу. Передбачається модульна контрольна робота, що проводиться в два етапи: МКР1 (Розділ1-2) на 8-ому тижні та МКР2 (Розділ3-4) на 16-ому тижні. Максимальна кількість балів – 24.*

*Семестровий контроль: екзамен – 40 балів.*

*Умови допуску до семестрового контролю: семестровий рейтинг більше 30 балів.*

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

<i>Кількість балів</i>	<i>Оцінка</i>
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

#### **9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)**

- перелік питань, які виносяться на семестровий контроль, надається у вигляді додатка до силабусу.

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

**Складено** Старший викладач, кандидат технічних наук, Панченко Надія Анатоліївна

**Ухвалено** кафедрою Фізики енергетичних систем (протокол № 2 від 04.09.2020р.)

**Затверджено** Вченою радою ФТІ (протокол № 7/1 від 07.09.2020р.)