



Теорія турбулентності

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	Енергетичне машинобудування
Статус дисципліни	Нормативна, навчальні дисципліни для здобуття глибинних знань зі спеціальності
Форма навчання	очна(денна)
Рік підготовки, семестр	II курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	120 годин/4 кредити ЄКТС, 28 годин лекції, 26 годин індивідуальні заняття, 66 СРС
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Екзамен/ модульна контрольна робота, реферат
Розклад занять	http://roz.kpi.ua/
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: проф., д.т.н., Письменний Євген Миколайович, e-mail: evgnik1947@gmail.com
Розміщення курсу	https://campus.kpi.ua , https://drive.google.com/drive/u/1/my-drive

Програма навчальної дисципліни

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

Дисципліна знайомить студентів з основними поняттями теорії турбулентності і дає пояснення їх фізичній суті. При вивченні дисципліни студенти отримають знання про види турбулентності, амплітудні характеристики турбулентних пульсацій та лінійні масштаби. Також дисципліна передбачає ознайомлення з теорією і практикою вимірювання характеристик турбулентного потоку і поздовжньої швидкості та інтенсивності поздовжніх пульсацій швидкості.

Знання теорії турбулентності є надзвичайно корисними для розуміння явищ конвективного теплообміну ламінарних і турбулентних течій. Під час вивчення дисципліни є можливість отримати навчитися працювати з термоанемометром, унікальним приладом для вимірювання турбулентних характеристик потоку. Матеріал дисципліни викладається по принципу постійного ускладнення, при чому фізична інтерпретація підкріплюється достатньо вагомими математичними висновками.

Предметом навчальної дисципліни є турбулентна течія рідини і газу є найбільш поширеною формою руху матерії в природі і техніці; вона спостерігається практично у всіх натурних машинах і апаратах. Безперервне підвищення вимог до точності розрахунків тепломасопереносу і тертя, що проводяться при конструюванні і доведенні теплотехнічного і енергетичного устаткування підтримує постійний інтерес до проблем турбулентності і диктує необхідність підготовки інженерів-енергетиків в цьому напрямку.

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

1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу (ЗК 1).
2. Здатність генерувати нові ідеї (ЗК 4).
3. 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 (ФК 5).

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

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).

2. Розробляти та досліджувати концептуальні, математичні і комп'ютерні моделі процесів і систем, ефективно використовувати їх для отримання нових знань та/або створення інноваційних продуктів у сфері енергетичного машинобудування та дотичних міждисциплінарних напрямках (ПРН 4).
3. 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 дисципліни: Кінетика фазових перетворень в енергетичному обладнанні.

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

3. Зміст навчальної дисципліни

Частина 1. Фізичні основи теорії турбулентності

Розділ 1. Поняття теорії турбулентності і їх фізична суть

Тема 1.1. Поняття турбулентності

Тема 1. 2. Характеристика внутрішньої структури турбулентності

Тема 1. 3. Напруження Рейнольдса

Розділ 2. Рівняння для характеристик турбулентності

Тема 2.1. Рівняння для динамічних характеристик турбулентності

Тема 2.2. Рівняння для теплових характеристик турбулентності.

Розділ 3. Моделі турбулентності

Тема.3.1. Феноменологічні моделі турбулентності

Тема 3.2. Моделі турбулентності, що включають диференціальні рівняння для характери-стик турбулентності

Тема 3.3. Моделі турбулентності для процесів теплообміну

Частина 2. Вимірювання турбулентності

Розділ 4. Вимірювання турбулентності

Тема 4.1. Способи вимірювання характеристик турбулентного потоку.

Тема 4.2. Теорія термоанемометрії

Тема 4.3. Деякі результати експериментальних досліджень турбулентних характеристик потоку

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова (підручники, навчальні посібники) література.

1. Теорія турбулентності [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів третього (освітньо–наукового) ступеня вищої освіти за спеціальностями 142 «Енергетичне машинобудування» та 143 «Атомна енергетика» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Є. М. Письменний. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,92 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 127 с. (<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45466>).

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

1. Гідрогазодинаміка. Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 142 Енергетичне машинобудування, 143 Атомна енергетика, 144 Теплоенергетика, / В.М. Турик; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 8,37 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 145 с. (<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41225>).
2. Charles G. Speziale, Sutanu Sarkar and Thomas B. Gatski. Modelling the pressurestrain correlation of turbulence : an invariant dynamical systems approach // J. Fluid Mech. (1991), vol. 227, pp. 245-272.
3. B. E. Launder, G. J. Reece and W. Rodi. Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure // J. Fluid Mech. (1975), vol. 68, part 3, pp. 537-566.
4. Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F. A., & Runstadler, P. W. (1967). The structure of turbulent boundary layers. Journal of Fluid Mechanics, 30, 741.
5. Townsend, A. A. (1970). Entrainment and the structure of turbulent flow. Journal of Fluid Mechanics, 41 (part 1), 13-46.
6. Schoppa, W., & Hussain, F. (2002). Coherent structure generation in near-wall turbulence. Journal of Fluid Mechanics, 453, 57-108.

7. Bradshaw, P., Launder, B. E., & Lumley, J. L. (1991). Collaborative testing of turbulence models: progress report. *Journal of Fluids Engineering*, 113, 3.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Тиждень	Зміст навчальної роботи	СРС
1 (01.02-05.02) – I тиждень	Лекція 1. Завдання і структура курсу. Значення досліджень турбулентності. Історія розвитку науки про турбулентність і методи її дослідження. Внесок вітчизняних учених в розвиток науки про турбулентність.	Види турбулентності і їх характеристики: однорідна, ізотропна, локально-ізотропна, неізотропна. (1,5 години).
	Індивідуальне заняття 1. Основні ознаки турбулентного руху рідини. Турбулентний моль. Основні визначення поняття турбулентності. Усереднений і пульсаційний рух. Правила усереднювання.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
2 (08.02-12.02) – II тиждень	Лекція 2. Амплітудні характеристики турбулентних пульсацій. Кореляції: загальне поняття, коефіцієнт кореляції, тензор кореляцій. Види кореляцій: одноточечні, просторові, часові, просторово-часові. Взаємозв'язок між часовими і просторовими кореляціями.	Гіпотеза «замороженої турбулентності». (1,5 години).
3 (15.02-19.02) – I тиждень	Лекція 3. Лінійні масштаби турбулентності: інтегральні, мікромасштаби, масштаби енергомістких вихорів, масштаби дисипативних вихорів. Каскадний механізм передачі енергії Колмогорова.	Часові масштаби турбулентності. (1,5 години).
	Індивідуальне заняття 2. Спектральні характеристики турбулентності. Частотні спектри: спектральна щільність пульсацій, нормована спектральна функція; зв'язок часових кореляцій і частотних спектрів, перетворення Фур'є. Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 1.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
4 (22.02-26.02) – II тиждень	Лекція 4. Спектри за хвильовими числами: зв'язок просторових кореляцій із спектрами за хвильовими числами; тензор спектру енергії; одновимірний енергетичний спектр; спектр за модулями хвильових чисел; отримання спектрів за хвильовими числами.	Переваги спектрів за хвильовими числами. (1,5 години).
5 (01.03-05.03) – I тиждень	Лекція 5. Механізм виникнення рейнольдсового напруження - пояснення на основі теореми імпульсів.	Тензор напружень Рейнольдса. (1,5 години).
	Індивідуальне заняття 3. Рівняння руху у формі Рейнольдса - виведення в тензорній формі. Рівняння для рейнольдсового напруження - виведення. Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 2.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
6 (08.03-12.03) – II тиждень	Лекція 6. Рівняння для кінетичної енергії турбулентних пульсацій - виведення і характеристика його членів.	Рівняння для рейнольдсових напружень - аналіз його членів. (1,5 години).
7 (15.03-19.03) – I тиждень	Лекція 7. Баланс кінетичної енергії турбулентних пульсацій.	Рівняння для кінетичної енергії турбулентних пульсацій - характеристика його членів. (1,5 години).
	Індивідуальне заняття 4. Рівняння для дисипації кінетичної енергії турбулентних пульсацій.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).

	Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 3.	
8 (22.03-26.03) – II тиждень	Лекція 8. Рівняння енергії у формі Рейнольдса - виведення в тензорній формі. Турбулентна теплопровідність.	Характеристика членів рівняння для дисипації кінетичної енергії турбулентних пульсацій (1,5 години).
9 (29.03-02.04) – I тиждень	Лекція 9. Рівняння для складових вектору щільності турбулентного теплового потоку - виведення і аналіз членів. Рівняння для інтенсивності турбулентних пульсацій температури.	Турбулентний тепловий потік. (1,5 години).
	Індивідуальне заняття 5. Рівняння для інтенсивності турбулентних пульсацій температури. Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 4.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
10 (05.04-09.04) – II тиждень	Лекція 10. Рівняння для дисипації інтенсивності пульсацій температури.	Фізичний зміст складових рівняння для дисипації інтенсивності пульсацій температури (1,5 години).
	Індивідуальне заняття 6. Розрахунок динамічної швидкості в залежності від числа Рейнольдса по закону тертя Блазіуса та модифікованому методу Клаузера, порівняння результатів розрахунків. Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 5.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
11 (12.04-16.04) – I тиждень	Лекція 11. Способи вирішення проблеми замикання рівнянь для характеристик турбулентності. Поняття моделі турбулентності. Феноменологічні моделі. Гіпотеза Буссінеска. Поняття шляху перемішування. Модель шляху перемішування Прандтля.	Переваги і недоліки багатопараметричних моделей турбулентності (1,5 години).
	Індивідуальне заняття 7. Формули для розрахунку довжини шляху перемішування. Методи визначення довжини шляху перемішування (зокрема за безпосередньо визначеними в експериментах локальними характеристиками турбулентності). Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 6.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
12 (19.04-23.04) – II тиждень	Індивідуальне заняття 8. Недоліки феноменологічних моделей. Залежності для турбулентної в'язкості А.Н.Колмогорова, Л.Прандтля. Однопараметричні моделі турбулентності. Моделювання членів рівнянь для характеристик турбулентності. Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 7.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
	Індивідуальне заняття 9. Розрахунки та побудова універсальних розподілів швидкості в координатах «закону стінки». Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 8.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
13 (26.04-30.04) – I тиждень	Лекція 12. Гіпотеза про локальну ізотропність дисипативних вихорів. Багатопараметричні моделі. Двопараметричні моделі «енергія-масштаб» і «енергія-дисипація». Багатопараметрична модель з рівняннями для рейнольдсових напружень.	Турбулентне число Прандтля. Підготовка до модульної контрольної роботи.
	Індивідуальне заняття 10. Турбулентне число Прандтля. Моделі, засновані на використанні турбулентного числа Прандтля. Моделі, основані на	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).

	використанні рівнянь для складових вектору щільності турбулентного теплового потоку. Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 9.	
14 (03.06-07.05) – II тиждень	Модульна контрольна робота.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
15 (10.05-14.05) – I тиждень	Лекція 13. Класифікація методів: безконтактні і контактні методи. Вимоги до чутливого елемента і апаратури, що використовується при вимірюваннях характеристик турбулентності.	Області застосування термоанемометрів.
	Індивідуальне заняття 11. Термоанемометр. Принцип його роботи. Метод постійного струму і метод постійної температури. Переваги і недоліки. Конструктивне виконання термоанемометра. Конструкція і різновиди датчиків термоанемометра. Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 10.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
16 (17.05-21.05) – II тиждень	Індивідуальне заняття 12. Рівняння теплового балансу нитки. Статичне тарування нитки. Тарувальні залежності. Рівняння реакції нитки. Вимірювання подовжньої швидкості і інтенсивності подовжніх пульсацій швидкості. Визначення інтенсивності поперечних пульсацій швидкості. Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 11.	Метод схрещених ниток. Переваги і недоліки (1,5 години).
17 (24.05-28.05) – I тиждень	Індивідуальне заняття 13. Коефіцієнти чутливості до подовжніх і поперечних пульсацій швидкості. Метод «трьох поворотів». Метод схрещених ниток. Переваги і недоліки. Вимірювання подвійних кореляцій: визначення автокореляцій; визначення частотних спектрів. Вимірювання пульсацій температури. Коефіцієнт чутливості нитки до пульсацій температури. Режим термометра опору. Метод «трьох перегрівів». Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 12.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
18 (31.05-04.06) – II тиждень	Лекція 14. Захист індивідуальних завдань, рефератів у вигляді презентації.	–

6. Самостійна робота аспіранта

Види самостійної роботи та терміни часу, які на це відводяться, вказані у таблиці п.5 відповідно до навчальних тижнів та запланованих навчальних занять.

В якості тем для реферату здобувачам вищої освіти пропонується:

1. Багатопараметричні моделі з рівняннями для рейнольдсових напружень.
2. Результати досліджень у турбулентному прикордонному шарі.
3. Можливості новітніх PIV-методів для візуалізації траєкторій руху частинок.
4. Безконтактні методи вимірювання характеристик турбулентності.

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог до студентів:

- **правила відвідування занять** – відвідування занять усіх видів (лекцій та практичних занять) є обов'язковим як при навчанні в аудиторіях, так і при використанні дистанційного режиму навчання. В останньому

- випадку заняття проводяться в режимі онлайн-конференцій і студенти їх «відвідують» під'єднуючись за наданими викладачем посиланням;
- **правила поведінки на заняттях** – не заважати зайвою діяльністю, розмовами (в тому числі телефоном) іншим студентам слухати лекцію. В аудиторіях/лабораторіях та при дистанційному навчанні вдома дотримуватись правил техніки безпеки при роботі з обладнанням;
 - **правила призначення заохочувальних та штрафних балів** – заохочувальні бали передбачені за академічну активність на лекційних заняттях, штрафні бали нараховуються при виявленні фактів порушення правил доброчесності при виконанні контрольних і можуть накладатися у розмірі оцінки передбаченої за конкретну роботу;
 - **політика дедлайнів та перескладань**:
 - 1) перескладання *екзамену* здійснюються за графіком, встановленим на рівні університету;
 - 2) переписування модульних контрольних робіт не передбачено;
 - 3) *захист звіту з індивідуальних завдань* відбувається на наступному занятті. Всі проблемні питання з вирішуються на аудиторних практичних заняттях. При значних заборгованостях з оформлення і їх захистів, здобувачі вищої освіти можуть бути недопущені до семестрового контролю і не отримати позитивну оцінку.
 - 4) *захист реферату* відбувається на останньому занятті в семестрі. Оцінювання реферату відбувається сумуванням балів за розкриття теми реферату, якість презентації та балів за захист реферату.
 - **політика щодо академічної доброчесності** – студенти зобов'язані дотримуватись положень Кодексу честі та вимог академічної доброчесності під час освітнього процесу (<http://kpi.ua/code>).

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

Семестровий контроль: екзамен.

Умови допуску до семестрового контролю: виконання та захист реферату а також загальна кількість балів за семестр не менше 25 балів.

Види контролю знань аспіранта з дисципліни:

- відповіді на лекційних заняттях;
- виконання МКР;
- відповідь на екзамені.

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

- 1) *п'ять відповідей в середньому кожного студента на лекційних заняттях (на одному занятті опитуються приблизно 2 студенти; при середній чисельності групи 5 осіб, дванадцять лекцій: 2·12/5 ≈ 5 відповідей);*
- 2) *виконання завдань СРС;*
- 3) *виконання МКР;*
- 4) *відповідь на екзамені при виконанні умов допуску.*

Система рейтингових балів та критерії оцінювання

1. Робота на заняттях

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

Критерії оцінювання:

1 бал — повна вірна відповідь на поставлене запитання; **0,5 балів** — відповідь має несуттєві помилки; **0 балів** — відсутність відповіді.

2. Виконання СРС

Ваговий бал — 1. Максимальна кількість балів за чотирнадцять завдань (завдання СРС видаються після лекції, строк задачі завдання – не пізніше ніж через тиждень): $r_2=1 \text{ бал} \times 14 = 14 \text{ балів}$. Виконане завдання надається викладачу у вигляді конспекту, виконання завдань СРС обов'язкове.

Критерії оцінювання:

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

Штрафні бали:

- несвоєчасне представлення виконаного завдання СРС без поважної причини (хвороба) — **0,5 балів**.

3. Модульна контрольна робота

Під час семестру виконується одна модульна контрольна робота у вигляді тесту. Контрольна робота оформлена на платформі Сікорський. Завдання містить чотирнадцять питань. За вірну відповідь на питання нараховується 1 бал. Максимальна оцінка за МКР становить $r_{\text{МКР}}=1\text{бал} \times 14 = 14 \text{ балів}$.

Критерії оцінювання:

1 бал — вірна відповідь; 0 балів — невірна відповідь або відсутність відповіді.

У разі відсутності студента на контрольній роботі без поважних причин робота оцінюється у 0 балів.

4. Реферат

Під час семестру здобувачі вищої освіти оформлюють реферат, теми якого зазначені у п. 6. Максимальна оцінка за реферат становить $r_{\text{реф}} = 17$ балів. Кожен реферат повинен розкривати обрану тему, бути оформленим згідно вимог.

Критерії оцінювання

- якість розкриття теми

бали

1...10

5 балів — повне розкриття теми; **4 бали** — реферат має несуттєві зауваження; **3...1 бали** — не достатньо повне розкриття теми, має суттєві зауваження — потребує доопрацювання (бали не підвищуються)

- оформлення реферату

0...2

2 бали — оформлено згідно вимог, представлена презентація у вигляді слайдів; **1 бал** — оформлено згідно вимог, але є не суттєві зауваження, представлена презентація у вигляді слайдів; **0 балів** — не оформлено згідно вимог та / або не представлена презентація у вигляді слайдів — потребує доопрацювання (бали не підвищуються)

- якість презентації / доповіді при захисті

0...5

5 балів — повне розкриття теми, надано ґрунтовні відповіді, висока якість презентації; **4 бали** — повне розкриття теми, надано не достатньо ґрунтовних відповідей, висока якість презентації; **3 бали** — розкриття теми, не надано відповіді або не висока якість презентації; **2 бали** — розкриття теми, не надано відповіді та не висока якість презентації; **1 бал** — тема не розкрита, низька якість презентації, але надано ґрунтовні відповіді; **0 балів** — тема не розкрита та / або не надано відповіді та / або низька якість презентації - захист не зараховується.

Загалом

0...17

5. Відповіді на екзамені

Екзамен проводиться у письмовій формі. На екзамені студенти виконують письмову екзаменаційну роботу. Кожне завдання містить три теоретичних питання. Перше теоретичне питання оцінюється у 20 балів, друге та третє — по 15 балів. Тобто, максимальна кількість балів за виконане завдання $R_E = 15+15+20 = 50$ 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**.

Заохочувальні бали

Сума заохочувальних балів не повинна перевищувати 20 балів. Додатково до рейтингу зараховуються бали:

— за отримані сертифікати, що підтверджують участь у науково-практичних і наукових конференціях за тематикою дисципліни (5 балів/доповідь);

— за публікацію статті у науковому журналі за тематикою дисципліни. (10 балів/стаття).

2. Розрахунок шкали рейтингу з дисципліни (R_D):

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

$$R_c = r_1 + r_2 + r_{\text{мкр}} + r_{\text{реф}}$$

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

Максимально можливий стартовий рейтинг: $R_c = 5+14+14+17 = 50$ балів.

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

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

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://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

Перелік питань, які виносяться на модульну контрольну роботу

1. Основні ознаки турбулентного руху рідини.
2. Турбулентний моль.
3. Основні визначення поняття турбулентності.
4. Усереднений і пульсаційний рух.
5. Правила усереднювання.
6. Види турбулентності і їх характеристики: однорідна, ізотропна, локально-ізотропна, неізотропна.
7. Амплітудні характеристики турбулентних пульсацій.
8. Кореляції: загальне поняття, коефіцієнт кореляції, тензор кореляцій.
9. Види кореляцій: одноточечні, просторові, часові, просторово-часові.
10. Взаємозв'язок між часовими і просторовими кореляціями.
11. Лінійні масштаби турбулентності: інтегральні, мікромасштаби, масштаби енергомістких вихорів, масштаби дисипативних вихорів.
12. Каскадний механізм передачі енергії Колмогорова.
13. Часові масштаби турбулентності.
14. Спектральні характеристики турбулентності.
15. Частотні спектри: спектральна щільність пульсацій, нормована спектральна функція; зв'язок часових кореляцій і частотних спектрів, перетворення Фур'є.
16. Спектри за хвильовими числами: зв'язок просторових кореляцій із спектрами за хвильовими числами; тензор спектру енергії; одновимірний енергетичний спектр; спектр за модулями хвильових чисел; отримання спектрів за хвильовими числами.
17. Переваги спектрів за хвильовими числами.
18. Механізм виникнення рейнольдсового напруження - пояснення на основі теореми імпульсів.
19. Тензор напружень Рейнольдса.
20. Рівняння руху у формі Рейнольдса - виведення в тензорній формі.
21. Рівняння для рейнольдсового напруження - виведення.
22. Рівняння для рейнольдсових напружень - аналіз його членів.
23. Рівняння для кінетичної енергії турбулентних пульсацій - виведення і характеристика його членів. Баланс кінетичної енергії турбулентних пульсацій.
24. Рівняння для дисипації кінетичної енергії турбулентних пульсацій.
25. Характеристика членів рівняння для дисипації кінетичної енергії турбулентних пульсацій.
26. Рівняння енергії у формі Рейнольдса - виведення в тензорній формі.
27. Турбулентна теплопровідність.
28. Турбулентний тепловий потік.
29. Рівняння для складових вектору щільності турбулентного теплового потоку - виведення і аналіз членів.
30. Рівняння для інтенсивності турбулентних пульсацій температури.
31. Рівняння для дисипації інтенсивності пульсацій температури.
32. Способи вирішення проблеми замикання рівнянь для характеристик турбулентності.
33. Поняття моделі турбулентності.
34. Феноменологічні моделі.
35. Гіпотеза Буссінеска.
36. Поняття шляху перемішування.
37. Модель шляху перемішування Прандтля.
38. Формули для розрахунку довжини шляху перемішування.

39. Методи визначення довжини шляху перемішування (зокрема за безпосередньо визначеними в експериментах локальними характеристиками турбулентності).
40. Недоліки феноменологічних моделей.
41. Залежності для турбулентної в'язкості А.Н. Колмогорова, Л. Прандтля. Однопараметричні моделі турбулентності.
42. Моделювання членів рівнянь для характеристик турбулентності.
43. Гіпотеза про локальну ізотропність дисипативних вихорів.
44. Багатопараметричні моделі.
45. Двопараметричні моделі «енергія-масштаб» і «енергія-дисипація».
46. Багатопараметрична модель з рівняннями для рейнольдсових напружень.
47. Переваги і недоліки багатопараметричних моделей турбулентності.
48. Турбулентне число Прандтля.
49. Моделі, засновані на використанні турбулентного числа Прандтля.
50. Моделі, основані на використанні рівнянь для складових вектору щільності турбулентного теплового потоку.

Додаток 2

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль

1. Осереднений і пульсаційний рух. Основний закон осереднення. Осереднення по ансамблю.
2. Визначення турбулентності. Види турбулентності.
3. Амплітудні характеристики турбулентних пульсацій.
4. Кореляції – загальні положення. Коефіцієнт кореляції. Види кореляцій.
5. Одноточкові кореляції. Тензор одноточкових кореляцій. Фізичне трактування.
6. Просторові кореляції. Тензор просторових кореляцій. Види просторових кореляцій. Кореляційні криві.
7. Часові кореляції.
8. Гіпотеза «замороженої турбулентності». Умови її використання.
9. Просторово-часові кореляції. Ідея Фавра.
10. Лінійні масштаби турбулентності. Загальні представлення. Каскадний механізм перенесення енергії Колмогорова. Види лінійних масштабів.
11. Інтегральний лінійний масштаб. Основна ідея, яка закладена в поняття інтегрального (макро) масштабу. Методика визначення макромасштабу.
12. Лінійний мікромасштаб турбулентності. Основна ідея, яка закладена в поняття мікромасштабу турбулентності. Методика визначення мікромасштабу.
13. Масштаб Колмогорова. Його місце і роль в ієрархії лінійних масштабів. Масштаб енергомістких вихорів.
14. Часові масштаби турбулентності. Зв'язок з просторовими масштабами.
15. Спектральні характеристики турбулентності. Загальні положення.
16. Частотні спектри. Зв'язок між частотними спектрами і просторовими кореляціями.
17. Хвильове число. Спектри по хвильовим числам. Загальні положення. Тривимірний характер спектрів по хвильовим числам.
18. Одновимірний спектр по хвильовим числам як виродження тривимірного спектру.
19. Спектр по модулям хвильових чисел, як іще одне виродження тривимірного спектру.
20. Методи отримання спектрів по хвильовим числам.
21. Рівняння руху в формі Рейнольдса.
22. Напруги Рейнольдса. Турбулентна в'язкість. Фізичний зміст.
23. Проблема замикання системи рівнянь руху в формі Рейнольдса. Підходи до її вирішення.
24. Рівняння переносу турбулентних пульсацій. Структура і фізичний зміст складових. Роль і місце в рішенні проблеми замикання.
25. Рівняння енергії в формі Рейнольдса (виведення).
26. Складові вектору густини теплового потоку. Турбулентна теплопровідність. Коефіцієнт турбулентної теплової дифузії. Турбулентне число Л. Прандтля.
27. Моделі турбулентності. Загальні відомості. Класифікація.
28. Модель довжини шляху змішування Л. Прандтля.
29. Довжина шляху змішування. Фізичний зміст. Методи визначення.
30. Однопараметричні моделі турбулентності. Загальна характеристика.
31. Багатопараметричні моделі турбулентності. Загальна характеристика.
32. Моделі турбулентності, які використовуються для рішення теплових задач турбулентності.

33. Методи вимірювання характеристик турбулентності.
34. Термоанемометр. Принцип його роботи.
35. Рівняння теплового балансу нитки.
36. Статичне тарування нитки.
37. Рівняння реакції нитки. Коефіцієнт чуттєвості нитки.
38. Вимірювання поздовжньої швидкості і поздовжньої компоненти пульсацій швидкості.
39. Визначення інтенсивності поперечних пульсацій швидкості. Метод перехрещених ниток.
40. Визначення одноточкових кореляцій.
41. Визначення просторових кореляцій.
42. Визначення автокореляцій.
43. Визначення частотних спектрів.
44. Вимірювання пульсацій температури.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено д.т.н., професором, *Письменним Євгеном Миколайовичем*

Ухвалено: кафедрою АЕ (протокол № 20 від 12.06. 2024 р.)

Погоджено: Методичною комісією НН ІАТЕ (протокол № 10 від 25. 06. 2024 р.)