



Теорія турбулентності

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>143 Атомна енергетика</i>
Освітня програма	<i>Атомна енергетика</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна, навчальні дисципліни для здобуття глибоких знань зі спеціальності</i>
Форма навчання	<i>очна (денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>II курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>160 годин/5 кредитів ЄКТС, 30 годин лекції, 26 годин індивідуальні заняття, 94 СРС</i>
Семестровий контроль/контрольні заходи	<i>Екзамен / модульна контрольна робота, реферат</i>
Розклад занять	http://roz.kpi.ua/
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: проф., д.т.н., проф. 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 атомної енергетики, 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 галузі атомної енергетики 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 галузі атомної енергетики 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

Розділ 1. Поняття теорії турбулентності і їх фізична суть

Тема 1.1. Поняття турбулентності

Тема 1.2. Осереднений і пульсаційний рух

Тема 1.3. Види турбулентності

Розділ 2. Характеристики внутрішньої структури турбулентності

Тема 2.1. Амплітудні характеристики турбулентних пульсацій

Тема 2.2. Кореляції

Тема 2.3. Лінійні масштаби турбулентності

Тема 2.4. Часові масштаби турбулентності

Тема 2.5. Спектральні характеристики турбулентності

Розділ 2. Рівняння для характеристик турбулентності

Тема 3.1. Рівняння для гідродинамічних характеристик турбулентності

Тема 3.2. Рівняння для теплових характеристик турбулентності

Розділ 4. Моделі турбулентності

Тема 4.1. Феноменологічні моделі турбулентності

Тема 4.2. Моделі турбулентності, що включають диференціальні рівняння для гідродинамічних характеристик турбулентності

Тема 4.3. Моделі турбулентності для процесів теплообміну

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 pressure-strain 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	CPC
1	Лекція 1. Завдання і структура курсу. Значення досліджень турбулентності. Історія розвитку науки про турбулентність і методи її дослідження. Основні ознаки турбулентного руху рідини. Турбулентний моль. Основні визначення поняття турбулентності. Усереднений і пульсаційний рух.	Види турбулентності і їх характеристики: однорідна, ізотропна, локально-ізотропна, неізотропна. (1,5 години).
	Інд. завдання 1. Правила усереднення.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
2	Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 1. Лекція 2. Амплітудні характеристики турбулентних пульсацій. Кореляції: загальне поняття, коефіцієнт кореляції, тензор кореляцій. Види кореляцій: одноточкові, просторові, часові, просторово-часові.	Гіпотеза «замороженої турбулентності». (1,5 години).
	Інд. завдання 2. Взаємозв'язок між часовими і просторовими кореляціями.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
3	Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 2. Лекція 3. Лінійні масштаби турбулентності: інтегральні, мікромасштаби, масштаби дисипуючих вихорів.	Часові масштаби турбулентності. (1,5 години).
	Інд. завдання 3. Каскадний механізм передачі енергії Колмогорова.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
4	Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 3. Лекція 4. Спектральні характеристики турбулентності. Частотні спектри: спектральна щільність пульсацій, нормована спектральна функція.	Хвильовий підхід до трактування природи турбулентності (1,5 години)
	Інд. завдання 4. Зв'язок часових кореляцій і частотних спектрів, перетворення Фур'є.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).

Тиждень	Зміст навчальної роботи	СРС
5	Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 4. Лекція 5. Спектри за хвильовими числами: зв'язок просторових кореляцій із спектрами за хвильовими числами; тензор спектру енергії; одновимірний енергетичний спектр; спектр за модулями хвильових чисел.	Переваги спектрів за хвильовими числами. (1,5 години). Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
	Інд. завдання 5. Отримання спектрів за хвильовими числами.	
6	Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 5. Лекція 6. Рівняння руху у формі Рейнольдса - виведення в тензорній формі. Рівняння для напружень Рейнольдса - виведення.	Тензор напружень Рейнольдса. (1,5 години). Рівняння для рейнольдсових напружень - аналіз його членів. (1,5 години). Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
	Інд. завдання 6. Механізм виникнення рейнольдсових напруження - пояснення на основі теореми імпульсів.	
7	Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 6. Лекція 7. Рівняння для кінетичної енергії турбулентних пульсацій - виведення і характеристика його членів. Рівняння для дисипації кінетичної енергії турбулентних пульсацій.	Рівняння для кінетичної енергії турбулентних пульсацій - характеристика його членів. (1,5 години). Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
	Інд. завдання 7. Баланс кінетичної енергії турбулентних пульсацій.	
8	Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 7. Лекція 8. Рівняння енергії у формі Рейнольдса - виведення в тензорній формі. Турбулентна теплопровідність. Рівняння для складових вектору щільності турбулентного теплового потоку - виведення і аналіз членів. Рівняння для інтенсивності турбулентних пульсацій температури.	Характеристика членів рівняння для дисипації кінетичної енергії турбулентних пульсацій (1,5 години). Турбулентний тепловий потік. (1,5 години). Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
	Інд. завдання 8. Рівняння для дисипації інтенсивності пульсацій температури.	
9	Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 8. Лекція 9. Способи вирішення проблеми замикання рівнянь для характеристик турбулентності. Поняття моделі турбулентності. Феноменологічні моделі. Гіпотеза Буссінеска. Поняття шляху перемішування. Модель шляху перемішування Прандтля. Формули для розрахунку довжини шляху перемішування. Залежності для турбулентної в'язкості А.Н.Колмогорова, Л.Прандтля.	Проблема замикання системи рівнянь для турбулентного перенесення (1,5 години). Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
	Інд. завдання 9. Методи визначення довжини шляху перемішування (зокрема за безпосередньо визначеними в експериментах локальними характеристиками турбулентності). Недоліки феноменологічних моделей.	

Тиждень	Зміст навчальної роботи	СРС
10	Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 9. Лекція 10. Однопараметричні моделі турбулентності. Моделювання членів рівнянь для характеристик турбулентності.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (1 година).
	Інд. завдання 10. Градієнтний підхід до моделювання дифузійного члену.	
11	Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 10. Лекція 11. Багатопараметричні моделі. Двопараметричні моделі «енергія-масштаб», «енергія-дисипація», «енергія-завихреність».	Переваги і недоліки багатопараметричних моделей турбулентності (1,5 години).
	Інд. завдання 11. Багатопараметричні моделі з рівняннями для рейнольдсових напружень.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
12	Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 11. Лекція 12. Турбулентне число Прандтля. Моделі, засновані на використанні турбулентного числа Прандтля.	Турбулентне число Прандтля. (1,5 години)
	Інд. завдання 12. Моделі, засновані на використанні рівнянь для складових вектору щільності турбулентного теплового потоку.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (0,5 години).
13	Перевірка результатів виконання індивідуального завдання 12. Лекція 13. Захист індивідуальних завдань, рефератів у вигляді презентації.	Опрацювання пройденого на лекціях матеріалу (1 година).
	Лекція 14. Способи вимірювання характеристик турбулентного потоку.	Підготовка до модульної контрольної роботи (8 годин)
14	Модульна контрольна робота.	

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 примежовому шарі.
3. Можливості новітніх PIV-методів для візуалізації траєкторій руху частинок.
4. Безконтактні методи вимірювання характеристик турбулентності.
5. Сучасний стан проблеми замикання системи диференціальних рівнянь переносу характеристик турбулентності.
6. LES, DES, DNS підходи до моделювання турбулізованих потоків.

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 індивідуальних завдань відбувається на наступному занятті. Всі проблемні питання з вирішуються на аудиторних 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 індивідуальних завдань та СРС;
- виконання МКР;
- виконання реферату;
- відповідь на екзамені.

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

- 1) п'ять відповідей в середньому кожного аспіранта на лекційних заняттях (на одному занятті опитується приблизно 1 аспірант; при середній чисельності групи 2 особи, чотирнадцять лекцій: $14/2 \approx 5$ відповідей);
- 2) виконання індивідуальних завдань та СРС;
- 3) виконання МКР;
- 4) відповіді при презентації реферату;
- 5) відповідь на екзамені при виконанні умов допуску.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання

1. Відповіді на лекційних 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 індивідуальних завдань та СРС

Ваговий бал — 1. Максимальна кількість балів за 12 завдань (завдання видаються після лекції, строк здачі завдання – не пізніше ніж через тиждень): $r_2 = 1,33 \text{ бал} \times 12 = 16 \text{ балів}$. Виконане за-

вдання надається викладачу у вигляді конспекту, виконання індивідуальних завдань та СРС обов'язкове.

Критерії оцінювання:

1,25 бал — у повному об'ємі і вчасно надане завдання; **0 балів** — не вчасно надане завдання; не своєчасне представлення виконаного індивідуального завдання або 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 виконують реферат, теми якого зазначені у п. 6. Максимальна оцінка за реферат (включає виконання і презентацію-захист) становить $r_{\text{реф}} = 15 \text{ балів}$. Кожен реферат повинен розкривати обрану тему, бути оформленим згідно вимог.

Критерії оцінювання

- якість розкриття теми 7 балів — повне розкриття теми; 7...4 балів — реферат має несуттєві зауваження; 4...1 бали — не достатньо повне розкриття теми, має суттєві зауваження – потребує доопрацювання (бали не підвищуються)	1...7
- оформлення реферату 3 бали — оформлено згідно вимог, представлена презентація у вигляді слайдів; 2..1 балів — оформлено згідно вимог, але є несуттєві 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)	0...3
- якість презентації / доповіді при захисті 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.	0...5

Загалом 0...15

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 $R_E = 15+15+20 = 50 \text{ балів}$.

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**.

Заохочувальні бали

Сума заохочувальних балів не повинна перевищувати 20 балів. Додатково до рейтингу за-раховуються 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:

$$R_c = 5+16+14+15 = 50 \text{ балів.}$$

Необхідною умовою допуску до екзамену є позитивна оцінка з виконання всіх індивідуальних завдань та 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.

Аспіранти, 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.

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, мікомасштаби, 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.

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.)