



ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ НАН УКРАЇНИ

Аерогідромеханіка потоку теплоносія

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти

Третій (освітньо-науковий)

Галузь знань	14 Електрична інженерія ¹
Спеціальність	144 Теплоенергетика
Освітня програма	Назва
Статус дисципліни	Вибіркова
Форма навчання	очна(денна)/дистанційна/змішана
Рік підготовки, семестр	2 курс, весільний
Обсяг дисципліни	3 кредити, годин 90, лекції 16 годин, семінари 14 годин, самостійна робота - 60 годин
Семестровий контроль/ контрольні заходи	екзамен
Розклад занять	За розкладом
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: <i>д.т.н., професор, член-кореспондент НАН України, Авраменко Андрій Олександрович</i> , tgetu.ittf@gmail.com, Семінарські: <i>д.т.н., професор, член-кореспондент НАН України, Авраменко Андрій Олександрович</i> , tgetu.ittf@gmail.com
Розміщення курсу	Посилання на дистанційний ресурс (Moodle, Google classroom, тощо)

Програма навчальної дисципліни

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

Основною метою навчальної дисципліни «Спеціальні розділи механіки рідини і газу» є отримання аспірантами знань закономірностей гідродинаміки в складних гідрогазодинамічних процесах. Прослухавши курс аспіранти повинні вміти самостійно формулювати, аналізувати і вирішувати задачі гідродинаміки в елементах енергетичного устаткування, робити розрахунки гідродинаміки в елементах перспективних енергетичних установок та сучасного обладнання. А також, виконувати дослідження і робити обґрунтовані висновки при дослідженні гідродинамічних процесів в енергетичних системах і нових джерел енергії.

Відповідність формування у аспірантів компетентностей:

ЗДАТНІСТЬ:

- Формулювати, аналізувати і вирішувати задачі гідродинаміки в елементах енергетичного устаткування;
- Розраховувати гідродинамічні процеси в сучасних та перспективних енергетичних установках;
- ЗК 1 Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу;

¹ В полях Галузь знань/Спеціальність/Освітня програма:

Для дисциплін професійно-практичної підготовки зазначається інформація відповідно до навчального плану. Для соціально-гуманітарних дисциплін вказується перелік галузей, спеціальностей, або «для всіх».

² Електронна пошта викладача або інші контакти для зворотного зв'язку, можливо зазначити прийомні години або години для комунікації у разі зазначення контактних телефонів. Для силабусу дисципліни, яку викладає багато викладачів (наприклад, історія, філософія тощо) можна зазначити сторінку сайту де представлено контактну інформацію викладачів для відповідних груп, факультетів, інститутів.

- **ЗК 2** Здатність працювати в міжнародному контексті;
- **ЗК 3** Здатність розв’язувати комплексні проблеми у сфері теплоенергетики на основі системного наукового світогляду та загального культурного кругозору із дотриманням принципів професійної етики та академічної доброчесності;
- **СК 1** Здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукові результати, які створюють нові знання у сфері теплоенергетики та дотичних до неї міждисциплінарних напрямках;
- **СК 4** Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру у сфері теплоенергетики, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень;

ЗНАННЯ:

- *закономірностей гідродинаміки у в складних гідро-газодинамічних процесах.*
- *методів розрахунку гідродинаміки в складних гідро-газодинамічних процесах*

УМІННЯ:

- *самостійно формулювати, аналізувати і вирішувати задачі гідродинаміки в елементах енергетичного устаткування.*
- **ПРН 04** 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 теплоенергетиці та дотичних міждисциплінарних напрямках;
- **ПРН 05** Планувати і виконувати експериментальні та/або теоретичні дослідження з теплоенергетики та дотичних міждисциплінарних напрямків з використанням сучасних інструментів, критично аналізувати результати власних досліджень і результати інших дослідників у контексті усього комплексу сучасних знань щодо досліджуваної проблеми;
- **ПРН 07** Застосовувати сучасні інструменти і технології пошуку, оброблення та аналізу інформації, зокрема, статистичні методи аналізу даних великого обсягу та/або складної структури, спеціалізовані бази даних та інформаційні системи;

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

Вивчення курсу «Спеціальні розділи механіки рідини і газу» базується на таких курсах: «Механіка рідини і газу», «Фізика», «Турбулентність і нестійкість», «Газодинаміка». Отримані практичні навички та засвоєні теоретичні знання під час вивчення навчальної дисципліни «Спеціальні розділи механіки рідини і газу» можна використовувати в подальшому під час навчання спеціалізованих дисциплін фізико-енергетичного циклу, що забезпечує індивідуальну наукову роботу аспірантів.

3. Зміст навчальної дисципліни

Розділ 1. Базові теореми гідродинаміки та вивід рівнянь Нав’є – Стокса.

Тема 1.1. Базові теореми гідродинаміки.

Перша теорема Гельмгольца. Друга теорема Гельмгольца. Теорема Стокса. Теорема Лагранжа.

Тема 1.2. Вивід рівнянь Нав’є – Стокса. Гипотеза Стокса. Вивід рівнянь Нав’є – Стокса.

Розділ 2. Повзучі течії та методи їх розрахунку.

Тема 2.1. Методи розрахунку повзучих течій. Групи перетворення симетрій (групи Лі). Автомодельні форми та автомодельні рівняння. Метод розділу змінних.

Тема 2.2. Перша та друга задачі Стокса. Перша задача Стокса – отримання автомодельного дифференційного рівняння. Аналітичне рішення. Друга задача Стокса – розділ змінних. Аналітичне рішення.

Тема 2.3. Задача Стокса обтікання сфери. Рівняння Нав'є – Стокса в формі Ламба. Розділ змінних. Аналітичне рішення. Сила Стокса. Вимірювання в'язкості.

Розділ 3. Нестационарні течії та методи їх розрахунку.

Тема 3.1. Методи операційного обчислення. Основи методу операційного обчислення. Розгінна течія в плоскому каналі. Розгінна течія в круглому каналі.

Тема 3.2. Методи симетрії. Перехід до автомодельних форм рівняння руху. Приклади розрахунку течій в каналах різної геометрії.

Розділ 4. Наближення прикордонного шару та методи розрахунку параболічних течій.

Тема 4.1. Основи теорії прикордонного шару. Припущення теорії прикордонного шару. Вивід рівняння Прандтля.

Тема 4.2. Методи розрахунку параболічних течій. Диференційний метод.

Автомодельні форми рівняння Прандтля. Інтегральні рівняння прикордонного шару. Розрахунок прикордонного шару на основі інтегральних рівнянь.

Розділ 5. Течії в каналах и методи їх розрахунку.

Тема 5.1. Основні рівняння руху в каналах. Рівняння руху в каналах різної геометрії.

Канали різної геометрії – плоский, круглий, криволінійний, прямокутного перерізу.

Тема 5.2. Методи розрахунку течій в каналі. Метод рядів Фур'є. Метод операційного обчислення. Метод симетрії. Метод ґраток Больцмана.

Розділ 6. Гідродинамічна нестійкість.

Тема 6.1. Форми гідродинамічної нестійкості. Нестійкість Релея – Бенара. Нестійкість Орра – Зоммерфельда. Відцентрова нестійкість.

Тема 6.2. Методи дослідження нестійкості. Метод збурень. Енергетичний метод. Модель Лоренца.

Розділ 7. Турбулентність.

Тема 7.1. Моделі турбулентності. Класифікація моделей турбулентності. Побудова ренормалізаційно - групової моделі турбулентності.

Тема 7.2. Турбулентні течії в пограничному шарі та каналах. Структура течії. Профілі швидкості. Коефіцієнт тертя та гідравлічного опору.

Розділ 8. Спеціальні види течій.

Тема 8.1. Пористе середовище. Закон Дарсі. Закон Форхаймера. Наближення Брінкмана. Профілі швидкості. Коефіцієнт гідравлічного опору.

Тема 8.2. Нанорідини та мікроканали. Структура течії. Профілі швидкості. Коефіцієнт тертя та гідравлічного опору.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова

1. H. Schlichting, K. Gersten *Boundary-Layer Theory*. Springer, 2017 – 833 p.
2. Авраменко А.О., Басок Б.І., Дмитренко Н.П., Ковецька М.М., Турінов А.І., Давиденко Б.В. *Ренормалізаційно груповий аналіз турбулентності* К: ТОВ «Видавничо - поліграфічний центр «Експрес», 2013 – 300с.
3. Авраменко А.О., Басок Б.І., Кузнєцов А.В. *Групові методи в теплофізиці*. К: Наукова думка, 2003 – 480с.
4. Avramenko A.A., Shevchuk S.V. *Modeling of convective heat and mass transfer in nanofluids with and without boiling and condensation*. Springer, 2022 – 263 p.
5. Авраменко А.О., Басок Б.І., Давиденко Б.В. *Термогідродинамічна нестійкість у теплових процесах*. К: Наукова думка, 2022 – 213 с.

Допоміжна

1. L. G. Loitsianskii. *Mechanics of Liquids and Gases*, Elsevier Science, 2014 – 816 p.
2. Reynolds A.J. *Turbulent flows in engineering*. John Wiley & Sons. –1974. 462 p.
3. Hinze J.O. *Turbulence: An Introduction to Its Mechanism and Theory*. Front Cover. McGraw-Hill, 1959 - Turbulence - 586 p.
4. Fletcher C.A.J. *Computational Galerkin Method*. Springer-Verlag, New York. 1984. 319 p.
5. Monin A.S., Yaglom A.M.. *Statistical Fluid Mechanics, Volume II: Mechanics of Turbulence*, Mineola, New York, 2013 – 882 p.
6. McComb W. D. *The Physics of Fluid Turbulence*. O: Oxford science publications, 1992 – 600p.
7. Nield D.A, Bejan A. *Convection in porous media*. New York: Springer, 2006 – 640 p.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, завдання на СРА з посиланням на літературу)
1	Базові теореми гідродинаміки та вивід рівнянь Нав'є – Стокса. Перша теорема Гельмгольца. Друга теорема Гельмгольца. Теорема Стокса. Теорема Лагранжа. Гипотеза Стокса. Виведення рівнянь Нав'є – Стокса. Література: 1. L.G. Loitsianskii. <i>Mechanics of Liquids and Gases</i> , Elsevier Science, 2014 – 816 p. [с.40-45, 158-159] 2. H. Schlichting, K. Gersten <i>Boundary-Layer Theory</i> . Springer, 2017 – 833 p. [с. 51–79]

	ЗАВДАННЯ НА СРА Гіпотеза Стокса. Зв'язок між тензором швидкостей деформації та тензором напруги.
2	<i>Повзучі течії та методи їх розрахунку. Перша задача Стокса. Друга задача Стокса. Рівняння Нав'є – Стокса в формі Ламба. Аналітичне рішення. Сила Стокса.</i> Література: 1. Авраменко А.О., Басок Б.І., Кузнєцов А.В. Групові методи в теплофізиці. К: Наукова думка, 2003 – 480с. [с. 24-40, 64-74] 2. L.G. Loitsianskii. Mechanics of Liquids and Gases, Elsevier Science, 2014 – 816 p. [с. 403-409] 3. Н. Schlichting, K. Gersten Boundary-Layer Theory. Springer, 2017 – 833 p. [с. 65-66, 68-69, 73-76] ЗАВДАННЯ НА СРА Групи перетворення симетрій (групи Лі). Автомодельні форми та автомодельні рівняння. Метод розділу змінних.
3	<i>Нестационарні течії та методи їх розрахунку. Методи операційного обчислення. Методи симетрії. Розгінна течія в плоскому каналі. Розгінна течія в круглому каналі.</i> Література: 1. Авраменко А.О., Басок Б.І., Кузнєцов А.В. Групові методи в теплофізиці. К: Наукова думка, 2003 – 480с.[с. 21-24, 81-87] 2. L.G. Loitsianskii. Mechanics of Liquids and Gases, Elsevier Science, 2014 – 816 p.[с.167-171, 211-215] 3. Н. Schlichting, K. Gersten Boundary-Layer Theory. Springer, 2017 – 833 p. [с. 101-104, 139-141, 341-342] 4. Avramenko A.A., Shevchuk S.V. Modeling of convective heat and mass transfer in nanofluids with and without boiling and condensation. Springer, 2022 – 263 p.[13-33] ЗАВДАННЯ НА СРА Перехід до автомодельних форм рівняння руху. Приклади розрахунку течій в каналах різної геометрії.
4	<i>Наближення прикордонного шару. Основи теорії прикордонного шару. Припущення теорії прикордонного шару. Вивід рівняння Прандтля. Методи розрахунку параболічних течій. Диференціальний метод. Розрахунок прикордонного шару на основі інтегральних рівнянь.</i> Література: 1. Авраменко А.О., Басок Б.І., Кузнєцов А.В. Групові методи в теплофізиці. К: Наукова думка, 2003 – 480с. [с. 74-81, 119-131, 141-165, 173-183] 2. Н. Schlichting, K. Gersten Boundary-Layer Theory. Springer, 2017 – 833 p. [145-150, 195-202, 258-273]

	3. L.G. Loitsianskii. Mechanics of Liquids and Gases, Elsevier Science, 2014 – 816 p. [439-451] ЗАВДАННЯ НА СРА. <i>Автомодельні форми рівняння Прандтля. Інтегральні рівняння прикордонного шару.</i>
5	Течії в каналах и методи їх розрахунку. <i>Рівняння руху в каналах різної геометрії. Канали різної геометрії – плоский, круглий, криволінійний, прямокутного перерізу. Метод ґраток Больцмана.</i> Література: 1. Авраменко А.О., Басок Б.І., Кузнєцов А.В. Групові методи в теплофізиці. К: Наукова думка, 2003 – 480с. [с. 64-87] 2. L.G. Loitsianskii. Mechanics of Liquids and Gases, Elsevier Science, 2014 – 816 p. [31-40] 3. H. Schlichting, K. Gersten Boundary-Layer Theory. Springer, 2017 – 833 p. [101-124] 4. Авраменко А.О., Басок Б.І., Давиденко Б.В. Термогідродинамічна нестійкість у теплових процесах. К: Наукова думка, 2022 – 213 с. [5-15] ЗАВДАННЯ НА СРА <i>Метод рядів Фур'є. Метод операційного обчислення. Метод симетрії.</i>
6	Гідродинамічна нестійкість. <i>Форми гідродинамічної нестійкості. Нестійкість Релея – Бенара. Нестійкість Орра – Зоммерфельда. Відцентрова нестійкість. Методи дослідження нестійкості.</i> Література: 1. H. Schlichting, K. Gersten Boundary-Layer Theory. Springer, 2017 – 833 p. [415-434] 2. Авраменко А.О., Басок Б.І., Дмитренко Н.П., Ковецька М.М., Тирінов А.І., Давиденко Б.В. Ренормалізаційно груповий аналіз турбулентності. К: ТОВ «Видавничо - поліграфічний центр «Експрес», 2013 – 300с. [128-138] 3. Reynolds A.J. Turbulent flows in engineering. <i>John Wiley & Sons.</i> –1974. 462 p. [9-40] 4. Hinze J.O. Turbulence: An Introduction to Its Mechanism and Theory. Front Cover. McGraw-Hill, 1959 - Turbulence - 586 p. [с. 71-88, 160-169] 5. Fletcher C.A.J. Computational Galerkin Method. Springer-Verlag, New York. 1984. 319 p. [24-39] 6. Monin A.S., Yaglom A.M.. Statistical Fluid Mechanics, Volume I: Mechanics of Turbulence, Mineola, New York, 2013 – 882 p. [85-162] 7. McComb W. D. The Physics of Fluid Turbulence. O: Oxford science publications, 1992 – 600p. [с. 29-31, 87-107] 8. Avramenko A.A., Shevchuk S.V. Modeling of convective heat and mass transfer in nanofluids with and without boiling and condensation. Springer, 2022 – 263 p.[227-258] 9. Авраменко А.О., Басок Б.І., Давиденко Б.В. Термогідродинамічна нестійкість у теплових процесах. К: Наукова думка, 2022 – 213 с. [23-43] ЗАВДАННЯ НА СРА <i>Метод збурень. Енергетичний метод. Модель Лоренца.</i>

7	Турбулентність. Моделі турбулентності. Класифікація моделей турбулентності. Побудова ренормалізаційно - групової моделі турбулентності. Турбулентні течії в примежовому шарі та каналах. Література: 1. Авраменко А.О., Басок Б.І., Дмитренко Н.П., Ковецька М.М., Тирінов А.І., Давиденко Б.В. Ренормалізаційно груповий аналіз турбулентності. К: ТОВ «Видавничо - поліграфічний центр «Експрес», 2013 – 300с. [с. 20-93] 2. Reynolds A.J. Turbulent flows in engineering. John Wiley & Sons. –1974. 462 p. [с. 387-392] 3. Hinze J.O. Turbulence: An Introduction to Its Mechanism and Theory. Front Cover. McGraw-Hill, 1959 - Turbulence - 586 p. [с. 9-35] 4. Monin A.S., Yaglom A.M.. Statistical Fluid Mechanics, Volume II: Mechanics of Turbulence, Mineola, New York, 2013 – 882 p. [с. 162-166] 5. McComb W. D. The Physics of Fluid Turbulence. O: Oxford science publications, 1992 – 600p. [с. 182-196] ЗАВДАННЯ НА СРА Структура течії. Профілі швидкості. Коефіцієнт тертя та гідравлічного опору.
8	Пористе середовище. Нанорідини та мікроканали. Закон руху в пористому середовищі та мікроканалах. Течія нанорідин. Закон Дарсі. Закон Форхаймера. Наближення Брінкмана. Профілі швидкості. Коефіцієнт гідравлічного опору. Література: 1. Авраменко А.О., Басок Б.І., Кузнецов А.В. Групові методи в теплофізиці. К: Наукова думка, 2003 – 480 с. [с. 440-456] 2. Авраменко А.О., Басок Б.І., Дмитренко Н.П., Ковецька М.М., Тирінов А.І., Давиденко Б.В. Ренормалізаційно груповий аналіз турбулентності. К: ТОВ «Видавничо - поліграфічний центр «Експрес», 2013 – 300с. [с. 138-160] 3. Nield D.A, Bejan A. Convection in porous media. New York: Springer, 2006 – 640 p. [с. 4-20] 4. Авраменко А.О., Басок Б.І., Давиденко Б.В. Термогідродинамічна нестійкість у теплових процесах. К: Наукова думка, 2022 – 213 с. [с. 66-95] 5. Avramenko A.A., Shevchuk S.V. Modeling of convective heat and mass transfer in nanofluids with and without boiling and condensation. Springer, 2022 – 263 p.[с. 1-11, 232-245] ЗАВДАННЯ НА СРА Закони Дарсі, Форхаймера та наближення Брінкмана. Профілі швидкості. Коефіцієнт гідравлічного опору.
9	Екзамен

Назва теми практичних занять (Теми семінарів)

1	Вивід рівнянь гідродинаміки.
2	Задача Стокса обтікання сфери.
3	Розгінна течія в плоскому та круглому каналах.
4	Рішення задачі пограничного шару біля плоскої поверхні.
5	Задача течії в каналах прямокутного перерізу.
6	Розв'язання задач на власні значення.
7	Методика отримання ренормалізаційно – групових моделей турбулентності.

6. Самостійна робота аспіранта

Завданням самостійної роботи аспірантів є навчити аспірантів самостійно працювати з літературою, творчо сприймати навчальний матеріал і осмислювати його.

На самостійну роботу відводяться наступні види завдань:

- обробка і осмислення інформації, отриманої безпосередньо на заняттях;
- робота з відповідними підручниками та особистим конспектом лекцій;
- підготовка до складання екзамену.

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед аспірантом:

- відвідування лекцій та семінарських занять. Заняття проводяться згідно з розкладом, за допомогою додатку Zoom (за умови дистанційного навчання)
- активність на семінарських та лекційних заняттях, регулярная самостоятельная работа
- дотримання стандартів академічної доброчесності. <http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/08/polozhennja-pro-akademichnu-dobrochesnist-ta-etiku.pdf>
- Відвідування лекцій та семінарських занять, а також відсутність на них, не оцінюється. Однак, аспірантам рекомендується відвідувати усі види занять (як лекцій, так і семінарів);
- Moodle та інші інтернет ресурси, що надає викладач тощо).

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

Вказуються всі види контролю та бали за кожен елемент контролю, наприклад:

Поточний контроль: експрес-опитування, опитування за темою заняття

Семестровий контроль: екзамен

Умови допуску до семестрового контролю: мінімально позитивна оцінка за індивідуальне завдання семестровий рейтинг більше 30 балів.

Поточний контроль: опитування за темою лекції. Максимальна кількість балів – 20.

Контроль на семінарських заняттях.

Максимальна кількість балів – 40.

Семестровий контроль:.

Екзамен – 40 балів.

Умови допуску до екзамена - більше 30 балів.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

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

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

- перелік питань, які виносяться на семестровий контроль (наприклад, як додаток до силабусу);
- можливість зарахування сертифікатів проходження дистанційних чи онлайн курсів за відповідною тематикою;
- інша інформація для аспірантів щодо особливостей опанування навчальної дисципліни.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено

Професор, доктор технічних наук

А.А. Авраменко

Ухвалено Вченою радою ІТТФ НАН України _____ (протокол № 7 від 11.04.24)

Додаток

Перелік питань, які виносяться на екзамен

1. Базові теореми гідродинаміки.
2. Вивід рівнянь Нав'є – Стокса.
3. Задача Стокса для сфери.
4. Перша задача Стокса.
5. Друга задача Стокса.
6. Розгінна течія в плоскому каналі.
7. Розгінна течія в круглому каналі.
8. Течія в каналі прямокутного перерізу.
9. Диференціальні методи розрахунку параболічних течій.
10. Інтегральні методи розрахунку параболічних течій.
11. Розв'язання задач на власні значення.
12. Нестійкість Релея – Бенара.
13. Нестійкість Орра – Зоммерфельда.
14. Відцентрова нестійкість.

15. Моделі турбулентності та їх класифікація.;
16. Побудова ренормалізаційно - групової моделі турбулентності.
17. Турбулентні течії в примежовому шарі.
18. Турбулентні течії та каналах.
19. Течія в пористому середовищі.
20. Модель течії нанорідин.
21. Течія в мікроканалах.