



# ОСНОВИ ТЕОРІЇ ПРИМЕЖОВОГО ШАРУ

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### • Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Третій (доктор філософії)</i>
Галузь знань	10 Природничі науки
Спеціальність	105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма	Прикладна фізика
Статус дисципліни	Вибіркова
Форма навчання	очна(денна)
Рік підготовки, семестр	2 курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	4 (120) Лекції – 27 год., семінарські заняття – 18, СР – 75 год.
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Екзамен
Розклад занять	<a href="http://ipt.kpi.ua/navchalnij-protses">http://ipt.kpi.ua/navchalnij-protses</a>
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: к.ф.-м.н., Димитрієва Наталія Федорівна, <a href="mailto:dimitrievanf@gmail.com">dimitrievanf@gmail.com</a> Практичні: к.ф.-м.н., Димитрієва Наталія Федорівна, <a href="mailto:dimitrievanf@gmail.com">dimitrievanf@gmail.com</a>
Розміщення курсу	<a href="http://phes.ipt.kpi.ua/osnovy-teoriyi-prymezhevogo-sharu">http://phes.ipt.kpi.ua/osnovy-teoriyi-prymezhevogo-sharu</a> <a href="https://do.ipk.kpi.ua/course/view.php?id=1832">https://do.ipk.kpi.ua/course/view.php?id=1832</a>

### • Програма навчальної дисципліни

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

Курс «Основи теорії примежового шару» має велике значення у підготовці фахівців в області прикладної фізики та наноматеріалів, що навчає формалізувати, моделювати та вирішувати складні актуальні задачі фізики суцільних середовищ в наближенні примежового шару.

Метою навчальної дисципліни є формування компетентностей:  
*загальних компетентностей (ЗК):*

ЗК 1 Здатність проводити критичний аналіз, оцінку і синтез нових і складних ідей, переосмислювати наявне та створювати нове цілісне знання та/або професійну практику, розв'язувати значущі наукові та інші проблеми.

ЗК 2 Здатність використовувати у професійній діяльності сучасні знання з різних наук, у тому числі міждисциплінарного характеру.

ЗК 5 Здатність знаходити, обробляти й аналізувати необхідну інформацію для вирішення проблем й прийняття рішень.

ЗК 7 Здатність забезпечувати безперервний саморозвиток і самовдосконалення, відповідальність за розвиток інших.

*фахових компетентностей (ФК):*

ФК 1 Здатність самостійно здійснювати науково-дослідну та науково-педагогічну діяльність у галузі прикладної фізики з використанням новітніх наукових теорій, методів та інноваційних технологій

ФК 2 Здатність адаптувати і узагальнювати результати сучасних досліджень в галузі прикладної фізики для вирішення наукових і практичних проблем

ФК 3 Здатність проводити теоретичні й експериментальні дослідження, комбінувати та зв'язувати їх методи, інтерпретувати одержані результати з метою виявлення властивостей та характеристик досліджуваних об'єктів в галузі прикладної фізики та нанотехнологій

ФК 4 Здатність проводити дослідження складних систем, їх системний та синергетичний аналіз, використовувати моделі та методи моделювання в наукових дослідженнях.

Після засвоєння навчальної дисципліни аспіранти мають продемонструвати такі *програмні результати навчання (ПРН)*:

ПРН 1 Системні знання у фізиці та інших природничих науках, включаючи оволодіння методами наукового дослідження при здійсненні професійної діяльності.

ПРН 2 Системні знання поглибленого рівня в галузі прикладної фізики, наукомістких технологій, нових речовин і матеріалів, методів дослідження їх властивостей, зокрема, знання сучасних досягнень та інноваційних прикладних рішень, в тому числі на стику різних галузей наук.

ПРН 3 Знання методики проведення теоретичних та експериментальних досліджень, основоположних принципів системного та синергетичного аналізу, розуміння моделей та методів моделювання в прикладній фізиці.

ПРН 9 Вміння орієнтуватися в наукових проблемах у професійній сфері, знаходити оптимальні шляхи їх розв'язання.

ПРН 10 Вміння критично аналізувати, оцінювати і синтезувати нові складні ідеї, які заслуговують на рецензовану публікацію на національному або міжнародному рівні.

ПРН 11 Вміння розширення меж і переосмислення наявного теоретичного знання й професійних практик, здатності сприймати, розробляти, застосовувати і адаптувати основний процес дослідження з науковою повнотою і цілісністю.

ПРН 12 Вміння обирати теоретичні й експериментальні методи дослідження, відповідні методи системного і синергетичного аналізу, застосовувати моделі та методи моделювання та інноваційні підходи для розв'язання складних завдань і проблем в науково-дослідній та/або інноваційних сферах.

ПРН 15 Вміння збирати та інтерпретувати наукову та фахову інформацію, з використанням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій та пошукових систем.

ПРН 16 Вміння використовувати сучасні методи і технології професійної комунікації українською та іноземними мовами.

ПРН 17 Вміння ефективно взаємодіяти в професійному середовищі й соціумі в цілому, результативно, науково і професійно працювати над новими ідеями як індивідуально, так і як член творчої команди.

ПРН 18 Вміння формулювати свої професійні висновки, особисті результати і досягнення та розумно їх обґрунтовувати для фахової та не фахової аудиторії.

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

Міждисциплінарні зв'язки: курс «Основи теорії примежового шару» безпосереднім чином ґрунтується на курсах «Фізика суцільних середовищ», «Моделювання фізичних процесів», «Теорія гідродинамічної стійкості» та «Основи конвективного теплообміну».

Отримані практичні навички та засвоєні теоретичні знання під час вивчення навчальної дисципліни «Основи теорії примежового шару» можна використовувати в подальшому під час навчання спеціалізованих дисциплін фізико-енергетичного циклу.

Необхідні навички:

1. Моделювати та розв'язувати типові задачі визначення просторово-часових полів параметрів суцільних середовищ при заданих крайових умовах.
2. Самостійно формулювати, аналізувати і розв'язувати задачі стійкості характерних течій в області гідрогазодинаміки, процесів тепло- та масообміну.
3. Самостійно формулювати, аналізувати і розв'язувати задачі в області законів конвективного переносу тепла.
4. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

### 3. Зміст навчальної дисципліни

#### Вступ

#### **Розділ 1. *Ламінарна та турбулентна течії.***

- Тема 1.1 Режими руху рідини. Ламінарно-турбулентний перехід.
- Тема 1.2 Осереднений і пульсаційний рух. Турбулентні напруження і потоки тепла.
- Тема 1.3 Математичний опис турбулентного потоку.
- Тема 1.4 Структура пристінної турбулентної течії.
- Тема 1.5 Розрахункові підходи до опису турбулентної течії.
- Тема 1.6 Диференційні моделі турбулентності.

#### **Розділ 2. *Моделювання примежового шару.***

- Тема 2.1. Поняття про примежовий шар.
- Тема 2.2. Диференційні рівняння примежового шару.
- Тема 2.3. Інтегральні рівняння примежового шару.
- Тема 2.4. Закони тертя та теплообміну. Консервативність до зміни граничних умов.
- Тема 2.5. Основи теорії локального моделювання.

#### **Розділ 3. *Розв'язок характерних задач теорії примежового шару.***

- Тема 3.1. Застосування диференційних рівнянь примежового шару до розв'язку задач ламінарної течії.
- Тема 3.2. Застосування інтегральних співвідношень примежового шару до розв'язку задач ламінарної течії.
- Тема 3.3. Задача про турбулентну течію в початковій ділянці круглої труби.
- Тема 3.4. Задача про плоский затоплений турбулентний струмінь.
- Тема 3.5. Плоский спутний струмінь.

#### **Розділ 4. *Чисельний розв'язання задач гідродинаміки та теплообміну за методом скінченних об'ємів.***

- Тема 4.1. Загальні положення.
- Тема 4.2. Дискретизація конвективного члена.
- Тема 4.3. Дискретизація дифузійного, джерельної і нестационарного членів.
- Тема 4.4. Дискретний аналог рівняння переносу.
- Тема 4.5. Дискретна форма рівнянь переносу імпульсу.
- Тема 4.6. Взаємопов'язана процедура корекції полів тиску і швидкості.
- Тема 4.7. Техніка нижньої релаксації і критерії збіжності.
- Тема 4.8. Корекція  $P_{xi}$  – Чоу.
- Тема 4.9. Розв'язання систем лінійних рівнянь.
- Тема 4.10. Приклад чисельного розрахунку плоского затопленого турбулентного струменю.

#### **Розділ 5. *Керування примежовим шаром.***

- Тема 5.1. Методи, що передбачають зміну граничних умов на обтічної поверхні.
- Тема 5.2. Методи, що впливають на структуру течії за рахунок зміни умов усередині пограничного шару.
- Тема 5.3. Поєднання декількох методів керування примежовим шаром.

### 4. Навчальні матеріали та ресурси

#### Базова література

1. Халатов, А. А. Основи теорії примежового шару [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» / А. А. Халатов, Є. В. Мочалін, Н. Ф. Димитрієва ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові

- дані (1 файл: 2,86 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 191 с. – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/26035> (Розділ 1-4)
2. Димитрієва Н. Ф. Моделювання турбулентних течій розведених розчинів полімерів: дис ... канд. фіз.-мат. наук : 01.02.05 / Димитрієва Наталія Федорівна. – Київ, 2011. – 172 с. – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/33718> (Розділ 1,2,5)

#### Допоміжна література

3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г.Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с. <https://drive.google.com/file/d/1I8ktCQ7DFiudzcg9OmTzEquBb9SNq91P/view?usp=sharing> (Розділ 1-3)
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г.Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с. [https://drive.google.com/file/d/1jBJOatjhIab6INH2W-V\\_2G8fOfHjL5P/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1jBJOatjhIab6INH2W-V_2G8fOfHjL5P/view?usp=sharing) [https://drive.google.com/file/d/1-PR3NIriPhB1Kkv\\_Nu2jJTD66Ajeo9qV/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1-PR3NIriPhB1Kkv_Nu2jJTD66Ajeo9qV/view?usp=sharing) (Розділ 2; Тему 1.1, 3.1, 3.2)
5. Ландау Л.Д. Теоретическая физика, том VI, Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука. – 1986. – 736 с. [https://drive.google.com/file/d/1jZalKmavl2xWvoi7BNn4m6\\_aa2pX3IRt/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1jZalKmavl2xWvoi7BNn4m6_aa2pX3IRt/view?usp=sharing) (Тему 1.2, 2.3)
6. Повх И.Л. Техническая гидромеханика / И.Л.Повх. Л.: Машиностроение. 1976. <https://drive.google.com/file/d/1wsmkMg1hM5Z9uf0nQ3Oh8Suqy99caYYR/view?usp=sharing> (Розділ 1-3)
7. Кутателадзе С.С. Пристенная турбулентность / С.С. Кутателадзе.– Новосибирск: Наука, 1973. – 227 с. <https://drive.google.com/file/d/103xdz-6wNysbV7ECKOoblFdA9p6rZKep/view?usp=sharing> (Тему 1.2, 2.1, 2.2)
8. Мочалин Е.В. Математическое моделирование и приближенное решение инженерных задач механики. Учеб. пособие / Е.В. Мочалин. – Алчевск: ДГМИ, 1998.- 142с. (Тему 1.3, 2.3)
9. Федяевский К.К. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости / К.К. Федяевский, А.С. Гиневский, А.В. Колесников.– Л.: Судостроение, 1973. – 256 с. (Тему 2.4, 2.5, 3.3)
10. Хинце И.О. Турбулентность. Ее механизм и теория / И.О. Хинце. – М.: Физматгиз, 1963. – 680 с. [https://drive.google.com/file/d/1fWRerc9PZUgqMIYx\\_BvTqRfduCQWnIsF/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1fWRerc9PZUgqMIYx_BvTqRfduCQWnIsF/view?usp=sharing) (Розділ 1; Тема 2.5)
11. Єфремов І.І. Основи механіки рідини та газу / І.І.Єфремов, В.М.Турик. – К.: НМК ВО, 1990. – 84 с. (Тема 1.1)
12. Приходько А.А. Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене / А.А.Приходько. – К.: Наукова думка, 2003. – 380 с. <https://drive.google.com/file/d/1clPLVrKm8ZYh1MAAH3bitdZIMf4fWHku/view?usp=sharing> (Тему 1.4, 1.5, Розділ 4)
13. Себеси Т. Модели турбулентности для пристенных пограничных слоев / Т. Себеси, К.К. Ченг, К. Ли, Д.Х. Уайтлоу // Аэрокосмическая техника. – 1986. – Т. II, № 11. – С. 157–159. (Тема 1.6)
14. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович.– М.: Физматгиз, 1960.– 715 с. [https://drive.google.com/file/d/1NF5BcbdP5aB49WSgG669MGHQbXpRx\\_/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1NF5BcbdP5aB49WSgG669MGHQbXpRx_/view?usp=sharing) (Тему 3.4, 3.5)
15. Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков / А.А. Халатов, И.И. Борисов, С.В. Шевцов. – К.: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2005. – 500 с. (Розділ 5; Тема 2.4)

#### Інформаційні ресурси

- **Fluid Mechanics II - Dr. John Biddle's lecture series. Fluid Mechanics: Laminar Boundary Layer on a Flat Plate.** – [https://www.youtube.com/watch?v=dEg896XFgkw&list=PLZOZfX\\_TaWAE7uM59dIBr-rH73WTJCcp\\_&index=13](https://www.youtube.com/watch?v=dEg896XFgkw&list=PLZOZfX_TaWAE7uM59dIBr-rH73WTJCcp_&index=13)
- **Fluid Mechanics II - Dr. John Biddle's lecture series. Fluid Mechanics: Turbulent Boundary Layer on a Flat Plate.** – [https://www.youtube.com/watch?v=SpkYBNdSOHQ&list=PLZOZfX\\_TaWAE7uM59dIBr-](https://www.youtube.com/watch?v=SpkYBNdSOHQ&list=PLZOZfX_TaWAE7uM59dIBr-)

- **Fluid Mechanics II - Dr. John Biddle's lecture series. Fluid Mechanics: Drag Forces on Blunt Bodies.** –  
[https://www.youtube.com/watch?v=5kcyzcDISP8&list=PLZOZfX\\_TaWAE7uM59dIBr-rH73WTJCcp\\_&index=15](https://www.youtube.com/watch?v=5kcyzcDISP8&list=PLZOZfX_TaWAE7uM59dIBr-rH73WTJCcp_&index=15)

● **Навчальний контент**

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

Теми дисципліни взаємозв'язані, матеріал вивчається в логічній послідовності. На заняттях розкриваються найбільш суттєві питання, які дозволяють забезпечити аспірантам можливість глибокого самостійного вивчення всього програмного матеріалу.

Теоретичні і практичні знання поглиблюються шляхом самостійної роботи з використанням рекомендованої літератури та глобальної мережі Internet. Опубліковано навчальний посібник [1] під Грифом КПІ ім. Ігоря Сікорського, який значною мірою узгоджується з навчальною програмою дисципліни «Основи теорії примежового шару».

На заняттях використовуються звичайна дошка, а також презентації лекцій та практичних занять з використанням мультимедіапроектора. Контроль засвоєння навчального матеріалу здійснюється індивідуальним опитуванням, перевіркою практичних завдань та екзаменом.

**5.1 Лекційні заняття**

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, завдання на СРС з посиланням на літературу)
1	<i>Режими руху рідини. Ламінарно-турбулентний перехід. Профіль швидкості при ламінарному та турбулентному режимах. Коефіцієнт перемежовування. Осереднений і пульсаційний рух. Турбулентні напруги та потоки тепла. Характеристики турбулентності: вільність, однорідність, ізотропність. Масштаби турбулентності.</i> Література: [1-7], [11] Завдання на СРС: Число Рейнольдса як характеристика режиму течії. Поділ всіх характеристик (швидкість, тиск, температура, концентрація та ін.) на осереднену та пульсаційну складові. Правила усереднювання, кореляція величин
2	<i>Математичний опис турбулентного потоку. Рівняння руху осереднене за Рейнольдсом (RANS), тензор турбулентних напруг. Турбулентна в'язкість. Структура пристінної турбулентної течії. Теорія «шляху перемішування» Л.Прандтля. Двошарова і тришарова модель турбулентного примежового шару.</i> Література: [1-3], [8], [12] Завдання на СРС: Рівняння переносу тепла та маси при турбулентному режимі. Безшарова модель турбулентного примежового шару Ван-Дриста. Обезрозмірювання за динамічними параметрами.
3	<i>Розрахункові підходи до опису турбулентної течії. Підходи до моделювання турбулентності RANS, LES, DNS. Гіпотеза Бусінеска. Диференційні моделі турбулентності. Баланс енергії турбулентності. <math>k-\epsilon</math>, <math>k-\omega</math> моделі.</i> Література: [1], [2], [3], [6], [12], [13] Завдання на СРС: Порівняльна характеристика RANS, LES та DNS підходів. SST $k-\omega$ модель Ментера, модель Спаларта–Аллмареса, модель переносу напружень Рейнольдса Лаундера–Риса–Роді.
4	<i>Поняття про примежовий шар. Структура і характеристики примежового шару. Диференційні рівняння примежового шару. Рівняння переносу імпульса Нав'є-Стокса в наближенні примежового шару. Умови малості величин, порядок складових рівняння. Залежність числа Рейнольдса від параметрів примежового шару. Інтегральні рівняння примежового шару. Товщина примежового шару, товщина втрати імпульсу, товщина витіснення.</i> Література: [1], [4-8] Завдання на СРС: Тепловий та дифузійний примежовий шар. Рівняння переносу тепла та маси в наближенні примежового шару. Рівняння енергії, товщина втрати енергії.
5	<i>Закони тертя та теплообміну. Консервативність до зміни граничних умов. Закони подібності. Основи теорії локального моделювання. Тепловіддача на пластині. Поверхневе тертя на пластині.</i> Література: [1], [9], [10], [15]



	Завдання на СРС: Імпіричні співвідношення та експериментальні результати законів тертя і теплообміну за різних граничних умов. Теорія примежового шару з вироджуваною в'язкістю
6	<i>Розв'язок задач ламінарної течії. Застосування диференційних рівнянь примежового шару до розв'язку задач ламінарної течії. Застосування інтегральних співвідношень примежового шару до розв'язку задач ламінарної течії. Задача про турбулентну течію в початковій ділянці круглої труби. Рівняння вісесиметричної течії, основні припущення для розв'язку задачі. Розв'язання рівняння імпульсів.</i> Література: [1], [3], [4], [9] Завдання на СРС: Автомодельність профілів динамічного, теплового та дифузійного примежового шару. Тепловіддача пластини з ламінарним примежовим шаром залежно від числа Pr. Розв'язання рівняння енергії. Визначення довжини ділянки гідродинамічної стабілізації
7	<i>Задача про плоский затоплений турбулентний струмінь. Близькість задачі про затоплений струмінь до задачі примежового шару Принципова розрахункова схема струменя: початкова, перехідна та основна ділянка. Плоский спутний струмінь. Параметр супутності.</i> Література: [1], [14] Завдання на СРС: Оцінка ежекційних властивостей затопленого струменя. Залежність довжини початкової ділянки струменя від параметра супутності
8	<i>Керування примежовим шаром. Методи, що передбачають зміну граничних умов на обтічній поверхні: вихорогенератори, мікроелектронні системи, та ін. Методи, що впливають на структуру течії за рахунок зміни умов усередині примежового шару.: газові бульбашки, домішки ПАР або полімерів та ін. Поєднання декількох методів керування примежовим шаром.</i> Література: [2].

## 5.2 Практичні заняття

Основна мета практичних занять: навчитися розв'язувати характерні задачі теорії примежового шару при ламінарному та турбулентному режимах, в нестационарній та стаціонарній постановках, розрізняти та застосовувати моделі пристінної турбулентності.

№ з/п	Назва теми заняття
1.	Застосування диференційних рівнянь примежового шару до розв'язку задач ламінарної течії.
2	Застосування інтегральних співвідношень примежового шару до розв'язку задач ламінарної течії
3	Задача про турбулентну течію в початковій ділянці круглої труби
4	Задача про плоский турбулентний струмінь

## 6. Самостійна робота (СР)

№ з/п	Назви тем і питань, що виносяться на самостійне опрацювання та посилання на навчальну літературу	Кількість годин СРС
1	<i>Тема 1.1 Режими руху рідини. Ламінарно-турбулентний перехід.</i> Число Рейнольдса як характеристика режиму течії Література: [1], [3], [4], [11]	3
2	<i>Тема 1.2 Осереднений і пульсаційний рух. Турбулентні напруги та потоки тепла.</i> Поділ всіх характеристик (швидкість, тиск, температура, концентрація та ін.) на осереднену та пульсаційну складові. Правила усереднювання, кореляція величин Література: [1], [2], [5-7]	3
3	<i>Тема 1.3 Математичний опис турбулентного потоку</i> Рівняння переносу тепла та маси при турбулентному режимі. Література: [1], [3], [8]	3
4	<i>Тема 1.4 Структура пристінної турбулентної течії</i> Безшарова модель турбулентного примежового шару Ван-Дроста. Обезрозмірювання за динамічними параметрами. Література: [1-3], [12]	3
5	<i>Тема 1.5 Розрахункові підходи до опису турбулентної течії.</i> Порівняльна характеристика RANS, LES та DNS підходів. Література: [1], [3], [6], [12]	3
6	<i>Тема 1.6 Диференційні моделі турбулентності</i>	3

	SST $k - \omega$ модель Ментера, модель Спаларта–Аллмареса, модель переносу напружень Рейнольдса Лаундера-Риса-Роді. Література: [1], [2], [12], [13]	
7	Тема 2.1. <i>Поняття про примежовий шар</i> Тепловий та дифузійний примежовий шар. Література: [1], [4], [6], [7]	3
8	Тема 2.2. <i>Диференційні рівняння примежового шару</i> Рівняння переносу тепла та маси в наближенні примежового шару. Література: [1], [4], [7]	3
9	Тема 2.3. <i>Інтегральні рівняння примежового шару</i> Рівняння енергії, товщина втрати енергії Література: [1], [5], [8]	3
10	Тема 2.4. <i>Закони тертя та теплообміну. Консервативність до зміни граничних умов.</i> Імпіричні співвідношення та експериментальні результати законів тертя і теплообміну за різних граничних умов Література: [1], [9], [15]	3
11	Тема 2.5. <i>Основи теорії локального моделювання</i> Теорія пограничного шару з вироджуваною в'язкістю Література: [1], [9], [10]	2
12	Тема 3.1. <i>Застосування диференційних рівнянь примежового шару до розв'язку задач ламінарної течії</i> Автомодельність профілів динамічного, теплового та дифузійного примежового шару. Література: [1], [3], [4]	2
13	Тема 3.2. <i>Застосування інтегральних співвідношень примежового шару до розв'язку задач ламінарної течії</i> Тепловіддача пластини з ламінарним примежовим шаром залежно від числа Pr. Література: [1], [3], [4]	2
14	Тема 3.3. <i>Задача про турбулентну течію в початковій ділянці круглої труби</i> Розв'язання рівняння енергії. Визначення довжини ділянки гідродинамічної стабілізації Література: [1], [9]	2
15	Тема 3.4. <i>Задача про плоский затоплений турбулентний струмінь</i> Оцінка ежекційних властивостей затопленого струменя. Література: [1], [14]	2
16	Тема 3.5. <i>Плоский спутний струмінь</i> Залежність довжини початкової ділянки струменя від параметра супутності Література: [1], [14]	2
17	Тема 4.1. <i>Загальні положення.</i> Інтегрування за об'ємом рівняння переносу. Література: [1], [12]	2
18	Тема 4.2. <i>Дискретизація конвективного члена.</i> Визначення конвективного потоку для контрольного об'єму. Література: [1], [12]	2
19	Тема 4.3. <i>Дискретизація дифузійного, джерельної і нестационарного членів</i> Порядок точності апроксимації членів рівняння переносу Література: [1]	2
20	Тема 4.4. <i>Дискретний аналог рівняння переносу.</i> Умови збіжності ітераційних методів розв'язку систем лінійних рівнянь Література: [1]	2
21	Тема 4.5. <i>Дискретна форма рівнянь переносу імпульсу.</i> Дискретний аналог рівняння руху для кожної компоненти швидкості та рівняння нерозривності. Література: [1], [12]	2
22	Тема 4.6. <i>Взаємопов'язана процедура корекції полів тиску і швидкості.</i> Алгоритми зв'язку полів тиску і швидкості PISO, SIMPLE та PIMPLE. Література: [1]	2
23	Тема 4.7. <i>Техніка нижньої релаксації і критерії збіжності.</i> Похибки і коефіцієнти релаксації. Література: [1], [12]	2
24	Тема 4.8. <i>Корекція Pxi – Чоу.</i>	2

	Згладжувальні поправки до значення нормальної швидкості на грані комірки. Література: [1]	
25	Тема 4.9. Розв'язання систем лінійних рівнянь. Метод Гауса–Зейделя. Метод алгебраїчного багатосіткового прискорювача (Algebraic Multigrid – AMG). Література: [1]	2
26	Тема 4.10. Приклад чисельного розрахунку плоского затопленого турбулентного струменя. Розрахункова схема для чисельного моделювання задачі плоского затопленого струменя. Граничні умови для характеристик турбулентності у вхідному перерізі потоку. Література: [1]	2
27	Тема 5.1. Методи, що передбачають зміну граничних умов на обтічній поверхні. Заглиблення (лунки, ріблети), плівкове охолодження Література: [2]	2
28	Тема 5.2. Методи, що впливають на структуру течії за рахунок зміни умов усередині пограничного шару. мікроканали, LEBU, ЕГД та МГД Література: [2]	2
29	Тема 5.3. Посадження декількох методів керування примежовим шаром. Баланс між теплообміном та опором тертя при керуванні примежовим шаром Література: [2]	2
30	Підготовка до екзамену. Матеріал розділів 1-4 Література: [1-15]	7

● Політика та контроль

## 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

### Відвідування занять

Рекомендується відвідувати заняття. Система оцінювання орієнтована на отримання балів за виконання завдань, які здатні розвинути практичні уміння та навички. Відсутність на лекційних і практичних заняттях, без поважних причин штрафується від'ємними балами.

### Порушення термінів виконання завдань та заохочувальні бали

Заохочувальні бали		Штрафні бали	
Критерій	Ваговий бал	Критерій	Ваговий бал
Участь в олімпіадах, публікаціях, наукових конференціях, розробці дидактичних матеріалів (за тематикою навчальної дисципліни)	+10 балів	Відсутність на лекції без поважних причин	-1 балів за кожне заняття
		Відсутність на практичному занятті без поважної причини	-1 балів за кожне заняття
		Несвоєчасне виконання контрольної роботи без поважних причин	-5 бали

### Академічна доброчесність

Політика та принципи академічної доброчесності визначені у розділі 3 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

### Норми етичної поведінки

Норми етичної поведінки аспірантів і працівників визначені у розділі 2 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

### Процедура оскарження результатів контрольних заходів

Здобувачі мають можливість підняти будь-яке питання, яке стосується процедури контрольних заходів та очікувати, що воно буде розглянуто згідно із наперед визначеними процедурами.



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

*Поточний контроль:* індивідуальні практичні роботи, додаткові завдання підвищеної складності

*Семестровий контроль:* екзамен

*Умови допуску до семестрового контролю:*

Обов'язкові:

- Виконані всі індивідуальні практичні роботи.
- Поточний рейтинг  $RD \geq 30$  балів.

Необов'язкові:

- Активність на семінарських заняттях.
- Відвідування лекційних занять.

Протягом семестру здобувач отримує бали за такі види роботи:

1. Індивідуальні практичні роботи. *Максимальна кількість балів – 30.* За кожну окрему роботу аспірант отримує:
  - гарна підготовка до роботи за результатами вхідного контролю, самостійне та повне виконання індивідуального завдання по роботі, глибоке розкриття питань під час співбесіди – 9-10 балів;
  - готовність до роботи, повне і в цілому самостійне виконання індивідуального завдання, розкриття питань під час співбесіди – 6-8 балів;
  - виконання індивідуального завдання, частково правильні відповіді під час співбесіди – 3-5 балів;
  - незадовільні результати виконання – 0 балів.
2. Додаткові завдання підвищеної складності. *Максимальна кількість балів – 20.*
3. Штрафні та заохочувальні бали:
  - відсутність на лекції без поважних причин (-1 бал). Максимальна кількість балів – -8.
  - відсутність на практичному занятті без поважної причини (-1 бал). Максимальна кількість балів – -4;
  - участь в семінарах, вебінарах, публікаціях, наукових конференціях, розробці дидактичних матеріалів (за тематикою навчальної дисципліни) – +10 балів.
4. Екзамен. Проводиться в усній формі. Необхідною умовою допуску до екзамену є виконання всіх практичних робіт та рейтинг більший за 30 балів. Екзаменаційний білет включає три завдання: два теоретичних питання і одне практичне завдання (розрахункова робота). *Максимальна кількість 50 балів.*
  - вичерпна відповідь – 36 – 40 балів;
  - відповідь з незначними неточностями – 26-35 балів;
  - неповна відповідь та незначні помилки – 16 – 25 балів;
  - грубі помилки – 5-15;
  - незадовільна відповідь – 0 балів.

Розрахунок шкали рейтингу:

$$R_c = 30 + 20 + 50 = 100 \text{ балів}$$

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)

Питання до екзамену:

- Режими течії. Порівняльна характеристика.
- Число Рейнольдса як характеристика течії
- Критичне число Рейнольдса.

- Режими течії. Залежність характеристик турбулентної течії від часу.
- Осереднений і пульсаційний рух.
- Ламінарна течія.
- Профіль швидкості ламінарного примежового шару.
- тензор турбулентних напруг.
- Масштаби турбулентності.
- Гіпотеза Бусінеска.
- Моделі турбулентної в'язкості.
- Баланс енергії турбулентності.
- Рівняння переносу швидкості дисипації.
- Рівняння Нав'є-Стокса в наближенні примежового шару.
- Товщина втрати імпульсу, товщина витіснення.
- Подібність примежового шару.
- Профіль швидкості турбулентного примежового шару.
- Тепловий та дифузійний примежовий шар.
- Закони тертя.
- Рівняння Рейнольдса. Фізичний зміст його складових.
- Турбулентний примежовий шар.
- Переваги та недоліки RANS моделей турбулентності.
- Алгебраїчні моделі турбулентності.
- k-ε модель турбулентності.
- Керування турбулентним примежовим шаром. Характеристики одного з методів.
- Керування турбулентним примежовим шаром. Поєднання декількох методів.

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

Основи теорії примежового шару

**Складено:**

В.о. зав. каф. ФЕС, д.т.н., проф. Халатов Артем Артемович

ас., к.ф.-м.н, Дмитрієва Наталія Федорівна

**Ухвалено** кафедрою Фізики енергетичних систем (протокол № 2 від 4 вересня 2020 р.)

**Погоджено** Методичною комісією Фізико-технічного інституту (протокол № 7/1 від 7 вересня 2020 р.)