

**СИЛАБУС**  
**навчальної дисципліни**  
**«ТЕОРІЯ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ»**

|   |  |
|---|--|
| <b>Галузь знань</b>                                   | <i>10 – Природничі науки</i>   |
| <b>Спеціальність</b>                                  | <i>104 – Фізика та астрономія</i>  |
| <b>Освітня програма</b>                               | <i>Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу</i> |
| <b>Освітній рівень</b>                                | доктор філософії   |
| <b>Статус дисципліни</b>                              | <i>Фаховий / Вибірковий</i>  |
| <b>Мова викладання</b>                                | <i>Українська</i>  |
| <b>Курс / семестр</b>                                 | <i>II (III) курс, 1 (2) семестр</i>  |
| <b>Кількість кредитів ЄКТС</b>                        | <i>4 кредити ЄКТС</i>  |
| <b>Розподіл за видами занять та годинами навчання</b> | <i>Лекції – 32 год.</i>  |
|   | <i>Практичні (семінарські) – 16 год.</i>   |
|   | <i>Консультація – 2 год.</i>   |
|   | <i>Самостійна робота – 70 год.</i>   |
| <b>Форма підсумкового контролю</b>                    | <i>Іспит</i>   |
| <b>Відділ</b>   | <i>Відділ структури ядра, ІЯД НАН України, корп. 31, к.106<br/>тел. +380-44-525-4575</i>   |
| <b>Викладач (-і)</b>                                  | <i>Хоменков Володимир Петрович, ст. наук. співроб., к.ф.-м.н.</i>  |
| <b>Контактна інформація викладача (-ів)</b>           | <i>khomenkov@kinr.kiev.ua, +380-44-525-4575</i>  |
| <b>Дні занять</b>                                     | <i>За розкладом</i>  |
| <b>Консультації</b>                                   | <i>Дистанційні, за домовленістю з ініціативи здобувача, групові</i>  |

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

**Мета** навчальної дисципліни – формування у аспірантів компетентностей у галузі ядерної та нейтронної фізики, що застосовуються при аналізі і розрахунку фізичних процесів в ядерних реакторах.

**Предмет** навчальної дисципліни – вивчення процесів, що відбуваються в ядерних реакторах та їх застосування до ядерно-фізичного розрахунку реакторів.

**Компетентності**

**Інтегральна компетентність (ІК):** Здатність продукувати нові ідеї, розв'язувати комплексні проблеми науково-дослідницької та/або розробницької, та/або інноваційної діяльності у сфері фізики та/або астрономії, застосовувати методологію науково-дослідницької та педагогічної діяльності, а також проводити власне наукове дослідження, результати якого мають наукову новизну, теоретичне та практичне значення.

**Загальні компетентності (ЗК):**

ЗК01. Здатність генерувати нові ідеї (креативність).

ЗК02. Здатність працювати в міжнародному контексті.

ЗК03. Здатність розв'язувати комплексні наукові проблеми на основі системного наукового світогляду та загального культурного кругозору із дотриманням професійної етики та академічної доброчесності.

### **Спеціальні (фахові) компетентності (СК):**

СК01. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру в сфері фізики та/або астрономії, інтегрувати знання з різних галузей, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень.

СК04. Здатність організовувати та здійснювати науково-педагогічну діяльність у сфері фізики та/або астрономії.

СК05. Здатність ініціювати, розробляти та реалізовувати науково-дослідницькі, розробницькі та інноваційні проекти у сфері фізики та/або астрономії, планувати й організовувати роботу науково-дослідницьких, розробницьких та інноваційних колективів.

СК06. Здатність застосовувати сучасні методи, методики, технології, інструменти та обладнання для проведення прикладних та фундаментальних наукових досліджень у галузі фізики та/або астрономії.

### **Програмні результати навчання**

РН01. Мати сучасні концептуальні та методологічні знання з фізики та/або астрономії та дотичних до них міждисциплінарних напрямів, а також необхідні навички, достатні для проведення фундаментальних і прикладних наукових досліджень з метою отримання нових знань та/або здійснення розробок та інновацій.

РН02. Аналізувати та оцінювати стан і перспективи розвитку фізики та/або астрономії, а також дотичних міждисциплінарних напрямів.

РН06. Планувати і виконувати прикладні та/або фундаментальні дослідження фізики та/або астрономії та дотичних міждисциплінарних напрямів з використанням сучасних методів, методик, технологій, інструментів та обладнання, з дотриманням норм академічної етики, критично аналізувати результати наукових досліджень у контексті усього комплексу сучасних знань щодо досліджуваної проблеми; готувати проектні пропозиції щодо фінансування наукових досліджень та/або розробницьких і інноваційних проектів.

РН10. Мати навички захисту прав інтелектуальної власності.

РН11. Організовувати освітній процес і проводити педагогічну діяльність у сфері фізики та/або астрономії, забезпечувати відповідне наукове, навчально-методичне та нормативне забезпечення.

### **У результаті засвоєння матеріалу дисципліни аспірант повинен:**

**знати** основні положення і властивості ядерної та нейтронної фізики, що стосуються роботи ядерних реакторів;

**вміти** проводити нейтронно-фізичний розрахунок ядерних реакторів.

### **Передумови для навчання**

Перелік попередньо прослуханих дисциплін / Знання, вміння, навички, якими повинен володіти здобувач, щоб приступити до вивчення дисципліни

Для успішного засвоєння дисципліни аспірант повинен мати ґрунтовні знання, вміння і навички з дисциплін математичного і фізичного спрямування, які входять до стандартної програми підготовки бакалаврів на фізичних (радіофізичних) факультетах ВНЗ, а також вільно користуватись персональним комп'ютером. Компетентності, знання, уміння та досвід, одержані в процесі вивчення кредитного модуля «Теорія ядерних реакторів», є необхідними для розуміння фізичних процесів, що відбуваються при роботі ядерних реакторів, а також проведення розрахунків параметрів реакторів.

### **Зміст навчальної дисципліни**

Дисципліна структурно складається з восьми розділів:

Розділ 1. Фізичні основи ядерних реакторів.

Розділ 2. Дифузія нейтронів.

Розділ 3. Уповільнення нейтронів.

Розділ 4. Вікова теорія.

Розділ 5. Кінетична теорія нейтронів.

Розділ 6. Критичні розміри реактора.

Розділ 7. Гетерогенні реактори.

Розділ 8. Реактори на швидких нейтронах.

## Матеріально-технічне (програмне) забезпечення дисципліни

Для виконання практичних завдань за темою курсу потрібен лише персональний комп'ютер, підключений до мережі Інтернет. Станом на 2023 р. ця вимога легко задовольняється для аспірантів ІЯД НАН України за рахунок наявного обладнання у відділах, де виконується наукова робота, а також за рахунок особистої комп'ютерної техніки аспірантів. Отже, кожний аспірант має необхідні умови для виконання завдань курсу.

Сторінка курсу на платформі Інституту (персональна навчальна система)

### Рекомендовані джерела

*Базова література:*

1. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов / Под ред. Г.А.Батя. – М.: Энергоиздат, 1982. – 511 с.
2. Широков С. В. Фізика ядерних реакторів. – Видання друге: Вища школа, 1998. – с 288.
3. Широков С. В. Ядерні енергетичні реактори. К. 1997, с. 280.

*Допоміжна література:*

4. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы. – М.: Энергоиздат, 1990. – 281 с.
5. Галаин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. – М.: Энергоиздат, 1990. – 536 с.
6. Широков С.В. Гальченко В.В. Посібник з вирішення задач з курсів «Теорія ядерних реакторів», «Енергетичні ядерні реактори», «Нестационарні в ядерних реакторах». Київ, НТУУ «КПІ», 2006. 80 с.

### Навчальний контент

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

Загальний методичний підхід до викладання навчальної дисципліни визначається як комунікативно-когнітивний та професійно орієнтований, згідно з яким у центрі освітнього процесу знаходиться аспірант – суб'єкт навчання і майбутній науковець.

#### *Лекційні заняття*

**Вступ.**

**Лекція 1.** Атомна енергетика та шляхи її розвитку. Задача курсу «Теорія ядерних реакторів». Необхідність використання ядерної енергетики. Реактори нового покоління.

**Розділ 1. Фізичні основи ядерних реакторів.**

**Лекція 2.** Загальні відомості про будову ядра. Властивості нейтронів. Поняття складового ядра. Визначення маси ядер та атомів. Визначення енергії зв'язку ядер. Взаємодія нейтронів з ядрами. Ділення ядер. Визначення енергії ділення та синтезу ядер.

**Лекція 3.** Ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів. Основні характеристики середовища що розмножується та ядерного реактора. Формула чотирьох співмножників. Баланс нейтронів в ядерному реакторі. Ланцюгова реакція. Коефіцієнт розмноження

**Розділ 2. Дифузія нейтронів.**

**Лекція 4.** Закон Фіка. Дифузія нейтронів. Основні поняття та визначення. Поняття осередненої довжини та транспортного перерізу. Їх визначення для ізотропного та анізотропного середовища з поглинанням та без поглинання. Рівняння переносу нейтронів. Одношвидкісне рівняння переносу нейтронів.

**Лекція 5.** Рівняння дифузії нейтронів. Рішення рівнянь дифузії для різних джерел нейтронів. Фізичний зміст довжини дифузії. Інтегральне рівняння переносу нейтронів. Метод функцій Гріна. Рівняння Пайерлса. Вирішення задач з використанням інтегрального рівняння

переносу нейтронів

### **Розділ 3. Уповільнення нейтронів.**

**Лекція 6.** Уповільнення нейтронів. Зміна енергії нейтронів при взаємодії з ядрами. Закон розсіювання нейтронів. Функція розсіювання. Характеристики уповільнювача. Середньологарифмічний дискремент енергії. Властивість уповільнювача та коефіцієнт уповільнення. Вибір уповільнювача для різних типів реакторів

**Лекція 7.** Уповільнення нейтронів в середовищі при відсутності поглинань. Уповільнення нейтронів в водневому середовищі що не поглинає. Уповільнення в середовищі з масовим числом  $A > 1$ . Уповільнення нейтронів в системі, що містить ядра декількох сортів. Особливості розрахунку щільності уповільнення нейтронів за відсутності поглинання. Уповільнення нейтронів в середовищі за наявності поглинань. Уповільнення нейтронів в середовищі при поглинанні. Імовірність запобігання резонансного захоплення нейтронів. Особливості розрахунку щільності уповільнення нейтронів за наявності поглинання

### **Розділ 4. Вікова теорія.**

**Лекція 8.** Вікова теорія. Сутність вікової теорії. Вікове рівняння при відсутності поглинань. Рішення вікового рівняння для плаского, точкового та лінійного джерела нейтронів.

**Лекція 9.** Фактори, що впливають на зміну віку нейтронів. Межі застосування вікової теорії. Уповільнення нейтронів. Повтор матеріалу попереднього модуля

### **Розділ 5. Кінетична теорія нейтронів.**

**Лекція 10.** Кінетичне рівняння переносу нейтронів. Рівняння переносу нейтронів Больцмана. Рішення кінетичного рівняння реактора. Кінетичне рівняння реактора для теплової групи нейтронів

**Лекція 11.** Спряжені рівняння реактора. Функція цінності нейтронів. Рівняння функції. Методи розв'язку кінетичних рівнянь реактора. Метод поступового наближення. Метод дифузійного наближення. Рівняння Пайерлса

### **Розділ 6. Критичні розміри реактора.**

**Лекція 12.** Теорія критичних розмірів реактора. Рівняння для матеріального параметра реактора в дифузійно-віковому наближенні. Умови критичності реактора. Визначення критичних розмірів реактора без відбивача. Визначення критичних розмірів сферичного гомогенного реактора. Визначення критичних розмірів циліндричного гомогенного реактора

**Лекція 13.** Визначення критичних розмірів реактора з відбивачем. Гомогенний реактор з відбивачем в одноступеневому наближенні. Реактор з відбивачем у вигляді нескінченної пластини. Сферичний реактор з відбивачем. Циліндричний реактор з відбивачем. Гомогенний реактор з відбивачем в двохгруповому наближенні. Кінетичне рівняння з відбивачем в двохгруповому наближенні. Критичні розміри для гетерогенного реактора з відбивачем

### **Розділ 7. Гетерогенні реактори.**

**Лекція 14.** Загальні положення теорії гетерогенних реакторів. Теорія чарунки. Переваги та недоліки гетерогенних систем. Метод імовірності перших зіткнень. Елементарна паливна чарунка реакторів РВПК, ВВЕР. Представлення рівняння Пайерлса у вигляді системи алгебраїчних рівнянь

**Лекція 15.** Визначення коефіцієнтів формули чотирьох співмножників. Коефіцієнт розмноження на швидких нейтронах. Імовірність запобігання резонансній втраті. Коефіцієнт використання теплових нейтронів.

### **Розділ 8. Реактори на швидких нейтронах.**

**Лекція 16.** Реактори на швидких нейтронах. Кінетичне рівняння реакторів на швидких нейтронах. Система багатогрупових рівнянь на швидких нейтронах. Елементарна паливна чарунка реактора БН.

## Практичні заняття

Практичні заняття присвячені нейтронно-фізичному розрахунку реакторів ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 за допомогою 4-х групового методу.

Крім того, на практичних заняттях проводиться розв'язок по темам:

- Тема 1. Атомне ядро. Атомна енергія.
- Тема 2. Ланцюгова реакція. Коефіцієнт розмноження.
- Тема 3. Енерговиділення в активній зоні. Потужність реактора.
- Тема 4. Вигоряння, шламування, відтворення і отруєння палива.

## Самостійна робота аспіранта

Самостійна робота здобувача наукового ступеня доктора філософії є основним засобом засвоєння навчального матеріалу у вільний від навчальних занять час і включає:

Підготовка до поточних практичних занять – 16 год;

Виконання поточних практичних завдань – 16 год;

Опанування матеріалів лекцій та додаткових питань із застосування основної та додаткової літератури – 32 год;

Індивідуальні консультації з викладачем – 6 год;

## Політика та контроль

### Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед аспірантом:

- **правила відвідування занять:** заняття проводяться відповідно до розкладу згідно із правилами встановленими [Положенням про організацію освітнього процесу в Інституті ядерних досліджень НАН України](http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/creat_ed_inet.pdf). ([http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/creat\\_ed\\_inet.pdf](http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/creat_ed_inet.pdf)), присутність на заняттях є добровільною, і не допускається примушування до будь-яких дій в навчальному процесі без особистої згоди аспіранта. Відповідно до робочої навчальної програми даної дисципліни, бали нараховують за відповідні види навчальної активності на лекційних та практичних заняттях відповідно до [Уніфікованої системи оцінювання навчальних досягнень аспірантів](http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/sys_test.pdf). ([http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/sys\\_test.pdf](http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/sys_test.pdf));

- **правила поведінки на заняттях:** аспірант має можливість отримувати бали за відвідування лекційних та практичних занять, а також за відповідні види навчальної активності на лекційних та практичних заняттях, передбачені робочою навчальною програмою дисципліни. Використання засобів зв'язку для пошуку інформації на гугл-диску викладача, в інтернеті, в дистанційному курсі на платформі Інституту здійснюється за вказівкою викладача;

- **політика дедлайнів та перескладань:** аспірант повинен набрати не менше 30 балів поточного контролю, щоб бути допущеним до підсумкового контролю; передбачено індивідуальне проходження поточного контролю для нарахування відповідних балів, але не пізніше ніж за тиждень до призначеного іспиту (заліку). Перескладання іспиту передбачено (не більше одного разу):

- автоматично, якщо аспірант за роботу в семестрі та на іспиті набрав 30-59 балів; або

- за письмовою заявою аспіранта на ім'я гаранта навчальної програми у разі наявності обставин, що суттєво вплинули на рівень підготовки та/або моральний стан аспіранта;

- **політика щодо академічної доброчесності:** Положення встановлює загальні моральні принципи, правила етичної поведінки осіб та передбачає політику академічної доброчесності для осіб, що працюють і навчаються в Інституті, якими вони мають керуватись у своїй діяльності, в тому числі при вивченні та складанні контрольних заходів з дисципліни «Основи технічної експертизи в галузі державного контролю за міжнародними передачами товарів подвійного використання»;

- **при використанні цифрових засобів зв'язку з викладачем** (мобільний зв'язок, електронна пошта, переписка на форумах та у соцмережах тощо) необхідно дотримуватись загальноприйнятих етичних норм, зокрема бути ввічливим та обмежувати спілкування

робочим часом викладача.

## Система оцінювання результатів навчання

### Види контролю та система оцінювання результатів навчання

Поточний контроль: блиц-опитування на лекції за темою попередньої лекції, опитування і перевірка домашніх завдань на практичних заняттях, оцінювання рефератів та їх презентацій перед аудиторією.

Підсумковий контроль: іспит (залік).

Умови допуску до підсумкового контролю: допускаються усі аспіранти, крім тих, чий поточні знання оцінені на “незадовільно” (0 – 29 балів).

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

- 1) на лекційних та практичних заняттях (опитування і перевірка домашніх завдань);
- 2) за реферат;
- 3) за відповідь на іспиті (заліку).

### Система рейтингових балів

1) Практичні та лекційні заняття.

*Теоретичне питання (бліц-опитування):* кожна правильна і змістовна відповідь – 1 бал, максимальна кількість балів за семестр – 4 бали.

*Теоретичне питання (ускладнене):* кожна правильна і змістовна відповідь – 2 бали, максимальна кількість балів за семестр – 8 балів.

*Розв’язування задач:* кожне правильне розв’язання – 4 бали, максимальна кількість балів за семестр – 8 балів.

*Вибірковий контроль домашніх завдань:* кожне правильно виконане домашнє завдання – 5 балів, максимальна кількість балів за семестр – 10 балів.

2) Відвідування лекцій та семінарів.

*Кожна відвідана лекція (1 акад. година) – 0,5 бала, максимально за семестр – 8 балів.*

*Кожне відвідане практичне заняття (1 акад. година) – 0,5 бала, максимально за семестр – 7 балів.*

3) Підготовка і презентація рефератів.

*Повнота розкриття теми – максимально 10 балів.*

*Якість підготовленої презентації і виступу перед аудиторією (до 10 хв.) – максимально 5 балів.*

4) Іспит (Залік).

*Критерії оцінювання.* Завдання містить 2 основні теоретичні питання, кожне з яких оцінюється у 10 балів (максимум) та 2 задачі (чи додаткові запитання), які оцінюються у 10 балів. Всього  $2 \cdot 10 + 2 \cdot 10 = 40$  балів (максимум).

*Нарахування балів за відповідь на теоретичне питання:*

- повна розгорнута відповідь (не менше 90 % потрібної інформації) – 10 балів;
- достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації) – 8 балів;
- неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації) – 4 бали;
- незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) – 0.

*Нарахування балів за розв’язання задачі:*

- правильний кінцевий результат і повне пояснення – 10 балів;
- неправильний кінцевий результат, але правильний підхід – 5 балів;
- нерозв’язана задача – 0.

| <b>Накопичування рейтингових балів з навчальної дисципліни</b>  |             |   |               |
|---|-------------|---|---------------|
| <b>Види навчальної роботи</b>   |             | <b>Мах кількість балів</b>  |               |
| Навчальна активність на лекційних та практичних заняттях  |             | 45  |               |
| Реферат   |             | 15  |               |
| Іспит   |             | 40  |               |
| <b>Максимальна кількість балів</b>  |             | <b>100</b>  |               |
| <b>Відповідність шкали оцінювання ЄКТС національній системі оцінювання та ІЯД НАНУ</b>  |             |   |               |
| Сума балів за всі види навчальної діяльності  | Оцінка ЄКТС | Оцінка за національною шкалою   |               |
|   |             | для екзамену (іспиту), диференційованого заліку, курсового проекту (роботи), практики, тренінгу | для заліку    |
| 90 – 100  | A           | відмінно  | зараховано    |
| 82 – 89   | B           | добре   |               |
| 74 – 81   | C           | задовільно<br>достатньо   |               |
| 64 – 73   | D           |   |               |
| 60 – 65   | E           | незадовільно  | не зараховано |
| 35 – 59   | FX          |   |               |
| 1 – 34  | F           |   |               |
| <i>Більш детальну інформацію щодо компетентностей, результатів навчання, методів навчання, форм оцінювання, самостійної роботи наведено у Робочій програмі навчальної дисципліни, див сайт ІЯД.</i> |             |   |               |

Силабус затверджено на засіданні вченої ради ІЯД НАНУ « 5 » липня 2023 р. Протокол № 6.