

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор

Микола ШУЛЬГА
« 30 » 11 2022 р.



Робоча програма
навчальної дисципліни

Радіаційне матеріалознавство

Назва навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Доктор філософії
галузь знань	10 Природничі науки
спеціальність	104 фізика та астрономія
освітня програма	освітньо-наукова програма «Фізика та астрономія»
спеціалізація	
вид дисципліни	обов'язкова за вибором ННЦ ХФТІ
Інститут	Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»

2022 / 2023 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження
Науково-технічною радою ННЦ ХФТІ

від “ 29 ” 11 2022 року, протокол № 6

РОЗРОБНИК ПРОГРАМИ:

д.т.н., с.н.с, Микола ПИЛИПЕНКО

Програму схвалено на засіданні Науково-технічної ради Інституту
фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій ННЦ ХФТІ
(ІФТТМТ)

від “ 17 ” 10 2022 року, протокол № 1.

Директор ІФТТМТ ННЦ ХФТІ


(підпис)

Микола АЗАРЕНКОВ
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньо-професійної програми
«Фізика та астрономія»

назва освітньої програми

Гарант освітньо-професійної програми «Фізика та астрономія»


(підпис)

Віктор ТКАЧЕНКО
(прізвище та ініціали)

Вступ

Дисципліна «Радіаційне матеріалознавство» є частиною професійної підготовки аспірантів за вибором ННЦ ХФТІ за напрямом 10 Природничі науки, за спеціальністю – 104 фізика і астрономія, яка викладається протягом другого року навчання.

1. ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

1.1. Метою викладання навчальної дисципліни «Радіаційне матеріалознавство» є отримання знань про вплив опромінення високоенергетичними частинками різної природи та енергії на властивості матеріалів, головним чином, на службові характеристики матеріалів ядерних енергетичних пристроїв; вивчення механізмів радіаційного пошкодження та відбору матеріалів з високою радіаційною стійкістю для діючих реакторів та реакторів наступних поколінь.

1.2. Основними завданнями вивчення дисципліни «Радіаційне матеріалознавство» є:

- формування у аспірантів фізичних уявлень щодо процесів взаємодії опромінювання з речовиною;
- опанування основними типами пошкоджень, що утворюються при опроміненні та стадії утворення дефектної структури в опромінених матеріалах;
- наведення основних експериментальних фактів зміни властивостей реакторних матеріалів при опроміненні, що практично використовуються в реакторобудуванні;
- ознайомлення аспірантів із практичним використанням дослідження радіаційних пошкоджень у матеріалах з метою розробки нових радіаційно-стійких матеріалів;
- ознайомлення аспірантів із методологією наукової творчості у галузі радіаційного матеріалознавства, яка пройшла шлях від перших фактів по поведінці матеріалів під дією нейтронного опромінення до теорії цілеспрямованого розв'язування складних науково-технічних задач і проблем.

1.2.1. Формування інтегральних компетентностей

Здатність продукувати нові ідеї, розв'язувати комплексні проблеми науково-дослідницької та інноваційної діяльності у сфері фізики, застосовувати методологію науково-дослідницької та педагогічної діяльності, а також проводити власне наукове дослідження, результати якого мають наукову новизну, теоретичне та практичне значення.

1.2.2. Формування наступних загальних компетентностей

ЗК 01. Здатність генерувати нові ідеї (креативність).

ЗК 02. Здатність працювати в міжнародному контексті.

ЗК 03. Здатність розв'язувати комплексні наукові проблеми на основі системного наукового світогляду та загального культурного кругозору із дотриманням професійної етики та академічної доброчесності.

1.2.3. Формування наступних спеціальних (фахових) компетентностей

СК 01. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру в сфері фізики, інтегрувати знання з різних галузей, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень.

СК 02. Здатність відстежувати тенденції розвитку фізики та/або астрономії, їх прикладних застосувань, критично переосмислювати наявні знання та методи фундаментальних та прикладних наукових досліджень.

СК 06. Здатність застосовувати сучасні методи, методики, технології, інструменти та обладнання для проведення прикладних та фундаментальних наукових досліджень у галузі фізики.

СК 14. Компетентність у сфері радіаційного матеріалознавства.

1.3. Кількість кредитів – 4.

1.4. Загальна кількість годин – 120.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни:

Опис навчальної дисципліни «Радіаційне матеріалознавство»

Галузь знань, напрям підготовки, спеціальність, освітньо-кваліфікаційний рівень	
Галузь знань	10 – Природничі науки
напрямок підготовки	104 – фізика та астрономія
спеціальність	
освітньо-кваліфікаційний рівень	Доктор філософії
Мова навчання	Українська
Характеристика навчальної дисципліни	
Вид	Обов'язкова за вибором ННЦ ХФТІ
Загальна кількість годин	120
Кількість кредитів ECTS	4
Кількість змістових модулів	2
Форма контролю	іспит
Показники навчальної дисципліни	
Рік підготовки	II
Лекційні заняття	32
Практичні заняття	16
Самостійна робота	70
Консультації	2

1.6. Передумови для вивчення дисципліни.

Знання аспірантами фізики твердого тіла, фізичного металознавства, фізики міцності і пластичності в межах стандартних університетських курсів, другого освітнього рівня (магістр).

1.7. Заплановані результати навчання.

Під час вивчення дисципліни аспіранти набувають теоретичних знань та практичних навичок з радіаційного матеріалознавства, основних процесів, що відбуваються при взаємодії опромінення з твердим тілом та основних явищ радіаційної пошкоджуваності матеріалів, а також відбору матеріалів з високою радіаційною стійкістю для діючих реакторів та реакторів наступних поколінь. Аспіранти мають мати:

- здатність продемонструвати глибинні професійні знання, науковий і культурний кругозір рівня здобувача наукового ступеня доктора філософії, зокрема шляхом засвоєння узагальнення та систематизації знань та основних концепцій, теоретичних та практичних проблем радіаційного матеріалознавства;
- здатність ефективно використовувати набуті у результаті вивчення навчальної дисципліни компетентності, знання, уміння та навички для того, щоб у процесі майбутньої роботи на посадах наукових працівників засвоювати основні концепції, розуміння теоретичних і практичних проблем, знання історії розвитку та сучасного стану радіаційного матеріалознавства, оволодіння термінологією з досліджуваного наукового напрямку;
- здатність використовувати знання щодо основних принципів та положень теоретичної та практичної методології наукової творчості при розв’язуванні конкретних завдань при визначенні життєвої стратегії своєї творчої діяльності, спрямованої на проведення експериментальних та теоретичних наукових досліджень у галузі сучасної фізики і астрономії, зокрема в радіаційному матеріалознавстві.

Згідно з вимогами освітньо-наукової програми здобувачі повинні:

РН 01. 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.

РН 02. Вільно презентувати та обговорювати з фахівцями і нефахівцями результати досліджень, наукові та прикладні проблеми фізики державною та іноземною мовами, кваліфіковано відображати результати досліджень у наукових публікаціях в провідних міжнародних наукових виданнях.

РН 07. Розробляти та реалізовувати наукові та/або інноваційні проекти, які дають можливість переосмислити наявне та створити нове цілісне знання та/або професійну практику і розв’язувати значущі наукові та технологічні

проблеми фізики з дотриманням норм академічної етики і врахуванням соціальних, економічних, екологічних та правових аспектів.

РН 08. Глибоко розуміти загальні принципи і методи природничих наук, а також історію розвитку та методологію наукових досліджень, застосувати їх у власних дослідженнях у сфері фізики (астрономії) та у викладацькій практиці.

РН 15. Знати загальні вимоги до матеріалів ядерних реакторів; сучасний статус конструкційних матеріалів для існуючих та перспективних ядерних реакторів; основні процеси, що відбуваються при взаємодії прискорених іонів з речовиною; основні явища радіаційної пошкоджуваності в залежності від різних умов опромінення (щільності потоку часток, їх енергії (енергетичний спектр), температури, часу (доза опромінення). Уміти застосовувати здобуті знання для отримання, аналізу та пояснення експериментальних даних, здобутих за різних умов радіаційного впливу на матеріали, відбору і розробці перспективних матеріалів, які мають високий опір впливу опроміненя.

РН 42. Самостійно планувати та виконувати експерименти, оцінювати отримані результати.

РН 43. Самостійно виконувати експериментальні дослідження та застосовувати дослідницькі навички за професійною тематикою.

РН 44 Аргументувати вибір методів розв'язування спеціалізованої задачі, критично оцінювати отримані результати та захищати прийняті рішення.

Контроль знань аспіранта здійснюється за модульно-рейтинговою системою. Змістовий модуль 1 включає теми 1-4, змістовий модуль 2 – теми 5-8.

2. ЗМІСТ ТА СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Зміст навчальної дисципліни

Модуль 1. Матеріали ядерних реакторів та процеси у них при радіаційному опроміненні:

ТЕМА 1. Вступ до курсу.

Загальна характеристика предмета курсу.

Мета і завдання курсу. Опис дисципліни.

Загальні питання радіаційного матеріалознавства.

Загальні визначення та основні поняття радіаційного матеріалознавства.

ТЕМА 2. Конструкційні матеріали ядерної енергетики.

Загальні вимоги до матеріалів ядерних реакторів.

Сталі та їх маркування.

Структура і клас сталі. Діаграма Шефлера.

Матеріали корпусів реакторів на теплових нейтронах.

Аустенітні нержавіючі сталі.

Ферито-мартенситні сталі.

Цирконієві сплави.

ТЕМА 3. Первинні процеси у твердих тілах при радіаційному впливі.

Процеси взаємодії опромінювання з речовиною.

Радіаційне пошкодження матеріалів.

Найпростіші типи пошкоджень.

Пари Френкеля. Первинно вибиті атоми.

Модель Кічина-Піза.

Каскади атомних зіткнень та їх вплив на мікроструктурну еволюцію.

ТЕМА 4. Точкові дефекти в кристалічних ґратках і реакції між ними.

Конфігурації міжвузлових і вакансійних комплексів.

Взаємодія дефектів.

Зародження і ріст дислокаційних петель.

Міжвузлові дислокаційні петлі.

Вакансійні петлі.

Реакції між рухомим і нерухомим дефектом.

Модуль 2. Фізичні явища радіаційної пошкоджуваності твердих тіл:

ТЕМА 5. Радіаційне зростання та розпухання матеріалів.

Уявлення про причини радіаційного зростання.

Радіаційне зростання конструкційних матеріалів.

Явище газового розпухання паливних матеріалів.

Розпухання палива, зумовлене твердими продуктами поділу.

Вакансійне розпухання металевих сплавів під дією опромінення.

ТЕМА 6. Радіаційно-індуковані перетворення та прискорені процеси.

Явище радіаційної гомогенізації сплавів урану.

Аморфізація сплавів під опроміненням.

Сегрегація елементів у сплавах при опроміненні.

Радіаційно-індукована сепарація атомів у сплавах.

Упорядкування та розупорядкування сплавів під опроміненням.

Радіаційно-прискорена дифузія.

ТЕМА 7. Радіаційне зміцнення та окрихчення.

Вплив умов опромінення на зміцнення.

Низькотемпературне радіаційне окрихчення.

Особливості впливу опромінення на механічні властивості.

Високотемпературне радіаційне окрихчення матеріалів.

ТЕМА 8. Радіаційна повзучість матеріалів.

Закономірності радіаційної повзучості

Механізми радіаційної повзучості

Релаксація напружень в матеріалах при опроміненні

Радіаційна ерозія поверхні

Розпилення матеріалів

Структура навчальної дисципліни

Назва лекції			
	Лекції	Практичні/семінарські заняття	Самостійна робота
Змістовний модуль 1. Матеріали ядерних реакторів та процеси у них при радіаційному опроміненні			
Тема 1. Вступ до курсу	2	2	8
Тема 2. Конструкційні матеріали ядерної енергетики	2	2	9
Тема 3. Первинні процеси у твердих тілах при радіаційному впливі	6	2	9
Тема 4. Точкові дефекти в кристалічних ґратках і реакції між ними	6	2	9
Разом за змістовний модуль 1	16	8	35
Змістовний модуль 2. Фізичні явища, що протікають у твердих тілах під дією опромінення			
Тема 5. Радіаційне зростання та розпухання матеріалів	4	2	9
Тема 6. Радіаційно-індуковані перетворення та прискорені процеси	4	2	9
Тема 7. Радіаційне зміцнення та окрихчування	4	2	9
Тема 8. Радіаційна повзучість матеріалів	4	2	8
Разом за змістовний модуль 2	16	8	35
Всього	32	16	70

Загальний обсяг: 120 год., зокрема: лекцій – 32 год.; практичних/семінарів – 16 год., самостійної роботи – 70 год., консультацій – 2 год.

Тематичний план практичних та семінарських занять

№ з/п	Тема	Години
1	Загальні питання радіаційного матеріалознавства	2
2	Конструкційні матеріали ядерної енергетики	2
3	Первинні процеси у твердих тілах при радіаційному впливі	2
4	Точкові дефекти в кристалічних ґратках і реакції між ними	2

5	Радіаційне зростання та розпухання матеріалів	2
6	Радіаційно-індуковані перетворення та прискорені процеси	2
7	Радіаційне зміцнення та окрихчування	2
8	Радіаційна повзучість матеріалів	2
	Всього	16

Самостійна робота

№ з/п	Тема	Години
1	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами 1 модулю.	35
2	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами 2 модулю.	35
	Всього	70

Запитання для самоперевірки

1. Які вимоги пред'являють до матеріалів ядерних реакторів?
2. Назвіть основні структури систем Fe-C в області «сталевий» концентрації вуглецю.
3. Які принципи маркування легованих конструкційних сталей?
4. Які елементи належать до феритостабілізуючих, а які до аустенітостабілізуючих? Яка їхня роль в створенні сталей різного класу і жароміцних структур?
5. До яких наслідків може призвести протікання міжкристалітної корозії і корозійного розтріскування оболонки твелів, зробленої з аустенітної корозійностійкої сталі?
6. У чому перевага цирконію перед сталями?
7. Які позитивні властивості має ніобій як легуючий елемент в цирконії?
8. Які властивості повинні мати матеріали органів регулювання реактора і які існують основні матеріали для регулюючих стержнів реактора?
9. Яка фізична ефективність гафнію при його застосуванні як поглинаючого матеріалу?
10. Як впливає чистота гафнію на його механічні властивості?
11. Дайте характеристику корозійній стійкості гафнію.
12. Якими є необхідні умови утворення радіаційних дефектів при малих енергіях ПВА?
13. Що таке порогова (гранична) енергія радіаційного пошкодження?
14. Які основні припущення моделі Кінчина-Піза?
15. Як оцінити рівень радіаційного пошкодження матеріалів?
16. Які типи каскадів можливі при опроміненні твердих тіл?
17. Які критерії визначення типу каскаду?

18. Як розподіляються дефекти у каскадній області пошкодження різних каскадів?
19. У чому особливості опромінення нейтронами матеріалів, що діляться?
20. Які основні закономірності радіаційного зростання матеріалів, що діляться?
21. Як впливає на газове розпухання урану ступінь вигорання та температура опромінення?
22. Якими способами можна зменшити газове розпухання матеріалів, що діляться?
23. Як залежить вакансійне розпухання від температури та флюенсу опромінення?
24. Як залежить радіаційне зміцнення металів та сплавів від умов опромінення?
25. Як залежить радіаційне окрихчення від умов опромінення?
26. Як впливають структура та легуючі добавки на зміцнення сталей?
27. Від яких чинників залежить радіаційна повзучість матеріалів?
28. У чому проявляється і від чого залежить релаксація напружень у матеріалах під опроміненням?
29. Які механізми радіаційно-індукованої сегрегації під опроміненням?
30. Як залежить коефіцієнт фізичного розпилення від умов опромінення?
31. Що таке хімічне розпилення? Коли воно спостерігається?
32. Що таке блістеринг та флекінг?
33. Як залежить коефіцієнт ерозії через радіаційний блістеринг від умов опромінення?

Запитання до екзамену

1. Загальні вимоги до матеріалів ядерних реакторів.
2. Сучасний статус конструкційних матеріалів для існуючих та перспективних ядерних реакторів.
3. Структура і клас сталі. Діаграма Шефлера.
4. Сталі перлітного класу. Характеристика їх структури.
5. Основні легуючі елементи і їх значення в хромистих сталях.
6. Ферито-мартенситні сталі.
7. Корозійностійкі сталі.
8. Назвіть основні легуючі елементи і їх роль в аустенітних сталях.
9. Розшифруйте принципи маркування легованих конструкційних сталей. Які елементи і в якій кількості містяться в сталях: 30ХГСА, 45ХН2МФ, 16Х12В2ФТаР, 15Х2НМФАА, 10Х13М2БФР, 12Х18Н12Т, 04Х15Н35М2БТЮР?
10. Міжкристалітна корозія. У чому причина схильності аустенітних корозійностійких сталей до міжкристалітної корозії?
11. Назвіть переваги і недоліки Zr як реакторного матеріалу.
12. Які сплави застосовуються для виготовлення каналних труб, чохлів ТВС і оболонок твелів для реактора?

13. Сучасні проблеми в галузі поглинаючих матеріалів. (n, α) - і (n, γ) -поглиначі. У чому їх відмінність?
14. Процеси взаємодії опромінювання з речовиною.
15. Радіаційне пошкодження матеріалів.
16. Найпростіші типи пошкоджень.
17. Пари Френкеля. Первинно вибиті атоми.
18. Каскади атомних зіткнень та їх вплив на мікроструктурну еволюцію.
19. Основні радіаційні ефекти при опроміненні матеріалів.
20. Сучасні уявлення про механізми радіаційного зростання.
21. Чинники від яких залежить радіаційне зростання конструкційних матеріалів.
22. Механізм газового розпухання матеріалів.
23. Вакансійне розпухання конструкційних матеріалів.
24. Види радіаційного окрихчення при опроміненні металів та сплавів.
25. Низькотемпературне радіаційне окрихчення.
26. Механізми високотемпературного радіаційного окрихчення (ВТРО). Як впливають температура, флюенс та спектр нейтронів на ВТРО? Засоби зменшення ВТРО.
27. Основні механізми радіаційної повзучості конструкційних матеріалів.
28. Радіаційно-прискорені та радіаційно-індуковані процеси під опроміненням.
29. Радіаційно-індукована сепарація атомів у сплавах.
30. Радіаційно-прискорена дифузія.
31. Основні механізми радіаційної ерозії металів та сплавів під опроміненням.
32. Основні параметри та механізми радіаційного блістерингу. В чому відмінність блістерингу від флекінгу?

Методи контролю

Поточний та семестровий підсумковий контроль: екзамен (іспит).

Схема нарахування балів

Матеріал курсу «Радіаційне матеріалознавство» згідно навчальної програми містить 8 тем. Темі розподілені по модулях відповідно: I модуль – 4 теми (від 1 до 4), II модуль – 4 теми (від 5 до 8). Оцінка роботи здобувачів проводиться за модульно-рейтинговою системою і включає такі види роботи над курсом: практичні роботи, засвоєння теоретичного матеріалу та домашні завдання.

Теми за курсом			Разом
Модуль 1	Модуль 2	Екзамен	100
T1-T4	T5-T8		
30	30		

T1, T2 ... – теми модулів.

Оцінка за модуль складається з оцінки за практикум, поточний контроль, виконання домашніх письмових завдань. Здобувачі повинні виконати та оформити всі практичні роботи.

Здобувачі пишуть відповідно до кожного модуля письмові контрольні роботи, кожна з яких оцінюється максимум 10-ма балами. Решта 20 балів – це середня оцінка поточного контролю за відповідними темами, колоквиуми (усні), самостійні письмові роботи тощо.

Для допуску до підсумкового семестрового контролю здобувач в сумі за практикум, поточний контроль, виконання домашніх письмових завдань має набрати не менше 30-ти балів з 60-ти можливих, тобто не менше 50% від максимально можливого.

На екзаміні здобувач може одержати від 20 до 40 балів. Між 0 та 20 балами оцінка не виставляється, екзамен вважається не зданим. Бали, одержані на екзаміні від 20 до 40 додаються до балів, одержаних у семестрі (30-60 балів). За цією сумою згідно таблиці шкали оцінювання виставляється підсумкова оцінка до залікової книжки.

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка
	за чотирирівневою шкалою оцінювання
90-100	відмінно
70-89	добре
50-69	задовільно
1-49	незадовільно

Критерії оцінювання

питань екзаменаційного білету (контрольної роботи)

Екзаменаційний білет (контрольна робота) містить кілька завдань (теоретичні питання або задачі). Кожне завдання має свій ваговий бал (вказується у дужках біля питання) та оцінюється окремо. Сумарно за всі відповіді на екзаменаційні питання можна отримати максимально 40 балів. Сумарний бал за контрольну роботу вказується в тексті відповідної роботи.

	Характеристика відповіді на кожне з питань екзаменаційного білету (контрольної роботи)	% від max балу за відповідь на питання
	Повна та вірна відповідь на питання або у повному обсязі правильно вирішена практична задача білету	100 %
	Повна відповідь з незначними помилками (або незначні помилки у розрахунках практичних завдань за наявності вірної розрахункової формули);	80-95 %
	Неповна, але вірна відповідь (або значні помилки у	50-80 %

	розрахунках практичних завдань за наявності вірної розрахункової формули для розв'язання практичних завдань);	
	Відповідь повна, але містить грубі помилки (або вирішення практичних завдань білету містить грубі помилки, розрахункові формули для розв'язання практичних завдань містять помилки)	30-50 %
	Неповна відповідь з суттєвими помилками	5-30 %
	Невірна відповідь	0-5 %
	Відсутня відповідь на теоретичне питання (або відсутнє вирішення практичних завдань білету)	0 %

Рекомендована література

Основна література

1. Alekseenko N.N. Radiation Damage of Nuclear Power Plant Pressure Vessel Steels. – American Nuclear Society, 1997. – 282 p.
2. Frost B.R.T. Nuclear Fuel Elements: Design, Fabrication and Performance – Pergamon Press Ltd, Oxford, 1982 – 274 p.
3. Hughes A.E., Pooley D. Real Solids and Radiation. – Wykeham publications (London) Ltd and Winchester Springer-Verlag New York Inc, 1975. – 357 p.
4. Koutský J., Kočík J. Radiation Damage of Structural Materials. – Elsevier, 1994. – 361 p.
5. Lehmann Chr. Interaction of Radiation with Solids and Elementary Defect Production – North-Holland, Amsterdam, 1977. – 296 p.
6. Linga Murty K., Charit I. An Introduction to Nuclear Materials: Fundamentals and Applications. – John Wiley & Sons, 2013. – 398 p.
7. Materials and Decision Support Systems in the Nuclear Power Industry. Monograph / O.Yefimov, M.Pylypenko, T.Potanina et al. – Lambert Academic Publishing. – 2020. – 135 p.
8. Ohtsuki Y.-H. Charged Beam Interaction with Solids. – Taylor and Francis; London (UK), 1983. – 248 p.
9. Was G.S. Nuclear Engineering and Radiological Sciences. Materials Science and Engineering. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 838 p.
10. Was G.S. Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 827 p.
11. Єфімов О.В., Пилипенко М.М. Конструкції, матеріали, процеси і розрахунки реакторів і парогенераторів АЕС: навч. посібник – Харків: Видавництво «Підручник НТУ «ХП», 2010. – 268 с.
12. Пилипенко М.М. Цирконій і його сплави – Харків: ФОП Панов А.М., 2020. – 348 с.
13. Радіаційне дефектоутворення і проблеми його опису: короткий огляд існуючих теоретичних підходів / І.М. Мриглод, О.В. Пацаган. – Л., 2003. – 26 с. (Препр. / НАН України. Ін-т фізики конденс. систем; ICMP-03-12U).

14. Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси, матеріали, конструкції, моделі / О.В.Єфімов, М.М.Пилипенко, Т.В.Потаніна та ін. – Харків: ТОВ «В справі», 2017. – 420 с.

Допоміжна література

1. Biersack J.P., Haggmark L.G. Monte-Carlo computer program for the transport of energetic ions amorphous targets / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1980. Т. 174. Р. 275-269.

2. Mollr W., Ekstein W. TRIDYN-aTRIM simulation code including dynamic composition changes / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1984. Т. В2. Р. 814-818.

3. Whittle K. Nuclear Materials Science. – IOP Publishing, Bristol, UK, 2016. – 16 p.

4. Wyatt L.M. Materials of Construction for Steam Power Plant. – Applied Science, 1976. – 256 p.

5. Пилипенко М.М. Гафній: отримання, рафінування, властивості – Харків: ФОП Панов А.М., 2020. – 236 с.

6. Хімічна корозія і захист металів: навчальний посібник / П.І. Стоєв, С.В. Литовченко, І.О. Гірка, В.Т. Грицина. – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2020. – 216с.

Посилання на інформаційні ресурси в Інтернеті, відео-лекції, інше методичне забезпечення

1. Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського
<http://www.nbuv.gov.ua/e-resources/>

2. Харківська державна наукова бібліотека ім В.Г. Короленка
<https://korolenko.kharkov.com/index.php>