

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Одеський державний екологічний університет

ЗАТВЕРДЖЕНО

на засіданні групи забезпечення спеціальності
протокол № 3 від «02» 11. 2021 року
Голова групи Герасимов О.І.

УЗГОДЖЕНО

Декан природоохоронного ф-ту
Чугай А.В.
(назва факультету, прізвище, ініціали)

СИЛЛАБУС

навчальної дисципліни

Теоретичні основи фізики іонізуючого випромінювання

(назва навчальної дисципліни)

Спеціальність 183 Технології захисту навколишнього середовища

(шифр та назва спеціальності)

Технології захисту навколишнього середовища

(назва освітньої програми)

бакалавр

(рівень освіти)

заочна

(форма навчання)

4

(рік навчання)

4/120

(семестр навчання)

(кількість кредитів ЕКТС/годин)

залік

(форма контролю)

кафедра загальної та теоретичної фізики

(кафедра)

Одеса, 2021 р.

1. ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Мета	Формування глибокого розуміння природи іонізуючого випромінювання, фізичного змісту законів та понять ядерної фізики. Знання характеристик та властивостей нуклонів та ядер; моделей ядер, радіоактивних розпадів, ядерних реакцій.
Компетентність	К23. Здатність оцінювати рівень екологічної загрози від радіаційного та інших техногенних випромінювань.
Результат навчання	ПР19. Вміти ідентифікувати спектри випромінювання, визначати кількісні характеристики вмісту та розсіювання радіонуклідів у довкіллі, проводити аналіз та ідентифікацію радіонуклідів.
Базові знання	знати властивості ядер, закони випромінювання та радіоактивного розпаду
Базові вміння	вміти оцінювати наслідки ядерних реакцій, енергії випромінюваних частинок.
Базові навички	На основі знань фізики іонізуючого випромінювання оцінювати ступінь небезпечності радіаційно-забруднених об'єктів, запобігати виникненню нещасних випадків і професійних захворювань працівників при роботі їх з джерелами іонізуючого випромінювання.
Пов'язані силлабуси	
Попередні дисципліни	Немає *)Теоретичною основою вибіркової дисципліни «Теоретичні основи фізики іонізуючого випромінювання» є квантова механіка, спеціальна теорія відносності, математичний аналіз та диференціальні рівняння в обсязі освітньо-професійної програми.
Наступні дисципліни	Немає *)Дисципліна є основою при вивченні деяких питань з курсів радіоекології та радіаційної безпеки.
Кількість годин	Лекції (настанов.): 2 год. консультації: 8 год. самостійна робота: 110 год.

2. ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

2.1. Лекційні модулі

Код	Назва модуля та тем	Кількість годин	
		аудиторні	СРС
ЗМ-Л1	Характеристики іонізуючого випромінювання Тема 1. Характеристики атомного ядра, моделі атомних ядер. Енергетичні спектри ядер.	1	10
	Тема 2. Види іонізуючого випромінювання та їх властивості. Альфа-, бетта- та гамма - випромінювання.		15
	Модульна тестова контрольна робота №1		5
ЗМ-Л2	Проходження ядерних частинок крізь речовину. Ядерні реакції. Тема 1. Розсіяння ядерних частинок. Переріз розсіяння.	1	10
	Тема 2. Ядерні реакції. Поділ та синтез атомних ядер. Спонтанний поділ.		10
	Тема 3. Поділ ізотопів урана під дією нейтронів. Ланцюгова реакція. Коефіцієнт розмноження. Ядерні реактори.		5
	Модульна тестова контрольна робота №2		5
	Разом	2	60

Консультації: Викладач: Курятников Владислав Володимирович, доцент кафедри загальної та теоретичної фізики, кандидат ф.-м. наук. (e-mail: kuryatnikov1@ukr.net). Сайт кафедри загальної та теоретичної фізики ОДЕКУ. URL: www.dpt12s.odeku.edu.ua. Дні тижня (згідно з графіком консультацій, затвердженим на засіданні кафедри): середа (15.00-16.00). Аудиторія 315 (НЛК №2).

Прізвище і по батькові викладача, дні тижня та час за розкладом пар академічних годин, аудиторія.

2.2. Практичний модуль

Код	Назва модуля та тем	Кількість годин	
		аудиторні	СРС
ЗМ-П1	Практичний модуль №1. Розв'язування задач за темами лекційного модулю ЗМ-Л1.		15
	Тема 1. Хвильова функція, властивості, зміст, умова нормування. Співвідношення невизначеностей Гейзенберга. Рівняння Шредінгера для стаціонарних станів у випадку 1) вільної частинки; 2) частинки в нескінченно глибокій одновимірній потенціальній ямі. Проходження частинки крізь потенціальний бар'єр. Тунельний ефект. Квантовий гармонічний осцилятор.		10
	Тема 2. Властивості ядер: маса, заряд, спин; розміри ядер. Дефект маси. Енергія зв'язку ядра. Формула Вейцекера. Властивості ядерних сил.		

	Закони радіоактивного розпаду. Активність радіоактивного препарату. Радіоактивні ряди. Енергія, що виділяється внаслідок розпадів. α -розпад, β -розпад, γ -перетворення. Формула Гейгера- Неттола.		
ЗМ-П2	Практичний модуль №2. Розв'язування задач за темами лекційного модулю ЗМ-Л2. 1.Переріз розсіяння ядерних частинок. 2.Ядерні реакції. Переріз реакцій. Канали реакцій. Реакції під дією γ -квантів. Реакції під дією нейтронів. Ланцюгова реакція. Коефіцієнт розмноження нейтронів.		10 10
		Разом:	45

Консультації: Викладач: Курятников Владислав Володимирович, доцент кафедри загальної та теоретичної фізики, кандидат ф.-м. наук. (e-mail: kuryatnikov1@ukr.net). Сайт кафедри загальної та теоретичної фізики ОДЕКУ. URL: www.dpt12s.odeku.edu.ua. Дні тижня (згідно з графіком консультацій, затвердженим на засіданні кафедри): середа (15.00-16.00). Аудиторія 315 (НЛК №2).

Прізвище і по батькові викладача, дні тижня та час за розкладом пар академічних годин, аудиторія.

2.3. Самостійна робота студента та контрольні заходи

Код модуля	Завдання на СРС та контрольні заходи	Кількість годин СРС	Строк проведення (семестр, тиждень)
ЗМ-Л1	• Самостійне вивчення тем теоретичної частини	25	Вересень-грудень 4-ий рік
	• Виконання модульної тестової контрольної роботи МКР-1 (обов'язковий)	5	
ЗМ-Л2	• Самостійне вивчення тем теоретичної частини	25	січень-травень 4-ий рік
	• Виконання модульної тестової контрольної роботи МКР-2 (обов'язковий)	5	
ЗМ-П1	• Вивчення певних тем практичного модуля • Розв'язання задач (обов'язковий)	25	Вересень-грудень 4-ий рік
ЗМ-П2	• Вивчення певних тем практичного модуля • Розв'язання задач (обов'язковий)	20	січень-травень 4-ий рік
	Підготовка до залікової контрольної роботи (обов'язковий)	5	травень 4-ий рік
	Разом:	110	

Настановна лекція – 2 аудиторні години (за розкладом настановної сесії).
Викладач: Курятников В.В., доцент кафедри загальної та теоретичної фізики, кандидат ф.-м. наук.

На настановній лекції студентам доводяться загальний огляд та особливості вивчення навчальної дисципліни, огляд програми навчальної дисципліни, в т.ч. графік її вивчення, перелік базових знань та вмінь (компетентності), огляд завдань на самостійну роботу, графік та форми їх контролю, форми спілкування з викладачем під час самостійного вивчення дисципліни, графік отримання завдань, відомості про систему доступу до навчально-методичних матеріалів, у тому числі через репозитарій електронної навчально-методичної та наукової літератури та систему дистанційного навчання університету тощо.

Консультації – 8 годин:

Викладач: (e-mail: Викладач: Курятников В.В., доцент кафедри загальної та теоретичної фізики, канд. ф.-м. наук. (e-mail: kuryatnikov1@ukr.net)). Сайт кафедри загальної та теоретичної фізики ОДЕКУ. URL: www.dpt12s.odku.edu.ua.

Якщо результати опанування навчальної дисципліни протягом самостійної роботи студентом є незадовільними, викладач рекомендує такому студенту взяти участь у консультаційній сесії, під час якої викладач може планувати будь-які види навчальної роботи, які дозволяють студентам якісніше опанувати матеріал навчальної дисципліни та підвищити рівень своєї практичної підготовки з цієї дисципліни. В цих сесіях беруть участь студенти, які не мають можливості самостійно опанувати завданнями на самостійну роботу або мають бажання виконати практичну частину самостійної роботи під керівництвом викладача.

В Zoom форматі (з попереднім узгодженням часу зустрічі викладача зі студентами): <https://us05web.zoom.us/j/3137444960?pwd=a2ljOFV6c0ExYzREcEhsaUhvRVhDUT09>.

Під час самостійної роботи студент має можливості спілкування з викладачем університету, який викладає цю навчальну дисципліну, за допомогою засобів електронного (e-mail: kuryatnikov1@ukr.net) і мобільного зв'язку та/або у системі Е-навчання (<http://dpt12s.odku.edu.ua/>).

Неучасть студента у консультаційних сесіях не позначається на оцінюванні його навчальних досягнень виконання навчального плану.

Консультації: Викладач: Курятников Владислав Володимирович, доцент кафедри загальної та теоретичної фізики, кандидат ф.-м. наук. (e-mail: kuryatnikov1@ukr.net). Сайт кафедри загальної та теоретичної фізики ОДЕКУ. URL: www.dpt12s.odku.edu.ua. Дні тижня: середа (15.00-16.00). Аудиторія 315 (НЛК №2).

Прізвище і по батькові викладача, дні тижня та час за розкладом пар академічних годин, аудиторія.

ОРГАНІЗАЦІЯ ПОТОЧНОГО ТА ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ

Методика поточного та підсумкового контролю знань регламентує організацію контролю рівня знань, вмінь та навичок, набутих студентами при вивченні розділів дисциплін, які вивчаються в ОДЕКУ згідно з навчальним планом та робочої програми.

Освітній процес за заочною формою навчання складається з:

- настановної лекції;
- консультаційної сесії, під час якої можуть проводитися консультації тощо;
- другої частини заліково-екзаменаційної сесії, під час якої здійснюються семестрові контролюючі заходи;
- самостійної роботи студента з опанування теоретичним та практичним матеріалом і виконання інших завдань на самостійну роботу згідно з програмою навчальної дисципліни протягом навчального семестру або року.

Максимальна сума балів, яку може отримати студент, склавши всі теоретичні та практичні модулі, береться рівною 100 балів.

Фактична сума балів, яку отримає студент за кожний модуль складається із підсумків виконання запланованих контрольних заходів, враховуючи своєчасність виконання студентом графіку навчального процесу.

2.3.1. Методика проведення та оцінювання контрольного заходу для ЗМ-Л1, ЗМ-Л2.

Організація контролю знань студентів побудована за накопичувально-модульним принципом згідно вимог діючого в університеті Положення «Про проведення підсумкового контролю знань студентів».

Формами контролю засвоєння теоретичних знань є модульні контрольні роботи за кожним змістовним модулем (внутрішньо семестровий контроль), складання заліку (підсумкова атестація).

Варіанти модульних контрольних робіт містять 25 запитань у тестовому вигляді. Кожна вірна відповідь оцінюється у 1 бал (ЗМ-Л1, ЗМ-Л2). Максимальна кількість балів за виконаний варіант кожної модульної контрольної роботи становить **25 балів**. Максимальна кількість балів, яку студент може отримати з теоретичної частини, складає **50 балів**.

2.3.2. Методика проведення та оцінювання контрольного заходу для ЗМ-П1, ЗМ-П2.

Формою контролю практичного модулю ЗМ-П є розв'язання задач за темами лекційного курсу.

Всього за практичні (семінарські) заняття студент може отримати 50 балів.

Загальна максимальна кількість балів з дисципліни «Теоретичні основи фізики іонізуючого випромінювання», яку студент може отримати за теоретичну та практичну частини, складає 100 балів.

2.3.3. Методика проведення та оцінювання контрольного заходу для семестрового заліку

Допуск до семестрового заліку за підсумками модульного накопичувального контролю регламентуються п. 2.4 Положення про проведення підсумкового контролю

знань студентів, а саме, студент вважається допущеним до підсумкового семестрового контролю з навчальної дисципліни, якщо він виконав всі види робіт, передбачені робочою навчальною програмою дисципліни і набрав за модульною системою суму балів не менше 50% від максимальної можливої за теоретичну та практичну частину (для заліку), тобто не менше 50 балів. Якщо дисципліна закінчується заліком, то студент пише залікову контрольну роботу, а інтегральна оцінка (В) по дисципліні розраховується за формулою

$$B = 0,75 \times OЗ + 0,25 \times OЗКР,$$

де ОЗ – кількісна оцінка (у відсотках від максимальної можливої) за змістовними модулями;

ОЗКР – кількісна оцінка (у відсотках від максимальної можливої) залікової контрольної роботи.

Студент, який не має на початок заліково-екзаменаційної сесії заборгованості по дисципліні, що завершується заліком, отримує якісну оцінку («зараховано» або «не зараховано»), якщо має на останній день семестру інтегральну суму балів поточного контролю, достатню (60% та більше) для отримання позитивної оцінки, та не менше 50% від максимальної можливої суми балів за залікову контрольну роботу.

Залікова контрольна робота з дисципліни «Теоретичні основи фізики іонізуючого випромінювання». проводиться у тестовому форматі і складається з 25 тестових завдань, в які входять теми лекційних та практичних модулів. Правильна відповідь на кожне з тестових завдань оцінюється в 4 бали. Максимальна можлива оцінка 100 балів еквівалентна 100% правильних відповідей. Залік проводиться в аудиторії під час заліково-екзаменаційної сесії.

3. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ

3.1. Модуль ЗМ-Л1 «Характеристики іонізуючого випромінювання».

3.1.1. Повчання

Тема 1. Характеристики атомного ядра, моделі атомних ядер. Спектри енергії ядер, характеристики енергетичних рівней.

Треба чітко уявляти, що іонізуюче випромінювання складається з α -, β - та γ -частинок, атомних ядер і т. ін., які потребують квантового опису. Ці частинки можуть мати дуже високу енергію та рухатися з релятивістськими швидкостями. Наслідком корпускулярно-хвильового дуалізму, притаманного частинкам, є співвідношення невизначеностей імпульсу та координати Гайзенберга, а також співвідношення невизначеностей енергії та часу.

Для розуміння властивостей та джерел іонізуючого випромінювання треба знати склад та властивості ядер, вплив складу ядра, питомої енергії зв'язку ядра на його стабільність. Звернути увагу на особливості енергетичних спектрів ядер та відображення цих особливостей в існуючих моделях ядер.

Література [1,2,4,6,9,11].

Тема 2. Види іонізуючого випромінювання та їх властивості. Альфа-, бета- та гамма-випромінювання.

Вивчення теми базується на таких питаннях курсу загальної фізики, як радіоактивність, її види, закон радіоактивного розпаду і т. ін. При цьому слід приділити особливу увагу питанням, що не входять до програми курсу загальної фізики, а саме: розгляду випадків складного розпаду, тобто накопичення та утворення ряду послідовних

продуктів розпаду радіонуклідів, умові секулярної рівноваги; умовам енергетичної можливості альфа-розпаду та різних типів бета-розпаду; відмінностям енергетичних спектрів альфа- та бета- частинок, гамма-випромінювання.

Література [1,2,4,6,9,11].

3.1.2. Питання для самоперевірки

- 1*. Склад та розміри атомних ядер.
- 2*. Що таке ізотопи, ізобари, ізотони, ізомери?
3. Поясніть, чим обумовлене те, що маса ядра завжди менша за суму мас нуклонів, що входять до його складу.
- 4*. Що таке енергія зв'язку ядра? Як її обчислюють?
5. Які вклади в енергію зв'язку ураховує напівемпірична формула Вейцекера?
- 6*. Як змінюється питома енергія зв'язку в залежності від значення масового числа A ?
- 7*. Які висновки щодо ядерних реакцій можна зробити, виходячи з цієї залежності?
8. Які моделі атомних ядер вам відомі? Які властивості атомних ядер можна пояснити за допомогою цих моделей?
- 9*. Особливості ядерних сил.
- 10*. Що таке радіоактивність? Які види радіоактивного розпаду вам відомі?
- 11*. Закон радіоактивного розпаду. Який фізичний зміст має стала розпаду, період напіврозпаду? Зв'язок між сталою розпаду і періодом напіврозпаду та середнім часом життя.
1. Які радіоактивні ряди вам відомі?
- 13*. Що таке α - розпад? За якою схемою він відбувається? Які характерні особливості α - розпаду вам відомі?
- 14*. Який енергетичний спектр притаманний α -частинкам? Що таке тунельний ефект?
- 15*. Які види β - розпаду вам відомі? Який енергетичний спектр є характерним для електронів та позитронів, які випромінюються при β - розпаді?
- 16*. Яке випромінювання є характерною ознакою електронного захвату?
- 17*. Що таке γ -промені? Який енергетичний спектр є характерним для γ - випромінювання?

(* - питання для самоперевірки базових результатів навчання – знань, умінь, навичок).

3.2. Модуль ЗМ-Л2 «Проходження ядерних частинок крізь речовину. Ядерні реакції»

3.2.1. Повчання

Тема 1. Розсіяння ядерних частинок. Переріз розсіяння.

Основними наслідками проходження іонізуючих частинок крізь речовину є іонізація та збудження атомів та молекул речовини. При вивченні теми звернути увагу на характеристики частинок та речовини, які визначають процеси та наслідки проходження іонізуючого випромінювання крізь речовину, та величини, які характеризують цей процес. Звернути увагу на процеси пружного та непружного розсіяння частинок, які підпадають під означення ядерної реакції (у широкому розумінні цього поняття), перерозподіл енергії та імпульсу частинок у цих процесах та поняття перерізу розсіяння як характеристики процесу.

Література [1,2,5,9,10].

Тема 2. Ядерні реакції. Поділ та синтез атомних ядер. Спонтанний поділ.

При вивченні теми засвоїти поняття ядерної реакції (у вузькому сенсі), як такої серед вихідних частинок якої є хоча б одно ядро; класифікацію ядерних реакцій за різними ознаками; способи запису різноманітних ядерних реакцій; закони збереження, якими користуються при розгляді ядерних реакцій, та механізми ядерних реакцій.

Розглянути умови протікання реакції синтезу та поділу атомних ядер.

Література [1,4,6,9,10,11].

Тема 3. Поділ ізотопів урана під дією нейтронів. Ланцюгова реакція. Коефіцієнт розмноження. Ядерні реактори.

При вивченні теми звернути увагу на умови виникнення ланцюгової реакції поділу, залежність режиму реакції від значення коефіцієнта розмноження нейтронів та факторів, які впливають на це значення.

При розгляді питань, зв'язаних з отриманням енергії в ядерних реакторах, звернути увагу на існування трьох типів ядерного паливного циклу в залежності від ядерного палива, що використовується в реакторі; розглянути складові частини будь-якого реактора та процеси, що відбуваються при його роботі. Одночасно звернути увагу на порівняльну характеристику основних типів реакторів (ВВЕР, РБМК та реактора на важкій воді), їх коефіцієнт реактивності.

Література [1, 3, 4, 5, 7, 9,10,11,12].

3.2.2. Питання для самоперевірки

- 1*. Які види взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною вам відомі?
- 2*. З якими властивостями іонізуючих частинок пов'язані процеси та наслідки проходження іонізуючого випромінювання крізь речовину?
- 3*. З якими властивостями речовини пов'язані процеси та наслідки проходження іонізуючого випромінювання крізь речовину?
- 4*. Що розуміють під іонізаційною здатністю або питомою іонізацією?
5. Від яких параметрів залежить середня лінійна втрата енергії на іонізацію для важких заряджених частинок?
- 6*. Які механізми втрати енергії є основними при проходженні легких частинок (електронів та позитронів) крізь речовину?
7. За яким законом змінюються з енергією іонізаційні втрати електронів? радіаційні втрати електронів?
- 8*. За яким законом відбувається ослаблення потоку β -частинок з суцільним спектром при проходженні через речовину? Ослаблення вузького пучка моно-енергетичних γ -квантів? Ослаблення потоку нейтронів?
- 9*. Які основні механізми взаємодії γ -квантів з речовиною вам відомі? Охарактеризуйте кожний з них.
- 10*. Якими величинами характеризують поглинаючу дію речовини? Що таке лінійний та масовий пробіг іонізуючої частинки? Що таке шар половинного послаблення?
- 11*. Що називають ядерною реакцією?
- 12*. Яка величина характеризує інтенсивність ядерної реакції? Як можна її інтерпретувати? У яких одиницях вона вимірюється?
- 13*. Що таке вихід реакції? Від чого він залежить?

- 14*. За якими ознаками характеризують ядерні реакції?
- 15*. Які закони збереження виконуються при ядерних реакціях?
- 16*. Які ядерні реакції називають екзотермічними? Ендотермічними? Що таке поріг реакції?
17. Які механізми ядерних реакцій вам відомі? За яких умов можна використовувати поняття складового ядра при опису реакції?
- 18*. У чому полягає ядерна реакція поділу?
19. Яким умовам повинні задовольняти ядерні реакції для їхнього використання у ядерній енергетиці?
- 20*. Що таке ланцюгова реакція поділу? Що таке активна зона реакції поділу?
- 21*. Яка фізична величина характеризує інтенсивність розмножування нейтронів при ланцюговій реакції?
- 22*. Якими факторами визначається коефіцієнт розмноження нейтронів? Які його значення відповідають критичному, підкритичному та надкритичному режиму ланцюгової ядерної реакції?
- 23*. Що розуміють під критичною зоною та критичною масою при ланцюговій реакції поділу?
- 24*. Яку роль відіграє сповільнювач при здійсненні ланцюгової реакції на повільних нейтронах?
- 25*. Що є складовими частинами будь якого ядерного реактору?
- 26*. Як відбувається керування процесом ланцюгової реакції?
- 27*. Основні типи енергетичних ядерних реакторів. Характерні особливості реакторів ВВЕР, РБМК та реакторів на швидких нейтронах.
- 28*. Що показує коефіцієнт реактивності ядерного реактору? За якими параметрами він розглядається?

* - питання для самоперевірки базових результатів навчання – знань, умінь, навичок).

3.3. Модуль ЗМ-П1. «Розв'язування задач за темами лекційного модулю ЗМ-П1»

3.3.1. Повчання

Тема 1. Хвильова функція, властивості, зміст, умова нормування. Співвідношення невизначеностей Гейзенберга. Рівняння Шредінгера для стаціонарних станів у випадку 1) вільної частинки; 2) частинки в нескінченно глибокій одновимірній потенціальній ямі. Проходження частинки крізь потенціальний бар'єр. Тунельний ефект. Квантовий гармонічний осцилятор.

При розв'язуванні задач про хвильові властивості частинок необхідно розрізняти випадки класичних і релятивістських частинок. За допомогою співвідношень невизначеностей координати та імпульсу можна розв'язувати задачі двох типів:

а) визначення найменшого значення однієї з двох невизначеностей $\Delta x, \Delta p_x$ при заданому значенні другої. У цьому випадку у відповідному співвідношенні користуються знаком рівності;

б) визначення найменшого значення самих величин, а саме, лінійних розмірів області L , в якій знаходиться частинка або найменшого значення її імпульсу p (або зв'язаного з ним значення кінетичної енергії).

У цьому випадку вважають, що шукана величина не може бути меншою за найменшу невизначеність при її вимірюванні, тобто у якості мінімальних значень величини використовують їх мінімальну невизначеність: $L_{\min} \approx \Delta x_{\min}$, а $p_{\min} \approx \Delta p_{\min}$.

Визначення хвильової функції мікрочастинок пов'язано з розв'язанням рівняння Шредінгера для стаціонарних станів. Розв'язки диференціальних рівнянь другого порядку з постійними коефіцієнтами, до яких відноситься рівняння Шредінгера, містять сталі, для визначення яких використовують властивості хвильової функції – її неперервність та плавність (неперервність її першої похідної), а також умову нормування. Слід звернути особливу увагу на квантування власних значень енергії у випадку обмеження руху мікрочастинок границями потенціальної ями та задачу про проходження частинки крізь потенціальний бар'єр, які мають безпосереднє відношення до пояснення закономірностей α - випромінювання та енергетичних спектрів α -, β -, та γ -частинок.

Методичні вказівки та приклади розв'язування задач див. [6] Герасимов О.І., Андріанова І.С. Фізика в задачах. Ч.IV. Коливання та хвилі. Оптика. Навч. посібник. Одеса: ТЕС, 2015. с. 116-126.

Тема 2. Властивості ядер: маса, заряд, спин; розміри ядер. Дефект маси. Енергія зв'язку ядра. Формула Вейцзекера. Властивості ядерних сил.

Закони радіоактивного розпаду. Активність радіоактивного препарату. Радіоактивні ряди. Енергія, що виділяється внаслідок розпадів. α -розпад, β -розпад, γ -перетворення. Формула Гейгера-Неттола.

При розв'язуванні задач на явище радіоактивності слід розрізняти випадки, коли відбувається розпад ізольованої речовини та випадок, коли розпадається дочірня речовина, яка співіснує в суміші з іншою радіоактивною речовиною (материнською), продуктом розпаду якої вона є. При певному співвідношенні періодів напіврозпаду материнської (T_1) та дочірньої (T_2) речовини, коли $T_1 \gg T_2$ за деякий проміжок часу установлюється радіоактивна рівновага між ними. Активність дочірньої речовини дорівнює кількості її ядер, утворених внаслідок розпаду ядер материнської речовини,

Методичні вказівки та приклади розв'язування задач див. [2] Герасимов О.І., Андріанова І.С., Затовська А.О., Співак А.Я. Методичні вказівки до розв'язання задач з дисципліни “Радіоекологія”. Одеса: ОДЕКУ, 2012, с.15-20; [6] Герасимов О.І., Андріанова І.С. Фізика в задачах. Ч.IV. Коливання та хвилі. Оптика. Навч. посібник. Одеса: ТЕС, 2015. с. 132-135.

Література [1, 2, 4, 6,11]

3.4. Модуль ЗМ-П2. «Розв'язування задач за темами лекційного модулю ЗМ-П2»

При розгляді ядерних реакцій закон збереження енергії необхідно записувати в релятивістській формі. При використанні закону збереження повної енергії слід пам'ятати, що ядерні реакції можуть йти як з виділенням, так і з поглинанням енергії. Отже, енергетичний вихід ядерної реакції Q може бути як додатним ($Q > 0$, екзотермічна реакція), так і від'ємним ($Q < 0$, ендотермічна реакція). У першому випадку, реакція може йти при будь-яких значеннях кінетичної енергії частинок, що вступають у реакцію. У другому випадку, тобто існує мінімальна кінетична енергія, починаючи з якої реакція стає можливою (порог реакції).

Методичні вказівки та приклади розв'язування задач див. [2] Герасимов О.І., Андріанова І.С., Затовська А.О., Співак А.Я. Методичні вказівки до розв'язання задач з дисципліни “Радіоекологія”. Одеса: ОДЕКУ, 2012, с.24-32; [6] Герасимов О.І., Андріанова І.С. Фізика в задачах. Ч.IV. Коливання та хвилі. Оптика. Навч. посібник. Одеса: ТЕС, 2015. с. 132-137.

Література [1, 2, 4, 6,11]

4. ПИТАННЯ ДО ЗАХОДІВ ПОТОЧНОГО, ПІДСУМКОВОГО ТА СЕМЕСТРОВОГО КОНТРОЛЮ

4.1 Тестові питання до модульної контрольної роботи модуля ЗМ-Л1

1. З одного протону і двох нейтронів складається ядро...
Література [1 с.403], [4 с.467]
2. Ізотопами називаються атоми, ядра яких мають однакові кількості
Література [1 с.403], [4 с.467]
3. Елементи, ядра яких мають однакову кількість нейтронів, називають...
Література [1 с.403]
4. З наведених ядер ${}^7_3\text{Li}$, ${}^7_4\text{Be}$, ${}^{13}_7\text{N}$, ${}^6_3\text{Li}$ є ізобарами...
Література [1 с.403], [4 с.467]
5. Ізотонами називаються атоми, зарядові (Z) і масові (M) числа, а також періоди напіврозпаду (T) яких знаходяться в співвідношенні...
Література [1 с.403]
6. З наведених пар ядер “дзеркальною” парою є ядра ...
Література [1 с.403]
7. Радіус ядра є пропорційним його масовому числу у степені ...
Література [1 с.404], [4 с.467]
8. Маса ядра порівняно з масою нуклонів, що входять до його складу, завжди є
Література [1 с.404], [4 с.467]
9. Найбільші значення питомої енергії зв’язку ядер у таблиці елементів припадають на елементи, що знаходяться ...
Література [1 с.404], [4 с.468]
10. Який з членів напівемпіричної формули Вейцекера для енергії зв’язку ядра відображує лінійну залежність енергії від кількості нуклонів в ядрі?
Література [1 с.406]
11. Який з членів напівемпіричної формули Вейцекера для енергії зв’язку ядра враховує його поверхневу енергію?
Література [1 с.406]
12. Який з членів напівемпіричної формули Вейцекера для енергії зв’язку ядра відображує той експериментальний факт, що з легких ядер найбільш міцними є ядра, в яких кількість протонів та нейтронів є однаковою?
Література [1 с.407]
13. Яке з наведених ядер відноситься до двічі магічних?
Література [1 с.407], [4 с.468]
14. Найменшу стабільність мають ядра кількості протонів та нейтронів в яких є ...
Література [1 с.407]
15. Напівціле значення повного моменту імпульсу ядра мають ядра, масове число яких є...
Література [1 с.408], [4 с.469]
16. Короткодія є характерною для взаємодій ...
Література [1 с. с.411, 487]
17. На які властивості ядерних сил указує пропорційність енергії зв’язку в ядрі кількості нуклонів?
Література [1 с.411]
18. З моделей атомного ядра слушно пояснює процес поділу важких ядер ...
Література [1 с.416], [4 с.470]
19. Більша стабільність магічних ядер пояснюється в моделі ...
Література [1 с.419], [4 с.471]
20. Радіоактивністю називають ...
Література [1 с.421], [4 с.471]
21. З названих ядерних перетворень до природної радіоактивності відноситься...
Література [1 с.422]

22. Яке з наведених рівнянь описує закон радіоактивного розпаду, якщо N - кількість активних ядер, λ - постійна розпаду, t - час?
Література [1 с.423], [4 с.472]
23. Величина, яка надає імовірність розпаду ядра радіоактивного елементу за одиницю часу має назву ...
Література [1 с.422]
24. Кількість деякої радіоактивної речовини зменшиться у 4рази за час, рівний ...
Література [1 с.423]
25. Зв'язок між середнім часом життя радіонукліду та сталою розпаду є ...
Література [4 с.473]
26. Загальна кількість розпадів, що відбувається в радіоактивній речовині за одиницю часу, має назву ...
Література [1 с.424], [4 с.473]
27. За один період напіврозпаду активність радіоактивної речовини ...
Література [1 с.с.424,422], [4 с.473]
- 28.Активність радіоактивної речовини зменшиться у 8 разів за час, рівний...
Література [1 с.с.424,422], [4 с.473]
29. В яких одиницях системи SI вимірюється активність радіоактивної речовини?
Література [1 с.424], [4 с.473]
30. Умову радіоактивної рівноваги надає співвідношення
Література [1 с.424]
- 31.Правила зміщення при радіоактивному розпаді впливають з законів збереження ...
Література [1 с.427], [4 с.473]
32. В результаті α - розпаду випромінюється ...
Література [1 с.427], [4 с.471]
33. α -частинка складається з ...
Література [1 с.427], [4 с.471]
34. Енергетичну можливість α -розпаду надає співвідношення між масами частинок, яке має вигляд:
Література [1 с.430]
35. Енергетичний спектр α -частинок є ...
Література [1 с.430], [4 с.474]
36. Зв'язок між періодом напіврозпаду речовини та енергією α - частинки надає ...
Література [1 с.430], [4 с.474]
37. Під β - частинками розуміють ...
Література [1 с.427]
38. Енергетичну можливість β^- - розпаду надає співвідношення між масами частинок, яке має вигляд:
Література [1 с.434]
39. При електронному β - розпаді зарядове число материнського ядра ...
Література [1 с.422], [4 с.475]
40. Енергетична можливість β^+ -розпаду має вигляд...
Література [1 с.434]
41. При β^+ -розпаді випромінюються ...
Література [1 с.427], [4 с.486]
42. Енергетичний спектр електронів або позитронів, випромінюваних при β -розпаді є...
Література [1 с.435], [4 с.475]
43. Енергетична умова e -захоплення має вигляд ...
Література [1 с.434]
44. При e -захопленні зарядове число материнського ядра ...
Література [1 с.428], [4 с.486]
45. Електронне захоплення обов'язково супроводжується випромінюванням ...
Література [1 с.428], [4 с.486]

46. Частинки якого іонізуючого випромінювання не несуть електричного заряду?
Література [1 с.442], [4 с.477]
47. γ – випромінювання – це ...
Література [1 с.442], [4 с.477]
48. Енергетичний спектр γ –променів є завжди ...
Література [1 с.442], [4 с.473]
49. Який з елементів, що починають радіоактивні сім'ї, не залишився у земній корі і отриманий штучним шляхом?
Література [1 с.428], [4 с.474]
50. Який з наведених елементів не є початком радіоактивної сім'ї?
Література [1 с.428], [4 с.474]
51. Наявність якого хімічного елементу супроводжує родовища радіоактивних елементів урану та торію на земній поверхні?
Література [1 с.429], [4 с.474]
52. Який ізотоп утворюється з ${}_{92}^{239}\text{U}$ після двох β^- - розпадів та одного α - розпаду?
Література [1 с.427], [4 с.473]
53. Який ізотоп утворюється з ${}_{83}^{214}\text{Bi}$ після двох β^- - розпадів та двох α - розпадів?
Література [1 с.42], [4 с.473]
54. Який ізотоп утворюється з ${}_{3}^8\text{Li}$ після одного β^- - розпаду та одного α - розпаду?
Література [1 с.427], [4 с.473]
55. Який ізотоп утворюється з ${}_{92}^{238}\text{U}$ після трьох α - розпадів та двох β^- - розпадів?
Література [1 с.427], [4 с.473]

4.2 Тестові питання до модульної контрольної роботи модуля ЗМ-Л2

- Основними втратами енергії при проходженні важких заряджених частинок крізь речовину є ...
Література [2с.24], [5 с.386],
- Іонізаційна здатність (питома іонізація) – це ...
Література [2с.24]
- Під лінійною втратою (передачею) енергії розуміють ...
Література [2с.24]
- Між лінійною втратою енергії важкої зарядженої частинки та чисельною густиною електронів речовини існує залежність ...
Література [2с.24]
- Середній потенціал іонізації атомів речовини визначається через ...
Література [2с.25]
- Радіаційні втрати заряджених частинок обумовлені зіткненнями з
Література [2с.26], [5 с.397]
- Залежність радіаційних лінійних втрат зарядженої частинки від її енергії є ...
Література [5 с.397], [2с.26]
- Радіаційна довжина – це відстань, на якій енергія іонізуючої частинки ...
Література [2с.26]
- Критичною називають енергію, при якій між радіаційними та іонізаційними втратами заряджених частинок виконується співвідношення ...
Література [2с.26]
- Енергія електронів високої енергії, для яких радіаційні втрати є основними, при проходженні крізь речовину змінюється за ...
Література [5 с.398], [2с.26]
- При проходженні γ –квантів крізь речовину їх енергія ...
Література [2с.26], [5 с.400]

12. Головний внесок в поглинання γ – випромінювання речовиною при низьких енергіях γ – квантів надає явище ...
Література [5 с.402]
13. В області енергій γ –квантів, що суттєво перевищують енергію зв'язку електрона з атомами, суттєвим механізмом поглинання γ –випромінювання є ...
Література [5 с.403]
14. Пружне розсіювання здійснюється при енергіях налітаючої частинки, які є
Література [5 с.487]
15. В будь-якій ядерній реакції виконуються закони збереження
Література [1 с.с.449-451]
16. Який з процесів взаємодії відповідає, як правило, ядерній реакції ?
Література [1 с.446]
17. До екзотермічних ядерних реакцій відносяться реакції, що проходять:
Література [1 с.450]
18. При пружному розсіянні енергія ядерної реакції має значення, яке є ...
Література [1 с.450], [5 с.110]
19. Інтенсивність ядерної реакції характеризує ...
Література [1 с.448]
20. Поріг ядерної реакції порівняно з енергією ядерної реакції завжди має ...
Література [5 с.111]
21. Доля частинок пучка, які зазнали ядерну взаємодію з частинками мішені, має назву ...
Література [1 с.448]
22. Ефективний переріз реакції вимірюється в ...
Література [1 с.448], [4 с.484]
23. Яку характеристику ядерної реакції можна трактувати як площину мішені, при попаданні в межі якої частинка викличе ядерну реакцію?
Література [1 с.448], [4 с.484]
24. Вихід ядерної реакції залежить від...
Література [1 с.448]
25. Різні кінцеві стани, які відповідають тим самим початковим умовам ядерної реакції, мають назву ...
Література [5 с.114]
26. Поняття складеного ядра використовується для опису механізму ядерної реакції у випадках, коли тривалість життя проміжного ядра є ...
Література [1 с.451], [4 с.485]
27. Пружне розсіяння частинки задовольняє умовам:
Література [4 с.485]
28. Фотоядерні реакції можуть відбуватися, коли енергія γ –квантів є ...
Література [1 с.455]
29. Реакцію радіаційного захоплення (n,γ) в реакторах використовують для ...
Література [1 с.453]
30. Під коефіцієнтом розмноження нейтронів розуміють ...
Література [1 с.471], [4 с.491]
31. Керованій ланцюговій реакції відповідає значення коефіцієнту розмноження нейтронів, яке є ...
Література [1 с.471], [4 с.491]
32. На величину коефіцієнту розмноження нейтронів впливає
Література [5 с.515-517]
33. Згасаючій ланцюговій реакції відповідає значення коефіцієнту розмноження нейтронів...
Література [1 с.471], [4 с.491]
34. Критична маса ядерного палива – маса активної зони, якій відповідає коефіцієнт розмноження нейтронів...
Література [5 с. 517], [4 с.491]

35. Переріз поділу ^{235}U тепловими нейтронами ($E \sim 5 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-1}$ eВ) порівняно з перерізом поділу швидкими нейтронами ($E \sim 10^5 \div 10^8$ eВ) є ...

Література [3с. 20]

36. Уповільнювач в атомних реакторах застосовується для:

Література [3с. 20]

37. Активна зона теплових реакторів та реакторів на проміжних нейтронах складається з ...

Література [3с.20], [5 с. 528]

38. Для ефективної передачі енергії при зіткненні нейтронів з ядрами уповільнювача атомна маса уповільнювача повинна бути ...

Література [3с.21]

39. Активна зона реактора на швидких нейтронах з усіх боків оточена:

Література [3с.21]

40. У зоні відтворення реактора на швидких нейтронах накопичуються ізотопи:

Література [3с.21]

41. Теплова схема реактору типу ВВЕР є ...

Література [3с.21]

42. В якості теплоносія в реакторі типу РБМК застосовується ...

Література [3с.21]

43. У якості сповільнювача в реакторах типу ВВЕР використовується ...

Література [3с.21]

44. Основними чинниками, що порушують нейтронний баланс і зниження коефіцієнта розмноження нейтронів в реакторі типу РБМК, являються :

Література [3с.23]

45. Стержні автоматичного регулювання в реакторі типу РБМК призначені для зміни:

Література [3с.23]

46. Оперативний запас реактивності реактора визначається ...

Література [3с.23]

47. Час знаходження ядерного палива в активній зоні реактора ВВЕР складає:

Література [3с.21]

48. Особливістю реакторів на швидких нейтронах є наявність ...

Література [3с.21]

49. Відсутність сповільнювача є характерною особливістю реакторів ...

Література [5с.537]

50. Злиття двох ядер в одне при реакції термоядерного синтезу відбувається внаслідок ... ефекту.

Література [1с.473], [4с.495]

51. Умову виникнення самопідтримної ядерної реакції надає ...

Література [1с.476]

4.3 Тестові завдання до залікової контрольної роботи

№	Тестові завдання	Основна література, сторінки
1.	З наведених формул формулою де Бройля для довжини хвилі мікрочастинки є...	[1]с.272 [4]с.394
2	Які властивості мікрочастинки можна обчислити за допомогою формули де Бройля?	[1]с.272 [4]с.394
3	Електрон, протон, нейтрон та α -частинка мають однакові довжини хвиль де Бройля. Найбільшу швидкість за цією умовою має	[1]с.272 [4]с.394
4.	Співвідношення невизначеностей координати та відповідної проекції імпульсу мікрочастинки пов'язані з...	[1]с.278 [4]с.396
5.	Умова нормування: хвильової функції у одновимірному випадку	[1]с.284

	має вигляд...	[4]с.400
6.	З одного протону і одного нейтрону складається	[1]с.403 [4]с.467
7.	Ізобарами називаються атоми, зарядові (Z) і масові (M) числа, а також періоди напіврозпаду (T) яких знаходяться в співвідношенні	[1]с.403 [4]с.467
8.	Кількість нейтронів, що входить до складу ядра урану $^{235}_{92}U$ дорівнює	[1]с.403 [4]с.466
9.	Ізомерами називаються атоми, зарядові (Z) і масові (M) числа, а також періоди напіврозпаду (T) яких знаходяться в співвідношенні	[2]с.186
10.	Ізотонами називають атоми, ядра яких мають однакові кількості	[1]с.403
11.	З наведених ядер 7_3Li , 7_4Be , $^{13}_7N$, 6_3Li ізотопами є	[1]с.403 [4]с.467
12.	Знаки потенціальної енергії взаємодії нуклонів в ядрі та енергії зв'язку ядер є ...	[1]с.405 [4]с.467
13.	Який з членів напівемпіричної формули Вейцекера для енергії зв'язку ядра описує зменшення енергії нуклона поблизу поверхні ядра?	[1]с.406
14.	5. Який з членів напівемпіричної формули Вейцекера для енергії зв'язку ядра враховує, що парно-парні ядра є найбільш стабільними, а непарно-непарні – нестабільні?	[1]с.406
15.	Який з членів напівемпіричної формули Вейцекера для енергії зв'язку ядра описує об'ємну енергію?	[1]с.406
16.	Який з членів напівемпіричної формули Вейцекера для енергії зв'язку ядра описує зменшення енергії внаслідок кулонівського відштовхування?	[1]с.406
17.	Питома енергія зв'язку двічі магічних ядер порівняно з такою у сусідніх ядер є ...	[1]с.407
18.	Момент імпульсу парно-парних ядер дорівнює ...	[1]с.408 [4]с.469
19.	Ядерна взаємодія нуклонів в ядрі отримала назву...	[1]с.411 [4]с.470
20.	На які властивості ядерних сил указує залежність радіуса ядра від його масового числа?	[1]с.411 [4]с.470
21.	Насичення є характерною особливістю взаємодії ...	[1]с.411 [4]с.470
22.	Величина ядерних сил залежить від взаємної орієнтації ...	[1]с.412 [4]с.470
23.	Періодичність властивостей ядер з магічними числами пояснює модель ...	[1]с.419 [4]с.471
24.	Явище спонтанного перетворення одних атомних ядер в інші з посиленням іонізуючого випромінювання має назву ...	[1]с.421 [4]с.471
25.	Не належить до природної радіоактивності	[1]с.422 [4]с.471
26.	За законом радіоактивного розпаду залежність кількості ядер радіоактивної речовини від часу є ...	[1]с.423 [4]с.472
27.	Період піврозпаду радіоактивних ядер – проміжок часу, за який кількість ядер радіоактивного елемента зменшується у	[1]с.423 [4]с.473
28.	Зв'язок між періодом піврозпаду та сталою розпаду є ...	[1]с.423 [4]с.473
29.	Кількість розпадів, що відбувається в одиниці маси радіоактивної речовини за одиницю часу, має назву ...	[2]с.16

30.	Як зміниться активність радіоактивної речовини за два періоди піврозпаду?	[1] с.424, с.422 [2]с.16
31.	Позасистемною одиницею вимірювання активності препарату є ...	[1]с.424 [4]с.473
32.	У магнітному полі не відхиляється від напрямку поширення потік ...	[1 с.442] [4]с.472
33.	При α -розпаді зарядове та масове число материнського ядра зазнають відповідно таких змін:	[1]с.427 [4]с.474
34.	При β^- -розпаді ядро випромінює	[1]с.427 [4]с.477
35.	Який ізотоп утворюється з ${}^8_3\text{Li}$ після одного β^- -розпаду та одного α -розпаду?	[1]с.427 [4]с.473
36.	Який з видів β -розпаду обов'язково супроводжується випромінюванням рентгенівських променів?	[1]с.428 [4]с.487
37.	Кількість пар іонів, утворених на всьому шляху випромінювання в речовині має назву ...	[2]с.24
38.	Основний внесок в іонізаційні втрати дають зіткнення налітаючої частинки з ...	[5]с.386 [2]с.24
39.	Радіаційними називають втрати енергії зарядженими частинками внаслідок...	[2]с.26
40.	Мінімальна товщина поглинача, яка потрібна для повного поглинання іонізуючого випромінювання має назву ...	[2]с.27
41.	При проходженні γ -квантів крізь речовину інтенсивність пучка ...	[5]с.401 [2]с.27
42.	Головним механізмом поглинання γ -випромінювання речовиною в області високих енергій γ -квантів є ...	[5]с.404
43.	Пружне розсіювання нейтронів здійснюється при енергіях нейтронів, які є ...	[5]с.487
44.	До ендотермічних ядерних реакцій відносяться реакції, що проходять:	[1]с.450
45.	Найменша кінетична енергія частинок, з якої протікання реакції є енергетично можливим має назву ...	[1]с.450 [5]с.110
46.	Поріг ядерної реакції практично співпадає з енергією реакції при співвідношенні мас налітаючої частинки (m_1) та маси ядра-мішені (m_2), яке має вигляд:	[5]с.111
47.	Під виходом ядерної реакції розуміють ..	[1]с.448
48.	Звільнення енергії внаслідок ядерної реакції відбувається при реакції ...	[1]с.472
49.	Реакції, що протікають без утворення складового ядра мають назву ...	[4]с.485
50.	Коефіцієнт розмноження нейтронів для протікання реакції ділення в атомних реакторах має бути:	[1]с.471 [4]с.491
51.	Згасаючій ланцюговій реакції відповідає значення коефіцієнту розмноження нейтронів...	[1]с.471 [4]с.491
52.	Критичним розміром називають розмір активної зони, при якому ...	[5]с.517 [4]с.491
53.	Перевантаження тепловиділяючих збірок без зупинки роботи реактора можливе в реакторах типу ...	[3]с.23
54.	В якості теплоносія в реакторі типу ВВЕР застосовується:	[3]с.23
55.	У якості сповільнювача в реакторах типа РБМК використовується ...	[3]с.21

5. ЛІТЕРАТУРА ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Основна література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Навч. посібн. К.: Техніка, 1999. Т.3. 518с.
2. Герасимов О.І., Андріанова І.С., Затовська А.О., Співак А.Я. Радіоекологія : Метод. вказ. до розв'язання задач. Одеса: Екологія, 2012. 60с.
3. Герасимов.О.І., Кільян.А.М. Елементи фізики довкілля: Радіоекологія (конспект лекцій). Одеса: ОДЕКУ, 2003. 134с.

Додаткова література

4. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебн. пособие. М: Высш. шк.,2001.542с.
5. Широков Н.П., Юдин Ю.М. Ядерная физика. М.: Наука, 1988. 671с.
6. Герасимов О.І., Андріанова І.С. Фізика в задачах. Ч.IV. Коливання та хвилі. Оптика. Навч. посібник. Одеса: ТЕС, 2015. 152с.
7. Герасимов О.І. Елементи фізики довкілля : Навч. посіб. Одеса: ТЕС, 2004. 144с.
8. Репозитарій ОДЕКУ. URL: <http://www.eprints.library.odeku.edu.ua>
9. Сивухин Д. В. Общий курс физики. 3-е издание, стереотипное. М.: Физматлит, 2006. Т. V. Атомная и ядерная физика. 784 с. [ISBN 5-9221-0645-7](https://www.isbn-international.org/number/5-9221-0645-7)
- 10.Булавін Л.А., Тартаковський В.К. Ядерна фізика: Підручник. К.: Знання. 2005. 439с.
- 11.Савельев И.В. Курс общей физики., т. 3. М.: Наука, 1987. 320с.
- 12.Ганев И.Х. Физика и расчет реактора. Учеб. пособие М.: Энергоиздат, 1992. 496 с.