

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

Затверджую

Голова приймальної комісії,
ректор Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна

_____Тетяна КАГАНОВСЬКА

«_____» _____ 2023 р.

ПРОГРАМА

вступного екзамену з прикладної фізики

спеціальність: 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

за освітньо-науковою програмою

підготовки доктора філософії

за спеціалізаціями:

1. Радіофізика та електроніка;
2. Біофізика

Третій (освітньо-науковий) рівень вищої освіти

Харків 2023



Спеціалізація Радіофізика та електроніка

I. СПЕЦІАЛЬНІ РОЗДІЛИ МАТЕМАТИЧНОЇ ФІЗИКИ

1. Постановка крайових задач.
2. Метод розділення змінних (метод Фур'є).
3. Метод функцій джерела рівнянь еліптичного та параболічного типів (метод функції Гріна).
4. Гама-функція, її властивості.
5. Циліндричні функції. Основні властивості.
7. Інтеграл типу Коші.
8. Ряди Тейлора та Лорана.
9. Теорія відраховань.
10. Інтегрування функцій комплексного змінного, ізольовані особливі точки.
11. Конформне відображення.

II. ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

1. Постулати мікроскопічної електродинаміки.
2. Релятивістські коваріантні рівняння руху. Тензор електромагнітного поля.
3. Перетворення Лоренца для електромагнітного поля. Інваріанти поля.
4. Перша і друга пари рівнянь Максвелла. Рівняння безперервності.
5. Граничні умови. Теорема Умова-Пойнтінга. Теорема єдиності розв'язків рівнянь Максвелла.
6. Хвильове рівняння. Плоскі хвилі. Плоскі однорідні і неоднорідні монохроматичні хвилі.
7. Рівняння Максвелла комплексної форми.
8. Густина та потік енергії електромагнітного поля.
9. Дисперсія діелектричної проникності. Співвідношення Крамерса-Кроніга.
10. Граничні умови Леонтовича-Щукіна.
11. Відбиття плоскої хвилі від плоскої межі розділення двох середовищ. Закони Снеліуса. Формули Френеля.
12. Методи розв'язання граничних задач електродинаміки.
13. Наближення геометричної оптики і межі його застосування. Рівняння ейконала, принцип Ферма.
14. Основні положення теорії хвильоводів.
15. Порожні металічні хвильоводи.
16. Лінії передачі поверхневих хвиль.
17. Квазіоптичні (відкриті) резонатори та хвильоводи.
18. Функція Гріна в електродинаміці.
19. Лема Лоренца та теорема взаємності.
20. Задача дифракції плоскої хвилі на нескінченній решітці з ідеально провідних стрічок.
21. Метод задачі Римана-Гільберта, розв'язання задач дифракції.

III. СТАТИСТИЧНА РАДІОФІЗИКА

1. Основні поняття теорії випадкових процесів. Стаціонарні й нестаціонарні випадкові процеси та способи їх опису.
2. Кореляційно-спектральна теорія стохастичних процесів.
3. Статистичні характеристики огинаючої та фази вузькосмугового нормального стохастичного процесу.
4. Стохастичні поля. Однорідні та ізотропні поля скалярних і векторних величин. Кореляційна функція та спектри.
5. Теплові флуктуації в електродинаміці.

6. Статистичні явища в радіофізиці. Статистична теорія антен. Статистична теорія розповсюдження радіохвиль.

IV. ФІЗИЧНА ЕЛЕКТРОНІКА

1. Види емісії.
2. Елементарні процеси в іонізованому газі. Основні поняття фізики атомних зіткнень. Переріз розсіювання.
3. Фундаментальні методи теоретичного дослідження плазми. Кінетичні рівняння для електронів у слабоіонізованому газі.
4. Методи діагностики розрядної плазми. Електричні зонди. Рефракційний, інтерференційний та лазерний методи діагностики.
5. Зонна теорія напівпровідників. Ефективна маса.
6. Статистика електронів та дірок в напівпровідниках, концентрація носіїв.
7. Кінетичні явища в напівпровідниках. Кінетичне рівняння Больцмана. Ефект Хола. Електропровідність.
8. Рівняння неперервності. Контактні явища, р-п перехід.
9. Дифузійний та дрейфовий транзистори. МДН, МОН- транзистори.
10. Прилади НВЧ-діапазону – тунельний діод, Лавинно-пролітний діод, діод Ганна.
11. Поглинання та випромінювання в напівпровідниках, прямі та непрямі переходи.
12. Світлодіод. Напівпровідниковий лазер. Критерій виникнення лазерного випромінювання.
13. Фотоелектричні прилади – фоторезистор, фотодіод, фототріод, оптрон. Оптиелектроніка.

V. КВАНТОВА РАДІОФІЗИКА

1. Атом водню і воднеподібні атоми.
2. Атоми з багатьма електронами.
3. Стаціонарні стани молекул.
4. Взаємодія електромагнітного поля речовини в дипольному наближенні. Лінійні та нелінійні тензори діелектричного сприйняття.
5. Напівкласична теорія випромінювання.
6. Імовірність однофотонних і багатифотонних процесів. Спонтанні та індуковані переходи.
7. Форма та інтенсивності спектральних ліній. Форма спектральних ліній в атомарних і молекулярних газах, електронні, коливальні та обертальні переходи. Правила відбору.
8. Однорідне і неоднорідне розширення спектральних ліній. Природня ширина, зштовхувальне і доплерівське розширення. Поперечний та поздовжній час релаксації.
9. Принципи роботи приладів квантової електроніки. Методи створення інверсії населеності та негативного поглинання.
10. Молекулярний генератор. Рівняння для поля в квантовому генераторі.
11. Оптичні резонатори, несталий резонатор.
12. Гаусівські пучки. Розповсюдження у вільному просторі. Граничні умови резонатора.
13. Поздовжні та поперечні типи коливань, спектр частот та розбіжність (спрямованість) випромінювання. Добротність.
14. Будова та параметри лазера.
15. Лазери на вимушеному комбінаційному розсіянні. Режим роботи лазерів. Надкороткі імпульси.
16. Методи стабілізації частоти лазерів.
17. Гільберт-оптика. Фазові дифракційні елементи для виконання перетворювання Гільберта хвильового пучка.
18. Формування профілю розподілу інтенсивності лазерного пучка дифракційними структурами.

19. Атомна спектроскопія. Методи дослідження рідбергівських станів атомів.
20. Квантові стандарти частоти.

VI. НЕЛІНІЙНА РАДІОФІЗИКА

1. Загальні відомості про нелінійні явища.
2. Методи нелінійної радіофізики.
3. Самодія та взаємодія електромагнітних хвиль.
4. Ударні хвилі. Солітони.
5. Самофокусування пучків хвиль.
6. Нестійкості, їх типи.
7. Нелінійні явища в квантовій радіофізиці.
8. Нелінійні явища в плазмі та навколоземному просторі.
9. Нелінійні явища в статистичній радіофізиці.
10. Детермінований хаос в радіофізиці.
11. Самоорганізація в радіофізиці.

Спеціалізація Біофізика

1. МОЛЕКУЛЯРНА БІОФІЗИКА

1.1. Особливості хімічного складу живої матерії. Основні типи біомолекул, відмінності їх структури та функцій. Аномальні фізичні властивості води. Структурні моделі води. Водні розчини електrolітів. Гідратація іонів. Біологічна роль води та іонів.

1.2 Фізичні властивості макромолекул.

Міжмолекулярні взаємодії і сили, які стабілізують будову біологічних макромолекул: кулонівська взаємодія, сили Ван-дер-Ваальса, водневий зв'язок і його основні властивості, гідрофобні взаємодії. Метод атом-атомних потенціалів і методи вивчення міжмолекулярних взаємодій, емпіричні потенціали міжчасткової взаємодії. Внутрішнє обертання та поворотна ізомерія. Конформації макромолекул: гаусові клубки, персистентні ланцюжки, спіральні конфігурації; зв'язок між параметрами реальних і модельних ланцюжків. Конформаційні перетворення: конформаційна статистична сума; теорії кооперативних переходів, ширина температурного інтервалу переходу; вплив іонізації макромолекул. Макромолекули у розчинах: вираження термодинамічних функцій через статистичну суму; рівняння стану макромолекулярних розчинів (граткова модель), віріальні коефіцієнти, тета-точка; виключений об'єм, набухання макромолекули; макроіони, рівняння стану у випадку іонізації макромолекули.

1.3. Фізика білків.

Основні типи вторинної структури поліпептидів та білків. Стабілізація вторинної структури білка, роль водного середовища. Проблема зв'язку первинної структури білка з його просторовою структурою; "самозбирання" білків. Структура та властивості мембранних білків, фібрилярних білків, колагенових білків.

1.4. Фізика нуклеїнових кислот.

Основні типи спіральної структури ДНК і полінуклеотидів. Стабільність подвійної спіралі ДНК, роль взаємодії з водою та іонами. Комплекси нуклеїнових кислот з іонами металів. Взаємодія нуклеїнових кислот з барвниками й антибіотиками. Взаємодія ДНК з білками, білково-нуклеїнове впізнавання.

2. БІОФІЗИКА КЛІТИНИ

2.1. Фізика біомембран.

Хімічний склад і моделі структурної організації біомембран. Роль води в організації структури біологічних мембран. Ферменти біомембран, алостеризм. Обертальна, латеральна та міжмоношарова дифузія мембранних компонентів. Ліпідні рафти та кластери. Фліпази та

скрамблази. Асиметрія біологічних мембран. Природа мембранних потенціалів. Поверхнева активність мембран. Пружні властивості біомембран. Теорія локальних дефектів (пор). Електричний пробій та середній час життя біомембран. Реконструкція біомембран.

2.2. Мембранний транспорт.

Проникність мембран та методи її дослідження. Дифузія води та розчинених речовин. Вільна дифузія нейтральних молекул та іонів. Полегшена дифузія. Моделі транспорту з переносником. Селективні фільтри. Кінетичні моделі активного транспорту. Термодинаміка мембранного транспорту.

2.3. Фізичні аспекти нервової провідності.

Мембранні електричні потенціали. Мембрани, що збуджуються електричним струмом. Фізико-хімічні моделі збудження. Механізми виникнення і розповсюдження нервових імпульсів по аксонах. Молекулярні механізми іонної проникності. Іонні струми та розповсюдження електричних імпульсів. Теорія постійного поля Гольдмана. Моделі Ходжкіна-Хакслі й Нобла та їх аналіз.

2.4. Міжклітинні взаємодії та рецепція.

Види міжклітинних взаємодій: мембранні рецептори, активні центри рецепторів, кінетичні теорії взаємодії речовин з мембранними рецепторами. Молекулярна рецепція. Вторинні посередники та signal transduction. Синаптична передача. Механізми ендо- та екзоцитозу. Спряження збудження з реакцією відповіді. Регуляція мембранних та клітинних функцій.

2.5. Механохімічні процеси.

Термодинамічний опис механохімічного процесу. Структура м'язових білків. Фізико-хімія м'язового скорочення й теоретичні моделі процесу. Механохімічні системи.

2.6. Основні поняття біоенергетики.

Енергетичні функції біомембран. Електрон-транспортні ланцюги. Енергетика окислювально-відновних реакцій. Структура та властивості мітохондрій. Мембранне окислювальне фосфорилування в мітохондріях. Хеміосмотичне спряження. АТФ-синтаза.

3. РАДІАЦІЙНА БІОФІЗИКА

3.1. Взаємодія радіації з речовиною.

Види іонізуючих випромінювань, їх властивості. Джерела випромінювань. Фізичні ефекти при взаємодії іонізуючої радіації з речовиною. Одиниці доз іонізуючих випромінювань та методи дозиметрії. Природна та штучна радіоактивність.

3.2. Вільно-радикальні реакції при взаємодії радіації.

Вільні радикали, фізичні властивості, методи визначення, вільно-радикальні реакції. Радіоліз води, інтермедіати кисню, гідратований електрон. Комірка Франка-Рабиновича. Первинні процеси в опроміненому організмі. Виходи радіаційно-хімічних реакцій, механізми посилення первинних процесів. Кисневий ефект, міграція енергії, утворення перекисів, ланцюгові реакції, ушкодження мембран. Радіопротектори. Антиоксидантна система.

3.3. Вплив іонізуючої радіації на біологічні об'єкти.

Пряма дія іонізуючої радіації на біологічні об'єкти. Теорія "мішені". Радіохімічний вплив іонізуючої радіації на біомолекули (білки, нуклеїнові кислоти, вуглеводи, ліпіди). Вплив іонізуючої радіації на організм. Гостре, хронічне опромінення, локальне пошкодження, наслідки аварії на ЧАЕС, Фукусімі.

4. ВПЛИВ ВИПРОМІНЮВАННЯ НА БІОСИСТЕМИ

4.1. Вплив електромагнітних полів на біооб'єкти.

Вплив постійних електричних та магнітних полів на біологічні об'єкти різного рівня організації. Вплив сантиметрових та міліметрових хвиль на біооб'єкти. Фізичні механізми впливу електромагнітного поля на біосистеми на молекулярному рівні. Поведінка води при впливі НВЧ та КВЧ полів.

4.2. Фотобіологічні процеси.

Фотосинтез – енергетична основа життя, дві фотохімічні системи, механізм фотосинтезу. Бактеріородопсин. Зір, будова та робота ока, молекулярний механізм рецепції світла.

5. ТЕОРЕТИЧНА БІОФІЗИКА

5.1. Динамічні моделі біологічних систем.

Особливості біологічної кінетики і методи побудови кінетичних моделей біосистем. Методи редукції і якісний аналіз динамічних моделей. Граничні цикли та атрактори. Моделі росту популяції. Математичні моделі в мікробіології. Вплив біологічної інерційності на динаміку росту популяції. Моделі Вольтерра і Лоткі. Біологічні тригери, їх характеристики та способи переключення. Генетичний тригер, модель Жакоба і Моно. Математичні моделі конвергентної та дивергентної еволюції. Моделювання реакцій імунної системи. Моделі взаємодії пухлини з організмом.

5.2. Автохвильові процеси в біологічних об'єктах.

Класифікація автохвильових процесів. Диференціальне рівняння типу “реакція-дифузія”. Реакція Білоусова - Жаботинського та модель Брюсселятора. Основні положення теорії біфуркацій та катастроф. Біфуркація Тьюринга. Біфуркація Хопфа. Дисипативні структури і самоорганізація матерії.

6. МЕТОДИ БІОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

6.1. Методи визначення розмірів та форми біомолекул.

Методи визначення щільності та об'єму біомолекул. Визначення молекулярної маси макромолекул методом осмометрії. Залежність характеристичної в'язкості від молекулярної маси та форми біополімерів. Способи вимірювання в'язкості розчинів біополімерів. Метод швидкості седиментації. Метод седиментаційної рівноваги. Метод Арчибальда. Седиментація в градієнті щільності.

6.2. Оптичні методи дослідження біологічних молекул.

Коефіцієнти дифузії біополімерів. Залежність від молекулярної маси та форми біополімерів. Визначення форми, розмірів та поляризованості біомолекул методом подвійного променезаломлення. Визначення молекулярної маси за даними світлорозсіювання малими частками. Сутність динамічного світлорозсіювання. Визначення коефіцієнта дифузії за спектральною інтенсивністю розсіювання. Розсіювання світла великими частками. Малокутове розсіювання рентгенівського проміння.

6.3. Дифракційні методи дослідження структури біополімерів у кристалі.

Розсіювання рентгенівського проміння атомами, молекулами, кристалічною ґраткою. Умова дифракції Бреґга-Вульфа. Поняття зворотної ґратки. Умова дифракції Лауе. Рівняння структурного фактора. Проблема фаз у рентгеноструктурному аналізі та методи її вирішення. Особливості кристалографії глобулярних білків. Етапи дослідження структури. Дифракція рентгенівських променів на фібрилярних структурах. Структура нуклеїнових кислот за рентгенографічними даними. Особливості електронної мікроскопії біоб'єктів. Принцип дії тунельного мікроскопа.

6.4. Спектроскопія біоб'єктів.

Ультрафіолетова абсорбційна спектроскопія. Особливості УФ-спектрів білків та нуклеїнових кислот. Коливальні спектри біомолекул. Інфрачервона спектроскопія біополімерів. Метод матричної ізоляції. Спектроскопія комбінаційного розсіювання. Типи взаємодії поляризованого світла з речовиною. Метод дисперсії оптичного обертання. Визначення ступеню спіральності білків методом ДОО. Метод кругового дихроїзму. Основні параметри спектрів КД. Спектри КД білків та нуклеїнових кислот. Фізичні основи ядерного магнітного резонансу. Застосування метода ЯМР у молекулярній біофізиці та біології. Метод електронного парамагнітного резонансу в біофізиці. Діелектрична спектроскопія біополімерів. Мас-спектрометрія біомолекул.

6.5. Методи дослідження гідратації біомолекул.

Визначення ізотерм гідратації методом гравіметрії. ІЧ-спектроскопічні дослідження гідратації біомолекул. Визначення ступеня гідратації біомолекул у розчинах методом НВЧ-діелектрометрії. Калориметричні дослідження енергетики гідратації. Застосування методу ЯМР для дослідження гідратації біомолекул. Ультразвукова велосиметрія як метод визначення гідратації біомолекул.

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ

Екзаменційний білет містить три питання.

1. Виконання кожного завдання білета оцінюється балом за таблицею:

№ з/п	Кільк . балів	При оцінці відповіді на теоретичні питання	При оцінці розв'язання задачі
1	0	Виявлено, що студент виявив академічну недобросовісність	
2	1-40	Наведено лише визначення термінів, які входять до формулювання питання	Записано коротку умову, наведено діаграму або рисунок до задачі, записано основні закони з цієї теми
3	41-80	Наведено лише загальні відомості	Додатково до п. 2 вказано метод розв'язання задачі
4	81-120	Наведено нечітку відповідь	Додатково до п. 3 при правильному виборі методу розв'язання допущено грубі помилки
5	121-160	Наведено відповідь з незначними помилками	Додатково до п. 3 при правильному виборі методу розв'язання не доведено до кінця
6	161-180	Наведено правильну в цілому відповідь з порушеннями логіки викладення матеріалу або без належних ілюстрацій чи оформлення відповіді ускладнює розуміння тексту	Задачу доведено до правильної кінцевої формули і на тому припинено розв'язання
7	181-200	Повна бездоганна відповідь	Здобуто правильну кінцеву формулу та проведено її аналіз, перевірку на розмірність, вірно визначено числове значення.

2. Загальна оцінка вступного випробування за 200-бальною шкалою розраховується за формулою:

$$\text{Оцінка} = (\text{П1} + \text{П2} + \text{П3}) / 3,$$

де П1, П2, П3 – бали за відповіді на окремі завдання екзаменаційного білета.

3. Якщо «Загальна оцінка» не є цілим числом, то оцінка округлюється з урахуванням правил округлення. В результаті за вступне випробування виставляється одна оцінка за шкалою 100-200 балів або ухвалюється рішення про негативну оцінку підготовленості вступника («незадовільно») у випадку, якщо загальна оцінка виявиться меншою за 100 балів.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Перестюк М. О., Маринець В. В. Теорія рівнянь математичної фізики. Курс лекцій. – Київ: Либідь, 1993. – 248 с.

2. Анісімов І.О. Коливання та хвилі : підручник. К.: Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”, 2009.
3. В.Б. Казанський, Статистична фізика та термодинаміка: Навчальний посібник. –Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2008. – 140 с.
- 4.В.Б. Казанський, В.В. Хардіков, Статистична фізика та термодинаміка: Навчальний посібник. – Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2013. – 292 с.
5. А.М. Федорченко. Вступ до курсу статистичної фізики та термодинаміки, Київ: Вища шк., 1973. — 188 с.
6. М. Г. Находкін, Н. П. Харченко. Атомна фізика. Підручник. Київ. нац. ун-т ім. Т. Шевченка. 2012 - 551 с.
7. О.П. Кобушкін. Атомна фізика. КПІ ім. Ігоря Сікорського Київ 2018 – 310 с.
8. М. В. Висоцький. Атомна, ядерна фізика та елементи квантової механіки. Київ. нац. ун-т ім. Т. Шевченка Київ 2019. 183 с.
9. Основи квантової електроніки : навч. посіб. / О. О. Птащенко; Одес. нац. ун-т ім. І.І. Мечникова. - О. : Астропринт, 2010. - 390 с.
10. Теоретична електродинаміка: підручник /О. В. Багацька, О. Ю. Бутрим, М. М. Колчигін та ін. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2017. – 412 с.
- 11.. Електродинаміка. Теорія поля : Навчальний посібник / Багацька О. В., Бутрим О. Ю., Колчигін М. М. та ін. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2008. – 132 с.
12. Прохоров Е.Д. Твердотіла електроніка: Навчальний посібник. Харків: ХНУ імені В.Н.Каразіна, 2007 - 544 с.
13. О.В. Третяк, В.В. Ільченко. Фізичні основи напівпровідникової електроніки: навчальний посібник. - Київ: ВПЦ «Київський університет», 2011. - 207 с.
- 14 С.М. Левитський. Фізична електроніка: підручник для студ. вищ. навч. закл. - Київ: ВПЦ «Київський університет», 2005. – 153 с.
15. О.Б.І. Михайловський, І.І. Бех, О.Є. Лушкін, В.М. Телега. Основи фізики вакууму та вакуумної техніки. Методи отримання високого й надвисокого вакууму: Навчальний посібник. - Київ: ВПЦ «Київський університет», 2004. - 70с.
16. Dodd, Roger K, Eilbeck, J Chris, Gibbon, John D, and Morris, Hedley C. Solitons and nonlinear wave equations. United States: N. p., 1982.
17. Heinz Georg Schuster, Deterministic Chaos: An Introduction, Physik–Verlag, Weinheim 1986, 220 pages
18. Чорногор Л.Ф. Нелінійна радіофізика. Підручник. Харків, ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2016.
19. Григоруку В.І., Коротков П.А., Хижняк А.І. Лазерна фізика. Київ, МП “Леся”, 1997.
20. Квантова електроніка : навч. посіб./ О. С. Кривець, О. О. Шматько, О. В. Ющенко. – Суми : Сумський державний університет, 2013. – 340 с.
21. Kraus, J.D. Electromagnetics. 4th ed., McGraw-Hill, 1992.XIX.
22. Kraus, J.D. Antennas, McGraw-Hill, 1988. XXV.
23. Baker, G.L., and J.P. Gollub. Chaotic Dynamics. Cambridge University Press, 1996.
24. Schlick T. Molecular Modeling and Simulation. An Interdisciplinary Guide. – N.Y.: Springer, 2006. – 635 p.
25. Біофізика / П.Г.Костюк, В.Л.Зима, І.С.Магура та ін. - К. : Обереги, 2001. - 544 с.
26. Фізика біомембран: підруч. для студ. вищ. навч. закл. / Є. О. Гордієнко, В. В. Товстяк. - К.: Наукова думка, 2009. - 271 с.
27. Nölting V. Methods in Modern Biophysics. – Berlin, Springer-Verlag, 2006. – 257 p.
28. Nelson P. Biological physics. Energy, Information, Life. – NY, W.H. Freeman and Company, 2004. – 598 p.
29. Cotterill R. Biophysics. An Introduction. – John Wiley & Sons, 2003. – 395
30. F. Brauer and C. Castillo-Chavez, Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology, Springer-Verlag, Heidelberg, 2000.
31. Miklós Farkas. Dynamical models in biology. Academic Press, 2001.

32. Allman E. S., Allman E. S., & Rhodes, J. A. Mathematical models in biology: an introduction. Cambridge University Press, 2004.
33. Jeffrey R. Chasnov Mathematical Biology. The Hong Kong University of Science and Technology. 2009.
34. Синергетика : підр. / І. О. Анісімов. К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2014. 511 с.
35. Анісімов І. О. Синергетика. Навчальний посібник. Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2006. 133 с.
36. Murray J. D. Mathematical Biology. I. Introduction. 3 ed. Springer, 2002.
37. Murray J.D. Mathematical Biology. II: Spatial Models and Biomedical Applications. 3 ed. Springer, 2002.
38. Haken H. Synergetics An Introduction. 1983.
39. Nikolis G., Prigogine I. Self-Organization in Nonequilibrium Systems. Wiley-Interscience Publication, Hoboken. 1977.

Голова предметної комісії

Вячеслав МАСЛОВ

Затверджено на засіданні приймальної комісії,
протокол № 3 від 3 квітня 2023 р.

Відповідальний секретар
приймальної комісії

Сергій ЄЛЬЦОВ