



Комп'ютерне моделювання в фізиці.

Частина 2. Моделювання колективних явищ у багаточастинкових системах.

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Перший (бакалаврський)
Галузь знань	10 «Природничі науки»
Спеціальність	104 «Фізика та астрономія»
Освітня програма	Комп'ютерне моделювання фізичних процесів
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	очна(денна)
Рік підготовки, семестр	4 курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	90 годин (3 кредити ЕКТС)
Семестровий контроль/ контрольні заходи	екзамен
Розклад занять	https://schedule.kpi.ua/ http://roz.kpi.ua/
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: доктор філософії, асистент Майкут Сергій Олексійович, s.maikuta@kpi.ua Лабораторні: доктор філософії, асистент Майкут Сергій Олексійович, s.maikuta@kpi.ua
Розміщення курсу	Посилання на дистанційний ресурс (Google classroom) https://classroom.google.com/c/NDY2NjI0MDgyMDgw?cjc=owgunej

Програма навчальної дисципліни

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

В курсі «Комп'ютерне моделювання в фізиці-2: Моделювання колективних явищ у багаточастинкових системах» розглядаються фізико-математичні моделі типових природніх явищ та приладів шляхом, моделі. Як-то Броунівський рух, рух потоку через трубопровід складної форми чи через змішувачі. Дисципліна відноситься до циклу ВНЗ професійної підготовки.

В наслідок вивчення курсу, студенти набувають знання про комп'ютерне моделювання та дослідження поведінки речовин (молекул) при русі у потоці. Загалом, досліджуються три фізики: суто математична інтерпретація руху та взаємодії між собою, взаємодія заряджених частинок та частинок, що рухаються у потоці (ламінальному або турбулентному).

Мета:

- Ознайомити студентів із типовими фізико-топологічними моделями, що використовуються для відтворення процесів взаємодії частинок між собою на навколишнім простором;

- Навчити експортувати результати з однієї фізики (модуля) до іншої, як вхідні параметри для створенні фонового потоку, який діятиме на частинки;
- Дати послідовність дій для проведення комплексного дослідження фізичних об'єктів та продуктивного постпроцесингу.

Предмет вивчення:

- Теоретична фізика та математика;
- Прикладне програмне забезпечення;
- Вибір граничних умов та середовища розрахунку;
- Кінцево-різницева сітка;.

Навики:

- Моделювання руху частинок (молекули, атоми, електрони) у полі з градієнтом;
- Розрізнявати за фізичною суттю ламінарні потоки та турбулентні;
- Проектування електронно-променевої прилади з урахуванням кулонівських та релятивістських сил у електронному промені;
- Проводити параметричне дослідження, мультифізичне та оптимізацію;
- Багатогранно презентувати та обробляти результати.

Загальні компетентності:

- ЗК1 Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.
- ЗК2 Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.
- ЗК3 Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.
- ЗК5 Здатність приймати обґрунтовані рішення.
- ЗК9 Визначеність і наполегливість щодо поставлених завдань і взятих обов'язків.

Фахові компетентності:

- ФК5 Здатність виконувати обчислювальні експерименти, використовувати чисельні методи для розв'язування фізичних та астрономічних задач і моделювання фізичних систем;
- ФК6 Здатність моделювати фізичні системи та астрономічні явища і процеси;
- ФК7 Здатність використовувати базові знання з фізики та астрономії для розуміння будови та поведінки природних і штучних об'єктів, законів існування та еволюції Всесвіту;
- ФК9 Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації;
- ФК10 Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей;
- ФК11 Розвинуте відчуття особистої відповідальності за достовірність результатів досліджень;
- ФК16 Здатність моделювати та досліджувати процеси природоохоронного призначення;
- ФК17 Здатність використовувати спеціалізоване програмне забезпечення для аналізу будь-яких фізичних процесів.

Програмні результати навчання:

- ПРН1 Знати, розуміти та вміти застосовувати на базовому рівні основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та квантової оптики, фізики атома та атомного ядра для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики та/або астрономії;

- ПРН3 Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій;
- ПРН5 Знати, аналізувати і пояснювати нові наукові результати, одержані у ході проведення фізичних та астрономічних досліджень відповідно до спеціалізації;
- ПРН10 Вміти планувати дослідження, обирати оптимальні методи та засоби досягнення мети дослідження, знаходити шляхи розв'язання наукових завдань та вдосконалення застосованих методів;
- ПРН15 Вміти працювати із сучасною обчислювальною технікою, вміти використовувати стандартні пакети прикладних програм і програмувати на рівні, достатньому для реалізації чисельних методів розв'язування фізичних задач, комп'ютерного моделювання фізичних та астрономічних явищ і процесів, виконання обчислювальних експериментів.

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

Пререквізити. Вивчення дисципліни базується на знанні студентами курсу «Комп'ютерне моделювання в фізиці. Частина 1. Чисельні методи розв'язку диференціальних рівнянь».

Постреквізити. Знання, отримані студентами з курсу «Комп'ютерне моделювання в фізиці. Частина 2. Моделювання колективних явищ в багаточастинкових системах» використовуються при подальшому навчанні в магістратурі в курсах «Комп'ютерне моделювання колективних процесів в твердому тілі» та ін.

3. Зміст навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин				
	Всього	у тому числі			
		Лекції	Практичні (семінарські)	комп'ютерний практикум	СРС
1	2	3	4	5	6
Розділ 1. Сфери використання мультичастинкових систем					
<i>Введення. Мультичастинкові системи</i>	3	3	-	-	0
<i>Тема 1. Відстеження заряджених частинок</i>	3	2	-	-	1
<i>Тема 2. Відстеження частинок у потоці рідини</i>	4	3	-	-	1
<i>Тема 3. Математичне відстеження частинок</i>	5	4	-	-	1
Разом за розділом 1	15	12	-	-	3
Розділ 2. Рух заряджених частинок у електричних та магнітних полях					
<i>Тема 1 Базові рівняння розподілу електромагнітного поля та руху частинок у ньому</i>	4	2	-	2	0
<i>Тема 2 Побудова розрахункової області задачі</i>	5	1	-	2	2
<i>Тема 3. Визначення параметрів задачі</i>	5	1	-	2	2

Тема 4. Визначення початкових та граничних умов задачі	6	1	-	4	1
Разом за розділом 2	20	5	-	10	5
Розділ 3. Рух молекул у потоці рідини					
Тема 1. Базові рівняння руху рідини та частинок	6	3	-	2	1
Тема 2. Побудова розрахункової області задачі	6	1	-	4	1
Тема 3. Визначення параметрів задачі	8	1	-	4	3
Разом за розділом 3	20	5	-	10	5
Розділ 4. Математична інтерпретація поведінки колективів					
Тема 1. Граничні умови першого роду (Діріхле)	4	1	-	2	1
Тема 2. Граничні умови другого роду (Неймана)	4	1	-	2	1
Тема 3. Граничні умови третього роду (Ньютона)	4	1	-	1	2
Тема 4. Розв'язок типових задач	6	1	-	1	4
Разом за розділом 4	18	4	-	6	8
Модульна контрольна робота	-	-	-	-	8
Екзамен					9
Всього годин	90	26	-	26	38

4. Навчальні матеріали та ресурси

Література

Базова

1. Котовський В.Й. Цибульський Л.Ю. Комп'ютерне моделювання фізичних процесів. - К., Наукова думка, 2019. - 215 с.
2. Доля П. Г. Основи моделювання в COMSOL Multiphysics [Електронний ресурс] / Доля П. Г.; ХНУ ім. Каразіна. – Електрон. текст. дані (1 файл: 14,58 Мб). – Х.: ХНУ ім. Каразіна, 2019 р. – 529 с. – Режим доступу: http://geometry.karazin.ua/resources/documents/20191219182458_3cc8431d.pdf
3. Кособуцький П. С. Мікро- і наноелектромеханічні системи: базові принципи проектування явищ, матеріалів та елементів [Текст] : навч. посіб. / Петро Кособуцький, Михайло Лобур, Володимир Кар-кульовський – Л.: Вид-во Львів. політехніки, 2017. – 400 с.
4. Сайт компанії розроблювача пакета COMSOL Multiphysics [Електронний ресурс] / www.comsol.com. Режим доступу: <http://www.comsol.com/>, вільний

Додаткова

1. Zimmerman, W.B.. (2006). COMSOL MULTIPHYSICS AND THE BASICS OF NUMERICAL ANALYSIS. DOI: 10.1142/9789812773302_0002.
2. Сайт компанії розроблювача пакета MATLAB [Електронний ресурс] / www.mathworks.com. Режим доступу: <http://www.mathworks.com/>, вільний.
3. Vakulenko, D. V., Kuchvara, O. M., Semenets, A. V., & Andrushchak, I. Y. (2019). ЗАСТОСУВАННЯ COMSOL MULTIPHYSICS ДЛЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПАДУ ДНК У ПЛАЗМІ. Медична освіта, (3), 62–65. <https://doi.org/10.11603/me.2414-5998.2019.3.10539>.

4. Khelfi, Safia & Helifa, Bachir & Lefkaier, Ibn & Hachani, Lakhdar. (2020). Simulation of Electromagnetic Systems by COMSOL Multiphysics. DOI: 10.1007/978-3-030-37207-1_62.
5. Al Tahhan, Shaymaa. (2017). FBG by Comsol Multiphysics. DOI: 10.13140/RG.2.2.35194.29120.
6. López-Vizcaíno, Rubén & Yustres, Ángel & Cabrera, Virginia & Navarro, Vicente. (2020). Development of a THMC code for bentonites in COMSOL Multiphysics. E3S Web of Conferences. 195. DOI: 10.1051/e3sconf/202019504002.
7. Hashiguchi, Masa. (2017). COMSOL Multiphysics® as Engineering Education Tool. The Proceedings of the Tecnology and Society Conference. 2017. 112. DOI: 10.1299/jsmetsd.2017.112.
8. Ries, C.B.. (2012). ComsolGrid: COMSOL Multiphysics und BOINC. DOI: 10.1007/978-3-642-23383-8_14.
9. COMSOL,. (2014). COMSOL Multiphysics 4.4, User 's Guide. URL: https://www.researchgate.net/profile/Rayudu_Nithin_Manohar/post/Can_any_one_please_give_me_a_link_that_would_help_me_to_understand_clearly_comsol_multiphysics/attachment/59d635aec49f478072ea380a/AS:273666233831428@1442258523089/download/COMSOLMultiphysicsUsersGuide.pdf

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

ЛЕКЦІЇ

Введення

1. Предмет та мета вивчення курсу, призначення курсу, його структура, зміст та методичні вказівки для вивчення.
2. Терміни, визначення, основні поняття по фізиці мультичастинкових систем.

Розділ 1. Сфери використання мультичастинкових систем

Тема 1.1 Відстеження заряджених частинок

1. Сфери застосування моделей
2. Перевага наявності механізму врахування кулонівських сил
3. Способи використання впливу релятивістської сили

Тема 1.2 Відстеження частинок у потоці рідини

1. Сфери застосування моделей
2. Одно- та двонаправлені взаємодії у моделях «частинка-середовище»

Тема 1.3 Математичне відстеження частинок

1. Граничні умови
2. Механізм появи та генерації вторинних частинок
3. Розширені інструменти моделювання

Розділ 2. Математична інтерпретація поведінки колективів

Тема 2.1 Граничні умови першого роду (Діріхле)

1. Розташування функціоналу у навігаторі моделей (Model Wizard)
2. Форма запису рівнянь та синтаксис.
3. Особливості задавання параметрів.
4. Вибір різновиду процесу, який моделюється шаблоном.
5. Конструктор моделей (Model Builder).

Тема 2.2 Граничні умови другого роду (Неймана)

1. Розташування функціоналу у навігаторі моделей (Model Wizard).
2. Вибір різновиду процесу, який моделюється шаблоном.

Тема 2.3 Граничні умови третього роду (Робена)

1. Завдання глобальних постійних, виразів, функцій і рівнянь
2. Завдання властивостей матеріалів (коефіцієнтів диференціальних рівнянь)

Тема 2.4 Розв'язок типових задач

1. Рух захоплених протонів у «пастці» магнітного поля землі.
2. Рух зірок в галактиці на основі визначеної користувачем сили взаємодії частинок з частинками для гравітаційного притягання.
3. Робота амортизатора

Розділ 3. Рух заряджених частинок у електричних та магнітних полях

Тема 3.1. Базові рівняння розподілу електромагнітного поля та руху частинок у ньому

1. Рівняння Пуассона, Лапласа та Лагранжа.
2. Рівняння Лоренца та Кулона.
3. Форми запису рівнянь та налаштування одно- і двосторонньої взаємодії з магнітним та електростатичним полями

Тема 3.2 Побудова розрахункової області задачі

1. Критерії вибору дво- чи тримірного простору.
2. Вимоги до кінцево-різницевої сітки на області появи та зони руху частинок.
3. Типи вирішувачів.
4. Дискретизація простору.
5. Помилки розрахунків.

Тема 3.3 Визначення параметрів задачі

1. Рекомендації по включенню у розрахунок кулонівських сил.
2. Рекомендації по включенню у розрахунок релятивістських сил.

Тема 3.4 Визначення початкових та граничних умов задачі

1. Умови появи частинок. Способи визначення їх стартових позиції, густини та розподілу.
2. Умови зупинки, зникнення та регенерації частинок (вторинної емісії).
3. Опис способів виникнення взаємодії між собою.

Розділ 4. Рух молекул у потоці рідини

Тема 4.1 Базові рівняння руху рідини та частинок

1. Рівняння Ньютона, Рейнольдса. Шиллера - Науманна та Нав'є - Стокса
2. Форми запису рівнянь та налаштування взаємодії з фоновим потоком (несучим), електромагнітним полем та діелектрофоретичними силами.

Тема 4.2 Побудова розрахункової області задачі

1. Критерії вибору дво- чи тримірного простору.

2. Вимоги до кінцево-різницевої сітки на області появи та зони руху частинок.
3. Типи вирішувачів.
4. Дискретизація простору.
5. Помилки розрахунків.

Тема 4.3 Визначення параметрів задачі

1. Рекомендації по включенню у розрахунок двостороннього зв'язку з потоком.
2. Рекомендації по включенню у розрахунок зв'язку з електричним та магнітним полем.
3. Рекомендації по включенню у розрахунок вплив діелектрофоретичної сили

Тема 4.4 Визначення початкових та граничних умов задачі

1. Умови появи частинок. Способи визначення їх стартових позиції, густини та розподілу.
2. Умови зупинки, зникнення та регенерації частинок (вторинної емісії).
3. Опис способів виникнення взаємодії між собою.

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

№ з/п	Назва лабораторної роботи (комп'ютерного практикуму)	Кількість ауд. годин
1	Рух електронів у електростатичних лінзах	10
2	Акустична левітація	8
3	Діелектрофорез	8
	Всього	26

6. Самостійна робота студента

№ з/п	Назва теми, що виноситься на самостійне опрацювання	Кількість годин СРС
1	Закони розподілу просторового заряду	1
2	Розподіл потоку рідини у трубопроводах	1
3	Конфігурація магнітного поля землі	1
4	Граничні умови модулі трасування заряджених частинок	2
5	Перелік параметрів, що використовуються для розпису моделі руху заряджених частинок	2
6	Завдання властивостей матеріалів та граничних умов, узгодження модуля з моделями електростатичного та магнітного полів	1
7	Перелік еталонних моделей	1
8	Перелік параметрів, що використовуються для розпису моделі руху частинок у рідині	1
9	Завдання властивостей матеріалів та граничних умов, узгодження модуля з моделями електростатичного та магнітного полів та розподілу теплового поля	3
10	Аналітичне використання умов Діріхле	1
11	Аналітичне використання умов Ньютона	1
12	Аналітичне використання умов Робена	2
	Всього	21

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Від студента(-ки) очікується:

- зацікавленість у освоєнні дисципліни;
- сумлінне виконання поставлених завдань;
- присутність на лекційних та лабораторних заняттях;
- періодичний перегляд (мінімум один раз на тиждень) корпоративної пошти чи групового чату, як засобу комунікації з викладачем
- мати творчий підхід до оформлення результатів лабораторних робіт, що вони були наочно зрозумілі, та виконавець сам міг їх пояснити;

Виконання студентами навчальних завдань реєструється викладачем в журналі і надається старостам груп по результатам атестацій і екзамену.

Питання та пропозиції студент може озвучити в час наданий викладачем, або після лекції.

Викладач зобов'язаний видалити студента з аудиторії, якщо вважає, що поведінка студента заважає проведенню заняття. Виховні дії під час лекції не доцільні і не рекомендовані методичною радою факультету.

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

8.1 Розподіл навчальних годин за видами занять.

Всього годин	Аудиторних, 54 години		Самостійна робота студента , 51 години			Семестр. контр.
	Лекцій	Лабораторні роботи	Вивчення лекцій, екзамен	Розрахункова робота	Підготовка лабораторних робіт	
90	26	13	25	0	26	екзамен

8.2 Система рейтингової оцінки за видами занять

№ п.п	Заняття, що підлягають рейтинговій оцінці	Загальна кількість завдань	Максимальний бал за 1 завдання	Кількість завдань на «відмінно»	Кількість балів на «відмінно»
1	Відвідування лекцій	0	0	0	0
2	Виконання лабораторних робіт	3	5	5	15
3	Захист лабораторних робіт	3	5	5	15
4	Розрахункова робота	1	1	1	20
5	Екзамен	3	20	3	50
	Загальний рейтинг				100

8.3 Модульний розподіл змісту дисципліни та балів

Змістовний модуль	Лекції	лабораторні	Розрахункова	Екзамен	Разом
1 Сфери використання мультичастинкових систем	0	-	-	-	0
2. Рух заряджених частинок у електричних та магнітних полях	0	10	-	-	10
3. Рух молекул у потоці рідини	0	10	-	-	10
4. Математична інтерпретація поведінки колективів	0	10	-	-	10
			20	50	70
Бали за семестр	18	36	20	50	100

Виконання студентами навчальних завдань реєструється викладачем в журналі і надається старостам груп по результатам атестацій і екзамену.

8.4 Участь в лекції та її оцінювання

Присутність студента не є достатньою умовою участі у лекції. Під час лекції студент повинен уважно слухати лектора.

Слухання лекції передбачає повне зосередження студента на змісті лекції, який передається словами викладача та дидактичними засобами лекції. Під час лекції неприпустимі відволікання та розмова студента. Особливо неприпустима поведінка, що пов'язана з оцінюванням будь чого що відбувається в аудиторії. Викладач може не зарахувати бали за відвідування лекції студенту, якщо вважає, що той не достатньо приймав участь у ній.

Питання та пропозиції студент може озвучити в час наданий викладачем, або після лекції.

Викладач зобов'язаний видалити студента з аудиторії, якщо вважає, що поведінка студента заважає проведенню заняття. Виховні дії під час лекції не доцільні і не рекомендовані методичною радою факультету.

За рекомендацією викладача студент конспектує матеріалами, що винесені на самостійне опрацювання. Цей матеріал також є обов'язковим для вивчення. Матеріал, що винесено на самостійне опрацювання, в конспекті відображається по розділах і має містити відповіді на питання:

- метод кінцевих елементів: концепція методу кінцевих елементів, переваги й недоліки;
- типи кінцевих елементів. Розбивання області на кінцеві елементи.
- інтерполяційні поліноми. Інтерполяція векторних величин.

Інтерполяційні поліноми для дискретизованої області;

- побудова розрахункової області засобами комп'ютерного моделювання;
- завдання глобальних постійних, виразів, функцій і рівнянь. Завдання властивостей матеріалів;
- завдання граничних і початкових умов;
- типи розрахунків. Завдання й найпростіше використання вирішувачів. Налаштування типів розрахунків і методів. Методи чисельного моделювання. Помилки розрахунків.

Перед екзаменом студент отримує додаткове питання по кожній пропущеній лекції. При незадовільних відповідях студент до екзамену не допускається.

8.5 Лабораторні роботи та їх оцінювання

Студент має приходити на занятті підготовленим, опрацювавши теоретичні матеріали та виконавши попередні лабораторні роботи. Студент повинен знати мету та послідовність виконання завдання. Максимальний бал отримує той, хто вчасно представив вірні результати виконання лабораторної роботи.

Максимальний бал складається з двох частин:

- виконання та оформлення завдань – 2 балів;
- захист лабораторних робіт – 2 балів.

Участь в усіх передбачених навчальним планом лабораторних заняттях та захист результатів обов'язкова.

8.6. Рейтингова оцінка ефективності роботи студента протягом семестру.

Значення рейтингу з дисципліни	Оцінка ECTS та визначення	Традиційна оцінка
95...100	A - відмінно	відмінно
85...94	B – дуже добре	добре
75... 84	C - добре	
65... 74	D - задовільно	задовільно
60...64	E – достатньо (задовольняє мінімальні критерії)	
50...59	FX – незадовільно (допущені до екзамену)	незадовільно
PO<50	F – незадовільно (потрібна додаткова робота)	

8.7 Студенти, які набрали протягом семестру кількість балів ($PO > 50$) можуть збільшити свої бали за рахунок балів отриманих під час екзамену.

8.7 Екзамен може проводитися за двома формами:

- студент готує відповідь на екзаменаційний білет, що містить 3 запитання.
 - екзаменаційний білет у вигляді тесту: 9 запитань з 4 варіантами відповідей, з яких одна вірна.
- Максимальна оцінка за правильну відповідь на білет – 27 балів

8.8 Після складання екзамену оцінка визначається за сумою семестрових та екзаменаційних балів відповідно до таблиці п.8.8.

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Тестові теоретичні питання.

Що таке модуль відстеження частинок (Particle Tracing Module) і для чого він використовується?

Як відрізняється Лагранжіанський підхід від методів кінцевих елементів у фізичних обчисленнях?

Які основні фізичні інтерфейси використовуються для відстеження заряджених частинок?

Як застосовується метод Монте-Карло для моделювання зіткнень частинок?

Які переваги і недоліки односпрямованого та двонаправленого зв'язку між полями та частинками?

Чому важливо використовувати функції розподілу ймовірностей у моделюванні фізичних процесів?

Що таке PDF та CDF і як вони пов'язані?

1. Як працює метод оберненого перетворення для вибірки випадкових чисел?
2. У чому відмінність між випадковими і псевдовипадковими числами?
3. Як функції Random та Randomnormal використовуються у COMSOL Multiphysics?
4. Що таке фазовий простір і для чого він використовується у фізиці заряджених пучків?
5. Чим відрізняються ламінарні та неламінарні пучки?
6. Як виглядає фазовий портрет ламінарного та неламінарного пучків?
7. Яке значення має еліпс у фазовому просторі для опису розподілу частинок?
8. Що таке емітанс пучка і як він визначається?
9. Які параметри визначають форму еліпса у фазовому просторі?
10. Як емітанс інтерпретується з точки зору статистики?
11. Які методи зниження емітансу існують у фізиці пучків?
12. Що таке діелектрофорез (DEP) і які типи DEP існують?
13. Які сили діють на частинку у неоднорідному статичному електричному полі?
14. Як впливає діелектрофоретична сила на сферичні частинки?
15. Як діелектрофоретична сила змінюється у змінному електричному полі?
16. Які фізичні інтерфейси використовуються для моделювання діелектрофоретичного розділення?
17. Що таке співвідношення Клаузіуса-Моссотті і де воно використовується?
18. Як у COMSOL Multiphysics моделюється поділ тромбоцитів та еритроцитів?
19. Яка роль броунівського руху у діелектрофоретичному розділенні?
20. Як аналіз результатів моделювання впливає на оптимізацію процесів розділення частинок?
21. Які переваги використання мікрофлюїдних систем для біомедичного моделювання?
22. Яка ефективність розділення клітин в системах lab-on-a-chip?
23. Які перспективи розвитку діелектрофоретичних технологій у медичній діагностиці?

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено старшим викладачем кафедри ЗФ та МФП, доктором філософії Майкутом С.О.

Ухвалено кафедрою загальної фізики та моделювання фізичних процесів (протокол № 1/06-25 від 15.06.2025р.)

Погоджено Методичною комісією Фізико-математичного факультету (протокол № 10 від 27.06.2025р.)