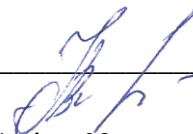


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ВИННИЧЕНКА**

Кафедра природничих наук та методик їхнього навчання

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»
В.о. завідувача кафедри**



(Протокол 1 від «03» вересня 2018 року)

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

**ПП 2.03.01 ТЕОРЕТИЧНА ФІЗИКА: КВАНТОВА МЕХАНІКА ТА
СТАТИСТИЧНА ТЕРМОДИНАМІКА**

(шифр і назва навчальної дисципліни)

галузь 01 Освіта/Педагогіка
(шифр галузі і назва галузі знань)

спеціальність 014 Середня освіта (за предметними спеціальностями)
(код і назва спеціальності)

предметна спеціальність 014.15 Середня освіта (Природничі науки)
(код і назва спеціальності (предметної спеціальності))

освітня програма Середня освіта (Природничі науки)
(назва освітньої програми)

рівень вищої освіти другий (магістерський)
(назва рівня вищої освіти)

факультет природничо-географічний
(назва інституту, факультету, відділення)

форма навчання денна
(денна, заочна)

2018–2019 навчальний рік

Робоча програма _____ з теоретичної фізики _____ для студентів
(назва навчальної дисципліни)
спеціальності 014 «Середня освіта (Природничі науки)»
освітня програма «Середня освіта (Природничі науки)» на другому
(магістерському) рівні вищої освіти

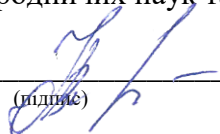
Розробник: Подопрігора Наталія Володимирівна, в.о. завідувача кафедри природничих наук та методик їхнього навчання, доктор педагогічних наук, доцент

(вказати авторів, їхні посади, наукові ступені та вчені звання)

Робочу програму схвалено на засіданні кафедри природничих наук та методик їхнього навчання

Протокол № 1 від 03 вересня 2018 року

В.о. завідувача кафедри природничих наук та методики їхнього навчання

 / Подопрігора Н.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

1. ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Найменування показників	Галузь знань, спеціальність, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни
		денна форма навчання
Кількість кредитів (ECTS) – 3	Галузь знань 01 Освіта/Педагогіка	Нормативна
Модулів – 2	Спеціальність 014 «Середня освіта (Природничі науки)	Рік підготовки:
Змістових модулів – 6		1-й
Індивідуальне науково-дослідне завдання _____ (назва)		Семестр
Загальна кількість годин – 90 44/46 (аудиторна/самостійна)		2-й
Кількість навчальних тижнів – 17 Тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 3 ; самостійної роботи студента – 3	Другий (магістерський) рівень вищої освіти	24 год.
		Практичні, семінарські
		20 год.
		Лабораторні
		0 год.
		Самостійна робота
		46 год.
Індивідуальні завдання:		
0 год.		
Вид контролю: 2-й семестр – <i>екзамен</i>		

Примітка.

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить:

для денної форми навчання – 48,9% / 51,1%

2. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

2.1. Мета дисципліни «Теоретична фізика: квантова механіка та статистична термодинаміка» визначається метою освітньо-професійної програми (ОПП) підготовки магістрів спеціальності 014 «Середня освіта (Природничі науки)», що сприяє формуванню інтегрованої динамічної комбінації знань і умінь для вивчення студентами теоретичних та методологічних засад теоретичної фізики відповідно до структури спеціальної фахової компетентності з теоретичної фізики: *квантова механіка та статистична термодинаміка*. Теоретична фізика, як навчальна дисципліна, згідно робочого навчального плану підготовки магістрів спеціальності 014 «Середня освіта (Природничі науки)» (2018–2019 н.р.) розробленого для студентів, які вступали на навчання на умовах перехресного вступу, для яких встановлено додаткові вимоги в частині строків навчання та виконання додаткового навчального плану для отримання базової підготовки з фізики, і входить до циклу дисциплін професійної підготовки майбутніх учителів природничих наук, фізики, хімії, біології старшої школи.

Структурована система знань, розумінь, умінь, здатностей та ін. компетенцій з квантової механіки (КМ) та статистичної термодинаміки (СТД) в структурі професійної компетентності майбутніх фахівців забезпечується їхньою теоретичною і практичною підготовкою, сприяючи *формуванню* в студентів: цілісного бачення світу, виробленню в них наукового підходу до аналізу проблем оточуючого світу; теоретичного та критичного мислення під час тлумачення явищ мікросвіту та процесів на мікроскопічному рівні відповідно до теоретичних основ КМ, а також формуванню їхньої здатності до теоретичних узагальнень у пізнанні з позицій: модельних гіпотез (кінетичної теорії ідеального газу і ін.), математичних гіпотез (кінетичних рівнянь термодинаміки, явищ переносу, теплових процесів і ін.), та методу принципів (СТД);

Кінцева мета вивчення дисципліни «Теоретична фізика квантова механіка та статистична термодинаміка» спрямована на *формування* у студентів засобами навчання КМ та СТД цілісного бачення світу, науковому світогляду; виробленню здатності до: реалізації наукового підходу під час аналізу проблем оточуючого світу, методології наукового пізнання у навчально-пізнавальній діяльності; *розвитку*: загальнонавчальних умінь (аналізу, узагальненню, систематизації, моделюванню і ін.), абстрактно-логічного, теоретичного та критичного мислення; творчих здібностей на засадах фундаменталізації, міждисциплінарної інтеграції, інформатизації та професійної спрямованості навчання.

2.2. Завдання вивчення дисципліни: під час вивчення основ КМ студенти знайомляться із застосуванням операторного підходу, заснованого на інтегралах руху та співвідношеннях комутації. Вивчаються постулати КМ та їхнє прикладне застосування для опису найпростіших квантових систем у задачах, які мають точні розв'язки (частинка в потенціальній ямі, гармонічний осцилятор і атом гідрогену). кількісного підходу до опису та аналізу квантово-механічних станів мікроскопічних фізичних систем. При цьому наголос робиться на загальних підходах щодо опису цих станів у найпростіших зовнішніх умовах (стаціонарні, одновимірні потенціальні поля). Особлива увага приділяється загальним

теоретичним методам (квантово-механічне рівняння та закони збереження) знаходження квантових станів мікрооб'єктів (стандартні методи розв'язування рівняння Шредінгера), або системи мікрооб'єктів (стандартні методики виконання наближених розрахунків: теорія збурень, метод послідовних наближень і ін.) у періодичних фізичних полях на базі методу Хартрі-Фока. Встановлюються межі застосування квантової механіки та критерії її виродження при переході до класичної механіки.

Під час вивчення основ СТД студенти з'ясовують: що являють собою макроскопічні фізичні системи, які перебувають у рівноважному стані, процеси переходу між цими станами на основі феноменологічного та статистичного методів дослідження і показати, що одержані висновки розширюють і доповнюють цілісне уявлення студентів про науковий підхід у дослідженні фізичних явищ, формування фундаментальних, інтегрованих і технологічних знань; розширюють та узагальнюють зміст основних фізичних понять (ТД: макроскопічна система, макроскопічні і мікроскопічні, калоричні і термічні параметри, початки термодинаміки, необоротність і ін.; СФ: ймовірність, фазовий простір, статистичний ансамбль систем, розподіли Гіббса, квантова і класична статистика, критерії виродження, статистичний зміст законів термодинаміки, принцип відповідності і ін.); вимоги для встановлення конкретних меж, критеріїв існування та використання законів СТД; якісно обговорюють проблеми і завдання теоретичних методів СТД.

Вивчення дисципліни передбачає, отримання знань та вмінь, які необхідні майбутньому вчителю природничих наук та фізики в його майбутній професійній діяльності.

2.3. Міждисциплінарні зв'язки: Дисципліна «Теоретична фізика: квантова механіка та статистична термодинаміка» вивчається у тісному дидактичному зв'язку із дисциплінами циклу професійної підготовки (математичні методи фізики, загальна фізика та методика навчання природничих наук, зокрема фізики), засвоєння яких необхідно майбутнім учителям природничих наук та фізики для подальшої навчально-пізнавальної та професійної діяльності. Дисципліна є часткою двосеместрового курсу теоретичної фізики («Теоретична механіка та електродинаміка», «Квантова механіка та статистична термодинаміка»), охоплює початковий мінімум засобів і прийомів теоретичної фізики. Набутий студентами на цей час багаж знань з дисциплін «Математичні методи фізики» та «Загальна фізика» (розділи «Механіка», «Молекулярна фізика та термодинаміка», «Електрика та магнетизм», «Оптика та квантова фізика») дозволяють знайомити студентів з сучасними методами дослідження фізичних явищ на якісному рівні. Здатність студентів застосовувати знання та вміння сформовані під час вивчення теоретичної фізики, розділ: квантова механіка та статистична термодинаміка в подальшому є основою для вивчення інших дисциплін: сучасних питань фізики, фізики твердого тіла, зокрема електронної теорії речовини, природничо-наукової картини світу тощо.

3. ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Модуль 1. КВАНТОВА МЕХАНІКА

ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ І ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ

Тема 1. Вступ.

Предмет і місце квантової механіки в сучасній фізиці.

Тема 2. Експериментальні основи квантової механіки.

Обмеженість класичної фізики при поясненні явищ мікросвіту і необхідність переходу до квантових понять. Ідеї Планка, Ейнштейна, де Бройля: дискретність процесів випромінювання і поглинання світла (*експериментальне вивчення випромінювання і поглинання світла в спектрах абсолютно чорного тіла: закони Кірхгофа, Стефана-Больцмана, Віна; формули Релея-Джінса, Планка*), модель атома Резерфорда-Бора, корпускулярно-хвильовий дуалізм (*досліди Франка і Герца, Штерна і Герлах, Девісона і Джермера*). Необхідність статистичної інтерпретації квантових явищ. Принцип відповідності. Роль сталої Планка.

Тема 3. Теоретичні основи квантової механіки.

Специфіка фізики мікрооб'єктів: ідеї квантування (дискретності), корпускулярно-хвильового дуалізму, співвідношення невизначеностей Гейзенберга, імовірнісний характер поведінки мікрооб'єктів. *Деякі результати, що впливають із співвідношення невизначеностей*. Неможливість класичної інтерпретації мікрооб'єктів – відмова від уявлень класичної фізики.

Тема 4. Фізичні основи і математичний апарат квантової механіки.

Оператори і дії над ними. Лінійні оператори. Самоспряжені оператори. Опис стану мікросистем. Хвильова функція. Квантово-механічний принцип суперпозиції. Власні функції і власні значення самоспряжених операторів, їх фізичний зміст. Основні властивості функцій операторів квантової механіки. Середні значення фізичних величин, ймовірність їх дозволених значень. Комутуючі оператори. Умови можливості одночасного вимірювання різних механічних величин у квантовій механіці. Повний набір спостережуваних.

Принцип причинності у квантовій механіці і рівняння Шредінгера. Властивості стаціонарних станів. Стаціонарне рівняння Шредінгера. Основні оператори квантової механіки в координатному зображенні. Оператори координати і імпульсу, кінетичної, потенціальної і повної енергії, оператор моментів імпульсу, гамільтоніан. *Нерівності Гейзенберга у загальному представленні (для будь-якої пари спряжених квантово-механічних величин)*.

ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 2. ДЕЯКІ ЗАСТОСУВАННЯ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ

Тема 1. Одновимірний рух.

Загальні властивості одновимірного руху. Задача про частинку в потенціальній ямі.

Лінійний гармонічний осцилятор в координатному зображенні.

Тема 2. Рух частинки в центрально-симетричному полі.

Власні функції і власні значення операторів орбітального моменту імпульсу і проекції моменту імпульсу в полі центральних сил. Радіальне рівняння Шредінгера. Рух у кулонівському полі. Теорія атома гідрогену: радіальне рівняння Шредінгера, енергетичний спектр електрона (формула Бальмера). Хвильові функції атома водню. Класифікація атомів за допомогою квантових чисел.

Тема 3. Спін електрона. *Власний механічний і магнітний моменти електрона. Експериментальні методи доказу існування спіну електрона. Досліди Ейнштейна і де Гааза, Штерна і Герлаха.* Оператори спіна. Хвильова функція електрона з урахуванням спіна. Повний набір величин, що спостерігаються для електрона в атомі.

ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 3. ФІЗИКА АТОМІВ І МОЛЕКУЛ.

Тема 1. Теорія збурень.

Наближені методи квантової механіки. Стаціонарна теорія збурень в квазікласичному наближенні (при наявності і відсутності виродження).

Система тотожних частинок. Принцип тотожності частинок: симетричні та антисиметричні стани. Зв'язок спіну із статистикою: бозони, ферміони. Принцип Паулі.

Тема 2. Атом гелію. Якісна теорія атома гелію. Мультиплетність станів. Орто- і паракелій. *Наближена кількісна теорія атома гелію: поняття про метод самоузгодженого поля. Обмінна та кулонівська енергії.*

Багатоелектронні атоми. Класифікація станів електрона в атомі. Періодична система елементів Д.І. Менделєєва.

Тема 3. Взаємодія атома з електромагнітним полем.

Молекула водню. Природа хімічного зв'язку. *Атоми в зовнішньому полі. Ефект Зеємана. Пара- і діаманітні властивості атомів і молекул. Нанівпровідники і їх застосування.*

Тема 4. Висновки.

Формальна схема квантової механіки. Межі застосування квантової теорії. Фізична картина мікросвіту.

Модуль 2. СТАТИСТИЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

Змістовий модуль 1. ТЕРМОДИНАМІКА

Тема 1. Вступ.

Феноменологічний і статистичний методи в фізиці. Феноменологічна термодинаміка і статистична фізика.

Тема 2. Основні поняття термодинаміки

Термодинамічна система, параметри, рівновага. Нульове начало термодинаміки. Температура. *Гомогенні і гетерогенні системи.* Рівноважні і нерівноважні процеси. Внутрішня енергія системи. Робота і теплота. Термічне і калоричне рівняння стану.

Основні закони термодинаміки

Тема 3. Перший закон термодинаміки

Перший закон термодинаміки. Теплоємності і теплоти ізотермічних змін зовнішніх параметрів. Загальний вираз для зв'язку між C_p і C_v для простої системи (доведення). *Основні термодинамічні процеси (політропічний, адіабатичний, ізотермічний) та їхні рівняння.*

Тема 4. Другий закон термодинаміки

Різні формулювання другого закону термодинаміки. Оборотні і необоротні процеси. Ентропія та абсолютна температура. Термодинамічна шкала температур. Специфічність теплоти як форми енергії. Основне рівняння термодинаміки для рівноважних процесів. Зв'язок між термічним і калоричним рівняннями стану. *Зростання ентропії при дифузії газів і парадокс Гіббса. Друге начало термодинаміки для нерівноважних процесів. Закон зростання ентропії. Цикл Карно і теореми Карно.*

Тема 5. Третій закон термодинаміки

Хімічна спорідненість. Різні формулювання третього закону термодинаміки. Теорема Нернста. Недосяжність абсолютного нуля. *Виродження ідеального газу.*

Тема 6. Методи термодинаміки

Метод циклів. Метод термодинамічних потенціалів. Рівняння Гіббса-Гельмгольца. Термодинамічні потенціали ідеального газу (внутрішня енергія, вільна енергія, термодинамічний потенціал Гіббса, ентальпія). Термодинамічні потенціали систем із змінним число частинок. Хімічний потенціал. Недоліки термодинамічного опису процесів.

Тема 7. Фазові переходи і критичні явища

Умови рівноваги двох фаз речовини та її стійкість. Класифікація фазових переходів. Фазові перетворення першого роду та умови рівноваги фаз в однокомпонентній системі. Крива рівноваги фаз. Рівняння Клайперона-Клаузіуса. Температурна залежність тиску насиченої пари. Критична точка. Рівновага трьох фаз речовини, потрійна точка. Поняття про фазові переходи другого роду. Критичні явища.

Змістовий модуль 2. СТАТИСТИЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

Основні поняття і принципи статистичної фізики.

Тема 1. Макроскопічний і мікроскопічний стани системи

Мікроскопічний опис макросистеми і статистичний характер макропроцесів. Термодинамічна рівновага. Фазовий простір, фазова траєкторія. Поняття про статистичний ансамбль системи. Функція розподілу в фазовому просторі. Припущення про рівність середнього за часом середньому за статистичним ансамблем. Ергодична гіпотеза. Макроскопічні величини як фазові середні мікроскопічних змінних. *Теорема Ліувілля про збереження фазового об'єму.*

Розподіли Гіббса.

Тема 2. Мікроканонічний і канонічний розподіли Гіббса

Зв'язок статистичного розподілу з адитивними законами збереження. Мікроканонічний розподіл в класичній статистиці. Квазінезалежні підсистеми і канонічний розподіл Гіббса. Фізичний зміст модуля канонічного розподілу.

Тема 3. Розподіл Максвелла-Больцмана

Розподіл Максвелла і Больцмана як частинні випадки канонічного розподілу Гіббса. Молекула ідеального газу як квазінезалежна підсистема. Розподіл молекул за імпульсами і координатами. Розподіл молекул за швидкостями та енергіями. Розподіл молекул за висотою у полі сил тяжіння.

Тема 4. Розподіл Гіббса в квантовій статистиці

Розподіл Гіббса в квантовій статистиці. Статистична сума і статистична вага. Перехід від квантової статистики до класичної. Квазікласичний розподіл (метод квантових комірок).

Тема 5. Статистичний зміст законів термодинаміки

Перший закон статистичної термодинаміки як наслідок канонічного розподілу. Статистичний зміст ентропії. Формула Больцмана. Статистичний характер II закону термодинаміки. Статистичне обґрунтування III закону термодинаміки.

Статистична теорія ідеальних систем.

Тема 6. Обчислення термодинамічних функцій ідеального газу

Термодинамічні величини як середні за канонічним розподілом. Статистичний інтеграл для ідеального газу. Обчислення основних термодинамічних потенціалів (параметрів термодинамічної системи) за допомогою канонічного розподілу. Рівняння стану ідеального газу. Рівняння Гіббса-Гельмгольца.

Квантова статистика ідеальних газів.

Тема 7. Розподіли Фермі і Бозе

Різні моделі поведінки частинок. Модель Максвелла-Больцмана. Нерозрізненість частинок. Моделі Бозе-Ейнштейна і Фермі-Дірака. Вивід формул статистичних розподілів Фермі-Дірака і Бозе-Ейнштейна із великого канонічного розподілу. Умови переходу до розподілу Гіббса (Максвелла-Больцмана), критерій виродження.

Тема 8. Квантова теорія теплоємності твердих тіл

Класична теорія. Теплоємність при низьких температурах. Модель Ейнштейна. Недоліки теорії Ейнштейна. Нормальні моди. Фонони. Модель Дебая. Температура Дебая. Вивід формули для теплоємності, виходячи із уявлень про фонони.

Примітки: курсивом виділені питання програми, які виносяться на самостійне опрацювання.

4. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин (денна форма)				
	усього	у тому числі			
		лекції	пр	інд.	ср
Модуль 1. Квантова механіка					
ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ І ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ					
Тема 1. Вступ	1	1	-	-	-

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин (денна форма)				
	усього	у тому числі			
		лекції	пр	інд.	сп
Тема 2. Експериментальні основи квантової механіки	5	1	2	-	2
Тема 3. Теоретичні основи квантової механіки	5	1	2	-	2
Тема 4. Фізичні основи і математичний апарат квантової механіки	5	1	2	-	2
<i>Разом за змістовим модулем 1</i>	16	4	6	-	6
ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 2. ДЕЯКІ ЗАСТОСУВАННЯ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ					
Тема 1. Одновимірний рух	4	2	-		2
Тема 2. Рух частинки в центрально-симетричному полі. Атом гідрогену	6	2	2		2
Тема 3. Спін електрона	3	-	1		2
<i>Разом за змістовим модулем 2</i>	13	4	3		6
ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 3. ФІЗИКА АТОМІВ І МОЛЕКУЛ					
Тема 1. Теорія збурень	4	2	-		2
Тема 2. Атом гелію	4	2	-		2
Тема 3. Взаємодія атома з електромагнітним полем	3	-	1		2
Тема 4. Висновки	2	-	-		2
<i>Разом за змістовим модулем 3</i>	13	4	1		8
<i>Модульна контрольна робота № 1</i>	2	-	-		2
<i>Колоквіум № 1</i>	2	-	-		2
Усього годин	46	12	10	-	24
Модуль 2. Статистична термодинаміка					
ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 1. ТЕРМОДИНАМІКА					
Тема 1. Вступ	1	1	-	-	-
Тема 2. Основні поняття термодинаміки	5	1	2	-	2
Тема 3. Перший закон термодинаміки	4	1	2	-	1
Тема 4. Другий закон термодинаміки	2	1		-	1
Тема 5. Третій закон термодинаміки	2	1		-	1
Тема 6. Методи термодинаміки	5	1	2	-	2
Тема 7. Фазові переходи і критичні явища	2	-	-	-	2
<i>Разом за змістовим модулем 1</i>	21	6	6	-	9
ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 2. СТАТИСТИЧНА ФІЗИКА					
Тема 1. Макроскопічний і мікроскопічний стани системи	2	1		-	1
Тема 2. Мікроканонічний і канонічний розподіли Гіббса	2	1		-	1
Тема 3. Розподіл Максвелла-	6	1	4	-	1

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин (денна форма)				
	усього	у тому числі			
		лекції	пр	інд.	сп
Больцмана					
Тема 4. Розподіл Гіббса в квантовій статистиці	2	1		-	1
Тема 5. Статистичний зміст законів термодинаміки	2	1			1
Тема 6. Обчислення термодинамічних функцій класичного ідеального газу	2	1		-	1
Тема 7. Розподіли Фермі і Бозе	1	-		-	1
Тема 8. Квантова теорія теплоємності твердих тіл	1	-		-	1
<i>Разом за змістовим модулем 2</i>	18	6	4	-	8
<i>Модульна контрольна робота № 2</i>	2	-	-	-	2
<i>Колоквіум № 2</i>	2	-	-	-	2
<i>Захист домашніх і інд. задач</i>	1	-	-	-	1
<i>Усього годин за модулем 2</i>	44	12	10		22
сього годин	90	24	20	-	46

5. ТЕМИ СЕМІНАРСЬКИХ ЗАНЯТЬ (не передбачено)

6. ТЕМИ І ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

6.1. ТЕМИ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Модуль 1. Квантова механіка		
1.	Хвильові властивості мікрочастинок. Співвідношення невизначеностей Гейзенберга	2
2.	Самоспряжені оператори. Власні функції і власні значення. Комутатори операторів	2
3.	Стаціонарне рівняння Шредінгера	2
4.	Атом гідрогену	2
5.	Спін електрона. Магнітні властивості атомів	2
Усього за модулем 1, годин		10
Модуль 2. Статистична термодинаміка		
1.	Рівняння стану	2
2.	Робота і кількість теплоти	2
3.	Метод циклів та його застосування	2
4.	Розподіл Максвелла	2
5.	Розподіл Больцмана	2
Усього за модулем 2, годин		10
Усього годин		20

6.2. ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Модуль 1. КВАНТОВА МЕХАНІКА

Тема 1. Хвильові властивості мікрочастинок. Співвідношення невизначеностей Гейзенберга.

2 год.

В аудиторії: №№ 11; 12; 15; 17; 18; 28; 30.

[18 (а)]

Додому: №№ 14; 16; 24.

[18 (а)]

Запитання для самоконтролю:

1. Сформулюйте основні проблеми, з якими зіткнулась класична фізика наприкінці XIX століття під час пояснень явищ мікросвіту?
2. Які фізичні явища вказують на хвильову природу мікрооб'єктів?
3. Які фізичні явища вказують на корпускулярну природу мікрооб'єктів?
4. У чому полягає ідея корпускулярно-хвильового дуалізму?
5. Які фундаментальні експериментальні дослідження підтвердили ідею Луї де Бройля щодо корпускулярно-хвильового дуалізму елементарних частинок?
6. Як розрахувати довжину хвилі де Бройля?
7. У чому полягає концепція математичних хвиль де Бройля?
8. Чи диспергують хвилі де Бройля у вакуумі?
9. Як визначається фазова швидкість хвиль де Бройля?
10. Як визначається групова швидкість хвиль де Бройля?
11. Чи має фізичний зміст групова швидкість для плоскої монохроматичної хвилі де Бройля, у чому полягає ідея введення цієї величини?
12. У чому полягає необхідність статистичної інтерпретації квантових явищ?

Задачі для розв'язку

Задача № 11. Яка довжина хвилі де Бройля електрона, який пройшов прискорюючу різницю потенціалів $U = 10^3$ В?

Відповідь: $\lambda = 0,0387$ нм.

Задача № 12. Які дебройлівські довжини хвиль протона та електрона, кінетичні енергії яких дорівнюють середній кінетичній енергії теплового руху одноатомних молекул при кімнатній температурі?

Відповідь: $\lambda_p = 6,5$ нм; $\lambda_e = 0,15$ нм.

Задача № 14. Відшукати довжину хвилі де Бройля для α -частинки з кінетичною енергією 7,7 МеВ. В дослідах з резерфордівського розсіювання суттєвими є віддалі порядку 10^{-15} м; під час аналізу результатів дослідів за звичай не враховують хвильові властивості α -частинок. Чи можна вважати таке припущення вірним?

Відповідь: $\lambda = 1,6 \cdot 10^{-15} \text{ м}$; хвильові властивості α -частинок потрібно враховувати.

Задача № 15. У 1929 році Естерман і Штерн виконали експеримент з дифракції атомів гелію, що падали на кристал фтористого літію (LiF). Яка довжина хвилі де Бройля атома гелію (He) з енергією $3/2 \cdot kT$ при температурі 290 К?

Відповідь: $\lambda_{\text{He}} = 0,07 \text{ нм}$.

Задача № 16. Відшукати значення кінетичної енергії електрона, за якої похибка у довжині хвилі де Бройля, що визначається за релятивістською формулою, не перевищує 1% від значення, що отримують за релятивістською формулою. Виконайте аналогічні обрахунки також і для протона.

Відповідь: $E_k^{(e)} \leq 0,02 \text{ МеВ}$; $E_k^{(p)} \leq 37,5 \text{ МеВ}$.

Задача № 17. Використовуючи функцію статистичного розподілу Максвелла для молекул ідеального газу за модулем їх швидкості, отримати розподіл молекул в стані теплової рівноваги за дебройлівськими довжинами хвиль. Відшукати найбільш ймовірну довжину хвилі де Бройля для молекули водню при температурі 300 К.

Відповідь: $dW(\lambda) = 4\pi h^3 (2\pi m kT)^{-3/2} \lambda^{-4} e^{-\frac{h^2}{2m\lambda^2 kT}} d\lambda$; $\lambda_{\text{ім}} = 0,09 \text{ нм}$.

Задача № 18. Нерелятивістська частинка масою m_1 і кінетичною енергією E_k пружно виконує лобовий співудар з нерухомою частинкою масою m_2 . Відшукати дебройлівські довжини хвиль після співудару в системі відліку, зв'язаної із центром мас цих частинок.

Відповідь: $\lambda_1 = \lambda_2 = \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) \frac{h}{\sqrt{2m_1 E_k}}$.

Задача № 24. Електрон перебуває в області з лінійними розмірами порядку 0,1 нм. Якою є невизначеність імпульсу електрона? Якій енергії відповідає цей імпульс?

Відповідь: $\Delta p \geq 10^{-24} \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{м}}$; $E_k = \frac{\Delta p^2}{2m_e} \geq 3,5 \text{ еВ}$.

Задача № 28. Показати, що довжина хвилі де Бройля вкладається на довжині будь-якої борівської орбіти ціле число раз.

Відповідь: $\frac{r_n}{\lambda} = n$.

Задача № 30. Виходячи із співвідношення неозначеностей, показати, що мінімально можлива енергія лінійного гармонічного осцилятора за порядком величини дорівнює $\hbar\omega$ (ω – власна циклічна частота осцилятора).

Відповідь: $E_{\min} \sim \hbar\omega$.

Тема 2. Самоспряжені оператори. Власні функції і власні значення.

Комутатори операторів.

2 год.

В аудиторії: №№ 32; 35; 36; 49; 50; 51; 52; 53.

[18 (а)]

Додому: №№ 39; 45; 57.

[18 (а)]

Запитання для самоконтролю:

1. Що називають оператором?
2. Які оператори називають лінійними?
3. Що називають комутатором операторів?
4. Які оператори називають комутуючими?
5. Які оператори називають самоспряженими?
6. Що називають хвильовою функцією?
7. Яким умовам повинна задовольняти хвильова функція внаслідок її фізичних обмежень?
8. Як визначається густина місцезнаходження мікрочастинки?
9. Запишіть умову нормування хвильової функції.
10. Сформулюйте квантовий принцип суперпозиції.
11. Запишіть у загальному вигляді рівняння для власних функцій і власних значень деякого довільного оператора.
12. Що означає твердження «власне значення ермітового оператора вироджене»?
13. Які типи спектрів власних значень Ви знаєте?
14. Власні значення ермітових операторів належать до множини дійсних чи уявних чисел?
15. Як визначити середнє значення фізичної величини із урахуванням імовірності їх дозволених значень.
16. Що у квантовій механіці розуміють під повним набором спостережуваних?

Задачі для розв'язку

Задача № 32. Відшукати результат дії наступних операторів $\frac{d^2}{dx^2} x^2$ та $\left(\frac{d}{dx} x\right)^2$ на функції: а) $\sin x$; б) e^{2x} .

Відповідь: а) $(2 - x^2)\sin x + 4x \cos x$, $(1 - x^2)\sin x + 3x \cos x$;

б) $2(1 + 4x + 2x^2)e^{2x}$, $(1 + 6x + 4x^2)e^{2x}$.

Задача № 35. Подати оператор паралельного переносу $\hat{T}_a \psi(\vec{r}) = \psi(\vec{r} + \vec{a})$ через оператор імпульсу.

Відповідь: $\hat{T}_a = e^{\frac{i}{\hbar}(\hat{p}, \vec{a})}$.

Задача № 36. Відшукати результат дії оператора $e^{kx \frac{\partial}{\partial x}}$ на функцію $\psi(x)$.

Відповідь: $e^{kx \frac{\partial}{\partial x}} \psi(x) = e^{\frac{i}{\hbar} kx \hat{p}_x} \psi(x) = \psi[(k+1)x]$.

Задача № 39. Чи є оператор комплексного спряження $\hat{M} \psi = \psi^*$ лінійним оператором?

Відповідь: Ні.

Задача № 45. Довести ермітовість наступних операторів: а) \hat{p}_x ; б) \hat{L}_z ; в) \hat{p}_x^2 ; г) \hat{H} .

Задача № 49. Довести, що якщо оператори \hat{A} і \hat{B} комутують, тоді:

а) $(\hat{A} + \hat{B})^2 = \hat{A}^2 + 2\hat{A}\hat{B} + \hat{B}^2$; б) $(\hat{A} + \hat{B})(\hat{A} - \hat{B}) = \hat{A}^2 - \hat{B}^2$; в) $[(\hat{A} + \hat{B}), (\hat{A} - \hat{B})] = 0$.

Задача № 50. Довести, що якщо оператори \hat{A}_i комутують з оператором \hat{B} , тоді з ним комутує і оператор $\hat{A} = \sum_i \hat{A}_i^2$.

Задача № 51. Довести, що якщо оператори $[\hat{A}, \hat{B}] = 1$, тоді: а) $[\hat{A}, \hat{B}^2] = 2\hat{B}$; б) $[\hat{A}, \hat{B}^3] = 3\hat{B}^2$; в) $[\hat{A}^2, \hat{B}^2] = 2(\hat{A}\hat{B} + \hat{B}\hat{A})$.

Задача № 52. Відшукати комутатор оператора \hat{x} та оператора Лапласа $\vec{\nabla}^2$.

Відповідь: $[\hat{\nabla}^2, \hat{x}] = 2 \frac{\partial}{\partial x}$

Задача № 53. Перевірити наступні правила комутації для гамільтоніана \hat{H} у потенціальному полі $U(x)$:

а) $[\hat{H}, y] = i \frac{\hbar}{m_e} \hat{p}_y$; б) $[\hat{H}, \hat{p}_x] = i\hbar \frac{dU}{dx}$; в) $[\hat{H}, \hat{p}_x^2] = 2i\hbar \frac{dU}{dx} \hat{p}_x$.

Задача № 57. Довести наступні правила комутації:

$$\text{а) } [\hat{L}_x, \hat{p}_x] = 0; \text{ б) } [\hat{L}_x, \hat{p}_y] = i\hbar\hat{p}_z; \text{ в) } [\hat{L}_x, \hat{p}_z] = -i\hbar\hat{p}_y.$$

Тема 3. Стаціонарне рівняння Шредінгера.

В аудиторії: №№ 115 (1,2); 116, 120.

2 год.

[18 (а)]

Додому: №№ 115 (3,4).

[18 (а)]

Запитання для самоконтролю:

1. Який стан квантової системи називають стаціонарним?
2. Записати стаціонарне рівняння Шредінгера для координатної частини хвильової функції в диференціальній формі.
3. Записати інтегральну форму стаціонарного рівняння Шредінгера для часової складової хвильової функції.
4. Який рух квантової частинки називають одновимірним?
5. Сформулюйте основні властивості одновимірного руху.
6. Як визначити середнє значення фізичної величини?

Задачі для розв'язку

Задача № 115. Для частинки, що перебуває на n -у рівні в одновимірній прямокутній потенціальній ямі з абсолютно непроникними стінками, обчислити:

$$1) \bar{x}; 2) \overline{p_x}; 3) \overline{(\Delta x)^2}; 4) \overline{(\Delta p_x)^2}.$$

Примітка: Хвильова функція такої частинки має наступний вигляд:

$$\psi_n = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{n\pi}{a} x, \text{ де } n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\text{Відповідь: } 1) \bar{x} = \frac{a}{2}; 2) \overline{p_x} = 0; 3) \overline{(\Delta x)^2} = \frac{a^2}{12} \left(1 - \frac{6}{\pi^2 n^2} \right); 4) \overline{(\Delta p_x)^2} = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{a^2}.$$

Задача № 116. В одновимірній прямокутній потенціальній ямі з абсолютно непроникними стінками шириною a перебуває частинка, стан якої описується хвильовою функцією

$$\psi(x) = A \sin^2 \frac{\pi x}{a}.$$

Відшукати імовірність перебування частинки в основному стані та середнє значення кінетичної енергії.

$$\text{Відповідь: } W_1 \approx 0,96; \bar{T} = \frac{2\pi^2 \hbar^2}{3m_0 a^2}.$$

Задача № 120. Визначити власні значення енергії та власні функції частинки масою m_0 , яка перебуває у 3-х вимірній прямокутній потенціальній ямі з

абсолютно непроникними стінками ($0 < x < a$; $0 < y < b$; $0 < z < c$).
Відшукати значення енергії для перших трьох рівнів, якщо $a = b = c$.

$$\text{Відповідь: } E_1 = \frac{\pi^2 \hbar^2 n_1^2}{2m_0 a^2}; E_2 = \frac{\pi^2 \hbar^2 n_2^2}{2m_0 b^2}; E_3 = \frac{\pi^2 \hbar^2 n_3^2}{2m_0 c^2};$$

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_0} \left(\frac{n_1^2}{a^2} + \frac{n_2^2}{b^2} + \frac{n_3^2}{c^2} \right), n_1, n_2, n_3 = 1, 2, 3, \dots$$

$$\psi_{n_1}(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{n_1 \pi}{a} x; \psi_{n_2}(y) = \sqrt{\frac{2}{b}} \sin \frac{n_2 \pi}{b} y; \psi_{n_3}(z) = \sqrt{\frac{2}{c}} \sin \frac{n_3 \pi}{c} z;$$

$$\psi_{1,2,3}(x, y, z) = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{abc}} \sin \frac{n_1 \pi}{a} x \sin \frac{n_2 \pi}{b} y \sin \frac{n_3 \pi}{c} z, n_1, n_2, n_3 = 1, 2, 3, \dots$$

Тема 4. Атом гідрогену.

2 год.

В аудиторії: №№ 162; 164; 166; 168.

[18 (а)]

До дому: №№ 163; 165; 171; 172.

[18 (а)]

Запитання для самоконтролю:

1. Які атоми вважаються гідрогеноподібними?
2. Записати вигляд силового поля нерухомого точкового ядра гідрогеноподібного атому.
3. Які властивості має поле нерухомого точкового ядра гідрогеноподібного атому?
4. Яке рівняння зручно використати для розв'язку задачі про атом водню?
5. Який спектр енергій електрона утворюється під час розв'язання задачі про атом водню?
6. Чому дорівнює енергія n -ого рівня електрона у атомі водню?
7. Що називають радіальним квантовим числом, яких допустимих значень воно може набувати?
8. Що називають головним квантовим числом, яких допустимих значень воно може набувати?
9. Намалюйте схематично картину рівнів енергії у гідрогеноподібному атомі.
10. Яка кількість різних хвильових функцій відповідає головному квантовому числу n ?
11. Поясніть як можна описати стан електрона у гідрогеноподібному атомі за допомогою квантових чисел?

Задачі для розв'язку

Задача № 162. Звести рівняння, що визначає радіальну складову хвильової функції електрона в гідрогеноподібному атомі, до безрозмірного вигляду:

$$\frac{d^2 R}{d\rho^2} + \frac{2}{\rho} \frac{dR}{d\rho} + \left[\varepsilon + \frac{2z}{\rho} - \frac{\ell(\ell+1)}{\rho^2} \right] R = 0,$$

обравши в якості одиниць вимірювання атомарну одиницю довжини a_0 (перший борівський радіус) та атомну одиницю енергії $E_{iон} = E_1$ (енергія іонізації атома водню для основного стану) і, позначаючи

$$\rho = \frac{r}{a_0}; \quad \varepsilon = \frac{E}{E_1}.$$

Задача № 163. Користуючись таблицями 1 та 2, обрахувати нормовочні коефіцієнти хвильових функцій $1s$ -, $2s$ -, $3p$ - станів електрона в атомі гідрогену.

$$\text{Відповідь: } \psi_{100} = \left(\pi a_0^3\right)^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{r}{a_0}};$$

$$\psi_{200} = \left(4\left(2\pi a_0^3\right)^{\frac{1}{2}}\right)^{-1} \left(2 - \frac{r}{a_0}\right) e^{-\frac{r}{2a_0}};$$

$$\psi_{310} = \frac{1}{81} \sqrt{\frac{2}{\pi a_0^3}} \frac{r}{a_0} \left(6 - \frac{r}{a_0}\right) e^{-\frac{r}{3a_0}} \cdot \cos \theta;$$

$$\psi_{31\pm 1} = \pm \frac{1}{81} \sqrt{\frac{1}{\pi a_0^3}} \frac{r}{a_0} \left(6 - \frac{r}{a_0}\right) e^{-\frac{r}{3a_0}} \cdot \sin \theta \cdot e^{\pm i\varphi},$$

де a_0 – радіус першої борівської орбіти в атомі гідрогену.

Задача № 164. Електрон в атомі гідрогену перебуває в стаціонарному стані, що описується сферично-симетричною хвильовою функцією $\psi(r) = A(1 + ar)e^{\alpha r}$, де A, a, α деякі сталі. За допомогою рівняння Шредінгера відшукати значення сталих a, α та енергію електрона. Визначити у якому стані перебуває електрон.

$$\text{Відповідь: } a = \alpha = -\frac{1}{2a_0}, \text{ де } a_0 \text{ – радіус першої борівської орбіти; електрон}$$

перебуває у $2s$ -стані.

Таблиця 1

Радіальні хвильові функції для s -, p - станів з точністю до нормувального множника.

Квантовий стан	n	ℓ	$R_{n\ell}\left(\frac{r}{a_0}\right)$
$1s$	1	0	$e^{-\frac{r}{a_0}}$
$2s$	2	0	$\left(2 - \frac{r}{a_0}\right) e^{-\frac{r}{2a_0}}$
$2p$	2	1	$\frac{r}{a_0} e^{-\frac{r}{2a_0}}$

3s	3	0	$\left(27 - 18\frac{r}{a_0} + 2\left(\frac{r}{a_0}\right)^2\right)e^{-\frac{r}{3a_0}}$
3p	3	1	$\frac{r}{a_0}\left(6 - \frac{r}{a_0}\right)e^{-\frac{r}{3a_0}}$

Задача № 165. Відшукати для електрона, що перебуває в 1s стані в атомі гідрогену, найбільш імовірну віддаль від ядра $r_{\text{ім}}$ та імовірність перебування електрона в області $r < r_{\text{ім}}$.

Відповідь: $r_{\text{ім}} = a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_0e^2}$; $W = 1 - 5e^{-2} \approx 0,323$.

Задача № 166. Розрахувати імовірність перебування 1s електрона в атомі гідрогену поза класичних меж поля.

Відповідь: 5,9 %

Задача № 168. Розрахувати середнє значення кінетичної енергії та середньоквадратичну швидкість для 1s електрона в атомі гідрогену.

Відповідь: $\bar{E}_k = -\frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_0^2\hbar^2}$; $\sqrt{v^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar} = 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Задача № 171. Відшукати середнє значення сили взаємодії з ядром і потенціальної енергії для 2p електрона в атомі гідрогену і для іонів з одним електроном.

Відповідь: $\bar{F}_{\text{вз}} = \frac{Ze^2}{48\pi\epsilon_0a_0^2}$; $\bar{U} = -\frac{Ze^2}{16\pi\epsilon_0a_0}$, де a_0 – радіус першої борівської орбіти.

Задача № 172. Відшукати середній електростатичний потенціал, що збуджується 1s електроном у центрі гідрогеноподібного атома.

Відповідь: $\varphi_0 = \frac{e}{4\pi\epsilon_0a_0}$, де a_0 – радіус першої борівської орбіти.

Тема 5. Спін електрона. Магнітні властивості атомів.

2 год.

В аудиторії: №№ 213; 214; 215; 216; 222.

[18 (а)]

Додому: №№ 208; 209; 217; 233.

[18 (а)]

Запитання для самоконтролю:

1. Що називають спіном електрона?

2. Які експериментальні факти підтверджують існування у електрона власного механічного моменту?
3. Чому дорівнює магнетон Бора?
4. Чому дорівнює власний магнітний момент електрона?
5. Чому дорівнює власний механічний момент електрона?
6. Записати гіромагнітне співвідношення.
7. Записати математичний вигляд спінових матриць Паулі.
8. Записати математичний вигляд операторів спіна.
9. Який вигляд має хвильова функція електрона з урахуванням його спіна?
10. Як визначається повний магнітний момент атома?
11. Який вигляд має спектральне позначення терма?
12. Як розраховується g – фактор розщеплення Ланде?

Задачі для розв'язку

Задача № 208. Відшукати власні функції та власні значення операторів, що визначаються матрицями Паулі.

Задача № 209. Показати, що матриці Паулі можна розглядати як компоненти векторного оператора $\hat{\sigma}$, для якого справджуються співвідношення $[\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y] = 2i\hat{\sigma}_z$, $(\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y) = 3 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$. Відшукати також добуток $\hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y \hat{\sigma}_z$.

$$\text{Відповідь: } \hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y \hat{\sigma}_z = i \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Задача № 213. Виписати спектральні позначення терма, у якого а) $S = 3/2, L = 2, g = 0$; б) $S = 1/2, L = 3/2, g = 4/3$.

$$\text{Відповідь: а) } {}^4D_{1/2}; \text{ б) } {}^2P_{3/2}.$$

Задача № 214. Відшукати множник Ланде для атомів з одним валентним електроном в станах P, D та F .

$$\text{Відповідь: Для } P\text{-стану: } g_1 = \frac{2}{3}, g_2 = \frac{4}{3}; \text{ для } D\text{-стану: } g_1 = \frac{4}{5}, g_2 = \frac{6}{5}; \text{ для } F\text{-стану: } g_1 = \frac{6}{7}, g_2 = \frac{8}{7}.$$

Задача № 215. Відшукати магнітний момент атома водню в основному стані.

$$\text{Відповідь: } \mu = \sqrt{3}\mu_B.$$

Задача № 216. Відшукати можливі значення магнітного моменту атома в стані 3D .

Відповідь: $\frac{\sqrt{2}}{2} \mu_B$; $\frac{7}{\sqrt{6}} \mu_B$; $\frac{8}{\sqrt{3}} \mu_B$.

Задача № 217. Відшукати магнітний момент μ і можливі значення проекції μ_H атома в станах: а) 4D ; б) ${}^2P_{3/2}$.

Відповідь: а) $\mu = \sqrt{6} \mu_B$; $\mu_H = 0, \pm \mu_B, \pm 2\mu_B$; б) $\mu = \frac{2\sqrt{5}}{\sqrt{3}} \mu_B$,

$\mu_H = \pm \frac{2}{3} \mu_B, \pm 2\mu_B$.

Задача № 222. Вузкий пучок атомів пропускають за методом Штерна і Герлаха через різко неоднорідне магнітне поле. На яку кількість компонент розщепиться пучок атомів, що перебувають в станах: а) 6S ; б) 5F_1 ?

Відповідь: а) 6; б) пучок не розщеплюється.

Задача № 233. Відшукати діамагнітну сприйнятливість атомарного водню за нормальних умов (0°C , $p = 10^5 \text{ Па}$), якщо розподіл густини заряду електронної

хмарини в атомі подається у вигляді функції $\rho(r) = \frac{e}{\pi a_0^3} e^{-\frac{2r}{a_0}}$, де a_0 – радіус першої борівської орбіти.

Відповідь: $\chi = -1,31 \cdot 10^{-9}$.

Модульна контрольна робота №1 з квантової механіки (самостійне виконання).

Модуль 2. СТАТИСТИЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

Тема №1. Рівняння стану.

2 год.

В аудиторії: №№ 1 – 1; 2; 3; 4; 5; 6; 8.

[36 (а)]

Домашнє завдання: №№ 1 – 9; 10; 11.

[36 (а)]

Запитання для самоконтролю:

1. Який розділ фізики називають термодинамікою?
2. У чому полягає термодинамічний метод дослідження?
3. У чому полягає статистичний метод дослідження?
4. Що називають макроскопічною системою?
5. Що називають макроскопічними параметрами?
6. Як класифікують макропараметри? Навести відповідні приклади.
7. Що називають мікроскопічними параметрами?
8. Що називають функцією стану термодинамічної системи?
9. Який стан термодинамічної системи називають рівноважним?

10. Яке рівняння стану системи називають термічним?
11. Яке рівняння стану системи називають колоричним?
12. Що називають кількістю речовини, одиниці її вимірювання?
13. Що називають відносною молекулярною масою речовини, одиниці її вимірювання?
14. Що називають атомарною масою речовини, одиниці її вимірювання?
15. Що називають сталою Авогадро, вказати її значення та одиниці її вимірювання?
16. Що називають сталою Больцмана, вказати її значення та одиниці її вимірювання?
17. Що називають універсальною газовою сталою, вказати її значення та одиниці її вимірювання?
18. Записати термічне рівняння стану для ідеального газу. Пояснити зміст його параметрів.
19. Записати термічне рівняння Ван-дер-Ваальса для реального газу. Пояснити зміст його параметрів та поправочних коефіцієнтів.
20. Записати термічне рівняння Дітерічі для реального газу. Пояснити зміст його параметрів та поправочних коефіцієнтів.
21. Що називають повною енергією термодинамічної системи?
22. Що називають зовнішньою енергією термодинамічної системи?
23. Що називають внутрішньою енергією термодинамічної системи?
24. Сформулювати основні властивості внутрішньої енергії системи як функції стану.
25. Які види зміни внутрішньої енергії Вам відомі?
26. Які види теплопередачі Ви знаєте? Охарактеризувати їх.
27. Яка термодинамічна система вважається простою?
28. Що називають роботою термодинамічної системи? Вказати одиниці вимірювання. Записати формулу.
29. Сформулювати основні властивості роботи як функції процесу.
30. Записати формулу для розрахунку елементарної роботи для простої системи.
31. Що називають кількістю теплоти термодинамічної системи? Вказати одиниці вимірювання. Записати відомі формули.
32. Що називають теплоємністю термодинамічної системи, одиниці її вимірювання?
33. Що називають питомою теплоємністю термодинамічної системи, вказати одиниці її вимірювання?
34. Що називають молярною теплоємністю термодинамічної системи, вказати одиниці її вимірювання?
35. Що називають молярною теплоємністю ідеального газу при сталому об'ємі, вказати одиниці її вимірювання?
36. Що називають молярною теплоємністю ідеального газу при сталому тиску, вказати одиниці її вимірювання?
37. Записати формулу Майєра.
38. Яку кількість ступенів вільності має одноатомна, двоатомна і трьохатомна молекули?
39. Який процес називають ізотермічним, ізобаричним, ізохоричним?

Задачі для розв'язку

1. 1 Визначте, чи молекула кисню дійсно двоатомна, якщо відомо, що при об'ємі $V=4000 \text{ см}^3$ при температурі 150°C і тиску $p=1,373 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ знаходиться $m=5 \text{ г}$ кисню. Газ вважати ідеальним.

Відповідь: молекула двоатомна.

1. 2 З балону з стисненим воднем ємністю 10^{-2} м^3 в наслідок несправності вентилу витікає газ. При температурі 7°C манометр показав $5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$. Через деякий час при температурі 14°C манометр показав таке ж саме значення тиску. Визначте витік газу, вважаючи рівняння Клапейрона – Менделєєва справедливим.

Відповідь: $\Delta m = 1,07 \text{ г}$.

1. 3 Кіломоль кисню знаходиться при температурі 300°C і тиску 10^7 Н/м^2 . Знайдіть об'єм газу, вважаючи, що стан кисню в даний умовах описується рівнянням Ван-дер-Ваальса. Постійні в рівнянні Ван-дер-Ваальса кисню мають значення: $a=1,35 \cdot 10^5 \text{ (Па} \cdot \text{м}^6\text{)/моль}^2$, $b=3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3\text{/моль}$.

Відповідь: $V \approx 0,232 \text{ м}^3$.

1. 4 Запишіть рівняння Ван-дер-Ваальса для газу, що містить ν кіломолів.

Відповідь: $\left(p + \nu^2 \frac{a}{V^2} \right) (V - \nu b) = \nu RT$.

1. 5 Знайдіть критичні параметри V_k , p_k , T_k газу Ван-дер-Ваальса, виражаючи їх через постійні a , b для цього газу.

Відповідь: $V_k = 3b, T_k = \frac{8a}{27Rb}, p_k = \frac{a}{27b^2}$.

1. 6 Рівняння Ван-дер-Ваальса не досить точно описує поведінку реальних газів. Для більшого узгодження з дослідом Клаузіус запропонував інше емпіричне

рівняння $\left[p + \frac{a}{T(V+c)^2} \right] (V-b) = RT$, де a , b , c – постійні для розглядуваного газу.

Виразіть критичні параметри V_k , p_k , T_k через постійні a , b , c .

Відповідь: $V_k = 2c + 3b, T_k^2 = \frac{8a}{27R(b+c)}, p_k^2 = \frac{Ra}{216(b+c)^3}$.

1. 7 Встановіть зв'язок між критичними параметрами і рівнянням стану Дітерічі $p(V-b) = RT \frac{a}{RTV}$. Вирахуйте критичний коефіцієнт $s = \frac{RT_k}{p_k V_k}$ для цього рівняння.

Відповідь: $V_k = 2b, T_k = \frac{a}{4Rb}, p_k = \frac{a}{4e^2 b^2}, s = 3,695$.

1. 8 Визначте критичний об'єм кіломоля вуглекисню CO_2 , вважаючи справедливим рівняння Ван-дер-Ваальса, якщо критична температура і критичний тиск вуглекисню рівні відповідно $31\text{ }^\circ\text{C}$, $7,4 \cdot 10^6\text{ Н/м}^2$.

Відповідь: $V_k = \frac{3RT_k}{8p_k} \approx 0,13\text{ м}^3$.

1. 9 Ємність об'ємом 10^{-2} м^3 розділений навпіл напівпроникною перегородкою. В одну половину ємності введено 2 г водню і 4 г гелію. Через перегородку може дифундувати лише водень. Під час процесу температура підтримувалась $100\text{ }^\circ\text{C}$. Вважаючи гази ідеальними, визначте тиск, що встановився в обох частинах ємності.

Відповідь: $p \approx 9,6 \cdot 10^5\text{ Н/м}^2$.

1. 10 Два кіломоля азоту знаходяться при температурі $300\text{ }^\circ\text{C}$ і тиску $5 \cdot 10^6\text{ Па}$. Знайдіть об'єм газу вважаючи, що стан кисню при даних умовах описується рівнянням Ван-дер-Ваальса зі сталими $a=1,35 \cdot 10^5\text{ (Па}\cdot\text{м}^6\text{)/моль}^2$, $b=3 \cdot 10^{-2}\text{ м}^3\text{/моль}$.

Відповідь: $V \approx 0,98\text{ м}^3$

1. 11 Отримайте вираз критичних параметрів V_k , p_k , T_k через константи рівняння стану, запропонованого Бертло для опису реальних газів:

$$\left(p + \frac{a}{TV^2}\right)(V - b) = RT.$$

Відповідь: $V_k = 3b$, $T_k^2 = \frac{8a}{27Rb}$, $p_k^2 = \frac{Ra}{216b^3}$.

Тема №2. Робота і кількість теплоти.

2 год.

В аудиторії: №№ 1 – 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38.

[36 (а)]

Домашнє завдання: №№ 1 – 39; 40; 41.

[36 (а)]

Запитання для самоконтролю:

1. Що називають теплоємністю термодинамічної системи, одиниці її вимірювання?
2. Що називають питомою теплоємністю термодинамічної системи, вказати одиниці її вимірювання?
3. Що називають молярною теплоємністю термодинамічної системи, вказати одиниці її вимірювання?
4. Що називають молярною теплоємністю ідеального газу при сталому об'ємі, вказати одиниці її вимірювання?
5. Що називають молярною теплоємністю ідеального газу при сталому тиску, вказати одиниці її вимірювання?
6. Записати формулу Майєра.
7. Записати перший закон термодинаміки в диференціальній формі для простої системи.
8. Від яких макроскопічних параметрів залежить внутрішня енергія простої термодинамічної системи?

9. Сформулювати закон Джоуля для ідеального газу.
10. Записати інтегральний та диференціальний наслідок закону Джоуля для ідеального газу.
11. Який термодинамічний процес називають політропічним? Записати його рівняння. Що називають сталою політропи?
12. Який термодинамічний процес називають адіабатичним? Записати його рівняння. Що називають сталою адіабати?
13. Який термодинамічний процес називають ізотермічним? Записати його рівняння та зобразити графічно. Якого значення набуває стала політропи для такого процесу?
14. Який термодинамічний процес називають ізотермічним? Записати його рівняння та зобразити графічно. Якого значення набуває стала політропи для такого процесу?
15. Який термодинамічний процес називають ізохоричним? Записати його рівняння та зобразити графічно. Якого значення набуває стала політропи для такого процесу?
16. Що називають внутрішньою енергією термодинамічної системи? Які одиниці вимірювання її в системі СІ?
17. Що називають 1 калорією? Як калорія пов'язана з джоулем?
18. Чому дорівнює повний диференціал внутрішньої енергії як функції двох макроскопічних параметрів простої термодинамічної системи?
19. Чому дорівнює повний диференціал внутрішньої енергії для ідеального газу? Пояснити чим цей частковий випадок відрізняється від загального
20. Записати рівняння Ван-дер-Ваальса.
21. Записати зв'язок між калоричним та термічним рівняннями стану.

Задачі для розв'язку:

1.32 Ідеальний газ, що займає об'єм $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ і знаходиться під тиском $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ при температурі $290 \text{ }^\circ\text{К}$, був нагрітий при постійному об'ємі, а потім розширився ізобарично. Робота розширення газу при цьому стала рівною 200 Дж . На скільки нагрівся газ в ізобаричному процесі?

$$\text{Відповідь: } \Delta t = \frac{AT_0}{p_0V_0} \approx 58^\circ \text{C}.$$

1.33 Двохатомному ідеальному газу надають 500 кал тепла, при цьому газ розширюється ізобарично. Відшукати роботу з розширення газу.

$$\text{Відповідь: } A \approx 600 \text{ Дж}.$$

1.34 Відшукайте роботу, що виконує один моль газу при ізотермічному розширенні газу від об'єму V_1 до об'єму V_2 , якщо стан газу описується:

а) рівнянням Клапейрона-Менделєєва; б) рівнянням Ван-дер-Ваальса.

$$\text{Відповідь: } \text{а) } A = RT \ln \frac{V_2}{V_1}; \text{ б) } A = RT \ln \frac{V_2 - b}{V_1 - b} + a \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right).$$

1.35 Задано один кіломоль ідеального газу за нормальних умов: $V_0=22,414 \text{ м}^3$; $p_0=1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Знайти роботу, яку необхідно виконати для стиску цього газу до об'єму $V_1 = \frac{1}{2}V_0$, вважаючи, якщо процес відбувається за законом Бойля-Маріота.

Відповідь: $A \approx 1573,5 \text{ кДж}$.

1.36 Яка кількість теплоти необхідна для нагрівання 1 м^3 повітря від 273 до 274 К при постійному об'ємі, якщо початковий тиск $1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$, густина повітря за нормальних умов $\rho_0=1,29 \text{ кг/м}^3$, $\gamma=1,4$, $C_p=0,273 \text{ ккал/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$.

Відповідь: $Q = 0,252 \text{ ккал}$.

1.37 При адіабатичному стиску одного кіломоля ідеального двохатомного газу була виконана робота 146 кДж . На скільки збільшилась температура газу під час стиску?

Відповідь: $\Delta t = \frac{1}{R}(-1 + \gamma)A \approx 7^\circ \text{К}$.

1.38 Відшукайте роботу, яку виконує ідеальний газ при політропному розширенні ідеального газу від об'єму V_1 до об'єму V_2 , якщо початковий тиск газу p_1 .

Відповідь: $A = \frac{1}{n-1} p_1 V_1^n \left(\frac{1}{V_1^{n-1}} - \frac{1}{V_2^{n-1}} \right)$.

1.39 При ізобаричному розширенні одного моля одноатомного ідеального газу йому було надано 600 кал теплоти. У скільки разів збільшиться об'єм газу, якщо його початкова температура була 300 К і молярна теплоємність $C_p=5 \text{ ккал/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$?

Відповідь: $\frac{V_2}{V_1} \approx 1,4$.

1.40 Відшукайте кількість теплоти, що виділяється при ізотеричному стиску 2 кг азоту від нормального тиску до тиску $6,078 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Температура азоту 300°К ; газ вважати ідеальним.

Відповідь: $Q = 76,2 \text{ ккал}$.

1.41 Відшукайте роботу, яку виконує деяка маса газу оксигену в процесі політропного розширення, коли тиск і об'єм змінюються від $p_1=4,052 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $V_1=10^{-3} \text{ м}^3$ до $p_2=1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $V_2=2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

Відповідь: $A = 202,6 \text{ Дж}$, $Q = -70 \text{ кал}$.

Тема №3. Метод циклів та його застосування

2 год.

В аудиторії: №№ 1 – 126; 127; 128; 129; 130; 131; 132. [36 (а)]

Домашнє завдання: №№ 1 – 134; 135; 136. [36 (а)]

Запитання для самоконтролю:

1. У чому полягає зміст методу циклів?
2. Записати перший закон термодинаміки у диференціальній формі.
3. Що являє собою мікро цикл Карно?
4. Як розрахувати коефіцієнт корисної дії теплової машини?
5. Як розрахувати роботу теплової машини, яку вона виконує за цикл, аналітично й графічно?
6. Який цикл вважають прямим, а який зворотнім?
7. Якого граничного значення може набути коефіцієнт корисної дії машини, яка працює за циклом Карно? Сформулювати відповідно до цього третій закон термодинаміки.

Задачі для розв'язку:

1.126 Відшукайте залежність тиску насиченої пари від температури, виходячи з розгляду нескінченно малого циклу Карно між температурами T і $T - dT$, який здійснює система, що складається з рідини і її насиченої пари.

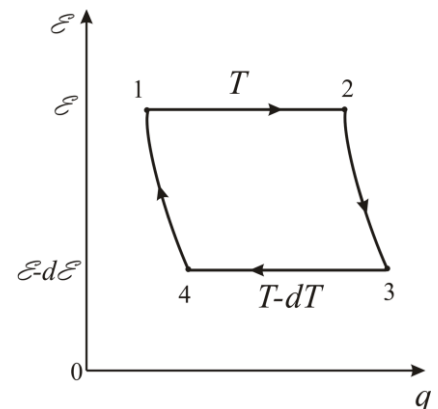
Відповідь:
$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{T(v_2 - v_1)}.$$

1.127 Відшукайте залежність поверхневого натягу σ від абсолютної температури, виходячи з розгляду нескінченно малого циклу Карно між температурами T і $T - dT$, цикл виконується плівкою рідини.

Відповідь:
$$\frac{d\sigma}{dT} = -\frac{r}{T}.$$

1.128 В оборотному гальванічному елементі відбувається наступний нескінченно малий цикл Карно: $1 \rightarrow 2$ – ізотермічний процес зарядки, при якому ЕДС залишається постійною, $2 \rightarrow 3$ – адіабатичний процес, при якому температура зменшується на dT ; $3 \rightarrow 4$ – ізотермічна зарядка від стороннього джерела; $4 \rightarrow 1$ – адіабатична зарядка. Використовуючи вираз ККД оборотного циклу Карно, знайдіть залежність електрорушійної сили від температури.

Відповідь:
$$\mathcal{E} = q + T \frac{d\mathcal{E}}{dT}.$$



До задачі 1.128

1.129 Електрорушійна сила гальванічного елемента залежить від температури по закону: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_1 T + \mathcal{E}_2 T^2$. Відшукати тепловий ефект хімічної реакції і кількість отриманої з зовні теплоти при ізотермічному процесі з

розрахунку на 1 Кл заряду, що протікає через елемент, якщо $\mathcal{E}_0 = 0,956 \text{ В}$,
 $\mathcal{E}_1 = 0,31 \cdot 10^{-4} \frac{\hat{\text{А}}}{0\text{Н}}$, $\mathcal{E}_2 = 3,8 \cdot 10^{-7} \frac{\hat{\text{А}}}{0\text{Н}^2}$, $T=273 \text{ К}$.

Відповідь: $q_0 = 0,929 \frac{\text{Ас}}{\text{Еє}}$, $Q = 0,05 \text{ Ас}$.

1.130 Один моль ідеального газу з початковий тиском p_1 та об'ємом V_1 вільно адіабатично (без виконання роботи) розширюється до об'єму V_2 . Потім газ квазістатично стискають до об'єму V_1 при постійному тиску p_2 і, нарешті, квазістатично нагрівають при об'ємі V_1 до тих пір, доки тиск не стане рівним p_1 . Доведіть на прикладі циклу справедливність співвідношення Майєра (молярну теплоємність вважати постійною).

1.131 Розглянувши елементарний цикл Карно для довільного діелектрика, встановіть зв'язок між залежностями діалектичної проникності від температури і тепловим ефектом ізотермічної поляризації. Для випадку, коли діелектрична проникність обернено пропорційна температурі, визначте поглинає чи віддає тепло діелектрик, що піддається ізотермічній поляризації.

Відповідь: $\left(\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial T}\right)_E = \frac{1}{TE} \left(\frac{\delta Q}{\delta E}\right)_T$.

1.132 Розрахуйте, користуючись методом циклів Карно, тепловий ефект ізотермічного намагнічування 1 см^3 магнетика під час зростання напруженості магнітного полі від 0 до H . Розглянути випадок ідеального парамагнетика.

Відповідь: $Q = T\mu_0 \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_H dH$.

1.134 Доведіть, що адіабата не може перетинається з ізотермою більш ніж в одній точці.

1.135 Покажіть, що ККД теплової машини не може перевищувати величину $1 - T_{\min}/T_{\max}$, де T_{\max} – максимальна температура термостатів, від яких машина отримує тепло, а T_{\min} – мінімальна температура теплових резервуарів, якими вона передає тепло.

1.136 Покажіть, використовуючи метод циклів, що абсолютна термодинамічна шкала температур співпадає з температурною шкалою газу, стан якого описується рівнянням Ван-дер-Ваальса.

Тема № 4. Розподіл Максвелла.

В аудиторії: №№ 2 – 20; 27; 31; 32; 36.

Домашнє завдання: №№ 2 – 21; 23; 24; 30.

2 год.

[36 (а)]

[36 (а)]

Запитання для самоконтролю:

1. Охарактеризувати, що являє собою статистичний розподіл Максвелла?
2. Як розраховується нормовочна стала розподілу Максвелла?
3. Записати розподіл Максвелла за проекціями імпульсу молекули ідеального газу у декартовій системі координат. Охарактеризувати що він визначає.
4. Записати розподіл Максвелла за проекціями лінійних швидкостей молекули ідеального газу у декартовій системі координат. Охарактеризувати що він визначає.
5. Записати розподіл Максвелла за швидкостями молекули ідеального газу. Охарактеризувати що він визначає. Намалювати графік.
6. Як визначається найбільш імовірна швидкість молекул ідеального газу?
7. Як визначається середньоарифметична швидкість молекул ідеального газу?
8. Як визначається середньоквадратична швидкість молекул ідеального газу?
9. За допомогою яких експериментальних дослідів перевірявся розподіл Максвелла?

Задачі для розв'язку

2.20. Обчислити середню і середньоквадратичну швидкість розподілу Максвелла

$$\text{Відповідь: } \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}; \quad \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

2.21. Розподіл молекул за швидкостями в пучку, що вилітають з отвору в посудині, описується функцією $\rho(v) = Av^3 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$, де T – температура газу в середині посудини, а A – нормовочна стала. Відшукати найбільш імовірні значення швидкості молекул, а також кінетичної енергії молекул в пучку.

$$\text{Відповідь: } v_{\text{ім}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}; \quad \varepsilon_{\text{ім}} = kT.$$

2.23. Яка частина молекул газу має кінетичну енергію поступального руху вище середньої кінетичної енергії $\langle E_k \rangle = \frac{3kT}{2}$?

$$\text{Відповідь: } \frac{N_1}{N} = \frac{\sqrt{6}}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3}{2}} + 1 - \text{erf}\left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) \approx 0,39.$$

2.24. Вивчення властивостей плівок нерозчинних поверхнево-активних речовин, нанесених на поверхню води, показало, що при малій густині плівки молекули цих речовин можуть абсолютно вільно рухатися по поверхні рідкої підкладки. Вони поведуться подібно до своєрідного «двовимірного» ідеального газу, частинки якого рухаються тільки в двох вимірах. Записати розподіл швидкостей в ідеальному двовимірному газі і знайти характерні швидкості (ймовірну, середню, середньоквадратичну).

Відповідь: $dW(v) = \left(\frac{m}{kT}\right) e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v dv$; $v_e = \sqrt{\frac{kT}{m}}$; $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{\pi kT}{2m}}$; $\sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$.

2.27. Відшукати середнє значення величини, оберненої швидкості молекул газу в стані рівноваги, тобто $\left\langle \frac{1}{v} \right\rangle$.

Відповідь: $\left\langle \frac{1}{v} \right\rangle = \sqrt{\frac{2m}{\pi kT}}$.

2.30. Обчислити найбільш ймовірну ε_i енергію молекул в ідеальному газі.

Показати, що $\varepsilon_i \neq \frac{mv_i^2}{2}$.

Відповідь: $\varepsilon_i = \frac{kT}{2}$

2.31. Яка частина молекул газу має швидкість, більшу за середню теплову швидкість $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$?

Відповідь: $\frac{N_1}{N} = \frac{4}{\pi} e^{-\frac{4}{\pi}} + 1 - \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{4}{\pi}}\right) \approx 0,5$.

2.32. Яка частина молекул газу має швидкість між половинним і подвоєним значеннями найбільш ймовірної швидкості, тобто $\frac{v_i}{2} \leq v \leq 2v_i$?

Відповідь: $\frac{\Delta N}{N} \approx 0,87$.

2.36. Високотемпературна плазма з дейтерію знаходиться при температурі 10^7 К. Визначити, яка частина ядер володіє кінетичною енергією, достатньою для подолання кулонівського потенційного бар'єру (без урахування тунельного ефекту). Радіус ядра дейтерію прийняти рівним $2 \cdot 10^{-15}$ м.

Відповідь: $\frac{N_1}{N} = 2 \sqrt{\frac{x_0}{\pi}} e^{-\frac{x_0}{\pi}} + 1 - \operatorname{erf}(\sqrt{x_0})$, де $x_0 = \frac{U_{\max}}{kT} \approx 4,5 \cdot 10^2$.

Тема № 5. Розподіл Больцмана.

В аудиторії: №№ 2 – 41; 45; 51; 52.

Домашнє завдання: №№ 2 – 42; 44; 47; 49.

2 год.

[36 (a)]

[36 (a)]

Запитання для самоконтролю:

1. Який фізичний зміст статистичного розподілу Больцмана?

2. Які фізичні обмеження накладаються на статистичну систему, щоб її стан можна було б описати за допомогою розподілу Больцмана?
3. Що визначає розподіл Больцмана у випадку відсутності потенціального поля?
4. Записати розподіл Больцмана для молекул ідеального газу у полі тяжіння Землі.
5. Записати барометричну формулу, що вона визначає, які межі її застосування?

Задачі для розв'язку

2.41. Вважаючи справедливою для атмосфери (у першому наближенні) барометричну формулу, знайти, на якій висоті при температурі 273 К тиск повітря зменшується втричі. Відносну молекулярну масу повітря вважати рівною $\mu=28,97$ г/моль. Прискорення вільного падіння $g = 9,81$ м/с².

$$\text{Відповідь: } C_V = \frac{RT}{\mu g} \ln 3 \approx 8600 \text{ м.}$$

2.42. Для вимірювання числа Авогадро Перрен досліджував розподіл по висоті зважених в рідині зерен гумігута в однорідному полі сили тяжіння. Він знайшов, що при температурі 293 К при піднятті вгору на висоту в 100 мкм число зважених частинок зменшується в два рази. Частинки гумігута діаметром $0,3 \cdot 10^{-6}$ м були зважені в рідині, густина якої на $\Delta\rho=0,2$ г/см³ менше густини частинок. Визначити за цими даними значення числа Авогадро.

$$\text{Відповідь: } N_A = \frac{RT \ln \frac{n_1}{n_2}}{gV\Delta\rho(h_1 - h_2)} \approx 6,1 \cdot 10^{23} \text{ (1/моль).}$$

2.44. Яка частка молекул кисню (O₂) земної атмосфери може подолати гравітаційне поле Землі при температурі 300 К? Вказівка: значення потенційної енергії молекули на відстані R від центру Землі записати за формулою:

$$U = mgR_0^2 \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R} \right), \text{ де } R_0 = 6371 \text{ км} - \text{радіус Землі.}$$

$$\text{Відповідь: } W = \frac{n_\infty}{n_{R_0}} \approx 10^{-344}.$$

2.45. У центрифугі знаходиться емульсія з води і деякої синтетичної речовини, густина якої $\rho = 999$ кг/м³. Частинки цієї речовини можна вважати кульками радіусом 10^{-2} мкм. Радіус центрифуги $R=0,12$ м, частота обертання $\nu=200$ Гц. Обчислити відношення концентрацій частинок в центрі ($r=0$) і на краю ($r=R$), якщо температура рівна 4°C.

$$\text{Відповідь: } \frac{n_{r=0}}{n_{r=R}} \approx 2,6 \cdot 10^5.$$

2.47. У газовій центрифугі радіусу R, що обертається з постійною кутовою швидкістю ω , проводиться розділення суміші газів, молекули яких мають маси m_1

і m_2 . Знайти коефіцієнт розділення $q = \frac{(n_1/n_2)_{r=R}}{(n_1/n_2)_{r=0}}$ де n_1 і n_2 — концентрації молекул обох сортів. Пояснити, чому q росте з пониженням температури.

$$\text{Відповідь: } q = \frac{(n_1/n_2)_{r=R}}{(n_1/n_2)_{r=0}} = \exp\left(\frac{(m_1 - m_2)\omega^2 R^2}{2kT}\right).$$

2.49. Знайти енергію і теплоємність ідеального газу, що знаходиться в центрифугі радіусу R , яка обертається з постійною кутовою швидкістю ω . Температура газу T , число молекул N .

$$\text{Відповідь: } E = \frac{3}{2}NkT + NkT \left\{ 1 + \frac{m\omega^2 R^2}{2kT} \frac{e^{\frac{m\omega^2 R^2}{2kT}}}{1 - e^{\frac{m\omega^2 R^2}{2kT}}} \right\};$$

$$C_V = \frac{3}{2}Nk + Nk \left\{ 1 - \left(\frac{m\omega^2 R^2}{2kT} \right)^2 \frac{e^{\frac{m\omega^2 R^2}{2kT}}}{\left(1 - e^{\frac{m\omega^2 R^2}{2kT}} \right)^2} \right\}.$$

2.51. Газ знаходиться в полі з потенціальною енергією $U = -a \cos \varphi$ (де a – const, φ – кут між віссю молекули і деяким виділеним напрямом, наприклад напруженістю зовнішнього однорідного електричного поля). Отримати розподіл молекул по напрямках і обчислити середнє значення потенціальної енергії молекули, вважаючи, що φ мінється безперервно в інтервалі від 0 до π .

$$\text{Відповідь: } dW(\varphi) = A e^{\frac{a \cos \varphi}{kT}} \sin \varphi d\varphi; \quad \bar{U} = kT - \operatorname{arcth}\left(\frac{a}{kT}\right).$$

2.52. Газоподібний аміак, молекули якого володіють дипольним моментом $\rho_0 = 4,9 \cdot 10^{-30}$ Кл·м поміщений в однорідне електричне поле з напруженістю $E = 500$ В/м. У якій частини молекул аміаку при температурі 273 К дипольні моменти утворюють з напрямом \vec{E} кут, що не перевищує 45° ?

$$\text{Відповідь: } \frac{\Delta N}{N} = 0,15.$$

Модульна контрольна робота № 2 із статистичної термодинаміки (самостійне виконання).

7. САМОСТІЙНА РОБОТА

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Модуль 1. Квантова механіка		
1.	Експериментальні основи квантової механіки	2
2.	Теоретичні основи квантової механіки	2
3.	Фізичні основи і математичний апарат квантової механіки	2
4.	Одновимірний рух	2
5.	Рух частинки в центральній-симетричному полі. Атом гідрогену	2
6.	Спін електрона	2
7.	Теорія збурень	2
8.	Атом гелію	2
9.	Взаємодія атома з електромагнітним полем	2
10.	Висновки	2
<i>Колоквіум №1</i>		2
<i>Модульна контрольна робота № 1</i>		2
Усього за модулем 1, годин		24
Модуль 2. Статистична термодинаміка		
1.	Основні поняття термодинаміки	2
2.	Перший закон термодинаміки	1
3.	Другий закон термодинаміки	1
4.	Третій закон термодинаміки	1
5.	Методи термодинаміки	2
6.	Фазові переходи і критичні явища	2
7.	Макроскопічний і мікроскопічний стани системи	1
8.	Мікроканонічний і канонічний розподіли Гіббса	1
9.	Розподіл Максвелла-Больцмана	1
10.	Розподіл Гіббса в квантовій статистиці	1
11.	Статистичний зміст законів термодинаміки	1
12.	Обчислення термодинамічних функцій класичного ідеального газу	1
13.	Розподіли Фермі і Бозе	1
14.	Квантова теорія теплоємності твердих тіл	1
<i>Колоквіум №2</i>		2
<i>Модульна контрольна робота №2</i>		2
<i>Захист домашніх та інд. задач</i>		1
Усього за модулем 2, годин		22
Усього годин		46

8. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

(визначаються за номером студента в списку академічної групи)

8.1. Методичні рекомендації з індивідуальних завдань. Індивідуальні завдання з курсу теоретичної фізики мають на меті перевірити вміння студента самостійно розв'язувати різноманітні фізичні задачі, аналогічні до тих, що були розглянуті під час практичних занять.

Пам'ятайте, що широту погляду на запропоновану задачу, вміння пов'язувати її з законами природи і з іншими суміжними задачами треба рішуче протиставити пошукам «потрібної формули» на основі здогадів, з'ясуванню, для чого дано ту чи іншу величину.

Розв'язування фізичних задач, як правило, має три етапи:

- 1) аналізу фізичної проблеми або опису фізичної ситуації;
- 2) пошуку математичної моделі розв'язку;
- 3) реалізації розв'язку та аналізу одержаних результатів.

На першому етапі фактично відбувається побудова фізичної моделі задачі, що подана в її умові:

- аналіз умови задачі, визначення відомих параметрів і величин та пошук невідомого;
- конкретизація фізичної моделі задачі за допомогою графічних форм (малюнки, схеми, графіки тощо);
- скорочений запис умови задачі, що відтворює фізичну модель задачі в систематизованому вигляді.

На другому, математичному етапі розв'язування фізичних задач відбувається пошук зв'язків і співвідношень між відомими величинами і невідомим:

- вибудовується математична модель фізичної задачі, робиться запис загальних рівнянь, що відповідають фізичній моделі задачі;
- враховуються конкретні умови фізичної ситуації, що описується в задачі, здійснюється пошук додаткових параметрів (початкові умови, фізичні константи тощо);
- приведення загальних рівнянь до конкретних умов, що відтворюються в умові задачі, запис співвідношення між невідомим і відомими величинами у формі часткового рівняння.

На третьому етапі здійснюються такі дії:

- аналітичне, графічне або чисельне розв'язання рівняння відносно невідомого;
- аналіз одержаного результату щодо його вірогідності й реальності, запис відповіді;
- узагальнення способів діяльності, які властиві даному типу фізичних задач, пошук інших шляхів розв'язку.

Модуль 1. Квантова механіка

№ з/П	Номери індивідуальних задач за збірником: Иродов И.Е. Сборник задач по атомной и ядерной физике. Учебное пособие для вузов / И.Е. Иродов. – Изд. 5, перераб. – М.: Атомиздат, 1971. – 231 с.									
1.	2.28.	3.1.	3.15.	3.29.	3.43.	4.1.	4.15.	4.29.	4.43.	5.15.
2.	2.29.	3.2.	3.16.	3.30.	3.44.	4.2.	4.16.	4.30.	4.44.	5.16.
3.	2.30.	3.3.	3.17.	3.31.	3.45.	4.3.	4.17.	4.31.	4.45.	5.17.
4.	2.31.	3.4.	3.18.	3.32.	3.46.	4.4.	4.18.	4.32.	4.46.	5.18.
5.	2.32.	3.5.	3.19.	3.33.	3.47.	4.5.	4.19.	4.33.	4.47.	5.19.
6.	2.33.	3.6.	3.20.	3.34.	3.48.	4.6.	4.20.	4.34.	4.48.	5.20.
7.	2.34.	3.7.	3.21.	3.35.	3.49.	4.7.	4.21.	4.35.	4.49.	5.21.
8.	2.35.	3.8.	3.22.	3.36.	3.50.	4.8.	4.22.	4.36.	4.50.	5.22.
9.	2.36.	3.9.	3.23.	3.37.	3.51.	4.9.	4.23.	4.37.	4.51.	5.23.
10.	2.37.	3.10.	3.24.	3.38.	3.52.	4.10.	4.24.	4.38.	4.52.	5.24.
11.	2.38.	3.11.	3.25.	3.39.	3.53.	4.11.	4.25.	4.39.	4.53.	5.25.
12.	2.39.	3.12.	3.26.	3.40.	3.54.	4.12.	4.26.	4.40.	4.54.	5.26.
13.	2.40.	3.13.	3.27.	3.41.	3.55.	4.13.	4.27.	4.41.	4.55.	5.27.
14.	2.41.	3.14.	3.28.	3.42.	3.56.	4.14.	4.28.	4.42.	4.56.	5.28.
15.	2.42.	3.15.	3.29.	3.43.	3.57.	4.15.	4.29.	4.43.	4.57.	5.29.
16.	2.43.	3.16.	3.30.	3.44.	3.58.	4.16.	4.30.	4.44.	4.58.	5.30.

Модуль 2. Статистична термодинаміка

№ з/П	Нумерація задач за збірником: Волчанський О.В. Термодинаміка і статистична фізика: навчальний посібник [для студ. фізик. спец. пед. вищ. закл.] / Волчанський О.В., Подопрігора Н.В., Гур'євська О.М. – Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2012. – 428 с.									
1.	1-12.	1-26.	1-64.	1-82.	1-107.	1-123.	1-156.	1-170.	1-192.	
	2-1	2-34	2-57	2-85	2-104	2-117	2-134	2-156		
2.	1-13.	1-27.	1-65.	1-83.	1-108.	1-124.	1-157.	1-171.	1-193.	
	2-6	2-35	2-58	2-86	2-105	2-118	2-135	2-157		
3.	1-14.	1-28.	1-66.	1-84.	1-109.	1-125.	1-158.	1-172.	1-194.	
	2-8	2-37	2-59	2-87	2-106	2-119	2-136	2-158		
4.	1-15.	1-29.	1-67.	1-85.	1-110.	1-133.	1-159.	1-173.	1-195.	
	2-13	2-38	2-60	2-88	2-107	2-120	2-137	2-159		
5.	1-16.	1-30.	1-68.	1-86.	1-111.	1-137.	1-160.	1-174.	1-196.	
	2-14	2-39	2-61	2-89	2-108	2-123	2-141	2-160		
6.	1-17.	1-31.	1-69.	1-87.	1-112.	1-138.	1-161.	1-175.	1-197.	
	2-17	2-40	2-67	2-90	2-109	2-124	2-142	2-161		
7.	1-18.	1-46.	1-70.	1-88.	1-113.	1-139.	1-162.	1-176.	1-198.	
	2-18	2-43	2-68	2-91	2-110	2-125	2-145	2-162		
8.	1-19.	1-47.	1-71.	1-89.	1-114.	1-140.	1-163.	1-185.	1-199.	
	2-19	2-46	2-69	2-92	2-111	2-126	2-148	2-163		
9.	1-20.	1-48.	1-72.	1-90.	1-115.	1-141.	1-164.	1-186.	1-200.	
	2-22	2-48	2-71	2-93	2-112	2-127	2-149	2-164		
10.	1-21.	1-49.	1-73.	1-91.	1-116.	1-142.	1-165.	1-187.	1-201.	
	2-25	2-50	2-72	2-94	2-112	2-128	2-151	2-165		
11.	1-22.	1-50.	1-74.	1-99.	1-117.	1-143.	1-166.	1-188.	1-202.	
	2-26	2-53	2-73	2-98	2-113	2-129	2-152	2-166		
12.	1-23.	1-51.	1-75.	1-100.	1-118.	1-144.	1-167.	1-189.	1-203.	
	2-28	2-54	2-74	2-101	2-114	2-130	2-153	2-168		

13.	1-24.	1-52.	1-76.	1-101.	1-119.	1-145.	1-168.	1-190.	1-204.	
	2-29	2-55	2-83	2-102	2-115	2-132	2-154	2-169		
14.	1-25.	1-53.	1-77.	1-102.	1-120.	1-155	1-169.	1-191.	1-205.	
	2-33	2-56	2-84	2-103	2-116	2-133	2-155	2-170		
15.	1-9	1-42	1-78	1-103	1-121	1-130	1-151	1-181	1-195	
	2-15	2-36	2-70	2-81	2-106	2-143	2-160	2-164		
16.	1-10	1-43	1-79	1-104	1-122	1-131	1-152	1-182	1-199	
	2-11	2-32	2-66	2-82	2-121	2-144	2-161	2-165		

Примітка: завдання виконуються в окремому зошиті з детальним поясненням до кожної задачі.

8.2. *Навчальний проект (індивідуальне навчально-дослідне завдання)* передбачає виконання мікро дослідження і його оформлення у вигляді реферату на задану тему:

Модуль 1. Квантова механіка

1. Експериментальні основи квантової механіки і її зв'язок з класичною фізикою.
2. Одержання рівняння Шредінгера на основі дисперсійного рівняння. Оператори.
3. Одержання рівняння Шредінгера на основі оптико-механічної аналогії.
4. Зв'язок хвильової функції з експериментально вимірюваними величинами.
5. Чисті та мішані квантові стани. Матриця густини.
6. Теорія зображень.
7. Тензорний формалізм в теорії моменту імпульса.
8. Квантові стани дискретного спектра в центральних полях.
9. Канонічні перетворення в квантовій механіці.
10. Рух без спінової зарядженої частинки в магнітному полі.
11. Частинка зі спіном у магнітному полі.
12. Магнітне поле орбітальних струмів і спінові магнітні моменти.
13. Задача двох частинок у квантовій механіці.
14. Тотожні частинки. Основи формалізму вторинного квантування.
15. Нестационарні явища в атомах і молекулах.
16. Фазова теорія розсіювання. Розсіювання повільних частинок. Резонансні явища під час розсіювання.
17. Розсіювання складних частинок.
18. Теорія фотоефекту.
19. Квантова теорія дисперсії.
20. Варіаційний метод у квантовій механіці.
21. Релятивістське хвильове рівняння для частинок з напівбілим спіном.
22. Релятивістська теорія атома гідрогену.
23. Енергетичний спектр атомних систем у магнітному полі. Ефект Зеемана.
24. Квантування електромагнітного поля.
25. Взаємодія атомних систем з квантовим електромагнітним полем.
26. Атоми і молекули як квантові системи. Стационарні стани атомів з одним і двома електронами.
27. Основні уявлення про ядерні сили. Дейтрон. Модель ядерних оболонок.
28. Кінематика розпадів і зіткнень.
29. Збереження моменту імпульсу і парності під час розпадів і зіткнень. Ізотонічні співвідношення.
30. Основи релятивістської квантової механіки.

Модуль 2. Статистична термодинаміка

1. Термодинамічний і статичний методи дослідження властивостей макроскопічних систем
2. Історичний огляд розвитку термодинаміки, молекулярно-кінетичної теорії, статистичної фізики

3. Правило фаз Гіббса. Потрійна точка
4. Температура та її застосування у науці
5. Температурні явища
6. Температура. Рівняння теплового руху молекул
7. Принцип роботи теплового двигуна
8. Зв'язок ентропії з імовірністю стану системи
9. Зміна ентропії в реальних системах
10. Ентропія термодинамічна і інформаційна
11. Загальнонаукове значення поняття ентропії
12. Хімічна термодинаміка
13. Теоретичні основи теплотехніки
14. Температурна залежність поверхневого натягу рідини
15. Значення поверхневого натягу під час утворення нової фази. Зародки
16. Рівноважна форма монокристалу. Принцип Гіббса-Кюрі і теорема Вульфа
17. Термодинаміка гальванічних і паливних елементів. Визначення хімічної спорідненості
18. Охолодження газу при необоротному та оборотному адіабатних розширеннях
19. Рівновага в гомогенній системі
20. Рівновага в гетерогенній системі
21. Ефект Джоуля-Томсона
22. Теорія дисоціації двохатомного газу
23. Від'ємні температури
24. Термодинамічна теорія флуктуацій
25. Часові кореляції флуктуацій термодинамічних величин
26. Термодинаміка діелектриків і магнетиків
27. Термодинаміка випромінювання
28. Термодинаміка плазми
29. Термодинаміка надпровідного переходу
30. Критичні і надкритичні явища. Теорія В.К. Семенченка
31. Термодинамічна теорія критичних показників
32. Варіаційні принципи термодинаміки необоротних процесів
33. Дисипативні функції Онзагера
34. Хімічні реакції і процеси релаксації
35. Термоелектричні явища
36. Термомеханічний і механокалоричний ефекти
37. Синергетика і її основні положення
38. Значення синергетики для сучасного природничо-наукового пізнання
39. Квантова теорія теплоємності двохатомних газів. Якісний аналіз
40. Квантова теорія теплоємності двохатомних газів. Кількісний аналіз
41. Вільні електрони в металі як вироджений фермі-газ
42. Рівноважне випромінювання як фотонний бозе-газ
43. Фотонний бозе-газ у кристалі.
44. Статистика носіїв струму в напівпровідниках
45. Нерівноважні системи. Методи кінетики
46. Рівняння кінетичного балансу. Принцип детальної рівноваги.
47. Кінетичне рівняння для електронів у металі. Тензор електропровідності

9. МЕТОДИ НАВЧАННЯ

– *методи пізнання*: абстрагування, ідеалізація, узагальнення і систематизація знань, проблемно-пошуковий, моделювання фізичних явищ і процесів на лекціях; актуалізація опорних знань та послідовне виконання визначеної системи завдань на практичних заняттях; індивідуальне обговорення складних для засвоєння

студентами теоретичних питань та індивідуальних завдань курсу на консультаціях;

– *методи управління*: моніторинг рівнів сформованості (мотивації – професійної, навчально-пізнавальної, соціальної інтенсифікації, утилітарної; засвоєння – глибина, міцність, системність знань, успішність вивчення дисципліни; наукового світогляду – фундаментальності, інтегрованості і технологічності знань з дисципліни тощо) – діагностика, аналіз, коригування.

10. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

Усне опитування (на колоквиумах, семінарських та практичних заняттях), тестування і перевірка письмових робіт (тематичних атестаційних, контрольних, комплексних контрольних робіт, домашніх та індивідуальних завдань), колективне обговорення (запитань, що виносяться на самостійне опрацювання студентами, рефератів ін.).

Норми оцінювання усних відповідей:

При оцінюванні усної відповіді студентом оцінюються:

- висвітлення логічно відповідає змісту питань курсу;
- знання фактів до визначених елементів теорії та їх узагальнення;
- знання й висвітлення експериментальних результатів;
- знання принципів і постулатів;
- уміння пов'язувати зміст питань курсів загальної й теоретичної фізики;
- виражати власну точку зору стосовно аналізу елементів курсу та наукового світогляду людства;
- вміння застосувати знання в новій ситуації.

Завдання, яке одержує студент **на колоквиумі** складає два теоретичних запитання з висвітлення логічно завершеного елемента теорії із застосуванням математичного апарату.

5 балів ставиться тоді, коли студент: виявляє правильне розуміння фізичного змісту розглядуваних явищ і закономірностей, законів і теорій, дає точне визначення і тлумачення основних понять, законів і теорій, а також правильне визначення фізичних величин будує відповідь за власним планом, супроводжує розповідь власними прикладами, вміє застосувати знання в новій ситуації; може встановити зв'язок між матеріалом, що вивчається, і раніше вивченим.

4 бали студент одержує в разі неповного відтворення відповіді, пов'язане з випущенням або нерозумінням одного-двох положень, постулатів, принципів і невмінням визначити їх за довідниками, посібниками.

3 бали оцінюється відповідь, у якій лише відтворено основні постулати й принципи, на яких ґрунтується зміст відповідей без математичного виведення лише фрагментарним описом окремих елементів.

У 0 балів оцінюється відповідь, що складають логічно не зв'язані фрагментарні відомості, які не дозволяють судити про розуміння суті відповіді; відсутність знань законів, постулатів і їх математичних виразів.

Оцінювання письмових самостійних та контрольних робіт:

5 балів ставиться тоді, коли студент вільно володіє теоретичним матеріалом (законами, формулами), що проявляється у самостійному розв'язку задач на 4 й

більше й більше логічних кроків, зводить значення фізичних величин до єдиної системи вимірювання, робить перевірку одиниць вимірювання шуканої фізичної величини.

4 бали ставиться тоді, коли студент засвоїв теоретичний матеріал, може самостійно розв'язувати задачі на 4 й більше логічних кроків репродуктивного характеру, зводить значення фізичних величин до єдиної системи вимірювання, робить перевірку одиниць вимірювання шуканої фізичної величини.

3 бали ставиться тоді, коли студент вміє розв'язувати задачі і вправи на 1-3 кроки репродуктивного характеру, зводить значення фізичних величин до єдиної системи вимірювання, робить перевірку одиниць вимірювання шуканої фізичної величини.

В усіх останніх випадках ставиться відповідь оцінюється у **0 балів**.

При оцінюванні письмових робіт враховується частка завдання, яка виконана вірно.

11. РОЗПОДІЛ БАЛІВ, ЯКІ ОТРИМУЮТЬ СТУДЕНТИ

Модуль 1 Квантова механіка та Модуль 2. Статистична термодинаміка

Поточне оцінювання та самостійна робота						Екзам ен	Усього	
Теоретичний модуль		Практичний модуль			Самостійно- практичний модуль		40	100
K1	K2	МКР1	МКР2	СБ	ДЗ	ІДЗ		
5	5	10	10	5	5	20		

Примітка: Оцінювання проводиться за видами навчальної діяльності: К – колоквиум з теоретичного лекційного матеріалу; МКР – модульна контрольна робота; СБ – середній бал за практичні заняття; ДЗ – виконання і захист домашніх задач; ІДЗ – виконання і захист індивідуальних завдань.

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою
		для екзамену
90 – 100	A	відмінно
82-89	B	добре
74-81	C	
64-73	D	задовільно
60-63	E	
35-59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання
0-34	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

12. МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Підручники, навчальні посібники, навчально-методичний комплекс дисципліни (конспекти лекцій, перелік запитань для самоконтролю під час підготовки до

практичних занять, завдання для підготовки до модульних контрольних робіт, тематика рефератів, перелік питань для підготовки до колоквиумів, захисту самостійно вивченого теоретичного матеріалу, екзамену тощо).

13. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Модуль 1. Квантова механіка

а) базова

1. Астахов А.В. Квантовая физика / Астахов А.В., Широков Ю.М. – М.: Наука, 1983. – 249 с.
2. Бережной Ю.А. Лекції з квантової механіки: навч. Посібник / Ю.А. Бережной. – К.: Видавництво «Майстер-клас», 2008. – 448 с.
3. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики / Д.И. Блохинцев. – [6-е изд.]. – М.: Высшая школа, 1983, – 64 с.
4. Борисоглебский Л.А. Квантовая механика / Л.А. Борисоглебский. – Минск: Издательство БГУ, 1988. – 622 с.
5. Венгер Є.Ф. Збірник задач з квантової механіки / Венгер Є.Ф., Грибань В.М., Мельничук О.В. – К.: Вища шк., 2003. – 230 с.
6. Венгер Є.Ф. Основы квантовой механики / Венгер Є.Ф., Грибань В.М., Мельничук О.В. – К.: Вища шк., 2002. – 286 с.
7. Глауберман А.Ю. Фізика атома та квантова механіка / Глауберман А.Ю., Манакин Л.О. – К.: Вища школа, 1972. – 291 с.
8. Грашин А.Ф.. Квантовая механика / А.Ф. Грашин. – М.: Просвещение, 1974. – 208 с.
9. Давыдов А.С. Квантовая механика / А.С. Давыдов. – М.: Наука, 1973. – 704 с.
10. Дирак П.А.М. Принципы квантовой механики / П.А.М. Дирак. – М.: Физматгиз, 1960. – 434 с.
11. Друкарев Г.Ф. Квантовая механика / Г.Ф. Друкарев. – Ленинград: изд. ЛГУ, 1988. – 200 с.
12. Компанеец А.С. Курс теоретической физики: [в 2-х т.] / А.С. Компанеец. – М.: Просвещение, 1972. – Т.1: Элементарные законы. – 1972. – 512 с.
13. Ландау Л.Д. Краткий курс теоретической физики: [в 3-х кн.] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.– М.: Наука, 1969. – Кн. 2: Квантовая механика. – 1972. – 378 с.
14. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Квантовая механика (Нерелятивистская теория) / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1989. – Т.3. – 768 с.
15. Левич В.Г. Курс теоретической физики: [в 2-х т.] / Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А. – М.: Наука, 1969. – Т. 2: Квантовая механика. Квантовая статистика и физическая кинетика. – 1971. – 637 с.
16. Матвеев А.Н. Атомная физика / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1989, –150 с.
17. Матвеев А.Н. Квантовая механика и строение атома / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1965. – 356 с.
18. Серова Ф.Г. Сборник задач по теоретической физике: Квантовая механика, статистическая физика: [учеб. Пособ. Для студ. Пед. Ин-тов по физ. Спец.] / Серова Ф.Г., Янкина А.А. – М.: Просвещение, 1979. – 192 с.
19. Соколов А.А. Квантовая механика / Соколов А.А., Тернов И.М., Жуковский В.Ч. – М.: Наука, 1979. – 529 с.
20. Соколов А.А. Квантовая механика и атомная физика / Соколов А.А., Тернов И.М. – М.: Просвещение, 1970. – 423 с.

21. Федорченко А.М. Основы квантовой механики / А.М. Федорченко. – К.: Вища школа, 1979. – 271 с.
22. Фок В.А. Начала квантовой механики / В.А. Фок. – М.: Наука, 1976. – 376 с.
23. Шпольский Э.В. Атомная физика: [в 2-х т.] / Э.В. Шпольский. – М.: Наука, 1974. – Т. 1: Введение в атомную физику. – 1974. – 575 с.
24. Шпольский Э.В. Атомная физика: [в 2-х т.] / Э.В. Шпольский. – М.: Наука, 1974. – Т. 2: Основы квантовой механики и строение электронной оболочки атома. – 1974. – 447 с.
25. Энрико Ферми. Квантовая механика: конспект лекций / Энрико Ферми. – М.: Мир, 1968. – 366 с.

б) допоміжна

26. Бережной Ю.А. Лекції з квантової механіки: навчальний посібник / Ю.А.Бережной. – К. : Видавництво «Майстер клас», 2008. – 448 с.
27. Мигдал А.Б. Квантовая физика для больших и маленьких / А.Б. Мигдал. – М.: Наука, 1989. – 144 с. – (Б-чка «Квант». Вып. 75.)
28. Подопригора Н.В. Фізика твердого тіла / Подопригора Н.В., Садовий М.І., Трифонова О.М. – Кіровоград : «Авангард», 2013. – 416 с.
29. Савельев И.В. Основы теоретической физики: [в 2-х т.] / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1975. – Т.2: Квантовая механика. – 1977. – 351 с.
30. Суханов А.Д. Лекции по квантовой физике / А.Д. Суханов. – М.: Высшая школа, 1991. – 383 с.
31. Тарасов Л.В. Основы квантовой механики / Л.В. Тарасов. – М.: Высшая школа, 1978. – 286 с.
32. Фано У. Физика атомов и молекул / Фано У., Фано Л. – М.: Наука, 1980. – 656 с.
33. Фон Нейман Дж. Математические основы квантовой механики / Джон фон Нейман. – М.: Наука, 1964. – 367 с.

Модуль 2. Статистична термодинаміка

а) базова

34. Базаров И.П. Термодинамика : [учебник] / Базаров И.П. – М. : Высш. шк., 1983. – 344 с.
35. Василевский А.С. Статистическая физика и термодинаміка : [учеб. пособие для студентов ф.-м. фак. пед ин.-тов] / А.С. Василевский, В.В. Мултановский. – М. : Просвещение, 1985. – 256 с.
36. Волчанський О.В. Термодинаміка і статистична фізика: навчальний посібник [для студ. фізик. спец. пед. вищ. закл.] / Волчанський О.В., Подопригора Н.В., Гур'євська О.М. – Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В.Винниченка, 2012. – 428 с. – (Рекомендовано МОНмолодьспорту лист № 1/11-12975 від 08.08.12)
37. Курс теоретической физики : Учебное пособие для ВУЗов в 10 томах / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : [Физматлит](#), 2005. – Т.5. – Ч.1 : Статистическая физика. – 616 с.
38. Матвеев А.Н. Молекулярная фізика : [учеб. для физ. спец. вузов] / Матвеев А.Н. – М. : Высш. шк., 1987. – 360 с.
39. Основи статистичної фізики і термодинаміки : [навч. посіб.] / Венгер Є.Ф., Грибань В.М., Мельничук О.В. – К. : Вища шк., 2004. – 255 с.

б) допоміжна

40. Левич В.Г. Курс теоретической физики : [в 2 т.] / В.Г. Левич. – М. : Мир, 1984. – Т. 1. – 398 с.

41. Ноздрев В.Ф. Курс статистической физики: [учеб. пособ. для студ. пед. ин-тов] / В.Ф. Ноздрев, А.А. Сенкевич. – М. : Высш. шк., 1969. – 288 с.
42. Ноздрев В.Ф. Курс термодинамики : [учеб. пособ. для студ. пед. ин-тов] / В.Ф. Ноздрев, А.А. Сенкевич. – М. : Высш. шк., 1967. – 248 с.
43. Радушкевич Л.В. Курс статистической физики / Л.В. Радушкевич. – М. : Учпедгиз, 1966. – 420 с.
44. Радушкевич Л.В. Курс термодинамики : [учеб. пособ. для студ. физ.-мат. фак-тов пед.ин-тов] / Л.В. Радушкевич. – М. : Просвещение, 1971. – 288 с.
45. Рейф Ф. Берклеевский курс физики : [в 5 т.] / Ф. Рейф. – М. : Наука, 1986. – Т. V. Статистическая физика. – 336 с.
46. Румер Ю.Б. Термодинамика. Статистическая физика и кинетика / Ю.Б. Румер, М.Ш. Рывкин. – М. : Наука, 1977. – 553 с.

14. Інформаційні ресурси

1. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/index.html>
2. <http://ilib.mirror1.mccme.ru/>
3. http://booksobzor.info/estestvoznanie_nauchnotehnicheskaja_literatura
4. <http://www.femto.com.ua/start.html>
5. <http://newlibrary.ru/genre/nauka/fizika/>
6. <http://www.netbook.perm.ru/fisika.html>
7. <http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics/elementary.htm>