

УДК 378.147:536.93

DOI <https://doi.org/10.32782/2412-9208-2025-3-191-201>

**METHODOLOGICAL FEATURES OF TEACHING
THE FUNDAMENTALS OF QUANTUM STATISTICS IN THE COURSE
OF THEORETICAL PHYSICS**

**МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ ОСНОВ КВАНТОВОЇ
СТАТИСТИКИ КУРСУ ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ**

Oleksandr SHKOLA,

Doctor of Pedagogical Sciences,
Professor,

Berdiansk State Pedagogical
University

55A, Universytetska Str., Zaporizhia,
69011, Ukraine

aleksandrshkola99@gmail.com

orcid.org/0000-0001-9946-446X

Олександр ШКОЛА,

доктор педагогічних наук,
професор,

Бердянський державний
педагогічний університет

вул. Університетська 55А,
м. Запоріжжя, 69011, Україна

aleksandrshkola99@gmail.com

orcid.org/0000-0001-9946-446X

Elena KUZNETSOVA,

Doctor of Pedagogical Sciences,
Professor,

Berdiansk State Pedagogical
University

55A, Universytetska Str., Zaporizhia,
69011, Ukraine

ekena2055@gmail.com

orcid.org/0000-0001-9728-7324

Олена КУЗНЕЦОВА,

доктор педагогічних наук,
професор,

Бердянський державний
педагогічний університет

вул. Університетська 55А,
м. Запоріжжя, 69011, Україна

ekena2055@gmail.com

orcid.org/0000-0001-9728-7324

Hanna KOLOMOETS,

Candidate of Physical and
Mathematical Sciences, Associate
Professor,

Berdiansk State Pedagogical University
55A, Universytetska Str., Zaporizhia,
69011, Ukraine

kolombozgia@gmail.com

orcid.org/0000-0003-2604-6333

Ганна КОЛОМОЄЦЬ,

кандидат фізико-математичних
наук, доцент,

Бердянський державний
педагогічний університет

вул. Університетська 55А,
м. Запоріжжя, 69011, Україна

kolombozgia@gmail.com

orcid.org/0000-0003-2604-6333

ABSTRACT

The article highlights the methodological features of teaching the basics of quantum statistics in the theoretical physics course of a pedagogical university, which is of great

importance in the fundamental professional training of future physics teachers. Taking into account modern educational realities and the distance learning format, attention is focused on the need to implement such methodological approaches in teaching the course that would ensure systematic active cognitive activity of students, acquisition of professional competence, and contribute to their personal and professional growth. Based on the analysis of modern domestic educational and methodological sources from the theoretical physics course, an author's approach to teaching the basic provisions of quantum statistics is proposed in accordance with the principles of fundamentality and professional orientation; logical structuring, content compactness and mathematical laconicism of the educational material. In a concise version, the main issues of quantum statistics that traditionally cause difficulties for students are highlighted in a qualitative form, in particular: features of the application of the Gibbs statistical method to quantum systems, Fermi-Dirac and Bose-Einstein distributions, the gas degeneracy criterion, thermodynamic potentials and equations of state of a quantum gas, ideal Bose and Fermi gases at low temperatures, degenerate electron gas in a metal. The emphasis is on the main aspects of students' mastery of quantum theories of heat capacity of gases, solids and equilibrium electromagnetic radiation as important stages in the development of physical science at the beginning of the 20th century, which led to the emergence and formation of a new quantum-field picture of the world. The effectiveness of the proposed author's approach in teaching the relevant topic of the theoretical physics course is confirmed by the level of cognitive activity and the results of final assessments (or exams) of students.

Key words: theoretical physics, thermodynamics and statistical physics, quantum statistics, future physics teacher, professional competence.

Вступ. Курс теоретичної фізики традиційно завершує цілеспрямовану й послідовну систему фундаментальної підготовки майбутніх учителів фізики в педагогічному університеті, передбачаючи формування найповніших і цілісних уявлень про структуру та еволюцію сучасної фізичної картини світу на основі засвоєння змісту фундаментальних фізичних теорій та сфер їх практичного застосування як невід'ємної складової фахової компетентності, основи професійного зростання й розвитку. Якісне засвоєння студентами навчальних матеріалів курсу залежить не тільки від рівня їх належної фізико-математичної підготовки, але й пов'язане з іншими важливими освітніми чинниками сьогодення: а) зниження пізнавального інтересу і рівня предметної підготовки; б) зменшення обсягу аудиторних контактних годин і збільшення «питомої ваги» самостійної роботи; в) порушення системної взаємодії учасників освітнього процесу в умовах військового стану в державі та дистанційного формату навчання. Очевидно, що така ситуація потребує обов'язкового виправлення, оскільки негативно впливає на рівень фундаментальної професійної підготовки майбутніх учителів фізики і має вкрай небезпечні наслідки.

Ключовим завданням у викладанні навчального курсу нині стає організація системної пізнавальної роботи студентів із використанням цілісного навчально-методичного забезпечення та неперервного моніторингу й діагностики рівня їх навчальних досягнень. Попри існування різноманітних

навчально-методичних джерел та оригінальність авторських підходів у розкритті ключових аспектів дисципліни, необхідність оновлення підходів до її викладання в сучасних освітніх реаліях вважаємо очевидною. Важливим є впровадження таких методичних підходів, які б відповідно принципам фундаментальності та професійної спрямованості; логічної структурованості, змістовної компактності і математичної лаконічності навчального матеріалу забезпечувати б системну активну навчально-пізнавальну роботу студентів, набуття фахової компетентності, сприяли їх особистісному та професійному зростанню. У зв'язку з цим *метою статті* є висвітлення методичних особливостей викладання основ квантової статистики курсу теоретичної фізики педагогічного університету, що має важливе значення у фундаментальній професійній підготовці майбутніх учителів фізики.

Методи та методики дослідження: *опрацювання* навчальних планів та освітньо-професійних програм підготовки майбутніх учителів фізики у закладах вищої освіти, *аналіз* наукової і навчально-методичної літератури з курсу теоретичної фізики; *спостереження і бесіди зі студентами та викладачами* – з метою з'ясування проблемних питань методики навчання теоретичної фізики в педагогічному університеті та шляхів їх ефективного розв'язання; *моніторинг і діагностика* навчальних досягнень студентів, *синтез та узагальнення* – для систематизації результатів дослідження та формулювання висновків.

Результати та дискусії. Згідно робочої програми курсу теоретичної фізики [6, с. 45] квантову статистику ідеального газу студенти вивчають після опанування основ класичної статистики у відповідності з тим історичним шляхом, яким розвивалася статистична теорія. Послідовне опанування таких питань як *статистичний інтеграл ідеального газу, розподіл Максвелла-Больцмана, теореми про рівнорозподіл енергії за ступенями вільності молекули та віріал; класичні теорії теплоємності газів, твердих тіл та рівноважного електромагнітного випромінювання* дозволяє студентам не тільки усвідомити їх фізичну сутність, але й зрозуміти як «працюють статистичні методи» у дослідженні властивостей найпростішої макроскопічної системи – класичного ідеального газу (коли стан мікрочастинок системи можна описувати за допомогою координат та імпульсів). Ці питання були детально висвітлені у нашій попередній роботі [7]. Проте, як відомо, урахування взагалі квантового характеру усіх фізичних процесів суттєво змінює підходи до вивчення властивостей макросистем, забезпечуючи їх поглиблений аналіз і дозволяючи зрозуміти шляхи вирішення проблем класичної статистики, які виникали на певному етапі розвитку науки.

Традиційно навчальна тема «Квантова статистика ідеального газу» курсу теоретичної фізики педагогічного університету включає такі питання: *особливості застосування статистичного методу Гіббса до квантових*

систем; розподіли Фермі-Дірака та Бозе-Ейнштейна, критерій виро-дження газу; термодинамічні потенціали та рівняння стану квантового газу, ідеальні бозе- та фермі-гази за низьких температур, вироджений електронний газ у металі, квантовий осцилятор і квантовий ротатор; квантові теорії теплоємності газів, твердих тіл та рівноважного елек-тромагнітного випромінювання. Аналіз сучасних навчально-методич-них джерел з теоретичної фізики свідчить, що їх автори використовують різні методичні підходи у розкритті основних питань відповідної теми. Так, зокрема у посібнику [1, с. 38–43, с. 53–63] застосовано «операторний підхід» квантової механіки у такій логічній послідовності: рівняння Шре-дінгера, статистична матриця (оператор) та її задовільність рівнянню Неймана як квантово-механічного аналогу рівняння Ліувілля для функції розподілу, обчислення статистичної суми, аналіз квазікласичного пере-ходу; виведення розподілів Фермі-Дірака та Бозе-Ейнштейна з умови максимуму ентропії замкненої макросистеми та аналіз умови виродження газу. У навчальних посібниках [2; 3] основні положення квантової статис-тики висвітлено на основі методу Гіббса у різних навчальних модулях разом з питаннями класичної статистики. Автори «конспектів лекцій» [4; 5] аналіз ключових питань і співвідношень навчальної теми проводять у цілому аналогічно у стислій формі на основі методу Гіббса, послідовно враховуючи «квантові аспекти» мікрочастинок системи. Варто зазначити, що якість опанування здобувачами вищої освіти відповідних навчальних матеріалів курсу теоретичної фізики на основі наведених джерел перед-бачає достатньо високий рівень їх математичної підготовки, що цілком очевидно і зрозуміло. Однак, на наш погляд, за сучасних освітніх умов ефективному засвоєнню студентами матеріалів курсу сприятиме пере-дусім його змістовна компактність і математична лаконічність. Очевидно, що висвітлити методичні особливості викладання основ квантової статис-тики з відповідними математичними розрахунками у межах статті доволі складно, тому розглянемо коротко та якісно лише ті питання, що тради-ційно викликають труднощі у студентів.

1. У ході першого лекційного заняття студенти мають усвідомити, що квантова статистика – розділ статистичної фізики, в якому досліджують системи з великою кількістю частинок, поведінку яких описують зако-нами не класичної, а квантової механіки. Прикладами таких макросистем є електронний газ у металі, фотонний газ у порожнині, фононний газ у кристалі та ін. Основне завдання квантової статистики, як і класичної, зводиться до знаходження розподілу енергії в ансамблі з великого числа квазінезалежних підсистем (частинок), яке вирішують за допомогою того ж універсального статистичного методу Гіббса. Макроскопічні параме-три квантової системи з великого числа частинок знаходять також як середні за сукупністю, оскільки з останніх можна утворювати статистичні

ансамблі, і далі користуватися за Гіббсом відомими методами. При цьому варто звернути увагу студентів, що *принципова відмінність дослідження квантових систем від класичних полягає в тому, що статистика, неминуха під час дослідження систем з великим числом ступенів вільності, тут накладається на статистику, яка притаманна об'єктам мікросвіту через специфічний, квантовий характер їх руху. У квантовій фізиці немає місця законам, які керують змінами індивідуального об'єкту з часом; замість цього ми маємо закони, які керують змінами ймовірності його стану з часом. Звідси логічним є розгляд особливостей застосування універсального статистичного методу Гіббса до квантових систем.*

Властивості частинок у квантовій механіці якісно різняться зі звичайними класичними, до яких відносять: *корпускулярно-хвильовий дуалізм, дискретність різних фізичних параметрів, «спінові» властивості; принцип Паулі та ін.* На відміну від класичної статистики, в якій стан макросистеми визначається точкою у фазовому просторі, а її мікростани – координатами і імпульсами мікрочастинок, у квантовій механіці мікростан характеризують хвильовою функцією, яка задовольняє рівнянню Шредінгера. Це рівняння дає лише спектр можливих квантових станів системи, а не конкретний, в якому вона перебуває в даний момент. Хвильові функції інформують тільки про те, які мікроскопічні стани системи зайняті частинками, але через нерозрізненість останніх не вказують, які саме з них займають ці стани. Тому хвильову функцію системи визначають, вказуючи кількість частинок у кожному стані (числа заповнення): $n_1, n_2, \dots, n_i$. Очевидно, що мова йде про середнє значення $\bar{n}_i$, оскільки в умовах хаотичної взаємодії N частинок системи значення n_i весь час змінюються, при цьому: $\sum n_i = N$.

Для квантових систем, як і для класичних, використовують уявлення про фазовий простір з урахуванням квазікласичного наближення, коли сталу Планка можна вважати дуже малою, але не такою, що дорівнює нулю. Таким шляхом можна врахувати, з одного боку, квантово-механічні властивості системи, з іншого, – використовувати універсальний статистичний метод Гіббса, застосовуючи узагальнені координати та імпульси. Повний перехід до статистики квантових систем здійснюють замінюючи передусім *завдання розподілу систем за фазовими клітинками (об'ємами) у попередньому розумінні завданням розподілу систем за різними квантовими станами. При цьому положення Больцмана про рівну ймовірність фазових об'ємів слід замінити принципом рівноймовірності квантових станів, тобто класичне припущення про те, що всі припустимі області фазового простору однакового об'єму мають рівну ймовірність, замінюють припущенням про рівну ймовірність всіх припустимих станів квантової системи.* Відповідно до цього, всі інте-

грали за фазовим простором для класичної системи замінюють статистичними сумами за всіма власними станами квантової системи. При цьому враховують, що певному стану системи у фазовому просторі відповідає вже не точка, а деякий мінімальний об'єм фазового простору, в якому буде перебувати тільки $\Gamma(h^{3N}N!)$ станів системи з урахуванням співвідношення невизначеності Гейзенберга та кількості можливих перестановок частинок через їх нерозрізненість. З урахуванням вищезазначеного канонічним розподілом Гіббса для квантової системи буде такий вираз:

$\omega_i(E_i) = \frac{1}{Z} \left(\frac{1}{N! h^{3N}} \right) e^{-\frac{E_i}{kT}}$. Варто також звернути увагу студентів на те, що принцип нерозрізненості мікрочастинок породжує фактично існування двох типів хвильових функцій (симетричні та антисиметричні), а відповідно й двох типів частинок з різними спінами (бозони і ферміони) та двох різних квантових статистик.

2). Розподіли Фермі-Дірака та Бозе-Ейнштейна, критерій виродження

газу. У знаходженні $\bar{n}_i$ використовують великий канонічний розподіл Гіббса, застосовуючи його до підсистеми, що складається з усіх частинок газу, які перебувають в i -му квантовому стані. Маса газу, що лишилася, утворює, таким чином, термостат. Виведення розподілів середнього числа частинок за станами у більшості навчально-методичних джерел є подібним, тому звертаємо увагу студентів не тільки на відповідні математичні розрахунки, але й аналіз об'єднаного виразу:

$$\bar{n}_i = \frac{1}{e^{(\varepsilon_i - \mu)/kT} + \delta} = f(\varepsilon),$$

де μ – хімічний потенціал (не залежить від енергії системи і визначається лише її температурою та густиною); $\delta = 1$ (розподіл Фермі-Дірака), $\delta = -1$ (розподіл Бозе-Ейнштейна), $\delta = 0$ (розподіл Максвелла-Больцмана). Порівняння функцій ясно вказує на те, що класична статистика не має місця в природі: усі мікрооб'єкти виступають квантовими системами і для них справедливими є один з перших двох варіантів виразу. Класичну статистику можна розглядати як граничний випадок квантових за умови $e^{-\mu/kT} \gg 1$, коли обидві квантові розподіли переходять у класичний. Цьому сприяють великі маси частинок, низькі концентрації та високі температури. У протилежному випадку настає *виродження системи*, коли зростає вплив квантових ефектів. Розрахунки граничної температури виродження у статистичної теорії свідчать, що: 1) для звичайних газів за нормальних умов вона складає величину порядку 1K, тобто їх можна вважати невивродженими і вивчати на основі статистики Максвелла-Больцмана; 2) для електронного газу в металі $T_B \approx 8,5 \cdot 10^4$ K, тобто за всіх реальних температур його можна вважати

сильно виродженим і застосовувати квантову статистику Фермі-Дірака; 3) для електронів у зоні провідності напівпровідників залежно від природи останніх, концентрації домішок і температури $T_B \approx 10^{-3} \div 5 \cdot 10^4 \text{ K}$, тобто вони можуть бути як невиродженими, так і виродженими, у тому числі й сильно виродженими; 4) фотонний газ завжди є виродженим (статистика Бозе-Ейнштейна), який з урахуванням нульової енергії спокою частинок при охолодженні до абсолютного нуля не конденсується, а зникає.

3). Термодинамічні потенціали та рівняння стану квантового газу. Необхідні співвідношення знаходимо послідовно як результат аналізу умови нормування функції розподілу частинок квантового газу за енергіями та виявленого загального виразу для великого термодинамічного потенціалу системи як функції параметрів (V, T, μ), з якого отримуємо термічне рівняння стану квантового ідеального газу ($pV = 2U/3$), вираз для ентропії квантового газу, а через неї і статистичну суму. Таким чином, відкривається шлях для знаходження всіх термодинамічних потенціалів квантової системи.

4). Ідеальні бозе- та фермі-гази за низьких температур. Розгляд цього питання студентами потребує відповідно: а.1) аналізу фізичної сутності особливого явища – *конденсації бозонів* за низьких температур виродженої квантової системи з розподілом окремих частинок на рівні з «нульовою енергією», які вибувають із загальної картини теплового руху і практично не дають внесок у тиск газу; а.2) виведення *рівняння стану виродженого бозе-газу* і встановлення залежності його тиску лише від температури; б.1) аналізу фізичної сутності понять «*рівень*» та «*енергія Фермі*», характеру розподілу ферміонів за енергетичними рівнями згідно принципу Паулі та «розмитості» графіку функції розподілу $f(\epsilon)$ фермі-газу в околі E_F ; б.2) виведення *рівняння стану виродженого фермі-газу* і встановлення залежності його тиску лише від концентрації частинок.

5). Вироджений електронний газ у металі є квантовою системою частинок з напівцілим спіном, яка підпорядковується статистиці Фермі-Дірака (з урахуванням компенсації сил відштовхування між електронами з силами тяжіння до іонів кристалічної ґратки). Звертають увагу студентів на феномен, який в науці довгий час лишався незрозумілим: чому нагрівання металу не призводить до зміни енергії електронного газу, хоча й змінює енергію кристалічної ґратки? У результаті детального аналізу графіків функції розподілу $f(\epsilon)$ електронного газу за $T = 0\text{K}$ і $T > 0\text{K}$ з урахуванням співвідношення значень середньої енергії теплового руху та енергії Фермі студенти мають усвідомити, що у тепловий рух залучена лише їх невелика кількість «фермівського розмиття» (за кімнатної температури орієнтовно 10^{-5} від загального числа, що зна-

чно менше 1%). Отже, для теплоємності металу маємо такий вираз:
 $C_{мет} = C_{ар} + C_{ел.вез} \approx C_{ар} + 3R$.

6). Квантові моделі осцилятора і ротатора широко використовують у сучасній фізиці як наближені моделі реальних молекул, атомів та інших мікрочастинок (як вільних, так і тих, що утворюють фізичні тіла). Знаючи вираз для статистичної суми квантових осцилятора і ротатора, можна знайти вирази їх середніх енергій та проаналізувати отримані результати в області високих і низьких температур. Останнє є важливим для усвідомлення властивостей реальних макросистем, які складаються з великого числа осциляторів чи ротаторів.

7). Аналіз експериментальних даних теплоємності двохатомних газів свідчить про те, що класична статистика призводить до невірних результатів, необхідним є використання квантового підходу. Якщо розглядати найпростішу модель двохатомної молекули газу одночасно як незалежний квантовий осцилятор і ротатор, то з урахуванням співвідношення між температурою дослідів і так званими характеристичними температурами обертального і коливального рухів молекули ($T_{\chi}^{об} \approx 10^2 K$, $T_{\chi}^{кол} \approx 10^4 K$), можна пояснити незвичну з класичної точки зору температурну залежність теплоємності газу (рис. 1). Під час нагрівання двохатомного газу від дуже низьких температур спочатку збуджується поступальний рух, потім поступово «вмикається обертання» і в останню чергу – коливання молекули, тобто:

$$C_V = C_{пост} + C_{об} + C_{кол} = (3/2)R + R + R = (7/2)R.$$

Таким чином, за дуже низьких температур внаслідок квантування енергії немає рівномірного розподілу енергії за ступенями вільності молекули.

Температурну залежність теплоємності твердих тіл в області низьких температур (де класична теорія давала найбільше розходження з дослідом) пояснюють послідовно у рамках квантових теорій А. Ейнштейна і П. Дебая, які дають відповідно якісне і кількісне погодження з дослідом. Студенти мають усвідомлювати сутність відповідних

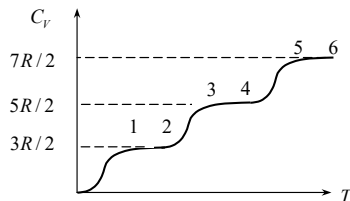


Рис. 1. Графік залежності $C_V(T)$ для двохатомного газу

вихідних модельних уявлень: врахування першим квантування енергії коливального руху частинок (як незалежних гармонічних осциляторів) у вузлах кристалічної ґратки, врахування іншим взаємозалежності їх коливань і поширення у межах кристалу стоячих хвиль.

Варто звернути увагу студентів на те, що застосування статистики Бозе-Ейнштейна до *рівноважного електромагнітного випромінювання* (як фотонного газу у деякій порожнині) дозволяє отримати з відомої формули Планка для спектральної густини енергії випромінювання всі основні експериментальні закони: Релея-Джинса, Стефана-Больцмана, зміщення Віна. Ця формула добре узгоджується з дослідом і розглядається як одне з важливих підтверджень справедливості статистичної теорії та квантових уявлень про природу світла, що стало поворотним пунктом у розвитку науки початку XX століття і призвело до народження квантової теорії, а згодом й нової фізичної картини світу.

Висновки. У статті висвітлено методичні особливості викладання основ квантової статистики курсу теоретичної фізики педагогічного університету, що має важливе значення у фундаментальній професійній підготовці майбутніх учителів фізики. Очевидно, що свідомому та якісному засвоєнню студентами теоретичного матеріалу сприятиме не тільки ретельне опрацювання навчально-методичних джерел, але й самостійне розв'язання відповідних практичних задач. Ефективність пропонованого авторами методичного підходу у викладанні зазначених питань курсу теоретичної фізики підтверджується результатами підсумкового модульного контролю здобувачів вищої освіти протягом останніх років.

Література

1. Андреев В. О., Пінкевич І. П. Термодинаміка та статистична фізика. Частина 1. Конспект лекцій. К.: Київський нац. ун-т імені Т.Шевченка, 2023. 82 с.
2. Дудик М. В. Термодинаміка і статистична фізика: навч. посібник для студ. вищих навч. закладів фіз.-мат. спеціальностей. Умань: ПП «Жовтий», 2015. 132 с.
3. Казанський В. Б., Хардіков В. В. Статистична фізика та термодинаміка : навч. посібник. Харків, ХНУ ім. В.Н.Каразіна, 2013. 292 с.
4. Малець Є. Б., Масич В. В., Сергєєв В. М. Конспект лекцій з дисципліни «Статистична фізика та термодинаміка» : навч. посібник. Харків: Харківський нац. пед. ун-т імені Г.Сковороди 2024. 44 с.
5. Рубіш В. В. Конспект лекцій з курсу «Термодинаміка та статистична фізика» : навч. посібник. Ужгород: Вид-во УжНУ «Говерла», 2020. 152 с.
6. Теоретична фізика. Програма навчальної дисципліни підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» напрямку 6.040203 Фізика для студентів вищих педагогічних закладів освіти : навч. видання / [уклад. М.І. Шут, О.В. Школа]. Бердянськ : БДПУ, 2014. 70 с.
7. Школа О. В. Методичні особливості вивчення основ класичної статистики курсу теоретичної фізики. *Наукові записки Бердянського держ. пед. ун-ту. Педагогічні науки* : зб. наук. праць. Вип. 3. Запоріжжя : БДПУ, 2023. С. 567–576. URL: <http://url.li/mrgmqg>. (дата звернення: 01.10.2024).

References

1. Andreiev, V. O., Pinkevych, I. P. (2023). *Termodynamika ta statystychna fizyka. Chastyna 1. Konspekt lektsii* [Thermodynamics and Statistical Physics. Part 1. Lecture notes]. K.: Kyivskiy nats. un-t imeni T.Shevchenka, 82 s. [in Ukrainian].
2. Dudyk, M. V. (2015). *Termodynamika i statystychna fizyka: navch. posibnyk dlia stud. vyshchych navch. zakladiv fiz.-mat. spetsialnostei* [Thermodynamics and statistical physics: a textbook for students of higher educational institutions specializing in physics and mathematics]. Uman: PP «Zhovtyi». 132 s. [in Ukrainian].
3. Kazanskiy, V. B., Khardikov, V. V. (2013). *Statystychna fizyka ta termodynamika : navch. posibnyk* [Statistical Physics and Thermodynamics: a textbook]. Kharkiv, KhNU im. V.N.Karazina. 292 s. [in Ukrainian].
4. Malets, Ye. B., Masych, V. V., Serhieiev, V. M. (2024). *Konspekt lektsii z dystsypliny «Statystychna fizyka ta termodynamika» : navch. vydannia* [Lecture notes on the discipline «Statistical Physics and Thermodynamics»: a textbook]. Kharkiv: Kharkivskiy nats. ped. un-t imeni H.Skovorody. 44 s. [in Ukrainian].
5. Rubish, V. V. (2020). *Konspekt lektsii z kursu «Termodynamika ta statystychna fizyka» : navch. posibnyk* [Lecture notes for the course «Thermodynamics and Statistical Physics»: a textbook]. Uzhhorod: Vyd-vo UzhNU «Hoverla», 152 s. [in Ukrainian].
6. *Teoretychna fizyka. Prohrama navchalnoi dystsypliny pidhotovky fakhivtsiv osvithno-kvalifikatsiinoho rivnia «bakalavr» napriamu 6.040203 Fizyka dlia studentiv vyshchych pedahohichnykh zakladiv osvity : navch. vydannia* [Theoretical Physics. Program of the academic discipline for training specialists of the educational and qualification level "bachelor" in the direction 6.040203 Physics for students of higher pedagogical educational institutions: educational edition]. [uklad. M.I. Shut, O.V. Shkola]. Berdiansk : BDPU, 2014. 70 s. [in Ukrainian].
7. Shkola, O. V. (2023). *Metodychni osoblyvosti vyvchennia osnov klasychnoi statystyky kursu teoretychnoi fizyky* [Methodological features of studying the basics of classical statistics in the course of theoretical physics]. *Naukovi zapysky Berdianskoho derzh. ped. un-tu. Pedahohichni nauky : zb. nauk. prats. Vyp. 3. Zaporizhzhia : BDPU. S. 567–576*. Retrieved from: <http://surl.li/mrrqmg>. (data zvernennia: 01.10.2024). [in Ukrainian].

АНОТАЦІЯ

У статті висвітлено методичні особливості викладання основ квантової статистики курсу теоретичної фізики педагогічного університету, що має важливе значення у фундаментальній професійній підготовці майбутніх учителів фізики. З урахуванням сучасних освітніх реалій та дистанційного формату навчання акцентовано увагу на необхідності реалізації у викладанні курсу таких методичних підходів, які б забезпечувати системну активну пізнавальну діяльність студентів, набуття фахової компетентності, сприяли їх особистісному та професійному зростанню. На основі аналізу сучасних вітчизняних навчально-методичних джерел з курсу теоретичної фізики запропоновано авторський підхід до викладання основних положень квантової статистики відповідно принципам фундаментальності та професійної спрямованості; логічної структурованості, змістовної компактності і математичної лаконічності навчального матеріалу. У стислому варіанті в якісній формі висвітлено основні питання квантової статистики, що традиційно викликають труднощі у студентів, зокрема: особливості застосування статистичного методу Гіббса до квантових систем, розподіли Фермі-Дірака та Бозе-

Ейнштейна, критерій вирождення газу, термодинамічні потенціали та рівняння стану квантового газу, ідеальні бозе- та фермі-гази за низьких температур, вирожденний електронний газ у металі. Акцентовано увагу на головних аспектах опанування студентами квантових теорій теплоємності газів, твердих тіл та рівноважного електромагнітного випромінювання як важливих етапів у розвитку фізичної науки початку ХХ століття, що призвели до зародження і становлення нової квантово-польової картини світу. Ефективність пропонованого авторського підходу у викладанні відповідної теми курсу теоретичної фізики підтверджується рівнем пізнавальної активності та результатами підсумкового контролю здобувачів вищої освіти протягом останніх років.

Ключові слова: теоретична фізика, термодинаміка і статистична фізика, квантова статистика, майбутній вчитель фізики, професійна компетентність.



Дата надходження статті: 28.10.2025

Дата прийняття статті: 25.11.2025

Опубліковано: 29.12.2025