

УДК 378.14.015.62

DOI 10.31494/2412-9208-2022-1-1-445-455

METHODOLOGICAL FEATURES OF STUDYING OF FUNDAMENTALS OF THEORY OF FLUCTUATIONS IN THE COURSE OF THEORETICAL PHYSICS IN PEDAGOGICAL UNIVERSITY

МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ ОСНОВ ТЕОРІЇ ФЛУКТУАЦІЙ У КУРСІ ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ ПЕДАГОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Oleksandr SHKOLA,

Doctor of Pedagogical Sciences,
Associate Professor

Олександр ШКОЛА,

доктор педагогічних наук, доцент

aleksandrshkola99@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9946-446X>

*Berdiansk State Pedagogical
University,*

*Бердянський державний
педагогічний університет*

✉ 4, Schmidta street, Berdiansk,
Zaporizhzhia region, 71100

✉ вул. Шмідта, 4, м. Бердянськ,
Запорізька обл., 71100

Original manuscript received: May 07, 2022

Revised manuscript accepted: May 14, 2022

ABSTRACT

The article deals with the theoretical aspects and practical implementation of the author's methodological approach in teaching the basics of fluctuation theory of the course of theoretical physics in Pedagogical University, which is important in the fundamental training of pre-service physics teachers. It is noted that despite the availability of various literary sources, methodological value and originality of the author's approaches in covering the main issues of the course, the need to improve the methodology of its teaching in modern conditions of modernization of higher pedagogical education in the context of European requirements and realities is quite obvious and natural. It is noted that the effective mastery of the basic principles of the theory of fluctuations of theoretical physics, taking into account the principles of fundamentality and professional orientation will contribute to the maximum conciseness of the mathematical apparatus, content compactness, unity, clarity and consistency of teaching material. The author proposes to study the fluctuations of the basic thermodynamic quantities of a macrosystem (energy, volume, density, temperature, entropy, pressure) using two Gibbs lemmas. Molecular scattering of light and its consequences are elucidated according to Rayleigh's law, in conditions when the dimensions of the inhomogeneities of the structure due to the thermal motion of particles is small in comparison with the wavelength of light. The derivation of the Einstein-Smolukhovsky formula for Brownian motion is proposed according to primary sources with emphasis on the analysis of its physical essence, connection with the second law of thermodynamics, experimental determination based on it in the early twentieth century Boltzmann's constant as a decisive argument in favour of the molecular kinetic theory of the structure of matter and the whole concept of statistical physics. The organization of the educational process on the basis of the methodological approach that was proposed by the author testifies to its effectiveness, which is confirmed by the level of cognitive activity and the results of the final modular control of applicants in recent years.

Key words: professional competence of pre-service physics teacher, theoretical physics, theory of fluctuations.

ICV 2020: 74.31

DOI 10.31494/2412-9208-2022-1-1

445

Вступ. Реалізація провідних завдань навчальної дисципліни «Теоретична фізика» в педагогічному університеті в сучасних умовах передбачає планування та організацію освітнього процесу на основі особистісно орієнтованого, діяльнісного і компетентнісного підходів, широкого використання ІКТ навчання, системного моніторингу рівня навчальних досягнень здобувачів. Навчання за таких умов має стати не лише накопиченням знань і репродуктивних умінь, але й постійним збагаченням досвіду успішної практичної діяльності, що забезпечуватиме їх фундаментальну, методологічну і світоглядну підготовку, формування навичок самоосвіти і самоконтролю, особистісне і професійне зростання. Педагогічний досвід автора свідчить, що курс теоретичної фізики традиційно важко засвоюється студентами, оскільки відрізняється високим рівнем формалізації основних понять, законів і теорій та відповідним рівнем математичного апарату. При цьому зменшення обсягу аудиторних годин і зміщення акцентів їх навчального навантаження у бік самостійної роботи, зниження рівня базової підготовки та збільшення кількості, які через певні причини одночасно працюють і навчаються за індивідуальними графіками в сучасних умовах дистанційного і змішаного навчання через пандемію COVID-19 створює певні перешкоди у досягненні запланованих освітніх цілей. За цих обставин першочергове значення має рівень навчально-методичного забезпечення дисципліни та якість його ефективного використання. Варто зазначити, що у розпорядженні викладача курсу теоретичної фізики педагогічного університету сьогодні існує значна кількість літературних джерел. Серед них: вітчизняні підручники (Л. Булавина; І. Вакарчука; Є. Венгера, В. Грибаня і О. Мельничука; С. Королюка, С. Мельничука і О. Валя; І. Мороза; А. Федорченка, І. Юхновського та ін.), російськомовні підручники (А. Ансельма; І. Базарова; А. Василевського і В. Мултановського; І. Кваснікова; Л. Ландау і Е. Ліфшица та ін.), переклади іншомовних видань (П. Дірака, Ч. Кіттеля, М. Планка, «Берклезьський курс фізики», «Фейманівські лекції з фізики» та ін.). Незважаючи на методичну цінність видань та оригінальність авторських підходів у висвітленні основних питань навчального курсу, необхідність удосконалення методики його викладання за сучасних умов модернізації вітчизняної освіти в контексті європейських вимог з урахуванням зазначених вище обставин є цілком очевидною і закономірною. Актуальним залишається пошук методів і підходів, які б дозволяли відповідно принципам цілісності, логічної послідовності та генералізації подавати навчальний матеріал курсу більш компактно, щільніше, не зменшуючи при цьому рівень науковості та, безумовно, якість професійної підготовки здобувачів. Створення умов, які б сприяли активізації їх пізнавальної діяльності з оволодіння основами фундаментальних фізичних теорій та методології наукового пізнання, спонукали б до самостійного пошуку і самовдосконалення було й залишається чи не головним освітнім завданням навчальному курсу. Останнє, безумовно, повинно знайти адекватне відображення в методиці

викладання його основних питань. У зв'язку з цим *метою статті* є висвітлення методичних особливостей вивчення основ теорії флуктуацій як одного з ключових питань курсу теоретичної фізики педагогічного університету, що має важливе значення у фундаментальній професійній підготовці майбутніх учителів фізики.

Методи та методики дослідження: *аналіз* державних нормативних освітніх документів, наукових і навчально-методичних праць, силабусів і робочих програм курсу теоретичної фізики педагогічних університетів; *спостереження, анкетування, тестування, бесіди зі студентами і викладачами* – з метою з'ясування актуальних питань і шляхів розв'язання досліджуваної проблеми; *порівняння та узагальнення* – для систематизації результатів дослідження, формулювання висновків і визначення напрямів подальших наукових розвідок.

Результати та дискусії. Традиційно навчальна тема «Флуктуації та броунівський рух» курсу теоретичної фізики педагогічного університету включає такі питання: поняття флуктуації, флуктуації основних термодинамічних величин, межа чутливості вимірювальних приладів, молекулярне розсіяння світла, броунівський рух [5 : 47]. Аналіз літературних джерел свідчить, що їх автори використовують різні методичні підходи в розкритті основних питань навчальної теми. Так, зокрема у [3] обчислення флуктуацій основних термодинамічних величин макросистеми в термостаті – інтенсивних (T, P, μ) та екстенсивних (V, S, N) – проведено на основі встановлення загальної формули для густини ймовірностей флуктуацій та її застосування для окремих випадків з урахуванням статистичної незалежності параметрів стану. У навчальному посібнику [2] розрахунок та аналіз флуктуацій термодинамічних величин системи проведено на основі порівняння з функцією розподілу Гаусса. У навчальному посібнику [1] запропоновано виведення та порівняння шуканих флуктуацій, отриманих традиційним шляхом і за допомогою канонічного розподілу Гіббса. Розгляд молекулярного розсіяння світла і броунівського руху в згаданих посібниках традиційно пов'язано з виведенням та аналізом відповідно до: а) виразу для інтенсивності випромінювання малого об'єму середовища на основі відомого з електродинаміки її зв'язку з електродипольним моментом, змінність якого зумовлена флуктуаціями густини; б) формули Ейнштейна-Смолуховського з класичного рівняння руху частинки сферичної форми.

Варто зазначити, що успішне засвоєння здобувачами навчального матеріалу на основі зазначених вище джерел передбачає достатньо високий рівень їх базової фундаментальної і математичної підготовки. На наш погляд, ефективному засвоєнню відповідних питань курсу теоретичної фізики з урахуванням принципів фундаментальності і професійної спрямованості сприятиме максимальна лаконічність математичного апарату, змістовна компактність, чіткість і послідовність викладу навчального матеріалу відповідно логіці його подання у наукових

«першоджерелах». Розглянемо коротко методичні особливості викладання цих питань.

1. Поняття флуктуації. У загальному випадку флуктуаціями прийнято називати випадкові відхилення будь-якої величини від середнього значення. Актуалізуючи опорні знання здобувачів нагадуємо, що згідно другого закону термодинаміки за умов досягнення рівноваги зміни в системі не припиняються в абсолютному розумінні, відбуваються постійні хаотичні її коливання біля положення рівноваги, а відповідно й флуктуації фізичних величин (параметрів стану). При цьому чим більше величина флуктуації, тим вона менш імовірна. Під час флуктуацій тепло переходить від холодного тіла до гарячого, порушується рівномірний розподіл молекул, виникає впорядкований рух тощо. Таким чином, цей термін збиральний і залежно від розгляду конкретного питання говорять про флуктуації енергії, ентропії, об'єму, тиску, густини, концентрації частинок системи тощо. Зазвичай такі відхилення величин незначні, тому в макроскопічному плані вони непомітні. Проте існують фізичні явища, які цілком пояснюються саме флуктуаціями певних параметрів. Серед них: броунівський рух дрібних частинок, завислих у рідині; розсіяння світла в однорідних рідинах і газах, зокрема блакитний колір неба та червоний колір зорі під час сходу/заходу Сонця; помутніння речовини в критичному стані (критична опалесценція); шумовий фон у радіоприймальній апаратурі, обмеженість чутливості вимірювальних приладів тощо.

Звертаємо увагу студентів на тому, що наявність флуктуацій є безпосереднім наслідком атомної будови речовини та хаотичності теплового руху, а ці уявлення, як відомо, лежать в основі статистичної фізики. Тому теоретичні дослідження флуктуацій у працях А. Ейнштейна, М. Смолуховського, Л. Онзагера та інших фізиків з наступною дослідною перевіркою отриманих результатів на початку ХХ століття були важливим етапом в історії розвитку фізичної науки. Саме тоді було вперше отримано прямі докази існування атомів і справедливості постулатів статистичної теорії, до якої деякі вчені того часу відносилися з недовірою [6 : 214]. Отже, флуктуації розглядають тільки в статистичній теорії, у термодинаміці цього поняття не існує. Для усвідомлення здобувачами сутності базових понять теми нагадуємо основні позначення з теорії ймовірностей:

а) $L(x)$ – миттєве значення випадкової величини;

б) \bar{L} – середнє значення;

в) $\Delta L = (L - \bar{L})$ – відхилення від середнього;

г) $\sigma_L = \overline{\Delta L^2} = \overline{(L - \bar{L})^2} = \bar{L}^2 - \bar{L}^2$ – середньоквадратичне відхилення (дисперсія);

д) $\delta_L = \sqrt{\sigma_L} = \sqrt{\bar{L}^2 - \bar{L}^2}$ – флуктуація;

е) $\eta_L = \delta_L / \bar{L}$ – відносна флуктуація.

Як бачимо з наведених формул, розрахунок флуктуацій потребує визначення \bar{L} та \bar{L}^2 . Знаходження останніх значно спрощується з використанням двох відомих лем Гіббса, які можна отримати безпосередньо з канонічного розподілу.

Перша лема Гіббса. Розглянемо довільну фізичну величину $L(q, p, \lambda)$ та визначимо її середнє значення за канонічним розподілом:

$$\bar{L} = \int_{\Gamma} L(q, p, \lambda) e^{(\Psi - E)/\theta} d\Gamma, \text{ де}$$

(q, p) – узагальненні координати та імпульси частинок системи, λ – параметр зовнішнього впливу на систему (наприклад, об'єм, тиск тощо), Ψ – вільна енергія системи, $\theta = kT$ – статистична температура, $d\Gamma$ – елементарний об'єм фазового простору системи. Диференціювання \bar{L} за θ , з урахуванням справедливості рівняння $\bar{E} = \Psi - \theta(\partial\Psi/\partial\theta)$, дає такий результат: $(\partial\bar{L}/\partial\theta) = (1/\theta^2)(\overline{L\bar{E}} - \bar{L} \cdot \bar{E})$ [детальніше див. (Школа, 2009: 213)]. Враховуючи справедливість рівняння

$$(\overline{A - \bar{A}})(\overline{B - \bar{B}}) = \overline{AB} - \bar{A} \cdot \bar{B}, \text{ отримуємо вираз: } \frac{\partial\bar{L}}{\partial\theta} = \frac{1}{\theta^2}(\overline{L - \bar{L}})(\overline{E - \bar{E}}),$$

який називають першою лемою Гіббса.

Друга лема Гіббса. Диференціювання \bar{L} за λ дає такий результат

$$[6 : 214]: \frac{\partial\bar{L}}{\partial\lambda} = \frac{\partial\bar{L}}{\partial\lambda} + \frac{1}{\theta} \left(\frac{\partial\Psi}{\partial\lambda} \bar{L} - L \frac{\partial\bar{E}}{\partial\lambda} \right). \text{ Оскільки для системи в}$$

$$\text{термостаті } (\Psi = \bar{E}), \text{ отримуємо вираз: } \frac{\partial\bar{L}}{\partial\lambda} = \frac{\partial\bar{L}}{\partial\lambda} - \frac{1}{\theta} (\overline{L - \bar{L}}) \left(\frac{\partial\bar{E}}{\partial\lambda} - \frac{\partial\bar{E}}{\partial\lambda} \right),$$

який називають другою лемою Гіббса.

За допомогою першої лемі можна отримати рівняння для флуктуації енергії системи з канонічним розподілом станів. Система у такому випадку, як відомо, перебуває в рівновазі з термостатом. Температура, число частинок та зовнішні параметри системи вважаються фіксованими, енергія та деякі інші параметри коливаються біля рівноважних значень. Поклавши у виразі $L = E$, отримуємо:

$$\partial\bar{E}/\partial\theta = (1/\theta^2)(\overline{E - \bar{E}})^2 = \sigma_E/\theta^2, \text{ тобто } \sigma_E = \theta^2(\partial\bar{E}/\partial\theta) = kT^2(\partial\bar{E}/\partial T).$$

Величина \bar{E} являє собою внутрішню енергію системи, тому з урахуванням $C_V = (\partial U/\partial T)_V$, отримуємо: $\sigma_E = kT^2 C_V$. Для

одноатомного ідеального газу: $\bar{E} = (3/2)NkT$, тобто $C_V = (3/2)kN$.

Оскільки $\sigma_E = (3/2)k^2T^2N$, отримаємо: $\delta_E = \sqrt{\sigma_E} = kT\sqrt{3N/2}$;
 $\eta_E = \delta_E / \bar{E} = \sqrt{2/3N}$.

Як бачимо, флуктуація енергії δ_E збільшується майже пропорційно розмірам системи, відносна ж флуктуація, навпаки, зменшується зі зростанням останніх. З підвищенням температури флуктуація енергії очевидно збільшується. Для реальних макросистем ($N \sim 10^{23}$) ці флуктуації незначні: $\delta_E \approx 10^{-9}$ Дж та $\eta_E \approx 10^{-12}$. Отже, інтервал, в якому весь час змінюється енергія системи в термостаті, складає одну десятимільярдну частку відсотка від середньої енергії, тобто з величезним ступенем точності її можна вважати сталою. Тому система в термостаті практично не ризичиться з ізольованою системою.

2. Флуктуації основних термодинамічних величин. Апарат статистичної механіки Гіббса дозволяє встановити загальні співвідношення, що пов'язують флуктуацію певної фізичної величини $L(q, p, \lambda)$ з її середніми значеннями за наявності додаткових сил, які діють на систему. Згідно другої леми Гіббса для будь-якої фізичної величини маємо: $\partial \bar{L} / \partial \lambda = \overline{\partial L / \partial \lambda} - (1/\theta)(L - \bar{L})(\partial H / \partial \lambda - \partial \bar{H} / \partial \lambda)$.

Якщо величина L є функцією тільки координат, то її можна представити як деяку нову узагальнену координату $q(X)$. Під величиною λ можна розуміти додаткову зовнішню силу, що діє на систему в напрямку узагальненої координати q . Таке припущення означає, що гамільтонова функція системи H має вигляд: $H(X, \lambda) = H_0(X) + \lambda q(X)$. Дійсно, у цьому випадку, згідно рівнянням Гамільтона:

$\dot{p} = -(\partial H / \partial q) = -(\partial H_0 / \partial q) - \lambda = A_0 - \lambda$, тобто на систему, крім A_0 , діє додаткова сила $-\lambda$. З урахуванням виразів $\partial H / \partial \lambda = L$;

$\partial \bar{H} / \partial \lambda = \bar{L}$ маємо $\partial \bar{L} / \partial \lambda = -\frac{1}{\theta}(L - \bar{L})^2$, звідки:

$$\sigma_L = \overline{\Delta L^2} = -\theta(\partial \bar{L} / \partial \lambda). \quad (1)$$

Формула (1) дозволяє визначити флуктуацію будь-яких фізичних величин, які виступають функціями тільки координат, якщо відома залежність середніх значень цих величин від зовнішніх сталих сил.

Флуктуації об'єму газу за сталого тиску. У термодинаміці об'єм як зовнішній параметр системи вважають фіксованим або таким, що змінюється дуже повільно. За таких умов він не міг зазнавати флуктуацій. Очевидно, флуктуації об'єму можливі, якщо його значення нічим не обмежуються, але система при цьому перебуває за сталого тиску (якщо V і p не фіксувати, стан системи перестає бути заданим). Реалізувати випадок сталого тиску в системі простіше всього, якщо вважати, що вона перебуває в циліндрі під поршнем із заданим навантаженням.

Конкретною системою такого типу є газовий термометр, в якому температуру визначають шляхом вимірювання поширення газу, що перебуває під фіксованим тиском. Згідно (1) для дисперсії об'єму газу маємо: $\sigma_V = -\theta \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial p} \right)$. Якщо газ ідеальний ($p\bar{V} = N\theta$), то $\sigma_V = \bar{V}^2 / N$, звідки: $\delta_V = \bar{V} / \sqrt{N}$; $\eta_V = 1 / \sqrt{N}$. Отже, флуктуації об'єму тим менші, чим більше частинок в системі.

Флуктуації густини в газі та рідині. Через флуктуацію об'єму можна отримати вираз для флуктуації густини частинок газу ($\rho = m/V$). Оскільки $\sigma_\rho = \overline{\Delta \rho^2} = (m^2 / V^4) \overline{\Delta V^2} = (m^2 / V^4) \cdot (V^2 / N) = \bar{\rho}^2 / N$, для флуктуації густини маємо: $\delta_\rho = \bar{\rho} / \sqrt{N}$; $\eta_\rho = 1 / \sqrt{N} = \eta_V$. Як бачимо, флуктуації густини, як і флуктуації об'єму, тим менші, чим більше частинок в системі. Наприклад, за нормального тиску відносна флуктуація числа молекул газу в 1 см^3 становить: $\eta_\rho = \sqrt{(1 / 2,7 \cdot 10^{19})} \approx 2 \cdot 10^{-10}$. Вона зростає зі зменшенням числа молекул в об'ємі, і доходить до 1% для $N = 10^4$. Обчислимо об'єм, який відповідає такій флуктуації. За нормальних умов на одну молекулу молю газу припадає об'єм: $(22400 / 6 \cdot 10^{23}) (\text{см}^3)$, а на 10^4 молекул відповідно: $v \approx 4 \cdot 10^{-16} (\text{см}^3)$. Лише за такого об'єму газу відносна флуктуація його густини дорівнює 1%!

Флуктуації температури, тиску та ентропії (одноатомний ідеальний газ):

$$\text{а) } \sigma_T = \overline{\Delta T^2} = \overline{\Delta V^2} = \frac{T^2}{N}; \quad \delta_T = \frac{T}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{kT^2}{C_V}}; \quad \eta_T = \frac{1}{\sqrt{N}};$$

$$\text{б) } \sigma_p = kT \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_S; \quad \delta_p = \sqrt{kT \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_S};$$

$$\text{в) } \sigma_S = kC_p; \quad \delta_S = \sqrt{\sigma_S} = \sqrt{kC_p}.$$

Справедливість наведених співвідношень пропонуємо студентам перевірити самостійно. Зазначаємо, що для всіх адитивних величин відносні відхилення зменшуються пропорційно розмірам системи. У стані термодинамічної рівноваги система весь час перебуває у мікростанах, за яких миттєві значення фізичних величин (параметрів стану) дорівнюють своїм середнім значенням. Оскільки всі мікростани ізольованої системи (у тому числі й системи в термостаті) згідно ергодичної гіпотези рівноймовірні, то переважна їх більшість є рівноважними. Порівняно часто система переходить до мікростанів із незначними флуктуаціями параметрів, проте значні відхилення зустрічаються досить рідко і для макросистем вони малоїмовірні.

3. Межа чутливості вимірювальних приладів. Звертаємо увагу здобувачів на тому, що в практиці сучасних вимірювань використовують різноманітні високочутливі прилади: гальванометри, мікротерези, термометри тощо. Як свідчить дослід, у багатьох випадках межа чутливості цих приладів обумовлена флуктуаціями в системі. Так, наприклад, коромисло чутливих терезів не тільки регулярно відхиляється залежно від навантаження, але й, випробовуючи випадкові поштовхи з боку молекул повітря, здійснює хаотичні коливання біля положення рівноваги. Для терезів великих розмірів ці коливання непомітні, але для чутливих стають суттєвою перешкодою під час зважування. Такі ж хаотичні коливання за рахунок теплового руху молекул повітря випробовує легке дзеркальце на нитці вимірювального приладу. Межею чутливості приладу в електричному колі є тепловий рух електронів у металі. У сучасній теоретичній фізиці теорію цих явищ розроблено достатньо повно, що дозволяє оцінювати межу чутливості вимірювальних приладів. Для більш свідомого і чіткого розуміння студентами цього матеріалу пропонуємо розглянути коротко кілька прикладів.

Дзеркальний гальванометр. Зовнішній вплив приводить до повороту легкого дзеркала, підвішеного на тонкій кварцовій нитці, флуктуації якого обмежують чутливість пристрою. Величину випадкових відхилень можна оцінити, вважаючи, що такий прилад має одну обертальну ступінь вільності з середньою енергією теплового руху $\theta/2$. Дзеркальце буде здійснювати малі коливання біля положення рівноваги, за яких середня кінетична енергія (згідно теореми про рівнорозподіл енергії) дорівнює середній потенціальній: $\overline{E}_{nom} = \alpha \overline{\varphi^2} / 2 = kT / 2$, де $\overline{\varphi^2}$ – середній квадрат кута відхилення дзеркала від положення рівноваги, α – коефіцієнт пружності. Звідси виходить: $\overline{\varphi^2} = kT / \alpha$. Таким чином, чим чутливіший прилад (чутливість обернено пропорційна коефіцієнту пружності), тим більшими будуть флуктуації в його показах. Для дзеркала значної маси флуктуації практично не впливатимуть на покази, але й чутливість при цьому виявляється низькою. Отже, точність вимірів приладу обмежується флуктуаціями. Цікаво відмітити, що за відомим $\overline{\varphi^2}$ можна експериментально визначити сталу Больцмана.

Пружні терези. Незалежно від конструкції і навантаження під дією теплового руху молекул пружини та флуктуацій тиску навколишнього повітря стрілка терезів хаотично коливатиметься навколо деякого положення рівноваги із відхиленням $\delta_x = \sqrt{\Delta x^2}$. Для ненавантаженого приладу внаслідок дії квазіпружної сили ($\alpha \cdot \Delta x$) зміна потенціальної енергії системи дорівнює $U(x) = \alpha \cdot \Delta x^2 / 2$, де α – коефіцієнт пружності.

Оскільки середня потенціальна енергія системи з однією поступальною ступеню вільності $\overline{U(x)} = kT/2$, маємо: $\overline{\Delta x^2} = kT/\alpha$.

Під дією вантажу масою m пружина терезів видовжиться на величину x_1 , яка має перевищувати δ_x , тобто: $x_1 > \sqrt{\Delta x^2}$ або $(mg/\alpha) > \sqrt{kT/\alpha}$. Звідси знаходимо мінімальну для вимірювання масу тіла: $m_{\min} = \sqrt{\alpha kT}/g$. Таким чином, відносна похибка у визначенні маси

тіла дорівнюватиме: $\Delta m/m = \sqrt{\Delta x^2}/x_1 = \sqrt{\alpha kT}/mg$. Як бачимо, похибка буде меншою за більш слабкої пружини, тобто меншим α (що досягається зменшенням її товщини і збільшенням довжини), але при цьому збільшується відхилення x_1 , що призводить до практичних незручностей конструкції. Таким чином, флуктуації кладуть принципову межу точності терезів.

Газовий термометр. Основну частину приладу складає скляний газовий балон, з'єднаний з ртутним манометром. Флуктуації густини газу обумовлюють коливання його об'єму в балоні та відповідно хаотичні коливання рівня ртуті в манометрі біля положення рівноваги, через що вимірювання температури стають неточними. У випадку ідеального газу флуктуації об'єму призводять до флуктуацій температури: $\delta_T = (p/kN)\delta_V$. З урахуванням $(\delta_V = \overline{V}/\sqrt{N})$ отримуємо:

$\delta_T = T/\sqrt{N} = T_{\min}$. Для звичайних газів ($N \sim 10^{23}$) відносна похибка у визначенні температури надзвичайно мала ($\Delta T/T \approx 10^{-11} \div 10^{-12}$), що практично не впливає на чутливість термометру. Таким чином, точність вимірювання температури газовим термометром може бути необмежено підвищена за рахунок збільшення його розмірів (тобто за рахунок дрібнення його шкали). Проте збільшення точності можливе тільки якщо теплоємність тіла значно переважає теплоємність термометру, інакше останній відбиратиме від нього деяку кількість тепла. Ця максимальна точність зростає пропорційно розмірам тіла і на практиці є більш ніж достатньою.

4. Молекулярне розсіяння світла. Явище розсіяння світла на малих неоднорідностях середовища, що виникають через тепловий рух його частинок, пояснюємо на основі відомого закону Релея. Останнє дозволяє безпосередньо на якісному рівні пояснити блакитний колір неба, червоний колір зорі під час сходу/заходу Сонця, залежність насиченості цих кольорів від температури та явище критичної опалесценції.

5. Броунівський рух. Як свідчить власний педагогічний досвід, глибини і міцності знань здобувачів сприяє аналіз у ході семінарських занять не тільки загальної логіки виведення формули Ейнштейна-

Смолуховського, але й її експериментального підтвердження (досліди Ільїна, Перрена, Зігмонді), неможливості створення на основі броунівського руху вічного двигуна II роду та можливості знаходження сталої Больцмана. Звертаємо увагу здобувачів, що отримання таким шляхом на початку XX ст. відомого значення фундаментальної сталої стало вирішальним аргументом на користь всієї концепції статистичної фізики.

Висновки. У відповідності з провідними дидактичними принципами педагогіки вищої школи висвітлено основи авторського методичного підходу у викладанні теорії флуктуацій як одного з ключових питань курсу теоретичної фізики педагогічного університету, що має важливе значення у фундаментальній професійній підготовці майбутніх учителів фізики. Безумовно, засвоєння здобувачами теоретичних матеріалів буде найефективнішим тільки разом із розв'язанням відповідних задач навчального курсу, виконанням індивідуальних творчих завдань, реалізації методів і прийомів, що стимулюватимуть їх активну пізнавальну діяльність. Організація освітнього процесу на основі пропонуваного автором методичного підходу свідчить про його ефективність, що підтверджується рівнем пізнавальної активності і результатами підсумкового модульного контролю здобувачів протягом останніх років.

Література

1. Венгер Є. Ф., Грибань В. М., Мельничук О. В. Основи статистичної фізики і термодинаміки. Київ : Вища школа, 2004. 255 с.
2. Казанський В. Б. Статистична фізика та термодинаміка : навч. посібник. Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2008. 142 с.
3. Королюк С. Л., Мельничук С. В., Валь О. Д. Основи статистичної фізики та термодинаміки. Чернівці : Книги XXI, 2004. 347 с.
4. Теоретико-методичні засади фахової підготовки вчителів фізики та математики в умовах освітнього інформаційного середовища : кол. монографія. Донецьк : ЛАНДОН-XXI, 2012. 241 с.
5. Теоретична фізика. Програма навчальної дисципліни підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» напряму 6.040203 Фізика* для студентів вищих педагогічних закладів освіти : навч. видання / [уклад. М. І. Шут, О. В. Школа]. Бердянськ : БДПУ, 2014. 70 с.
6. Школа О. В. Основи термодинаміки і статистичної фізики : навч. посібник. Донецьк : Юго-Восток, 2009. 374 с.
7. Школа О. В. Теоретико-методичні засади навчання теоретичної фізики майбутніх учителів фізики : монографія. Бердянськ : Видавець О. Ткачук, 2015. 381 с.

References

1. Venher, Ye. F., Hryban, V. M., Melnychuk, O. V. (2004). *Osnovy statystychnoi fizyky i termodynamiky*. Kyiv : Vyshcha shkola. [in Ukrainian].
2. Kazanskiy, V. B. (2008). *Statystychna fizyka ta termodynamika* : navch. posibnyk. Kharkiv : KhNU im. V. N. Karazina. [in Ukrainian].
3. Koroliuk, S. L., Melnychuk, S. V., Val, O. D. (2004). *Osnovy statystychnoi fizyky ta termodynamiky*. Chernivtsi : Knyhy XXI. [in Ukrainian].

4. Teoretyko-metodychni zasady fakhovoi pidhotovky vchyteliv fizyky ta matematyky v umovakh osvithnoho informatsiinoho seredovyshcha (2012) : kol. monohrafiia. Donetsk : LANDON-XXI. [in Ukrainian].

5. Teoretychna fizyka (2014). Prohrama navchalnoi dystsypliny pidhotovky fakhivtsiv osvithno-kvalifikatsiinoho rivnia «bakalavr» napriamu 6.040203 Fizyka* dlia studentiv vyshchykh pedahohichnykh zakladiv osvity : navch. vydannia / [uklad. M. I. Shut, O. V. Shkola]. Berdiansk : BDPU. [in Ukrainian].

6. Shkola, O. V. (2009). *Osnovy termodynamiky i statystychnoi fizyky* : navch. posibnyk. Donetsk : luho-Vostok. [in Ukrainian].

7. Shkola, O. V. (2015). *Teoretyko-metodychni zasady navchannia teoretychnoi fizyky maibutnikh uchyteliv fizyky* : monohrafiia. Berdiansk : Vydavets O.Tkachuk. [in Ukrainian].

АНОТАЦІЯ

У статті розглядаються теоретичні аспекти та практична реалізація авторського методичного підходу у викладанні основ теорії флуктуацій курсу теоретичної фізики педагогічного університету, що має важливе значення у фундаментальній професійній підготовці майбутніх учителів фізики. Зазначено, що незважаючи на наявність різноманітних літературних джерел, методичну цінність та оригінальність авторських підходів у висвітленні основних питань навчального курсу, необхідність удосконалення методики його викладання за сучасних умов модернізації вищої педагогічної освіти в контексті європейських вимог та наявних реалій є цілком очевидною і закономірною. Зазначено, що ефективному засвоєнню основних положень теорії флуктуацій курсу теоретичної фізики з урахуванням принципів фундаментальності і професійної спрямованості сприятиме максимальна лаконічність математичного апарату, змістовна компактність, єдність, чіткість і послідовність викладу навчального матеріалу відповідно з логікою його подання у наукових «першоджерелах». Розгляд питання про флуктуації основних термодинамічних величин макросистеми (енергії, об'єму, густини, температури, ентропії, тиску) запропоновано на основі використання двох лем Гіббса. Молекулярне розсіяння світла та його наслідки висвітлено згідно закону Релея за умови, коли розміри неоднорідностей середовища внаслідок теплового руху частинок малі порівняно з довжиною світлової хвилі. Виведення формули Ейнштейна-Смолуховського для броунівського руху запропоновано згідно першоджерел з акцентуванням уваги на аналізі її фізичної сутності, зв'язку з другим законом термодинаміки, експериментальним визначенням на її основі на початку ХХ ст. сталої Больцмана як вирішального аргументу на користь молекулярно-кінетичної теорії будови речовини і всієї концепції статистичної фізики. Організація освітнього процесу на основі запропонованого автором методичного підходу свідчить про його ефективність, що підтверджується рівнем пізнавальної активності і результатами підсумкового модульного контролю здобувачів протягом останніх років.

Ключові слова: фахова компетентність майбутнього вчителя фізики, теоретична фізика, теорія флуктуацій.