

ВІКТОР КУЛЬЧИЦЬКИЙ

<https://orcid.org/0009-0006-3817-2985>

viktor_kulchutsky@ukr.net

кандидат педагогічних наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
вул. Руська, 56, м. Тернопіль

ФОРМУВАННЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ФІЗИЧНИХ ПОНЯТЬ У СТУДЕНТІВ ТЕХНІЧНИХ ВУЗІВ У ПРОЦЕСІ ВИВЧЕННЯ РОЗДІЛУ «ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ»

У роботі розглядається формування фундаментальних фізичних понять у студентів технічних спеціальностей вишів у процесі вивчення розділу «Теплове випромінювання». На основі системи фундаментальних фізичних понять розроблена методика вивчення законів Кірхгофа, Стефана-Больцмана, Віна та, виходячи із точки зору класичної фізики, доведена формула Релея-Джінса. Проаналізовано істотні закономірності, не сумісні з уявленнями класичної фізики, які привели до гіпотези Планка про те, що електромагнітна енергія випромінюється у вигляді окремих порцій (квантів), величина яких пропорційна частоті випромінювання.

На основі фундаментальних фізичних понять проаналізовано розподіл коливань за значенням енергії, який описується законом Больцмана, та обчислено середнє значення енергії випромінювання у стані рівноваги, отримано вираз для густини енергії, що припадає на інтервал частот та вираз для відношення випромінювальної та поглинальної здатності у разі теплового випромінювання. Останні два вирази і є формулами, отриманими М. Планком, та дають вичерпне пояснення рівноважного теплового випромінювання. Такий підхід цілком виправданий, бо дозволяє під час вивчення розділу «Теплове випромінювання» у студентів технічних спеціальностей вишів сформувати уявлення про дискретний характер електромагнітного випромінювання та його квантову природу. Пропонована методика вивчення розділу «Теплове випромінювання» поглиблює розуміння суті фізичних процесів з точки зору сучасних фізичних теорій та методології фізичної науки, дозволяє розробити методику формування у студентів технічних спеціальностей вишів квантових уявлень про природу електромагнітного випромінювання на основі фундаментальних фізичних понять «симетрія», «ймовірність», «електромагнітна взаємодія», «фотон» з точки зору сучасних фізичних теорій.

У роботі проаналізовано квантову природу електромагнітного випромінювання, розкрито зміст фундаментальних понять «електромагнітне поле», «електромагнітна взаємодія», «фотон».

Розроблено методику формування у студентів квантових уявлень про природу електромагнітного випромінювання на основі системи фундаментальних фізичних понять «симетрія», «відносність», «ймовірність», «електромагнітна взаємодія», «фотон» з точки зору сучасних фізичних теорій.

Пропонований підхід вивчення розділу «Теплове випромінювання» дозволяє якісно засвоїти студентам поняття «фотон» та «електромагнітне поле»; пояснити дискретний характер електромагнітного випромінювання; розробити методику вивчення квантової фізики для студентів технічних спеціальностей вишів на основі фундаментальних фізичних понять та принципів без логічного конфлікту зі знаннями, набутими раніше.

Ключові слова: фундаментальні фізичні поняття, система фундаментальних фізичних понять, теплове випромінювання, фотони, електродинаміка, методика формування фундаментальних фізичних понять.

VIKTOR KULCHYTSKYI

Candidate of Pedagogical Sciences

Ternopil Ivan Pului National Technical University

56 Ruska str., Ternopil

FORMATION OF FUNDAMENTAL PHYSICAL CONCEPTS IN STUDENTS OF TECHNICAL UNIVERSITIES WHEN STUDYING THE SECTION “THERMAL RADIATION”

Formation of fundamental physical concepts in technical university students when studying the section “Thermal radiation”.

The work examines the formation of fundamental physical concepts among students of technical specialties of universities in the process of studying the section “Heat radiation”. Based on the system of fundamental physical concepts, a method of studying Kirhhoff’s, Stefan-Boltzmann’s, and Wien’s laws was developed and, based on the point of view of

classical physics, the Rayleigh-Jeans formula was proven. Essential regularities incompatible with the ideas of classical physics, which led to Planck's hypothesis that electromagnetic energy is emitted in the form of separate portions (quanta), the size of which is proportional to the radiation frequency, are analyzed.

On the basis of fundamental physical concepts, the distribution of oscillations according to the energy value, which is described by Boltzmann's law, was analyzed, and the average value of radiation energy in the equilibrium state was calculated, an expression for the energy density corresponding to the frequency interval and an expression for the ratio of radiative and absorptive capacity during thermal radiation were obtained. The last two expressions are formulas obtained by M. Planck and provide a comprehensive explanation of equilibrium thermal radiation. This approach is fully justified, because it allows students of technical specialties of universities to form an idea about the discrete character of electromagnetic radiation and its quantum nature when studying the section "Thermal radiation". The proposed method of studying the section "Thermal radiation" deepens the understanding of the essence of physical processes from the point of view of modern physical theories and methodologies of physical science, allows to develop a method of forming quantum ideas about the nature of electromagnetic radiation in students of technical specialties of universities based on the fundamental physical concepts of symmetry, probability, electromagnetic interaction, photon from the point of view of modern physical theories.

The work analyzed the quantum nature of electromagnetic radiation, revealed the meaning of the fundamental concepts "electromagnetic field", "electromagnetic interaction", "photon".

A method of forming students' quantum ideas about the nature of electromagnetic radiation based on the system of fundamental physical concepts of symmetry, relativity, probability, electromagnetic interaction, photon from the point of view of modern physical theories has been developed.

The proposed approach to studying the section "Thermal radiation" allows students to qualitatively learn the concepts of "photon" and "electromagnetic field"; explain the discrete nature of electromagnetic radiation; to develop a methodology for studying quantum physics for students of technical specialties of universities based on fundamental physical concepts and principles without logical conflict with the knowledge acquired earlier.

Keywords: fundamental physical concepts, system of fundamental physical concepts, thermal radiation, photons, electrodynamics, method of formation of fundamental physical concepts.

Вивченню розділу «Теплове випромінювання» у технічних вишах приділяється значна увага, оскільки джерелом енергії теплового випромінювання є внутрішня енергія фізичного тіла. Теплове випромінювання характерне для будь-якого тіла за будь-якої температури та є рівноважним. Окрім того, зміст фундаментальних понять «фотон», «електромагнітне випромінювання» та «електромагнітне поле» навряд чи може бути розкритий поза детальним аналізом фізичної природи та фізичних процесів, які відбуваються у разі теплового випромінювання.

Разом з тим у підручниках фізики для технічних вишів [1, с. 279–287; 2], які використовуються нині, присутні неточності, які перешкоджають правильному розумінню понять, згаданих вище. Більше того, вживані у них відповідні означення суперечать означенням, які використовуються у сучасній фізиці як науці [3; 6; 7; 8; 9]. Ми пропонуємо підхід, який дозволяє уникнути цих недоліків під час вивчення розділу «Теплове випромінювання», одночасно структуруючи навчальний матеріал на основі фундаментальних фізичних понять «симетрія», «ймовірність», «електромагнітна взаємодія», «фотон» для формування квантових уявлень про природу електромагнітного випромінювання з точки зору сучасних фізичних теорій.

У [4] нами було розглянуто один із можливих підходів до вдосконалення методики вивчення ефекту Комптона, у [5] – атома водню у квантовій механіці для студентів технічних спеціальностей вишів. Його застосування сприяє не лише формуванню понять «фотон» та «електромагнітна взаємодія» у відповідності до їх сучасного розуміння, але і створює передумови для якісного засвоєння змісту поняття «електромагнітне поле» (ЕМП) та дає змогу продемонструвати студентам технічних вишів пізнавальну продуктивність ідей імовірності та симетрії, які пронизують усю сучасну фізику [3; 6; 7; 8; 9].

У посібниках з фізики [1, с. 279–287; 2] для студентів технічних спеціальностей вишів значно розширено коло питань, які вивчаються в електродинаміці та квантовій оптиці, а також поглиблено розгляд традиційних питань. Зокрема, це стосується розділу «Теплове випромінювання»: вивчаються закони Кірхгофа, Стефана-Больцмана, Віна, формула Планка. Такий підхід цілком виправданий, бо емпіричні знання студентів про квантову природу випромінювання нині, по суті, обмежуються знанням гіпотези Планка про те, що електромагнітна енергія випромінюється у вигляді окремих порцій (квантів), величина яких пропорційна частоті випромінювання. Разом із тим, як показує практика, у разі такого кумулятивного підходу до вивчення розділу «Теплове випромінювання» у студентів технічних спеціальностей вишів не вдається сформуванню уявлень про дискретний характер електромагнітного випромінювання та його квантову природу. Для розуміння суті фізичних процесів виникає потреба глибшого трактування теоретичного матеріалу, викладеного у посібниках з фізики для технічних спеціальностей вишів та роз-

роблення методики формування у студентів технічних спеціальностей вишів квантових уявлень про природу електромагнітного випромінювання на основі фундаментальних фізичних понять «симетрія», «ймовірність», «електромагнітна взаємодія», «фотон» з точки зору сучасних фізичних теорій.

Тому **метою статті** є формування уявлень про дискретний характер електромагнітного випромінювання на основі системи фундаментальних фізичних понять у студентів технічних спеціальностей вишів у процесі вивчення розділу «Теплове випромінювання», дослідження квантової природи випромінювання та розроблення методики формування у студентів технічних спеціальностей вишів квантових уявлень про природу електромагнітного випромінювання на основі фундаментальних фізичних понять «симетрія», «ймовірність», «заряд», «електромагнітна взаємодія», «фотон» з точки зору сучасних фізичних теорій та методологічних принципів фізичної науки [3, с. 312–332; 6, с. 7–23; 7; 9, с. 703–709].

Виділимо ті питання, які сприятимуть якісному засвоєнню розділу «Теплове випромінювання» студентами технічних спеціальностей вишів і поглиблюватимуть розуміння квантової природи електромагнітного випромінювання загалом.

Випромінювання тілами електромагнітних хвиль (світіння тіл) може здійснюватися за рахунок різних видів енергії. Найбільш поширеним є теплове випромінювання – випромінювання електромагнітних хвиль за рахунок внутрішньої енергії. Всі інші види світіння (збуджені іншими видами енергії, окрім теплової) називаються люмінесценцією.

Оточимо тіло, яке випромінює енергію, ідеально відбиваючою поверхнею. Повітря із оболонки видалимо. Відбите оболонкою випромінювання, впавши на тіло, буде поглинатися частково або повністю. Отже, буде відбуватися неперервний обмін енергією між тілом і випромінюванням, яке заповнює об'єм, обмежений ідеально відбиваючою поверхнею. Якщо розподіл енергії між тілом і випромінюванням залишається незмінним для кожної довжини хвилі λ , стан системи тіло-випромінювання буде рівноважним. Дослід показує, що тільки теплове випромінювання може перебувати у стані рівноваги з випромінюючими тілами, бо інтенсивність теплового випромінювання зростає у разі збільшення температури [6, с. 7–8; 9, с. 702–703].

Інтенсивність теплового випромінювання характеризується величиною потоку енергії, що випромінюється у ватах. Потік енергії, що випромінюється одиницею поверхні випромінюючого тіла у всіх напрямках (в межах тілесного кута 4π), називається енергетичною світністю R тіла, яка є функцією температури.

Випромінювання складається із хвиль різних частот ω (або довжин хвиль λ). Позначимо через dR_ω – потік енергії, що випромінюється одиницею поверхні тіла в інтервалі частот $d\omega$. У малому інтервалі $d\omega$ потік dR_ω пропорційний $d\omega$:

$$dR_\omega = r_\omega d\omega. \quad (1)$$

Величина r_ω називається випускаючою здатністю тіла. r_ω є функцією частоти і температури [6, с. 8–9; 9, с. 703].

Енергетична світність зв'язана з випускаючою здатністю формулами:

$$R_T = \int dR_{\omega T} = \int_0^\infty r_{\omega T} d\omega \quad (2)$$

Ми знаємо, що $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$. Продиференціюємо останній вираз, отримаємо:

$$d\lambda = -\frac{2\pi c}{\omega^2} d\omega = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} d\omega. \quad (3)$$

(Знак «-» вказує на те, що зі зростанням однієї з величин, ω чи λ , друга величина спадає).

$$dR_\lambda = r_\lambda d\lambda. \quad (4)$$

Оскільки $d\omega$ і $d\lambda$ відноситься до одного і того ж спектра, то:

$$r_\omega d\omega = r_\lambda d\lambda, \\ r_\omega d\omega = r_\lambda \frac{2\pi c}{\omega^2} = r_\lambda \frac{\lambda^2}{2\pi c} d\omega, \text{ звідки: } r_\omega = r_\lambda \frac{2\pi c}{\omega^2} = r_\lambda \frac{\lambda^2}{2\pi c}.$$

Нехай на елементарну площу поверхні падає потік променевої енергії $d\Phi_\omega$, який зумовлений електромагнітними хвилями, частота яких лежить в інтервалі $d\omega$. Частина цього потоку $d\Phi'_\omega$ буде поглинута тілом. Величина

$$a_{\omega T} = \frac{d\Phi'_\omega}{d\Phi_\omega} \quad (5)$$

називається поглинаючою здатністю тіла і є функцією від змінних ω і T .

Поглинаюча здатність тіла $a_{\omega T}$ не може бути більшою від одиниці. Якщо $a_{\omega T} = 1$, то тіло поглинає все падаюче на нього випромінювання і називається абсолютно чорним тілом (АЧТ). Тіло, для якого $a_{\omega T} \equiv a_T = const < 1$, називається сірим [6, с. 7–8; 9, с. 702–703].

Між випромінюючою і поглинаючою здатністю будь-якого тіла є зв'язок. Нехай тіла обмінюються енергією між собою і оболонкою лише за рахунок випромінювання і поглинання електромагнітних хвиль. Дослід показує, що така система приїде у стан теплової рівноваги. Оскільки температура тіл не змінюється, а отже, і енергія тіл не змінюється, то тіло, що випромінює більше енергії, буде більше поглинати. Чим більша випромінююча здатність r_{ω} , тим більша поглинаюча здатність $a_{\omega T}$:

$$\left(\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}}\right)_2 = \left(\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}}\right)_3 = \dots \quad (6)$$

Формулюємо закон Кірхгофа:

відношення випускаючої та поглинаючої здатності не залежить від природи тіла, воно є для всіх тіл однією і тією ж універсальною функцією частоти (довжини хвилі) і температури:

$$\frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}} = f(\omega, T), \quad (7)$$

$$f(\omega, T) = \frac{2\pi c}{\omega^2} \phi(\lambda, T) = \frac{\lambda^2}{2\pi c} \phi(\lambda, T), \quad \phi(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^2} f\left(\frac{2\pi c}{\lambda}, T\right). \quad (8)$$

АЧТ у природі не існує. Сажма має поглинаючу здатність $a_{\omega T}$, близьку до одиниці, тільки в обмеженому інтервалі частот; в інфрачервоній області її поглинаюча здатність менша одиниці.

Моделлю АЧТ є порожнина з отвором, у якій відбувається багаторазове відбивання електромагнітного випромінювання [6, с. 10–11; 9, с. 705]. Тому майже все випромінювання поглинається такою порожниною. Якщо температуру стінок підтримувати за температури T , то з отвору виходить випромінювання, за спектральним складом близьке до випромінювання АЧТ. Розкладаючи його у спектрі із допомогою дифракційної ґратки і вимірюючи інтенсивність різних ділянок спектра, знаходимо $f(\omega, T)$ або $\phi(\lambda, T)$.

Площа, що охоплюється кривою, дає енергетичну світність АЧТ у разі відповідної температури T (рис. 1). Максимум випромінюючої здатності зі збільшенням T зсувається у сторону коротких хвиль. Знайдемо вигляд функції $f(\omega, T)$. Стефан (у 1879 р.), аналізуючи експериментальні дані, дійшов висновку, що енергетична світність R будь-якого тіла $\sim T^4$. Больцман (у 1884 р.), виходячи з термодинамічних міркувань, отримав теоретично для енергетичної світності АЧТ [6, с. 12; 9, с. 705–706]:

$$R^* = \int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega = \sigma T^4, \quad (9)$$

де σ – стала Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 K^4}$.

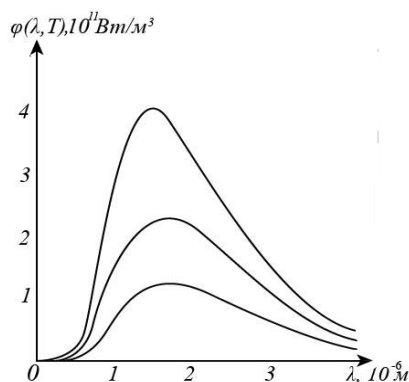


Рис. 1.

Він (у 1893 р.), використавши електромагнітну теорію, показав, що $f(\omega, T) = \omega^3 F\left(\frac{\omega}{T}\right)$, де F – функція відношення частоти до температури [9, с. 706–707]:

$$\phi(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \left(\frac{2\pi c}{\lambda} \right)^3 F \left(\frac{2\pi c}{\lambda T} \right) = \frac{1}{\lambda^5} \Psi(\lambda, T). \quad (10)$$

Встановимо залежність між λ_m , на яку припадає максимум $\phi(\lambda, T)$, і температурою T . Продиференціюємо (10) по λ :

$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{1}{\lambda^5} T \Psi'(\lambda T) - \frac{5}{\lambda^6} \Psi(\lambda T) = \frac{1}{\lambda^6} [\lambda T \Psi'(\lambda T) - 5 \Psi(\lambda T)], \quad \left(\frac{d\phi}{d\lambda} \right)_{\lambda=\lambda_m} = \frac{1}{\lambda_m^6} \Psi(\lambda_m, T) = 0.$$

Із дослідів випливає, що λ_m – скінченне ($\lambda_m \neq \infty$), тому $\Psi(\lambda T) = 0$. Звідки:

$$T \lambda_m = b \quad (11)$$

– закон зміщення Віна, де $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К} = 2,9 \cdot 10^7 \text{ \AA} \cdot \text{К}$.

Релей і Джінс зробили спробу визначити рівноважну густину випромінювання, виходячи із теореми класичної статистики про рівнорозподіл енергії за ступенем вільності: на кожне електромагнітне коливання припадає енергія, рівна двом половинам kT , одна половинка на електричний складник, друга – на магнітний (на кожен коливальний ступінь вільності припадає енергія, рівна половинці kT).

Рівноважне випромінювання у порожнині являє собою систему стоячих хвиль. Кількість стоячих хвиль, віднесена до одиниці об'єму, визначається формулою:

$$dn_\omega = \frac{\omega^2 d\omega}{2\pi^2 c^3}. \quad (12)$$

Цей вираз помножимо на два, оскільки у заданому напрямку можуть розповсюджуватися дві хвилі, що поляризовані у взаємно перпендикулярних напрямках. Тобто кожному коливанню припишемо енергію $\langle \varepsilon \rangle$, рівну kT :

$$u(\omega, T) d\omega = \langle \varepsilon \rangle dn_\omega = kT \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} d\omega. \quad (13)$$

Тобто $u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} kT$, де $u(\omega, T)$ – рівноважна густина енергії теплового випромінювання [6, с. 12–13; 9, с. 707–708]. Звідки:

$$f(\omega, T) = \frac{c}{4} u(\omega, T), \quad (14)$$

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT. \quad (15)$$

Функція $u(\omega, T)$ задовольняє отриманий закон Віна (11), а (15) – формула Релея-Джінса. Вона узгоджується з експериментальними даними лише у разі великих λ (рис. 2).

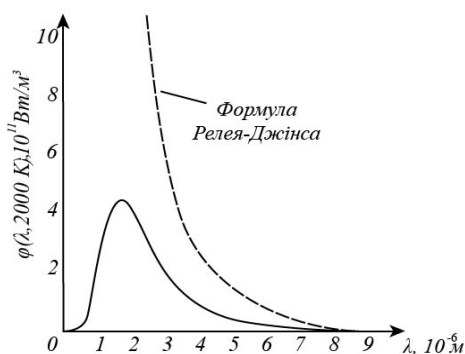


Рис. 2.

Інтегрування виразу (15) по ω від 0 до ∞ дає для рівноважної густини енергії $u(T)$ нескінченно велике значення (ультрафіолетова катастрофа). Цей результат також суперечить досліді (рис. 2). Рівновага між випромінюванням і випромінюючим тілом збігається у разі скінченних значень $u(T)$. З класичної точки зору виведення формули Релея-Джінса є бездоганим. Але розходження з дослідом вказує на існування закономірностей, несумісних із уявленнями класичної фізики [6, с. 13; 9, с. 708]. У 1900 р. Планку вдалося знайти вигляд функції $u(\omega, T)$ для густини енергії випромінювання, що відповідає

дослідним даним. При цьому він зробив припущення, яке суперечить класичним уявленням, – електромагнітне випромінювання випускається у вигляді окремих порцій енергії (квантів), величина яких пропорційна частоті випромінювання [6, с. 15–16; 9, с. 708–709]:

$$\varepsilon = \hbar\omega, \quad (16)$$

$$\varepsilon = h\nu, \text{ де } h = 6,02 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

У механіці величина «енергія \times час» називається дією. Тому \hbar називають квантом дії (розмірність \hbar співпадає з розмірністю моменту імпульсу).

Якщо випромінювання випускається порціями $\hbar\omega$, то його енергія повинна бути кратна до цієї величини $\varepsilon_n = n\hbar\omega$, ($n = 1, 2, 3, \dots$). У стані рівноваги розподіл коливань за значенням енергії описується законом Больцмана: ймовірність P_n того, що енергія коливання із частотою ω має значення ε_n визначається виразом

$$P_n = \frac{N_n}{N} = \frac{e^{(-\varepsilon_n/kT)}}{\sum_n e^{(-\varepsilon_n/kT)}}.$$

Середнє значення енергії випромінювання із частотою ω :

$$\langle \varepsilon \rangle = \sum_n P_n \varepsilon_n = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n\hbar\omega e^{(-n\hbar\omega/kT)}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{(-n\hbar\omega/kT)}} \quad [6, \text{ с. 20–21; 9, с. 708–709}].$$

Зробимо у останній рівності заміну $\hbar\omega / kT = x$ та припустимо, що x може приймати неперервний ряд значень. Тоді

$$\langle \varepsilon \rangle = \hbar\omega \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n e^{-nx}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nx}} = -\hbar\omega \frac{d}{dx} \ln \sum_{n=0}^{\infty} e^{-nx}. \quad (17)$$

Але $\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nx}$ є нескінченна геометрична прогресія з першим членом, рівним одиниці та знаменником e^{-x} , який менший одиниці.

$$\text{Тому } \sum_{n=0}^{\infty} e^{-nx} = \frac{1}{1 - e^{-x}}, \text{ та } \langle \varepsilon \rangle = -\hbar\omega \frac{d}{dx} \ln \frac{1}{1 - e^{-x}} = \hbar\omega \frac{e^{-x}}{1 - e^{-x}} = \frac{\hbar\omega}{e^x - 1}.$$

$$\text{Або } \langle \varepsilon \rangle = \frac{\hbar\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}.$$

При \hbar , що прямує до нуля, $e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} \approx 1 + \hbar\omega / kT$, тому отримуємо формулу класичної фізики $\langle \varepsilon \rangle = kT$, яка справджується для випадку, коли енергія приймає неперервний ряд значень. Помноживши dn_ω на $\langle \varepsilon \rangle$, отримаємо густину енергії, що припадає на інтервал частот $d\omega$ [6, с. 20–21; 9, с. 708–709]:

$$u(\omega, T) d\omega = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{d\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}, \quad (18)$$

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 c^2} \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}. \quad (19)$$

Формули (18) та (19) називаються *формулами Планка* ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – стала Больцмана). $f(\omega, T)$ – відношення випромінюючої і поглинальної здатності, $f(\omega, T) = \frac{r_{\omega T}}{a_{\omega T}}$. Ця формула точно співпадає з експериментальними даними у всьому інтервалі частот від 0 до ∞ . $f(\omega, T)$ задовольняє критерію Віна.

При $\frac{\hbar\omega}{kT} \ll 1$ (малі частоти) $\exp \approx 1 + \frac{\hbar\omega}{kT}$, у результаті чого отримуємо формулу (15) Релея-Джінса.

Для енергетичної світності АЧТ отримуємо [6, с. 16–21; 9, с. 706–709]:

$$R^* = \int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega = \int_0^{\infty} \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 c^2} \frac{d\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}.$$

$$\text{Заміна } \hbar\omega / kT = x \text{ дає: } \omega = \frac{kT}{\hbar} x, \quad d\omega = \frac{kT}{\hbar} dx, \text{ тоді: } R^* = \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \left(\frac{kT}{\hbar} \right)^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1}.$$

Інтеграл в останньому виразі обчислюється і дорівнює $\pi^2 / 15 \approx 6,5$. Внаслідок підстановки отримуємо закон Стефана-Больцмана:

$$R^* = \frac{\pi^2 k^4}{60 c^2 \hbar^3} T^4 = \sigma T^4.$$

Щоб знайти сталу у законі зміщення Віна, продиференціюємо функцію $\phi(\lambda, T)$ по λ та знайдемо точки екстремуму, прирівнявши вираз $\frac{d\phi(\lambda, T)}{d\lambda}$ до нуля [6, с. 18–21]:

$$T\lambda_m = \frac{2\pi\hbar c}{4,965k} = b.$$

Розроблена методика вивчення розділу «Теплове випромінювання» дозволяє сформуванню уявлення про дискретний характер електромагнітного випромінювання на основі системи фундаментальних фізичних понять у студентів технічних спеціальностей вишів у процесі вивчення розділу «Теплове випромінювання», дослідити квантову природу випромінювання та розробити методику формування у студентів технічних спеціальностей вишів квантових уявлень про природу електромагнітного випромінювання на основі фундаментальних фізичних понять «симетрія», «ймовірність», «заряд», «електромагнітна взаємодія», «фотон» з точки зору сучасних фізичних теорій та методологічних принципів фізики [3, с. 312–332; 6, с. 7–23; 7; 8; 9, с. 703–709].

Застосування такого методичного підходу сприяє не лише формуванню поняття «фотон» та «електромагнітна взаємодія» у відповідності до їх сучасного розуміння, але і створює передумови для якісного засвоєння змісту поняття «електромагнітне поле» (ЕМП) та дає змогу продемонструвати студентам технічних вишів пізнавальну продуктивність ідей імовірності та симетрії, які пронизують усю сучасну фізику.

ЛІТЕРАТУРА

1. Довідник з фізики для інженерів та студентів вищих навчальних закладів / Б.М. Яворський, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. Тернопіль : Навчальна книга – Богдан, 2007. 1040 с.
2. Зачек І.Р., Ільчук Г.А. Фізика і будівництво : посібник. Львів : Афіша, 2009. 330 с.
3. Курс фізики : навчальний підручник / І.Р. Зачек, І.М. Кравчук, Б.М. Романишин, В.М. Габа, Ф.М. Гончар ; за ред. І.Е. Лопатинського. Львів : Бескид-Біт, 2002. 376 с.
4. Коновал О.А. Теоретичні та методичні основи вивчення електродинаміки на засадах теорії відносності : монографія. Кривий Ріг : Видавничий дім, 2009. 346 с.
5. Кульчицький В.І. Формування фундаментальних фізичних понять у студентів у процесі вивчення ефекту Комптона. *Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова. Серія № 3. Фізика і математика у вищій і середній школі.* 2014. № 14. С. 40–49.
6. Кульчицький В.І. Формування фундаментальних фізичних понять у студентів у процесі вивчення атома водню у квантовій механіці. *Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова. Серія № 3. Фізика і математика у вищій і середній школі.* 2015. № 15. С. 63–69.
7. Мацок В.М. Роль методологічних принципів в удосконаленні професійної підготовки учителів фізики. *Фізико-математична освіта.* 2020. № 2(24). С. 66–72.
8. Основи квантової фізики : навчальний посібник. / Б.А. Лукіянець, Г.В. Понеділок, Ю.К. Рудавський. Львів : ВНУ «Львівська політехніка», 2009. 420 с.
9. Шут М.І., Форостяна Н.П. Вибрані питання історії фізики : навчальний посібник. Київ : ВНПУ імені М.П. Драгоманова, 2010. 238 с.

REFERENCES

1. Yavorskyi, B.M., Detlaf, A.A., & Lebediev, A.K. (2007). *Dovidnyk z fizyky dlia inzheneriv ta studentiv vyshchikh navchalnykh zakladiv [Handbook of physics for engineers and students of higher educational institutions]*. Ternopil: Navchalna knyha – Bohdan [in Ukrainian].
2. Zachek, I.R., & Ilchuk, H.A. (2009). *Fizyka i budivnytstvo [Physics and construction]*. Lviv: Afisha [in Ukrainian].
3. Zachek, I.R., Kravchuk, I.M., Romanyshyn, B.M., Haba, V.M., & Honchar, F.M. (2002). *Kurs fizyky [Physics course]*. Lviv: Beskyd-Bit [in Ukrainian].
4. Konoval, O.A. (2009). *Teoretychni ta metodychni osnovy vyvchennia elektrodynamiky na zasadakh teorii vidnosnosti [Theoretical and methodological foundations of the study of electrodynamics based on the theory of relativity]*. Kryvyi Rih: Vydavnychiy dim [in Ukrainian].
5. Kulchytskyi, V.I. (2014). Formuvannia fundamentalnykh fizychnykh poniat u studentiv u protsesi vyvchennia efektu Komptona [The formation of fundamental physical concepts among students in the process of studying the Compton effect]. *Naukovyi chasopys NPU imeni M.P. Drahomanova. Seriya № 3. Fizyka i matematyka u vyshchii i serednii shkoli – Scientific journal of the NPU named after M.P. Drahomanov. Series № 3. Physics and mathematics in higher and secondary school*, 14, 40–49 [in Ukrainian].

6. Kulchytskyi, V.I. (2015). Formuvannia fundamentalnykh fizychnykh poniat u studentiv u protsesi vyvchennia atoma vodniu u kvantovii mekhanitsi [Formation of fundamental physical concepts among students in the process of studying the hydrogen atom in quantum mechanics] *Naukovyi chasopys NPU imeni M.P. Drahomanova. Seriiia № 3. Fizyka i matematyka u vyshchii i serednii shkoli – Scientific journal of the NPU named after M.P. Drahomanov. Series № 3. Physics and mathematics in higher and secondary school*, 15, 63–69 [in Ukrainian].
7. Masiuk, V.M. (2020). Rol metodolohichnykh pryntsyviv v udoskonalenni profesiinoi pidhotovky uchyteliv fizyky [The role of methodological principles in improving the professional training of physics teachers]. *Fizyko-matematychna osvita – Physico-mathematical education*, 2 (24), 66–72 [in Ukrainian].
8. Lukiianets, B.A., Ponedilok, H.V., & Rudavskyi, Yu.K. (2009). *Osnovy kvantovoi fizyky [Fundamentals of quantum physics]*. Lviv: VNU «Lvivska politekhnikha» [in Ukrainian].
9. Shut, M.I., & Forostyana, N.P. (2010). *Vybrani pytannya istoriyi fizyky [Selected issues of the history of physics]*. Kyiv: VNPU imeni M.P. Drahomanova [in Ukrainian].