

УДК 621.391.6

Я. М. Грохольський,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизованих систем
управління Військового інституту телекомунікацій
та інформатизації імені Героїв Крут,

Б. А. Сусь,

доктор педагогічних наук, професор,
професор кафедри математики і фізики
Військового інституту телекомунікацій
та інформатизації імені Героїв Крут

Еквівалентність маси та енергії в корпускулярно- хвильовому представленні поширення світла і радіохвиль

Поширення в просторі радіохвиль усіх можливих діапазонів, включно зі світловими, представляється структурним взаємозалежним у часі й просторі корпускулярно-хвильовим процесом, фізичною основою якого є періодичний перехід енергії електромагнітної форми коливання в масу, названу корпускулою, і навпаки. З огляду на це введено поняття електромагнітних коливань, фотона в розширеному розумінні та радіофотона.

Ключові слова: електромагнітні коливання, радіохвилі, маса, енергія, корпускулярно-хвильова природа, фотон, радіофотон (R-фотон).

© Я. М. Грохольський, Б. А. Сусь, 2018

Матеріал статті стосується проблемного питання природи електромагнітних хвиль – проблеми дуалізму, сутністю якого є одночасне перебування матерії в стані хвилі й частинки (корпускули), що не знаходило пояснень з позицій доквантової фізики. Спочатку питання дуалізму виникло стосовно світла. Тривале вивчення світла виявило його електромагнітну хвильову й корпускулярну природу, тому радіохвилі всіх інших областей теж слід розглядати як електромагнітні хвилі та як корпускули водночас. Питання поєднання цих станів залишається актуальним і потребує узгодження з відомими експериментальними даними. Традиційно радіохвилі в сучасній навчальній і науковій літературі розглядаються тільки як хвильовий процес, що є лише частковою складовою повного процесу й не пояснює його реальну сутність. Фізична природа всіх електромагнітних хвиль однакова і підпорядкована певним законам існування та взаємодії, що не допускають протиріч, тому пояснення повинні наближатися до реальності.

Викладений матеріал має частково підсумковий характер, ґрунтується на більш ранніх публікаціях авторів [1–5] і певною мірою доповнює їхній попередній аналіз проблеми корпускулярно-хвильового стану світла та радіохвиль. Цільова направленість цих публікацій – представити для обговорення запропоноване розв’язання проблеми двоїстості, довести його до широкого кола спеціалістів і науковців для конкретизації та поглиблення досліджень, експериментів, об’єктивних оцінок щодо практичного застосування результатів, зокрема в спеціалізованих системах зв’язку.

Формулювання проблеми. Відомо, що радіохвилі розглядаються як електромагнітний хвильовий процес, для якого властива динаміка поширення в просторі та зміна в часі. Діапазон електромагнітних випромінювань не має обмежень, містить використовувані людством різні спектральні області, зокрема світлову, телекомунікаційних радіосистем, рентгенівського і гамма випромінювання тощо. Історично, поки радіовипромінювання ще не було відкрите, детально розглядалася й вивчалася природа світла – субстанції, найбільш придатної для спостереження. Були виявлені і практично підтверджені характерні ознаки світлових променів: їх спектральний склад (Ньютон), прямолінійність поширення і здатність огинання перешкод [1]. Відкриття радіовипромінювання (1866–1895 рр. – Луміє – Герц – Максвелл – Тесла – Попов – Марконі) підсилює актуальність вивчення джерел генерування і процесів поширення радіохвиль, урахувавши їх важливе прикладне значення [2, 3]. Для радіохвиль, аналогічно як і для світла, також характерна двоїста природа – це електромагнітні коливання і частинки (корпускули) водночас [4, 5]. Для однозначного трактування і коректного розуміння понять двоїстості як хвильового, так і корпускулярного стану електромагнітних коливань у статті розглядається модель взаємозв’язку цих станів, суть якої деталізується нижче.

Аналіз проблеми. Проблема двоїстості полягає в тому, що світло проявляє себе як частинки (корпускули) і як хвилі, що має експериментальне підтвердження. Наприклад, промінь світла, проходячи поблизу масивних тіл (Сонця), викривлює свій шлях під дією сили гравітації, чим проявляється корпускулярна природа світла. А хвильові властивості світла проявляються в явищах дифракції та інтерференції. Для світла властиві також усі теоретично-практичні положення, які стосуються електромагнітних хвиль узагалі. Уявлення про двоїстість природи світла дедалі більше підтверджувалося практикою, тому воно стало незаперечним [6]. Аналогічний погляд слід вважати прийнятним також для електромагнітних хвиль інших діапазонів. Але трактування електромагнітних коливань виходячи з умов їх виникнення внаслідок певних внутрішніх процесів чи зовнішніх впливів і характеру подальших переходів з одного стану в інший після випромінювання і в процесі самостійного поширення, незалежно від джерела генерування, не мають завершеного пояснення [4]. Численні спостереження та експерименти вказують як на корпускулярну, так і на хвильову природу світла чи інших електромагнітних хвиль, що є їхньою внутрішньою властивістю (станом), після того, як вони якимсь чином виникли [6, 7].

Двоїстість природи світла – так званий дуалізм – є проблемою не лише суто наукового, а й світоглядного характеру, що пов'язано з трактуванням хвильового і корпускулярного підходів при поясненні природи світла і взагалі електромагнітних хвиль. Суперечності традиційно зводилися до пояснення особливостей процесів поширення електромагнітних коливань без однозначного задовільного трактування неузгоджених представлень, що не могло в принципі відбутися на основі використання принципів ньютонівської механіки, тому пошуки пояснень тривали [8].

У 1900 р. М. Планк, вивчаючи теплове випромінювання тіл, для узгодження теоретичних і дослідних даних увів гіпотезу про випромінювання (і поглинання) речовиною енергії *квантами* (порціями), яку А. Ейнштейн у 1905 р. використав для пояснення фотоелектру. Це стало стартовим поштовхом розвитку квантової механіки, переходом від неперервних хвильових процесів до дискретних (квантових). Нові погляди на фізику взаємодій в області мікрочастинок суперечили класичним уявленням про неперервність усіх процесів, що були основою ньютонівського представлення фізичної картини світу і базисом наукових пояснень, тому сприймалися далеко неоднозначно і стримано, навіть Ейнштейна протягом життя долали сумніви. Але подальші дослідження та експерименти підтвердили гіпотезу Планка, хоча сам автор ставився до своєї ідеї критично. Згідно з квантовими принципами Планка, електромагнітні хвилі випромінюються і поглинаються порціями (квантами) з енергією W , пропорційною частоті ν :

$$W = h\nu, \quad (1)$$

де $h = 6,62606957(29) \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка.

Досить несподіваним та кардинальним поглядом на стан існування матерії було її представлення у вигляді хвиль Л. де Бройля (1924). На основі гіпотези де Бройля, яка знайшла експериментальне підтвердження, що не лише для світла, а й для будь-яких матеріальних частинок властивий хвильовий процес, Е. Шредінгер у 1926 р. опублікував рівняння квантової механіки стосовно хвильових властивостей матерії, а в 1927 р. П. Дірак представив математизовану модель поширення фотона та його взаємодії з речовиною [9].

Використовуючи хвильове представлення матерії, згідно з принципом де Бройля – Шредінгера, вважати природу корпускули хвильовою, але з іншим характером хвилі, ніж електромагнітна. Для поєднання цих варіантів хвиль використаємо закон збереження енергії та взаємну залежність енергії та маси на основі принципу еквівалентності Ейнштейна.

У загальному випадку зв'язок між енергією речовини W та її масою m визначається відомою формулою Ейнштейна [6]:

$$W = c^2 \cdot m, \quad (2)$$

де $c = 299792,458$ км/с – швидкість світла у вакуумі.

Таке енергетичне представлення дає можливість узгодити хвильовий та корпускулярний стани електромагнітних хвиль [1]. Взаємозв'язок елементів дуалізму впливає з рівняння Ейнштейна (2) та рівнянь Максвелла, загальна інтегральна форма яких така [1, 10]:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \int_S \frac{d\vec{D}}{dt} d\vec{s} + \int_S \vec{J} d\vec{s} \quad - \text{закон повного}$$

струму,

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \left(\int_S \vec{B} d\vec{s} \right) \quad - \text{закон електромагнітної}$$

індукції, (3)

$$\int_S \vec{B} d\vec{s} = 0, \quad \int_S \vec{D} d\vec{s} = q \quad - \text{умови теореми Остроградського – Гаусса,}$$

де \vec{E} , \vec{D} – вектори напруженості та індукції електричного поля; \vec{H} , \vec{B} – магнітного поля; l , S – довжина границі та площа деякого довільного контура; \vec{J} – густина струму провідності через поверхню S ; q – електричний заряд на поверхні.

Розв'язання рівнянь Максвелла задає структуру електромагнітних хвиль, характер їх поширення, а енергетичне представлення визначається теоремою Умова – Пойтінга [1, 10]:

$$E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kx + \psi_1) - \text{електрична складова хвилі,}$$

$$H_z = H_{0z} \cos(\omega t - kx + \psi_2) - \text{магнітна складова хвилі,}$$

$$P = E_y H_z = E_{0y} H_{0z} \cos^2(\omega t - kx + \psi) - \text{густина потоку енергії,}$$

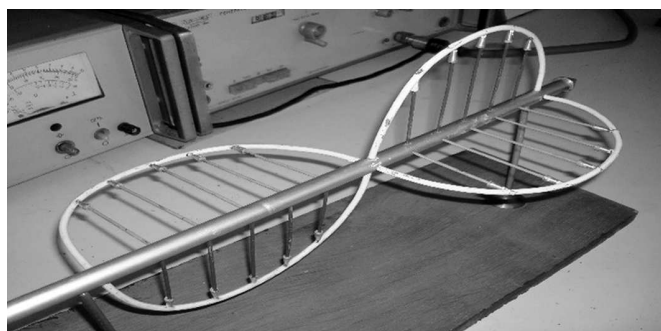
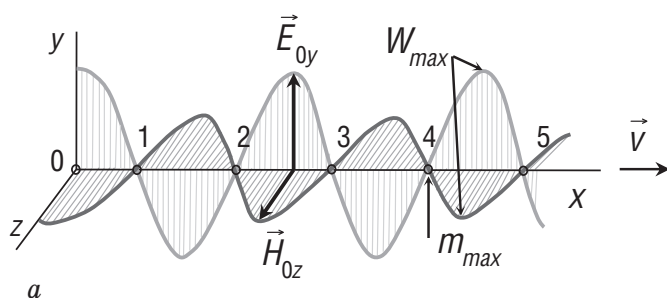


Рис. 1. Взаємно перпендикулярні коливання векторів \vec{E} і \vec{H} при поширенні електромагнітної хвилі у просторі в напрямку x

де E_{0y} , H_{0z} – амплітуди електричної та магнітної складових; ω – частота коливання; $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число; λ – довжина хвилі; змінні величини t і x – відповідно час і напрямок поширення хвилі; $\psi_1 = \psi_2 = \psi$ – початкові фази коливань, які є однаковими на основі повної взаємозалежності (взаємоіснування) електричної та магнітної складових.

Вектори \vec{E} та \vec{H} при поширенні у просторі перпендикулярні між собою, коливаються з правосторонньою гвинтовою динамікою руху в однаковій фазі (приймають синхронно максимальні, мінімальні та всі проміжні значення в координатах y та z). На *рисунку 1* представлені (у фіксований момент часу) коливання векторів \vec{E} і \vec{H} електромагнітної хвилі при поширенні у просторі в напрямку x зі швидкістю \vec{v} : а) графічне зображення; б) лабораторний макет.

Характерними є точки 1, 2, ... , у яких обидва вектори приймають нульові значення, звідки виникає **принципове** питання щодо сумарної енергії електричного й магнітного полів у цих точках, ураховуючи, що зникнути вона не може. Вважаємо, що енергія **переходить** у масу згідно з виділеним вище курсивом представленням та формулою (2).

Величина (енергія) векторів \vec{E} і \vec{H} формується в передавачі складанням електромагнітних квантів (за аналогією, як лінза формує інтенсивний промінь світла або направлена антена забезпечує концентрацію хвильового

поток). Представимо енергію електромагнітної хвилі W лівою частиною формули (2), звідки визначається еквівалентна цій енергії маса m . Взаємозв'язок маси та енергії приводить до логічного висновку, що **закону збереження енергії** відповідає **закон збереження матерії**, з переходом однієї її форми в іншу [1]. Таке представлення визначає при поширенні радіохвиль однозначну взаємно залежну **динамічну** змінність енергії та маси у вигляді формули [4]:

$$\Delta W = c^2 \Delta m. \quad (4)$$

Символ Δ означає процес взаємозалежної зміни енергії та маси. Максимальне значення енергії W_{max} відповідає точкам переходу електричного та магнітного коливань через максимуми, тоді як у цих точках змінна маса $m = 0$. Далі, завдяки механізмам переходу однієї форми матерії в іншу, енергія W_{max} починає зменшуватись і відповідно змінюється (зростає) маса m . У точках 1, 2, ... енергія зменшується до 0 із переходом в еквівалентну максимальну масу m_{max} .

Представлення часового процесу поширення електромагнітних хвиль від моменту t_0 (при фіксованій просторовій координаті x) ілюструється *рисунком 2*.

У моменти часу t_0, t_1, t_2, \dots енергія хвильових складових E_x та H_y повністю переходить у масу, яка приймає максимальне значення m_{max} , тоді як у проміжках між цими моментами **одночасно існують обидві форми** представлення електромагнітних хвиль – електромагнітна форма W і форма у вигляді змінної маси m . Ці форми

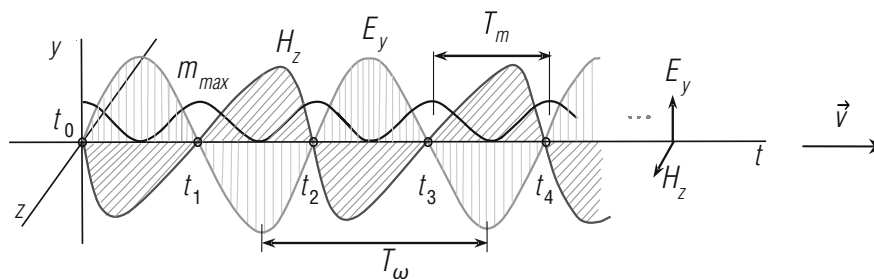


Рис. 2. Представлення часового поширення електромагнітних хвиль

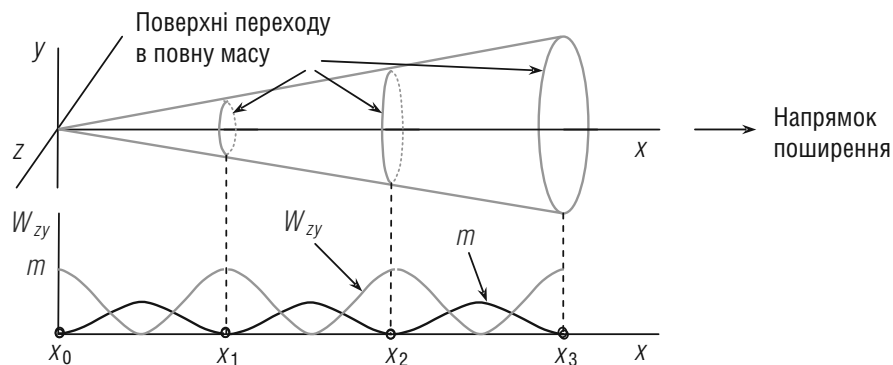


Рис. 3. Характер зміни енергії електромагнітних коливань

нерозривно пов'язані й не можуть існувати одна поза іншою. Далі процес зміни маси періодично повторюється з періодом T_m , який дорівнює половині періоду T_ω гармонічного коливання із частотою ω : $T_\omega = 2\pi/\omega$. У загальному представленні виникнення будь-яких електромагнітних хвиль супроводжується переходом енергії в масу і навпаки.

За аналогією до світла, частинки якого називаються фотонами, частинки хвиль радіодіапазону умовно можемо назвати **радіофотонами** (скорочено «**R-фотони**»). Потрапляючи на провідник (антену), «**R-фотони**» своїм електричним полем впливають на електрони і зміщують їх у напрямку руху, викликаючи відповідну електрорушійну силу. А далі всі процеси обробки наведеної напруги радіохвиль здійснюються стандартизованими методами.

Частоту коливань і динаміку їх виникнення задають джерела коливань природного й техногенного походження, які перекривають весь діапазон існування таких коливань. Слід зазначити, що поширення електромагнітних хвиль має об'ємно-просторовий характер, а точки повного переходу сумарної енергії складових E_y та H_z у масу утворюють просторові «електромагнітно-нульові» поверхні (які проходять через точки t_0, t_1, \dots) по фронту поширення хвилі.

На основі розглянутих принципів представляємо визначення електромагнітної хвилі.

Електромагнітна хвиля – це неперервний об'ємно-просторовий процес руху і зміни взаємозв'язаних форм матерії у вигляді електромагнітної форми та її маси з періодичним переходом однієї форми в іншу.

Хвиля у просторі поширюється в заданому тілесному куті (промінь прожектора, діаграма направленості антени тощо), амплітуди магнітної та електричної складових **зменшуються** при віддаленні від джерела випромінювання, відповідно зменшується й максимальна маса. Тілесний кут, у якому поширюються коливання, задає технічна система, що фокусує світло чи електромагнітні хвилі в потрібному напрямку поширення (рис. 3); W_{xy} – змінна сумарна енергія електричної та магнітної складо-

вих коливання в просторі в перпендикулярній системі координат z та y , m – змінна маса коливання у просторі.

Масу електромагнітного поля задають взаємно пов'язані складові H та E з їх сумарною енергією W , густина якої визначається співвідношенням [7]:

$$W = \frac{\epsilon_0 \cdot E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0}, \quad (5)$$

де $\epsilon_0, \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала; E – напруженість електричного поля, В/м; B – величина магнітної індукції, Вб/м²; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала.

Розгляньмо приклад [7]. Нехай величина магнітної індукції $B = 1$ Тл, напруженість електричного поля $E = 108$ В/м (достатньо велика). Тоді густина енергії електричного і магнітного полів w на основі (5) матиме значення:

$$W = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{16}}{2} + \frac{1}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 4,42 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^3.$$

Маса електромагнітного поля, яка відповідає цій енергії, згідно з формулою (2), дорівнює:

$$m = \frac{W}{c^2} = \frac{4,42 \cdot 10^5}{(3 \cdot 10^8)^2} = 4,91 \cdot 10^{-12} \text{ кг/м}^3.$$

Для уявлення про величину отриманої еквівалентної маси електромагнітного поля в одному кубічному метрі простору порівняймо її з масою спокою електрона: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Як видно, маса електрона порівняно з масою електромагнітного поля в одному кубічному метрі суттєво менша. Однак масу електрона в різних фізичних процесах доводиться враховувати. Тому можемо припустити, що зміна маси електромагнітного поля може знайти своє застосування в системах з електромагнітним випромінюванням. Крім цього, можливість (поки що гіпотетична) перетворення маси в енергію налаштує на думку про те, що реальність подібного процесу може бути мотивацією для наукових пошуків механізмів його виявлення та використання в майбутньому, хоча, наскільки відомо, перетворення речовини в енергію дається дуже непросто.

Характер поширення електромагнітних хвиль та відповідних їм мас показує, що їх сумісний рух здійснюється зі швидкістю світла (у вакуумі). Це підкреслює те, що існують **форми матерії**, маса яких (релятивістська маса) здатна рухатися зі **швидкістю світла**.

Стосовно світла використовується поняття **фотон**. Під фотонами розуміють найменші порції світла, які поводять себе як частинки і як хвилі. Однозначних визначень фотона, цілковито узгоджених із практикою проявів його двоїстості, наскільки відомо, немає. Фотон без руху не існує, маси спокою не має, він визначає властивість матерії його створювати за певних умов. Причому рух фотона має двоїстий характер – це рух поступальний і коливальний одночасно.

На основі вище викладеного матеріалу можемо дати визначення фотона (електромагнітного фотона в розширеному розумінні стосовно всіх діапазонів випромінювань).

Фотон – це взаємно зумовлені й взаємозалежні коливання двох форм матерії – електромагнітної та її маси, що існують тільки в процесі руху, з повним періодичним переходом однієї форми в іншу.

На *рисунку 3* представлені інтервали $x_0 \dots x_1$, $x_1 \dots x_2$ і т. д., які відображають повторення процесів у *просторі*, є періодами коливань (зміни станів). Зауважимо, що періодичні нульові та максимальні енергетичні стани електромагнітної хвилі в просторі можуть бути визначені експериментально. Певне джерело випромінює фотони (у вигляді складових E_x та H_y) з деякою енергією. Далі, у процесі поширення в просторі, енергія коливань зменшується, але зростає їхня маса до свого максимального значення, від якого починається наступний процес переходу в енергію електромагнітних складових до її максимальної величини – взаємоперетворення періодично повторюються. При поширенні в реальному просторі, де можливі втрати енергії, енергія фотона зменшується. Кожне джерело випромінювання задає параметри фотонів залежно від частоти та початкової енергії коливань. Що стосується видимого білого світла, то слід відмітити, що воно складається із сукупності коливань різних частот, які створюють сумарний потік різних фотонів. Тому картина поширення ускладнюється наявністю для кожної частоти своїх максимумів і мінімумів, що формують загальну динамічну рельєфну картину переміщення світлового потоку, в якому кожній частотній складовій світла відповідає свій варіант фотона. При такому розмаїтті фотонів є доцільним приведення їх до однозначної кількісної оцінки. Для цього вважаємо можливим застосуванням певного нормування за допомогою чітко визначених в енергетичному та частотному плані стабільних випромінювань (назвемо їх **базовими фотонами**). Це дає змогу фотон будь-якого електромагнітного випромінювання енергетично оцінити кількістю базових фотонів.

Висновки

1. Представлена фізична сутність двоїстості природи радіохвиль у вигляді взаємозв'язаних періодичних перетворень двох форм матерії одна в іншу – електромагнітної та її маси – відповідно з енергетичною динамічною залежністю $W = c^2 \cdot m$.

2. На основі розглянутих перетворень автори вважають за доцільне скоригувати поняття електромагнітного просторового коливання та фотона, розширивши й уточнивши зміст останнього стосовно не лише світла, а й радіохвиль усіх діапазонів. Це дає змогу з єдиних позицій розглядати корпускулярно-хвильові ефекти поширення радіохвиль узагалі.

3. Використання електромагнітних хвиль у вигляді коливань типу **енергія – маса – енергія ...** може розширити можливості телекомунікаційних чи інших систем з винайденням чутливих до дії динамічної маси пристроїв.

4. Що стосується електромагнітної складової, то наявність максимумів і мінімумів енергії в просторовому поширенні радіохвиль визначає можливість збільшення на прийомі відношення потужностей сигнал/шум шляхом раціонального розміщення в просторі окремих антен та елементів складних антенних систем (структур). Різні довжини хвиль, накладаючись, формують просторовий енергетично-частотний рельєф, інформаційні піки якого повинен виявити алгоритм приймання. У сукупності всі випадково-динамічні фактори формують тримірне просторове нерівномірне енергетично-частотне полотно, аналіз якого повинна здійснювати антенна структура із системою управління приймача.

5. Різні методи підвищення вірогідності обміну інформацією мають свої граничні можливості, а зазначений підхід може дати додаткові позитивні результати, якщо використати масу електромагнітних коливань. Певні рішення стосовно електромагнітної складової містять системи з просторовими методами передачі та обробки прийнятих радіохвиль, зокрема МІМО, які продовжують удосконалюватись у плані вивчення й використання об'ємних представлень інформаційних сигналів і завдань та оптимізації алгоритмів приймання. Але це стосується лише електромагнітної складової прийнятих коливань.

6. З огляду на закон збереження енергії, потребують аналізу рівняння Максвелла щодо характеру коливань та їх енергії в точках (просторових і часових координатах), де електромагнітна складова дорівнює нулю.

Перелік літератури

1. Сусь Б. А. Коливання і хвилі / Б. А. Сусь, В. Ф. Заболотний, Н. А. Мисліцька. – К. : ВІТІ НТУУ «КПІ», 2009. – 130 с.
2. Грохольський Я. М. Радіохвилі як потік частинок, що перебувають у коливальному стані / Я. М. Грохольський, Б. А. Сусь, Б. Б. Сусь. – Запоріжжя: ЗНТУ // Радіоелектроніка, інформатика, управління (Радіофізика). – 2016. – № 6. – С. 7–10.

3. *Грохольський Я. М.* Параметричний взаємозв'язок корпускулярної та хвильової моделей представлення електромагнітних коливань / Я. М. Грохольський, Б. А. Сусь // Матеріали ІХ науково-практичної конференції «Пріоритетні напрями розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення». – К. : ВТІ, 2016. – С. 23–26.

4. *Грохольський Я. М.* Концепція єдності корпускулярного та хвильового подань поширення радіохвиль / Я. М. Грохольський, Б. А. Сусь // Зв'язок. – 2017. – № 3. – С. 19–22.

5. *Грохольський Я. М.* Історичні аспекти розвитку фізичних уявлень про двоїсту природу електромагнітних хвиль / Я. М. Грохольський, Л. М. Матвеева, Б. Б. Сусь // Матеріали 16-ї Всеукраїнської наукової конференції «Актуальні питання історії науки і техніки». – К. : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – С. 79–83.

6. *Эйнштейн А.* Эволюция физики / А. Эйнштейн, Л. Инфельд; пер. с англ. – М. : Молодая гвардия, 1966. – 272 с.

7. *Демирчян К. С.* Теоретические основы электротехники / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин. – 5-е изд. – Т. 2. – СПб. : Питер, 2009. – 432 с.

8. *Козленко О. В.* Особливості вивчення корпускулярних властивостей світла в підручниках фізики / О. В. Козленко, М. Г. Лисенко, О. В. Матвійчук // Методологічні основи формування сучасних предметних дидактик : зб. наук. праць. – К. : НТУУ «КПІ». – 2009. – С. 288–293.

9. *Дирак П.* Принципы квантовой механики / П. Дирак; пер. с англ. – М. : Наука, 1979. – 480 с.

10. *Коновал О. А.* Основи термодинаміки / О. А. Коновал. – Кривий Ріг, 2008. – 347 с.