

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ВИКЛАДАННЯ ЕФЕКТУ ДОПЛЕРА В СИСТЕМІ ПІДГОТОВКИ ВЧИТЕЛЯ ФІЗИКИ

Розглядається роль ефекту Доплера у формуванні сучасних уявлень про відносність руху і фізичних величин у системі підготовки вчителя фізики. Наводяться стислі історичні відомості про відкриття Доплером зазначеного ефекту та пояснення ним причини різного забарвлення зірок. Аналізуються методичні особливості розгляду ефекту Доплера в механіці, оптиці, спеціальній теорії відносності (СТВ). Показано, що використання коваріантної форми запису властивостей простору й часу для подання в навчальному процесі ефекту Доплера більшою мірою, ніж існуючі методики, відповідає рівню сучасної теоретичної фізики і сприяє фундаменталізації фізичної освіти в Україні.

Ключові слова: ефект Доплера, частота, довжина хвилі, перетворення Лоренца, чотиривимірні вектори.

Постановка проблеми. Питання відносності руху й пов'язану з цим відносність величин, які характеризують фізичні явища під час розгляду їх у різних системах відліку, у процесі вивчення фізики сприймаються студентами достатньо важко. Ситуація ускладнюється ще й тим, що відносність фізичних величин (на перший погляд) суперечить принципу відносності, згідно з яким фізичні закони та рівняння, які їх описують, повинні мати однаковий вигляд у всіх інерціальних системах відліку. Зазначений принцип без детального аналізу нібито виключає відносність фізичних величин. Тому пошук методичних можливостей і методичних прийомів у роз'ясненні питань відносності є дуже важливим. Особливо актуальними вони є при підготовці вчителів фізики, які у своїй подальшій роботі зіткнуться з необхідністю пояснення школярам питань, пов'язаних з ефектами відносності. На наш погляд, для роз'яснення принципу відносності показовим об'єктом, вивчення якого ілюструє відносність фізичних величин, є ефект Доплера, який можна розглядати в різних розділах фізики: механіка, оптика й електродинаміка, спеціальна теорія відносності. Але, як показує аналіз актуальних досліджень, методика висвітлення ефекта Доплера залишилась поза увагою методичної науки. Зазначений ефект розглядається лише на рівні навчальних посібників та науково-популярної літератури [1–5], що, враховуючи його потенційні можливості в поясненні принципу відносності, доволі часті прояви в природі й важливі наукові та практичні застосування, є недостатнім і невиправдано тезовим.

Метою даної статті є аналіз методичних доробок у висвітленні ефекта Доплера й розробка оптимальної методики навчання зазначеного питання, яка б поєднувала наукову точність у викладенні з лаконічністю й доступністю сприйняття матеріалу.

Виклад основного матеріалу. У 1842 році в журналі Празького наукового товариства з'явилася стаття австрійського професора математики Христіана Доплера під назвою «Про кольорове світло подвійних зірок і деяких інших сузір'їв неба», у якій було представлено нове й несподіване пояснення забарвлення небесних об'єктів. Свою теорію Доплер будував на твердженні про те, що частота хвильових коливань повинна залежати від швидкості руху джерел відносно спостерігача. Іншими словами, один і той самий звук матиме різну висоту, а світло – різне забарвлення для джерела, що рухається і покоїться.

Доплер уявляв собі причину забарвлення зірок таким чином. Світло саме по собі має білий колір, оскільки є сумішшю різних кольорів у рівній пропорції. При русі джерела кольори зміщуються. Жовтий колір, наприклад, по мірі наближення зірки до Землі повинен переходити в зелений і далі в блакитний і фіолетовий. При віддаленні ж зірки від Землі жовтий колір переходить в оранжевий і червоний. Оскільки око здатне сприймати лише певні кольори (від фіолетового до червоного), а деякі кольорові компоненти при зсуві «виходять» за межі чутливості ока, то у видимому наборі кольорів деякі з них опиняються в перевазі, що й пояснює забарвлення зірки.

Проте, стаття Доплера «Про кольорове світло ...» піддалася різкій критиці, і, не дивлячись на спроби Доплера відстояти свою точку зору, його теорія була знехтувана більшістю відомих фізиків того часу.

Пояснення Доплером кольору зірок дійсно було невірним. Проте в його основі містилася плідна ідея про зміну кольору (довжини хвилі) випромінювання при русі джерела відносно спостерігача.

Правильне пояснення цього ефекту було виконано лише після того, як стала зрозуміла природа випромінювання. У часи ж Доплера ніхто, по суті, не усвідомив значення ідеї Доплера – ні супротивники його теорії, ні він сам.

Звук і світло – це хвильові явища. Хвилі – це коливання, які з часом розповсюджуються у просторі. Звукові (акустичні) хвилі в речовині є розповсюдженням коливань густини середовища. Світлові оптичні хвилі – це розповсюдження у просторі електромагнітних коливань. Для Доплера, як і майже для всіх науковців XIX століття, світло було хвилею в якомусь «світлоносному» середовищі – ефірі, що заповнює весь простір і всі тіла. Розповсюдження світла в ефірі для них було подібним до розповсюдження звуку в повітрі (або в іншому середовищі), тому світлові явища повинні були, на їх думку, мати аналогію зі звуковими явищами. Подібність звуку і світла все ж таки не повна. Звук є поздовжнім коливанням густини (скалярної величини), а світло – це поперечні коливання електричного й магнітного векторів. Тому ефект, передбачений Доплером, повинен спостерігатися як для світла, так і для звуку, але при цьому повинен мати відмінності, пов'язані з різною природою світлових і звукових хвиль.

Ефект Доплера для звуку. Звук може розповсюджуватися лише в середовищі, що має пружність об'єму або форми. Звукові коливання різної частоти сприймаються нашим вухом як звуки різної висоти.

Для того, щоб зрозуміти, як змінюється частота звуку при русі джерела або спостерігача, розглянемо наступне завдання. На озері плавають два човни. З одного з них у воду занурено прилад, який може випромінювати звукові коливання частоти V_0 . З іншого човна у воду опущено приймач (детектор), який може реєструвати частоту звуку, що доходить. Необхідно з'ясувати, яку частоту звуку реєструватиме приймач у всіх можливих випадках.

а) Рух джерела відносно середовища. Джерело рухається відносно води зі швидкістю v . Швидкість хвилі у воді c (у загальному випадку в середовищі) є величина постійна, яка не залежить від руху джерела (хвиля, будучи випущеною, забуває про своє джерело – вислів Гельмгольца).

Нехай у момент часу t_1 приймач знаходиться в деякій точці, а джерело – в іншій точці, при цьому будемо вважати, що джерело рухається вздовж лінії, яка з'єднує джерело з приймальним приладом. Хвиля, яка випущена в момент t_1 , коли джерело знаходиться на відстані a від приладу, досягне останнього в момент $T_1 = t_1 + \frac{a}{c}$. Хвиля, яка випущена джерелом пізніше – в момент $t_2 = t_1 + \tau$ в іншій точці, досягне приладу в момент T_2 : $T_2 = t_2 + \frac{a \pm v\tau}{c}$ (v_x – проекція швидкості на вісь x). У результаті хвилі, що випускаються джерелом за проміжок часу $T = t_2 - t_1$, діють на прилад приймача протягом часу $T = T_2 - T_1 = \tau \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$. Якщо частота джерела дорівнює V_0 , то за час τ ним буде випущено $N = V_0 \tau$ хвиль, отже, частота, яка сприймається приладом і визначається відношенням $\nu = \frac{N}{T}$, буде рівною:

$$\nu = \begin{cases} \frac{V_0}{1 + v/c}, & \text{джерело віддаляється} \\ \frac{V_0}{1 - v/c}, & \text{джерело наближується} \end{cases} \quad (1)$$

Оскільки швидкість хвилі в середовищі визначається властивостями середовища, тобто не залежить від руху джерела і залишається рівною c , то в розглянутому випадку повинна мати місце зміна довжини хвилі. Дійсно, позначивши через λ_0 – довжину хвилі, що спостерігається за відсутності руху джерела, а через λ – довжину хвилі, яка сприймається в разі руху джерела, й використовуючи означення довжини хвилі як відношення швидкості до її частоти, з урахуванням (1), знайдемо: $\lambda_0 = \frac{c}{V_0}$, $\lambda = \frac{c}{\nu} = \lambda_0 \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$.

Отже, при русі джерела в середовищі швидкість хвилі відносно приладу, розміщеного в цьому середовищі, залишається постійною, а частота і довжина хвилі, які сприймаються приладом, змінюються.

б) Рух детектора відносно середовища. Розглянемо тепер випадок, коли джерело хвилі нерухоме, а детектор хвилі рухається відносно середовища зі швидкістю u (U_x – проекція швидкості на вісь x), швидкість хвилі в середовищі постійна й дорівнює c . Повторюючи міркування, наведені вище, і враховуючи, що «зближення» між хвилею і приймачем відбувається зі швидкістю відносного руху $c \pm U$ (знак плюс, коли детектор наближається до джерела, а мінус, якщо – віддаляється), вирази для T_1 і T_2 знайдені раніше, де замість швидкості c у знаменнику потрібно підставити $(c \pm U)$:

$$T = \tau \left(1 + \frac{u_x}{c - u_x}\right) = \tau \frac{1}{1 - u_x/c} = \tau \frac{1}{1 \mp u/c}.$$
 У результаті: інтервал часу T дорівнює:

$$T = \tau \left(1 + \frac{u_x}{c - u_x}\right) = \tau \frac{1}{1 - u_x/c} = \tau \frac{1}{1 \mp u/c},$$
 а частота, що сприймається приймачем, буде рівною: $\nu = \nu_0(1 - u_x/c)$, або:

$$\nu = \begin{cases} \nu_0 \left(1 - \frac{u}{c}\right), & \text{джерело віддаляється} \\ \nu_0 \left(1 + \frac{u}{c}\right), & \text{джерело наближується} \end{cases} \quad (2)$$

Слід звернути увагу на те, що навіть за умови рівності швидкостей $V = U$, частота, яку сприймає детектор, що рухається до нерухомого джерела, відрізняється від частоти, яка сприймається нерухомим детектором, від джерела, що рухається до детектора.

У випадку руху приймача швидкість хвилі відносно нього, як зазначено вище, дорівнює $c - u_x = c \pm u = c(1 \pm \frac{u}{c})$. Тоді відношення цієї величини до частоти (8) дає вираз для довжини хвилі звуку, що сприймається детектором:

$$\lambda = \frac{c \mp u}{\nu} = \frac{c(1 \mp u/c)}{\nu_0(1 \mp u/c)} = \frac{c}{\nu_0} = \lambda_0. \quad (3)$$

Одержані формули відносяться до випадку, коли рух джерела або приймача відбувається вздовж однієї лінії. Якщо напрям спостереження складає деякий кут φ із напрямом руху, то в наших міркуваннях потрібно зробити невеликі зміни. По-перше, у випадку (б) замість $c \pm u$ довелося б підставити $(c \pm u \cos \varphi)$, бо саме ця величина дає в даному випадку швидкість «зближення» хвилі і приймача. По-друге, у вираз T_2 замість величини $(a \pm ut)$ увійде $-(a \pm ut \cos \varphi)$. Таким чином, остаточні результати відповідають заміні u на $u \cos \varphi$, тобто введенню складової швидкості уздовж лінії, яка з'єднує спостерігачів. Остаточно маємо:

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 \mp \frac{u}{c} \cos \varphi} = \frac{\nu_0 (1 \pm \frac{u}{c} \cos \varphi)}{1 - (\frac{u}{c} \cos \varphi)^2} \quad (4)$$

– у випадку руху джерела і

$$\nu = \nu_0 (1 \pm \frac{u}{c} \cos \varphi) \quad (5)$$

– у випадку руху приймача.

Отже, для випадку руху джерела чи детектора звукових хвиль у середовищі ми маємо дві різні формули, які відрізняються одна від одної множником $(1 - (u \cos \varphi / c)^2)^{-1}$. Для більшості випадків, що розглядаються в акустиці, відношення u/c мале, тому даний множник відрізняється від одиниці на величину другого порядку малості (u/c) . Дійсно, в даному випадку можемо скористатися наближеними рівностями: $\frac{1}{1-a} \approx 1 + a$ вірними при $a < 1$. У цьому випадку наведені формули співпадають.

При сучасних технічних засобах різниця нерідко досягає цілком помітних значень. Так, сучасні літаки можуть розвивати швидкість порядку ≈ 280 м/с і вище, так що для швидкості звуку 330 м/с відношенням знехтувати не можна, тому різниця двох вищенаведених формул стає суттєвою.

в) Джерело і приймач покояться один відносно одного. У загальному випадку можуть рухатись відносно води обидва човни. Якщо приймач рухається відносно середовища а джерело – наближається до приймача, то, послідовно застосовуючи наведені вище формули для випадку, коли джерело і приймач рухаються в один бік, одержимо: $V = V_0 \frac{1-u/c}{1-v/c}$. Якщо ж приймач наближається до джерела, а джерело віддаляється від приймача, то у цьому виразі знаки змінюються на протилежні.

При $u = v$ (джерело й детектор нерухомі один відносно одного) частота, виміряна детектором, співпадатиме з власною частотою джерела $V = V_0$.

Але якщо $u \neq v$, то ефект Доплера спостерігається, і при цьому зміна частоти залежить не від різниці $(u-v)$, а від самих величин u і v . Тому в даному випадку ефект Доплера дозволяє визначити не лише швидкість джерела відносно приймача, але і швидкість джерела і приймача відносно середовища. Це має широке технічне застосування, наприклад, ехолокація.

Ефект Доплера в оптиці. В оптичних явищах питання про розповсюдження хвиль є набагато складнішим, ніж розглянуте вище – в акустиці. Відомо, що світлові хвилі можуть розповсюджуватися у просторі, не заповненому ніякою речовиною (у вакуумі). Якщо дотримуватись точки

зору, згідно з якою вакуум заповнений середовищем – ефіром, відносно якого можна вимірювати швидкість джерела і приладу, то ефект Доплера для оптичних явищ повинен був би трактуватися так само, як і в акустиці. Ми прийшли б до двох різних формул, які відрізняються на величину другого порядку відношення (v/c). Для відносно швидкого руху Землі по її орбіті, відношення v/c не перевершує 10^{-4} . Відповідно, і відмінність результатів, розрахованих за цими формулами, для такого відношення v/c дуже мала і не перевищує 10^{-8} . Для більшості ж інших випадків, які можуть бути реалізовані на досліді, різниця ще менша. Тому ця відмінність результатів не може бути підтверджена безпосередніми спостереженнями. Проте вдалося, як відомо, провести оптичні досліди (наприклад, дослід Майкельсона), які є достатньо точними для того, щоб констатувати вказані малі відмінності, якби вони мали місце. Цими дослідом було доведено, що відмінність, очікувана з погляду уявлення про розповсюдження світлових хвиль у нерухомому ефірі, не має місця. Всі без виключення процеси протікають таким чином, що в них суттєву роль відіграє лише відносний рух джерела і приймача один по відношенню до одного. Таким чином, поняття абсолютного руху відносно вакууму не має фізичного змісту. Відповідно до цього і формули, що описують явище Доплера для електромагнітних хвиль, не повинні відрізнятися одна від одної для двох розглянутих вище випадків (джерело рухається – детектор покоїться і навпаки), тому що інакше ми, завдяки цьому явищу, мали б принципову можливість констатувати абсолютний рух системи у вакуумі, що суперечить принципу відносності.

Розглянемо приймач В, розташований у системі К, і джерело S, пов'язане із системою К', яка рухається відносно приймача вздовж осі x, причому приймач і джерело розташовані на лінії руху. Нехай частота джерела (у системі К') є V_0 . Потрібно визначити частоту ν , яка сприймається приладом В у системі К. Спостерігач відзначає в координатній системі, пов'язаній з ним, два моменти t_1 і t_2 і координати x_1 і x_2 , які відповідають положенню джерела в моменти випускання сигналу. Тривалість виділеної частини сигналу (за годинником у К-системі) дорівнює $\tau = t_2 - t_1$, а координата x_2 джерела буде рівною $x_2 = x_1 + v\tau$, де v – швидкість джерела.

Оскільки джерело віддалене від приладу, який фіксує сигнали, то моменти T_1 і T_2 початку і кінця дії виділеної частини сигналу на прилад відрізнятимуться від t_1 і t_2 , а саме: $T_1 = t_1 + \frac{a}{c}$, $T_2 = t_2 + \frac{a+vt}{c}$, де a – відстань між приладом і джерелом у момент t_1 . Таким чином, тривалість дії на прилад у системі К буде дорівнювати: $T = T_2 - T_1 = \tau \left(1 + \frac{v}{c}\right)$.

Яким же буде число коливань, що дійшли за цей час до приладу приймача? Оскільки джерело випускає за одну секунду ν_0 коливань (у

системі K'), то для оцінки повного числа коливань у виділеній частині сигналу треба знати тривалість її в системі K' . Ця величина буде рівною $\tau' = t_2' - t_1'$, де моменти t_2' і t_1' (кінця й початку виділеної частини сигналу) в системі K' . Її можна знайти за допомогою зворотного перетворення Лоренца для часу: $t_2' = \gamma \left(t_2 - \frac{v}{c^2} x_2 \right)$, $t_1' = \gamma \left(t_1 - \frac{v}{c^2} x_1 \right)$, $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Звідси $\tau' = t_2' - t_1' = \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \tau = \tau \sqrt{1 - v^2/c^2}$.

Отже, число тих коливань, які дійшли до приладу за час T дорівнює $N = \nu_0 \tau' = \nu_0 \tau \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Тому частота, яка сприймається детектором дорівнює:

$$\nu = \frac{N}{T} = \frac{\nu_0 \tau \sqrt{1 - v^2/c^2}}{\tau(1 + v/c)} = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}. \quad (6)$$

Абсолютно таку саму формулу отримаємо, якщо з системою K' пов'язати прилад, а з системою K – джерело. Щоб у цьому переконатися, достатньо використати формули перерахунку моментів часу при переході від K' системи до K системи і змінити знак швидкості на протилежний.

Якщо лінія, що сполучає джерело і прилад, складає деякий кут φ з напрямом швидкості переміщення, то аналогічні міркування приведуть до співвідношення $\nu = \frac{\nu_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + \frac{v}{c} \cos \varphi}$. При $\varphi = \frac{\pi}{2}$ знайдемо: $\nu = \nu_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$.

Отже, згідно з теорією відносності, ефект Доплера повинен мати місце і в тому випадку, коли напрямок розповсюдження світла є перпендикулярним до напрямку руху. Цей ефект має назву релятивістський поперечний ефект Доплера.

З методологічної точки зору при підготовці вчителя фізики важливо розглядати фізичні явища з позицій різних теорій. Тому потрібно проаналізувати ефект Доплера, використовуючи 4-вимірний коваріантний формалізм, уведений у СТВ. Для цього будемо розглядати фотон як релятивістську частинку, що має наступні характеристики: маса дорівнює нулю, швидкість дорівнює c , енергія $\varepsilon = \hbar\omega$, імпульс $p = \hbar\omega/c$, де $(\omega = 2\pi\nu)$.

Скористаємося (відомим студентам) поняттям хвильового вектора: $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \times \vec{n} = \frac{\omega}{c} \times \vec{n}$, де $\vec{n}$ – одиничний вектор напряму розповсюдження хвилі. Він, очевидно, співнаправлений з напрямом вектора імпульсу. Виразимо 4-вимірний імпульс фотона через хвильовий вектор [6]:

$$p^i = \left(\frac{\varepsilon}{c}, \vec{p} \right) = \left(\frac{\omega \hbar}{c}, \frac{\omega \hbar \vec{n}}{c} \right) = (k \hbar, k \hbar \vec{n}).$$

Якщо розділити цей вираз на сталу Планка $\hbar$, яка є інваріантом, то чотири величини, що залишилися, згідно з ознакою тензорності величини,

утворюють 4-вектор, який називається 4-вимірний хвильовий вектор:

$$k^i = (k^0, \vec{k}) = (\frac{\omega}{c}, \vec{k}).$$

Уведення 4-вимірного хвильового вектора фотона дозволяє описати розглянутий раніше ефект Доплера наступним чином. Нехай у K' системі монохроматична хвиля з 4-вимірним хвильовим вектором k^i розповсюджується в площині $x'y'$ під кутом θ' до осі x' . Тоді компоненти цього вектора в даній системі відліку дорівнюють

$$\begin{cases} k^{0'} = \frac{\omega'}{c}; k^{1'} = k' \cos \theta' = \frac{\omega'}{c} \cos \theta \\ k^{2'} = k' \sin \theta' = \frac{\omega'}{c} \sin \theta'; k^3 = 0. \end{cases}$$

За означенням 4-вектора компоненти 4-вимірного хвильового вектора перетворюються при переході до системи K за правилами прямих перетворень Лоренца:

$$\begin{cases} k^0 = \gamma(k^{0'} + k^{1'}v/c); k^1 = \gamma(k^{1'} + k^{0'}v/c); \\ k^2 = k^{2'}; k^3 = k^{3'} = 0; \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} \end{cases}$$

Оскільки $k^3 = 0$, то в системі K промінь, як і в системі K' , лежить у площині xu . Із виразу для нульової компоненти 4-вимірного хвильового вектора витікає вираз для частоти: $k^0 = \frac{\omega}{c} = \gamma \left(\frac{\omega'}{c} + \frac{v}{c} \frac{\omega'}{c} \cos \theta' \right)$, або $\omega = \frac{\omega' (1 + \frac{v}{c} \cos \theta')}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$, $v = \frac{v' (1 + \frac{v}{c} \cos \theta')}{\sqrt{1 - v'^2/c^2}}$. (7)

Якщо спостерігач віддаляється від джерела, то кут між напрямом хвилі і швидкістю K' системи відліку дорівнює π . Тоді $\omega = \omega' \frac{1 - v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \omega' \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}$.

Отже, вимірювана частота менша за частоту джерела. При зближенні джерела і приймача – навпаки: $\omega' \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$. Якщо ж $\theta' = \frac{\pi}{2}$ то $\omega = \omega' \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Це, вже згаданий раніше, релятивістський поперечний ефект Доплера, величина якого залежить від відношення v^2/c^2 . Цей ефект є чисто релятивістським і виникає виключно через відносність проміжків часу. Крім цього, він дуже слабкий, тому експериментально був виявлений значно пізніше повздовжнього (1938 р.). Його існування є одним з численних підтверджень СТВ.

Відмітимо, що з урахуванням $\omega = 2\pi\nu$ формули, одержані при квантово-релятивістському описанні світла, збігаються з формулами, що описують ефект Доплера, при розгляді його з хвильової точки зору.

На закінчення зазначимо, що ефект Доплера має не лише численне експериментальне підтвердження, але і одержав широке застосування в оптиці, акустиці, астрономії, медицині, а також використовується в дослідженні іоносфери радіохвильовими методами [4, 5]. Тому дуже доцільно запропонувати студентам відповідні теми курсових робіт.

Висновки. 1. Запропонована методика обґрунтування ефекту Доплера охоплює всі ключові аспекти цієї теми, не містить надмірної інформації і математичних ускладнень, істотно поглиблює і розширює знання студентів про відносність фізичних величин і тому, як показує власний досвід викладання фізики, досить легко сприймається студентами.

2. Використана коваріантна форма запису властивостей простору і часу, яка притаманна СТВ, більшою мірою, ніж існуючі методики, відповідає рівню сучасної теоретичної фізики і сприяє фундаменталізації фізичної освіти.

ЛІТЕРАТУРА

1. Трофимова Т. И. Краткий курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – М. : Высш.шк., 2006. – 352 с.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики : учебное пособие для вузов. В. 5 т. – Т. IV. Оптика / Д. В. Сивухин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 792 с.
3. Сусь Б. А. Незвичне бачення традиційних проблемних питань фізики : науково-методичне видання / Б. А. Сусь, Б. Б. Сусь. – К. : Просвіта, 2010. – 124 с.
4. Sceptic-Ratio науково-познавательный сайт Олега Акимова [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://sceptic-ratio.narod.ru/fi/Doppler-G.htm>.
5. Матвеев В. Н. Занимательная имитация специальной теории относительности средствами классической физики / В. Н. Матвеев, О. В. Матвеев. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 120 с.
6. Мороз І. О. Спеціальна теорія відносності : навчальний посібник (гриф МОН України лист №1/11-3525 від 11.05.11). / І. О. Мороз, В. С. Іваній, Р. І. Холодов. – Суми : Видавництво «МакДен», 2011. – 336 с.

РЕЗЮМЕ

Мороз І. А. Методические аспекты преподавания эффекта Доплера в системе подготовки учителя физики.

Рассматривается роль эффекта Доплера в формировании современных представлений об относительности движения и физических величин в системе подготовки учителя физики.

Приводятся сжатые исторические сведения об открытии Доплером отмеченного эффекта и объяснения им причины разного цвета звезд. Анализируются методические особенности рассмотрения эффекта Доплера в механике, оптике, специальной теории относительности.

Показано, что использование ковариантной формы записи свойств пространства и времени для представления в учебном процессе эффекта Доплера в большей степени, чем существующие методики, отвечает уровню современной теоретической физики и способствует фундаментализации физического образования в Украине.

Ключевые слова: эффект Доплера, частота, длина волны, превращения Лоренца, четырехмерные векторы.

SUMMARY

Moroz I. The methodological aspects of teaching Doppler effect in the system of physics teacher training.

The role of Doppler effect in shaping modern ideas about the relativity of motion and physical values in training of teachers of physics is revealed.

The brief historical information about the discovery of the Doppler effect and the explanation of the cause of different colors of stars are given. The methodological features of consideration of the Doppler effect in mechanics, optics, special relativity theory (ETS) are analyzed. In consideration of this effect in sound waves the author analyzes following cases: 1) the movement of the source relative to the medium; 2) motion detector with respect to the environment; 3) the source and detector lie relative to each other. It is proved that the motion of the source in the medium wave velocity relative to the device placed in this environment remains constant, and the frequency and wavelength are perceived by device change. If the movement of the receiver changes the wave velocity against it, and the wavelength remains unchanged. Thus, in the case of motion of the source or the detector to sound waves in the medium Doppler effect describes two different formulas that differ by the factor. In reciprocal movement source and detector of Doppler effect is also observed because the change in frequency does not depend on the difference in their speeds, and most of the velocity. Therefore, in this case, the Doppler effect determines not only the speed of the source relative to the receiver, but the speed of the source and the receiver relative to the medium.

Methodological study of the Doppler effect in optics is performed using the Lorentz transformation for points in time. From a methodological point of view in the preparation of teachers of physics is important to consider the physical phenomena from the standpoint of different theories. Therefore, the paper analyzes the Doppler effect as using 4-dimensional covariant formalism which is introduced into the ETS. Shown that the invariant form of recording the properties of space and time for submission to the learning process of the Doppler effect to a greater extent than existing methods, corresponds the modern level of theoretical physics and enhance fundamentalization of physical education in Ukraine.

Key words: Doppler effect, frequency, wave-length, transformation of Lorentz, 4-dimensional vectors.