

4. Касперський А.В., Кучменко О.М. Блочно-модульна система як засіб поглибленого вивчення фізики // Стратегічні проблеми формування змісту курсів фізики та астрономії в системі загальної середньої освіти: Матеріали науково-практичної конференції. – Львів: Видавничий центр Львівського національного університету імені Івана Франка, 2002. – С. 65 – 68.

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

Касперський Анатолій Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри загальної фізики НПУ імені М.П. Драгоманова.

*Наукові інтереси:* методика викладання фізики в середніх загальноосвітніх та вищих навчальних закладах.

Кучменко Олександр Миколайович – завідувач кабінету лекційних демонстрацій кафедри загальної фізики НПУ імені М.П. Драгоманова.

*Наукові інтереси:* методика викладання фізики в середніх загальноосвітніх та вищих навчальних закладах.

## **ПРИНЦИП БЛИЗЬКОДІЇ І МАГНІТНЕ ПОЛЕ ПОСТІЙНИХ СТРУМІВ У КУРСІ ФІЗИКИ ВИЩОГО НАВЧАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ**

**Олександр КОНОВАЛ**

Аналізуються способи обґрунтування рівняння Максвелла  $\text{rot}\vec{B} = \mu_0\vec{j}$ . Розглядається фізичний механізм генерації (породження) магнітного поля постійних струмів. Пропонується методика вивчення законів магнітного поля в контексті теорії відносності та близькодії.

Techniques of a substantiation of equation Maxwell  $\text{rot}\vec{B} = \mu_0\vec{j}$  are analyzed. The physical mechanism of generation of a magnetic field of direct currents is discussed. The technique of studying of laws of a magnetic field in a context of the theory of relativity and short-range is offered.

Рівняння Максвелла – основа класичної електродинаміки та наріжний камінь сучасної фізики. Електродинаміка – за сутністю своєю польова теорія, історично перша фізична теорія, що побудована на принципах близькодії.

При вивченні електромагнетизму ряд законів цього розділу фізики формулюються, незважаючи на польовий характер електродинамічних явищ, на основі уявлень далекодії (закон Біо-Савара, теорема про циркуляцію вектора магнітної індукції та співвідношення пов'язані з ними).

Очевидно, що всі властивості та закони магнітного поля, що виражені формулами (2), (3), (4), записані в інтегральній формі. Можна назвати їх кінематичними, оскільки ці формули просто описують властивості поля, зв'язують характеристики поля та величини, що описують переміщення заряджених частинок (ЗЧ). Вони не пояснюють чому і як виникає магнітне поле (МП), тут не розглядається природа МП та можливі механізми його виникнення (породження, генерації), а просто стверджується, що з струмами нерозривно зв'язане МП.

У наявних методиках вивчення властивостей магнітного поля постійного та квазістаціонарного струмів повністю відсутні спроби пояснити фізичну причину виникнення МП. Справді, хіба не дивно, що при викладанні електродинаміки, яка є однією з найточніших фізичних теорій і має такий широкий спектр експериментальних підтверджень та практичних застосувань, методисти спромоглися лише до тверджень виду “з рухом заряджених частинок зв'язане магнітне поле”, “навколо рухомих зарядів

(струмів) існує магнітне поле". Струм переносу  $i = \frac{dq}{dt}$ , або густина струму  $\vec{j}(\vec{r}')$  локалізовані в одних точках простору, а МП існує в інших точках простору. Наявні методики навчання нічого не говорять про те, як виникає МП, яка фізична причина появи МП у віддалених від струмів переносу точках простору. Такі методичні підходи до вивчення властивостей магнітного поля постійних струмів невимушено формують уявлення про далекодію.

Тому існує потреба методичного аналізу способів обґрунтування та пояснення рівняння:

$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} \quad (1)$$

У навчально-методичній літературі існують наступні способи доведення і пояснення рівняння (1).

1. Найбільш поширений і простий спосіб одержання рівняння (1) полягає в використанні теореми про циркуляцію вектора  $\vec{B}$  [1, 252], [2, 146], [5, 35], [7, 192]:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 i \quad (2)$$

та поширенні її на випадок довільного розподілу об'ємних струмів, що характеризуються об'ємною густиною струму  $\vec{j}(\vec{r})$ . Тобто теорема (2) в такому випадку набуває вигляду:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} \quad (2')$$

Сама теорема (2) виводиться на основі класичного закону Біо-Савара для лінійних струмів, звичайно, тільки для достатньо довгого провідника, по якому протікає постійний струм силою  $i$ ):

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{[d\vec{l} \cdot \vec{R}]}{R^3} \quad (3)$$

де  $id\vec{l}$  - елемент струму,  $\vec{R}$  - радіус-вектор, проведений від елемента струму в дану точку поля. Узагальнення (2) на довільний розподіл постійних та квазістаціонарних струмів зводиться до традиційного: як показує досвід (або: як може бути показано...), теорема (2) справедлива й для будь-якого розподілу постійних струмів [1, 251], [2, 140], [3, 221].

2. Другий спосіб обґрунтуванні (1) полягає у безпосередньому знаходженні операції ротора від індукції магнітного поля  $\vec{B}(\vec{r})$ , яке обчислюється із закону Біо-Савара для довільного розподілу об'ємних струмів в інтегральній формі [1, 254], [6, 131]:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V'} \frac{[\vec{j}(\vec{r}') \vec{R}]}{R^3} dV' \quad (4)$$

Однак, обґрунтування рівняння  $\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$  таким способом має досить формальний характер.

По-перше, вважається, що густина струму  $\vec{j}(\vec{r}')$  у кожному елементарному об'ємі  $dV'$  не залежить від МП, яке створюється іншими  $\vec{j}(\vec{r}')dV'$  даного розподілу струмів. Як

закон  $\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{[\vec{j}(\vec{r}')\vec{R}]}{R^3} dV'$ , можна вважати узагальненням дослідних фактів, якщо з об'ємними струмами не проводилися експерименти.

І по-друге, лінійний елемент струму  $id\vec{l}$  як окремих і незалежний об'єкт, як окрему фізичну структуру неможливо реалізувати. Тоді виникло запитання: як же вдалося сформулювати закон Біо-Савара на базі такого скромного й неточного експериментального матеріалу? Створюється враження, що закон Біо-Савара сформульований, щоб пояснити хоча б взаємодію в нерелятивістському наближенні двох рухомих заряджених частинок [3, 219].

Нами запропонована методика навчання теми "Магнітне поле", в якій розкривається релятивістська природа МП, і як наслідок, одержуємо і вираз для закону Біо-Савара в релятивістській формі, формулу Ампера, формули перетворення компонент електромагнітного поля, вираз для сили Лоренца, формулу (2) (8, 9, 10). Таким чином, знаходять належне обґрунтування основні формули МП постійних струмів на засадах генералізації знань навколо принципу відносності. Ця інноваційна методика ґрунтується, насамперед, на фундаментальних ідеях А. Ейнштейна щодо способів пізнання та навчання.

Структура й методики навчання, на наш погляд, повинні відповідати методології сучасної фізики. Це означає, зокрема, що структура навчання будь-якого розділу фізики має бути такою: а) наявність невеликої кількості справді фундаментальних дослідних фактів. Вони дають змогу сформулювати принципи фізичної теорії; експеримент, за своєю суттю, ніколи не може бути точним, і в той же час не існує логічного шляху від експериментальних фактів до теоретичного принципу. Тому ґрунтуючись на невеликій кількості добре перевірених принципів, слід розглядати та аналізувати адекватні моделі, що допускають точний розв'язок для виявлення основних закономірностей відповідної сукупності явищ; б) сама фізична теорія; в) наслідки теорії та вся сукупність експериментальних фактів, які описуються в рамках даної теорії; г) можливі гіпотетичні ситуації, ще не розв'язані проблеми, експериментально не перевірені чи не поставлені взагалі, дослідницькі задачі.

Аналіз властивостей електромагнітного поля рівномірно рухомої ЗЧ допоміг дійти висновку (в рамках класичної електродинаміки), що тільки величини  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  та  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  є фізичною причиною появи, відповідно, магнітного та електричного полів (11).

3. Спосіб, реалізований в підручнику академіка І.Є. Тамма [4]. Шляхом математичних перетворень, закон (4) можна подати у вигляді:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}, \tag{5}$$

де  $\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{j}(\vec{r}') dV'}{R}$  – векторний потенціал.

Далі, використовуючи формулу векторного аналізу  $\text{rot} \vec{B} = \text{rot} \text{rot} \vec{A} = \nabla \cdot \text{div} \vec{A} - \nabla^2 \vec{A}$  та умову калібровки вектор-потенціалу стаціонарного МП  $\text{div} \vec{A} = 0$ , одержуємо:

$$\text{rot} \vec{B} = -\nabla^2 \vec{A} \tag{6}$$

і нарешті порівнюючи (7) та (8) приходимо до рівняння (1).

4. Можна запропонувати й інший спосіб, який оснований на певній комбінації раніше описаних способів.

Неважко показати, що  $\frac{[\vec{j}\vec{R}]}{R^3} = \text{rot}_P \left( \frac{\vec{j}}{R} \right)$ , де індекс  $P$  означає, що операція ротора береться за координатами точки поля. Тоді маємо:

$$\text{rot} \frac{[\vec{j}\vec{R}]}{R^3} = \text{rot} \text{rot}_P \left( \frac{\vec{j}}{R} \right) = \nabla \cdot \text{div}_P \left( \frac{\vec{j}}{R} \right) - \nabla^2 \frac{\vec{j}}{R} \quad (7),$$

а інтеграл по за об'ємом струмів від величини (7) дорівнює:

$$-\int_{V'} \vec{j} \nabla^2 \frac{1}{R} dV' - \int_{V'} \nabla_P \cdot \text{div}_P \frac{\vec{j}}{R} dV' = 4\pi \int_{V'} \vec{j} \cdot \delta(R) dV' - \nabla_P \int_{V'} \text{div}_P \frac{\vec{j}}{R} dV'$$

Враховуючи співвідношення  $\nabla^2 \left( \frac{1}{R} \right) = -4\pi\delta(R)$  [5, 907] і  $\int_{V'} \text{div}_P \frac{\vec{j}}{R} dV' = 0$ ,

невимушено отримуємо (1).

Створюється враження, що всі способи обґрунтування рівняння  $\text{rot}\vec{B} = \mu_0\vec{j}$  мають надто формальний, штучний, а інколи й непереконливий характер. Усі вони потребують значної кількості формул векторного аналізу та векторної алгебри, за якими важко простежити фізичну сутність явища. Єдиним і, можливо, вирішальним фактором прийнятності цих способів є експериментальне підтвердження висновків математичного формалізму магнетостатики. Зокрема, розв'язок рівняння Пуассона (7) в ділянці простору поза межами струмів провідності дає значення  $\vec{H}$ , які відповідають дійсності. У цих точках  $\vec{H} \neq 0$ , а  $\vec{j} = 0$ . Тоді закономірно виникає питання: так чим і як створюється там МП і як це може бути? Відповіді на подібні питання математичний формалізм не дає. Можливо, бездоганного способу обґрунтування (1) і не існує, оскільки відсутній логічний шлях від дослідних фактів якісного рівня до теоретичного рівняння. "Рівняння Максвела являють собою приклад фундаментального закону, явно вгаданого, а не «виведеного» в риторичному смислі цього слова, із експериментальних даних." [13, 319].

Зробимо ряд зауважень щодо термінології.

Будь-яке векторне поле  $\vec{a}$  є вихровим тоді і тільки тоді, коли  $\text{rot}\vec{a} \neq 0$ . Але в точках поза струмами  $\text{rot}\vec{B} = 0$ , значить у цих точках поле не вихрове, а потенціальне. Хоча в деяких підручниках, коли говорять про вихрове МП, як завжди, мають на увазі МП у просторі поза струмами – замкнутість силових ліній вектора  $\vec{B}$ . Але в просторі поза струмами магнітне поле-потенціальне, не вихрове, хоч силові лінії індукції МП і замкнені.

Часто стверджується, що МП створюється (породжується) струмами, тобто слід це розуміти так, що в тих частинах простору, де немає струмів, магнітного поля теж немає і не може бути. Але досвід показує протилежне. МП якраз існує у тих точках поля, де струми, постійні чи змінні, відсутні. Але як же можна тоді говорити про породження МП струмами в контексті близькодії, якщо в точках, де відсутні струми, МП не дорівнює нулю. Природно виникає питання: як, чим, яким чином пояснити існування МП поза струмами? І як слід коректно та адекватно формулювати питання методики вивчення МП та опису властивостей МП?

По-перше, наші дослідження показали, що МП – це релятивістський феномен [8, 9]. По-друге, показано, що причиною виникнення МП у випадках рівномірного руху заряджених частинок при будь-якій величині швидкості їх існує тільки струм зміщення (12). При цьому густина струму зміщення дорівнює:

$$\vec{j}_{zm} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \left[ \frac{3q\nu(1-\beta^2)(x-\nu t)^2}{4\pi\{(x-\nu t)^2 + \rho^2(1-\beta^2)\}^{3/2}} - \frac{q\nu(1-\beta^2)}{4\pi\{(x-\nu t)^2 + \rho^2(1-\beta^2)\}^{3/2}} \right] \vec{i} + \frac{3q\nu y(1-\beta^2)(x-\nu t)}{4\pi\{(x-\nu t)^2 + \rho^2(1-\beta^2)\}^{3/2}} \vec{j} + \frac{3q\nu z(1-\beta^2)(x-\nu t)}{4\pi\{(x-\nu t)^2 + \rho^2(1-\beta^2)\}^{3/2}} \vec{k} \quad (8)$$

де  $\vec{r}$  – радіус-вектор, проведений із миттєвого положення ЗЧ у дану точку поля з координатами  $(x, y, z)$ ,  $\vec{r} = (x-\nu t)\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$ ,  $\beta = \frac{\nu}{c}$ ,  $\nu$  – швидкість руху протона,  $c$  – швидкість світла у вакуумі,  $\rho^2 = y^2 + z^2$ .

Таким чином, кожна рухома ЗЧ створює, породжує МП струмами зміщення. Тобто в кожній точці простору навколо провідника з постійним струмом МП виникає, бо в цій просторово-часовій точці існує змінне (внаслідок руху ЗЧ) електричне поле, яке й породжує вихор магнітного поля:  $rot\vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ . Тому і МП провідника з постійним чи квазістаціонарним струмом породжується тільки струмами зміщення. Очевидно, що цей результат повинен знайти своє висвітлення в дидактиці фізики.

І якщо ми хочемо знайти фізичний механізм чи пояснити фізичну причину появи МП постійних струмів (а не просто констатувати існування МП), то альтернативи струмів зміщення в рамках класичної (не квантової) електродинаміки не існує [12]. Таке пояснення відповідає і сучасній фізичній парадигмі й дає результати, що узгоджуються з експериментальними даними. А так званий струм переносу – це формальна величина, що не несе ніякого фізичного навантаження, але через яку зручно виражати властивості та дію магнітного поля, бо вона (величина  $\frac{dq}{dt} = i$ ) легко контролюється в дослідах.

Найбільш прозоро поняття сили струму, можливо вперше, сформувалося при аналізі явища електролізу.

Тоді ця величина була корисною і наочною. Принцип роботи приладів, з допомогою яких вимірювалася сила струму, оснований на дії сили Ампера (сили Лоренца) на відрізок провідника із струмом у МП. Рухома ЗЧ створює магнітне поле, й рухома ЗЧ “відчуває” силу з боку МП, але це різні прояви властивостей ЗЧ. А ми хочемо явище породження МП подати через ту ж просту експериментальну величину, що й силову дію на сукупність рухомих ЗЧ з боку МП.  $\frac{dq}{dt} = i$  – це величина заряду електронів, що в дану мить проходить через поперечний переріз провідника. Але ж магнітне поле в довільній точці простору породжується не тільки (і не стільки) цими електронами, а всім сукупним внеском величин  $\frac{d\vec{D}}{dt}$  кожного з них у даній точці простору.

Для кращого розуміння механізму “проходження” струмів зміщення, розподілу в просторі векторного поля  $\vec{i}$ , таким чином, з метою більш детального пояснення властивостей поля струму зміщення  $\vec{j}_{zm}$  нами змодельоване поле.

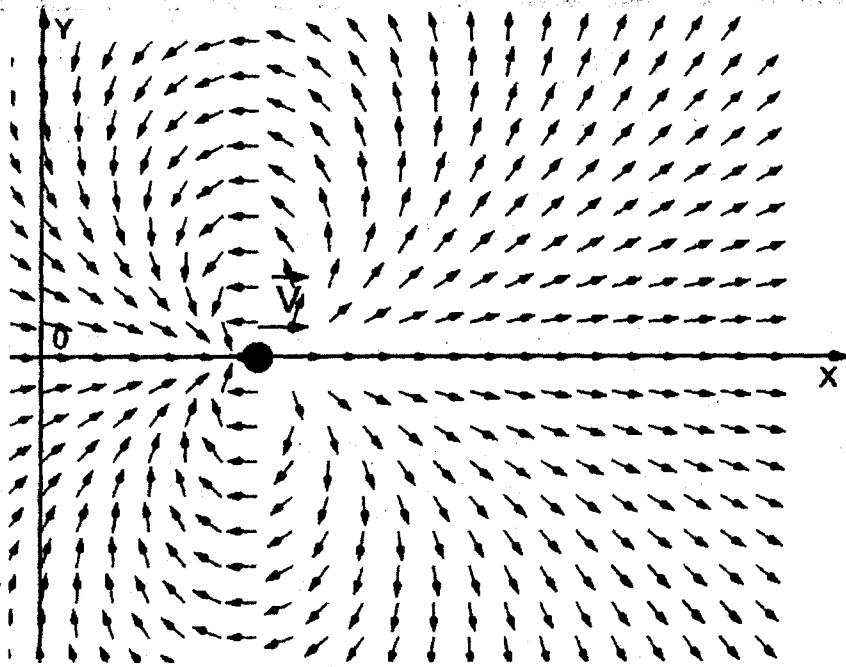


Рис.1. Розподіл поля  $\vec{J}_{zm}$  рівномірно рухомої ЗЧ у площині XOY.

За допомогою комп'ютерних імітаційних моделей можна продемонструвати, а отже й уявити, в деяких межах основні властивості об'єкта, що вивчається.

Так, зокрема, із рис.1 видно, що в будь-якій точці площини, що перпендикулярна  $v$  і яку в дану мить перетинає заряджена частинка, вектор  $\vec{J}_{zm}$  направлений протилежно осі OX

$$\vec{J}_{zm} = -\frac{qv}{4\pi \cdot \sqrt{1-\beta^2} \cdot \rho^3} \cdot \vec{i}$$

У кожній точці простору внаслідок руху заряджених частинок буде змінюватися вектор  $\vec{D}$ , тому

$$\text{rot}\vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (9)$$

Зауважимо, що фундаментальне рівняння (9) слід розглядати як наслідок властивостей електромагнітного поля рівномірно рухомої зарядженої частинки. Інтегруючи рівняння (9), одержуємо:

$$H_z(x, y, z, t) = \frac{qv \cdot (1-\beta^2) \cdot y}{4\pi \cdot \left\{ (x-vt)^2 + \rho^2 \cdot (1-\beta^2) \right\}^{3/2}} \quad (10)$$

$$H_y(x, y, z, t) = -\frac{qv \cdot (1-\beta^2) \cdot z}{4\pi \cdot \left\{ (x-vt)^2 + \rho^2 \cdot (1-\beta^2) \right\}^{3/2}} \quad (11)$$

$$\vec{H} = \frac{q \cdot [\vec{v}\vec{r}] \cdot (1-\beta^2)}{4\pi r^3 (1-\beta^2 \sin^2 \theta)^{3/2}} \quad (12)$$

де  $\sin^2 \theta = \frac{\rho^2}{r^2}$ ,  $\beta = \frac{v}{c}$ ,  $\theta$  - кут між  $\vec{r}$  та  $v$ ,  $\rho^2 = y^2 + z^2$ . Формула (12) при  $v \ll c$

збігається з загальновідомим виразом для напруженості магнітного поля, яке зв'язане з рухомою зарядженою частинкою [11].

Із збільшенням швидкості руху зарядженої частинки не тільки електромагнітне поле концентрується в площині, що перпендикулярна  $\vec{v}$  і проходить через цю частинку, а й поле струмів зміщення зосереджене в основному в цій площині (поле  $\vec{j}_{zm}$  сплющується у напрямку руху заряджених частинок).

Чи можна на початкових етапах вивчення МП пояснити й релятивістську природу МП, і механізм виникнення та описати всі властивості МП?

На ці питання нині можна дати однозначну, несуперечливу й позитивну відповідь (що узгоджена з основними положеннями сучасної фізичної парадигми) тільки для випадку рівномірного й прямолінійного руху ЗЧ. Тобто для постійного струму, що проходить по прямолінійному провіднику довільної довжини.

Інколи для обґрунтування (1) розглядається модель довгого лінійного струму з використанням формули (2) :

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \int_{S(L)} \text{rot} \vec{B} \cdot d\vec{S} = \mu_0 \int_{S_0} \vec{j} d\vec{S},$$

але,  $\int_{S(L)} \text{rot} \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_{S_0} \text{rot} \vec{B} \cdot d\vec{S} + \int_{S(L)-S_0} \text{rot} \vec{B} \cdot d\vec{S}$ , тобто тільки при умові  $\int_{S(L)-S_0} \text{rot} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$  ми

одержуємо рівняння (1). Іншими словами,  $\oint_L \vec{B} d\vec{l}$  поза струмами провідності дорівнює

нулю, але  $B \neq 0$ . Якщо взяти контур  $L$ , що не охоплює струм, то  $\int_S \vec{j}_{zm} \cdot d\vec{S}$  по поверхні,

яка спирається на  $L$ , не дорівнює нулю: різні контури, різні значення  $\int_S \vec{j}_{zm} \cdot d\vec{S}$ , але

$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = 0$ . Тобто  $\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 i$  – це просто одна з особливостей МП. Теорема (2) описує

важливу властивість МП, але про природу МП, механізм генерації МП ця теорема нічого сказати не може. Для знаходження індукції  $\vec{B}$  необхідно використовувати локальний,

польовий, закон  $\text{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ , але в практичних розрахунках з локальною формою законів

працювати дуже незручно. Виникає потреба так пер формулювати закон  $\text{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ , який

правильно відображає механізм породження МП, щоб оперувати величинами й параметрами, що контролюються в експерименті:  $i, \vec{j}$ .

Проведений науково-методичний аналіз навчально-методичної літератури з обґрунтування рівняння Максвелла  $\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$  дозволяє:

- 1) детально описати фізичний механізм породження магнітного поля постійних струмів;
- 2) запропонувати методичну концепцію вивчення законів і властивостей магнітного поля постійних струмів у контексті теорії відносності;
- 3) провести моделювання струмів зміщення рівномірно рухомої зарядженої частинки і показати, що всі властивості МП постійних струмів знаходять повний опис у рамках запропонованої методики. Оскільки висновки рівнянь (1) та (7) знаходять безліч експериментальних підтверджень, то із фізично коректної концепції струмів зміщення необхідно математично формально й строго вивести і закон (3), і  $\text{rot} \vec{H} = \vec{j}$ , і теорему (2).

#### БІБЛІОГРАФІЯ

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 1983. – 463 с.

2. Иродов И. Е. Основные законы электродинамики. – М., 1991. – 287 с.
3. Иродов И. Е. Электромагнетизм. Основные законы. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 352 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том III.: Электричество. – М.: Наука, 1977. – 688 с.
5. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1966. – 624 с.
6. Левич В.Г. Курс теоретической физики. – М.: Наука, 1969. – 912 с.
7. Пановский В., Филипс М. Классическая электродинамика. – М.: ГИФМЛ, 1963. – 432 с.
8. Парселл Э. Электричество и магнетизм: Учебное руководство: Пер. с англ./Под ред. А.И. Шальникова и А.О. Вайсенберга. – 3-е изд., испр. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
9. Коновал О.А. Особливості методики формування поняття “магнітне поле”//Фізика та астрономія в школі. – 2002. - № 3. – С. 24–26.
10. Коновал О.А. Інноваційна методика вивчення теми “Магнітне поле” в фізико-математичних класах середніх навчальних закладів//Вересень. – 2002. – №4 (22). – С.66–71.
11. Коновал О.А. Закон Біо-Савара в релятивістській формі //Наукові записки. – Серія: Педагогічні науки. – Кіровоград: РВЦ КДПУ ім. В. Винниченка. – 2002. – Вип. 42. – С. 159–165.
12. Коновал О.А. Механізм виникнення магнітного поля при русі протонів//Збірник науково-методичних праць “Теорія та методика вивчення природничо-математичних і технічних дисциплін”. Наукові записки Рівненського державного гуманітарного університету. – Рівне: РДГУ, 2002. – Випуск 4. – С. 123–125.
13. Коновал О.А. Струми зміщення і магнітне поле постійних струмів//Наукові записки: Збірник наукових статей Національного педагогічного університету ім. М.П. Драгоманова /Укл. П.В. Дмитренко, Л.Л. Макаренко, В.П. Сергієнко. – К.: НПУ, 2002. – Випуск 48. – С. 150–157.
14. Шапиро И.С. К истории открытия уравнений Максвелла//Успехи физических наук. – 1972. – Т. 108. – вып.2. – С. 319 – 333.

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

Коновал Олександр Андрійович – завідувач кафедри фізики Криворізького державного педагогічного університету, кандидат фізико-математичних наук, доцент.

*Наукові інтереси:* дидактика фізики середньої та вищої школи.

## **ЕВОЛЮЦІЯ ВІДКРИТТЯ ЗАКОНУ ЗБЕРЕЖЕННЯ І ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ**

**Дмитро КОСТЮКЕВИЧ, Микола САДОВИЙ**

У статті узагальнено історичні погляди на розвиток і становлення закону збереження та перетворення енергії.

The historical views on the development, low formation and the transformation of energy are generalized in the article.

Атомно-молекулярне вчення про матерію супроводжувало фізичні й хімічні дослідження, починаючи з Левкіппа та Демокріта. Уявлення про теплоту, як форму руху дрібних невідчутних частинок матерії, висловили ще в XVII ст. Ф.Бекон, Р.Декарт, І.Ньютон, Р.Гук та інші. Цю ідею розробляв і відстоював М.В.Ломоносов, проте більшість учених схилилися до ідеї теплороду. Успіхи експериментальної теплофізики XIX ст., і насамперед калориметрії, були також на користь теплороду. Але в XIX ст. було доведено зв'язок теплоти й механічного руху. Факт перетворення тертя у тепло був відомий з давніх часів. Прихильники теплоти вбачали в цьому явищі аналогію електризації тіл. Тертя сприяє вилученню теплороду з тіла. 1798 р. Б.Томпсон (1753–1814), який 1790 р. став графом Б.Румфордом, у мюнхенських військових майстернях спостерігав виділення великої кількості тепла під час свердлення гарматних стволів. Це дало змогу провести ряд експериментів. Один з них був таким. У висвердлений канал вставили тупе свердло такого