

УДК 371.134:530.145(07)

**Микола Садовий,**

доктор педагогічних наук, професор,  
проректор з наукової роботи  
Кіровоградського державного педагогічного  
університету імені Володимира Винниченка

**Наталія Подопригора,**

кандидат педагогічних наук, доцент,  
докторант Кіровоградського державного  
педагогічного університету імені

Володимира Винниченка;

**Олена Трифонова,**

кандидат педагогічних наук, старший викладач  
Кіровоградського державного педагогічного  
університету імені Володимира Винниченка

## **ВИВЧЕННЯ СИМЕТРІЙ МАЙБУТНІМИ ВЧИТЕЛЯМИ ФІЗИКИ**

*Стаття присвячена проблемі висвітлення властивостей симетрії у єдності із законами збереження і інваріантності, як основи будь-якої фізичної теорії щодо спостережуваних фізичних характеристик систем, у комплексно-системній підготовці майбутнього вчителя фізики.*

**Ключові слова:** симетрія, інваріантність, закони збереження, теоретична фізика, майбутній вчитель фізики.

*Статья посвящена проблеме изучения свойств симметрии в единстве с законами сохранения и инвариантности, как основы физической теории относительно наблюдаемых физических характеристик систем, в процессе комплексно-системной подготовки будущих учителей физики.*

**Ключевые слова:** симметрия, инвариантность, законы сохранения, теоретическая физика, будущий учитель физики.

*The article is devoted to the study of the properties of the symmetry in the laws of conservation and of invariance as a basis for the physical theory on observable physical characteristics of systems in the complex system of preparing future teachers of physics.*

**Key words:** symmetry, invariance, conservation laws, theoretical physics, the physics teacher.

Актуальними завданнями сучасної дидактики фізики як педагогічної науки є всебічне наукове обґрунтування процесу вдосконалення системи неперервної фізичної освіти та пошук шляхів і ефективних засобів

практичного використання результатів теоретичних досліджень. Це в свою чергу ставить відповідні вимоги до рівня підготовки майбутніх учителів фізики.

Загальний курс фізики, теоретична фізика та методика навчання фізики у циклі дисциплін природничо-наукової, науково-предметної та професійно-педагогічної підготовки студентів напряму 6.0402030 Фізика\* є провідними складовими в системі фахової підготовки майбутніх вчителів фізики. В курсі загальної фізики студенти знайомляться з експериментальним методом дослідження фізичних явищ і процесів природи, аналізом, синтезом, систематизацією спостережуваних результатів фізичного експерименту щодо формулювання феноменологічних закономірностей фізики як науки. У теоретичній фізиці об'єкти дослідження залишаються тими ж але студенти знайомляться з теоретичним методом їх пізнання: абстрагуванням, ідеалізацією, математичним моделюванням фізичних явищ і процесів, узагальненням і систематизацією теоретичних знань. Методика навчання фізики на основі синтезу досягнень дидактики та педагогіки у проекції на конкретні завдання та мету шкільного курсу фізики забезпечує майбутнього вчителя дієвими механізмами організації та управління навчально-пізнавальним процесом з фізики. Отже, комплексно-системне навчання студентів фізиці є запорукою якісної підготовки бакалаврів за відповідною освітньо-кваліфікаційною характеристикою фахівця.

Одним з напрямків реформування фізичної освіти в школі та ВНЗ стає посилення її методологічної спрямованості. Необхідність цього зумовлена не лише прогресом фізики як науки, але й корінними змінами в характері наукових знань, самому процесі пізнання і співвідношення знання і пізнання. Виникає потреба у тому, щоб наука сприймалась суб'єктом навчання не як перелік відкриттів чи сукупність формул, а формувала його спосіб мислення в процесі пізнання навколишнього світу. Рівень сформованості у майбутніх вчителів фізики сучасного способу мислення в значній мірі визначається тим, як вони засвоїли фундаментальні фізичні поняття, закони, теорії, принципи. Завдяки широкому спектру властивостей і функцій фундаментальних понять в науці їх формування набуває визначальних рис у структурі змістової компоненти методики навчання фізики. Фундаментальне поняття є тією дидактичною одиницею, досліджуючи процес формування якої можна визначити необхідні дидактичні умови підвищення якості навчання, формування науково-теоретичного способу мислення [1].

На нашу думку, варто сформувати у майбутніх учителів фізики цілісне уявлення про фізику як науку на основі вивчення системи фундаментальних понять, одним з яких є симетрія.

Отже, метою нашого дослідження є висвітлення властивостей симетрії у єдності із законами збереження і інваріантності, як основи будь-

якої фізичної теорії, щодо спостережуваних фізичних характеристик систем у комплексно-системній підготовці майбутнього вчителя фізики.

Вивчення основ сучасної фізики та формування в суб'єктів навчання науково-теоретичного способу мислення розглядалися в роботах та дисертаційних дослідженнях А. Ф. Баранова, О. І. Бугайова, С. У. Гончаренка, Ю. Е. Дурасевича, Л. Я. Зоріної, Н. М. Зверєвої, В. Р. Ільченко, Л. В. Косолапової, Є. В. Коршака, О. І. Ляшенка, В. Н. Маркова, В. В. Мултановського, Р. Е. Нудельмана, А. А. Пінського, В. Г. Розумовського, О. С. Руденка, О. В. Сергєєва та ін. [1].

О. І. Бугайов, Г. Ф. Бушок, С. У. Гончаренко, Б. С. Колупаєв, І. М. Кучерук, М. Т. Мартинюк, Л. І. Осадчук, В. П. Сергієнко, Б. А. Сусь, М. І. Шут в основу методики навчання фізики у вищій школі поклали: концепцію цілісного відображення науки в навчальному процесі; структуру знань, методологію і технічні засоби специфічної діяльності в даній галузі; дидактичні принципи педагогіки вищої школи; психологічну тезу про те, що прищеплення необхідних якостей особистості забезпечується обов'язковим залученням її до відповідної педагогічної діяльності. Специфічні ознаки формування фізичних знань з квантової фізики із урахуванням співвідношення теоретичного та емпіричного, дуалістичного й гіпотетичного, дискретного та неперервного розглянуті Г. М. Голіним, Л. Я. Зоріною, О. І. Ляшенком, О. В. Сергєєвим та іншими дослідниками [8].

Окремо проблемі вивчення фундаментальних понять присвятили свої праці: Б. Є. Будний [1] (формування в учнів системи фундаментальних фізичних понять), В. В. Мултановский [4] (прояви симетрії у класичній механіці), І. З. Ковальов [2] (симетрії в курсі фізики середньої школи), О. А. Коновал [3] (принцип фундаменталізації в електродинаміці, але не з позицій симетрії) та ін.

Вивчення досвіду роботи колег, щодо висвітлення симетрії у теорії та методиці навчання фізики, до вирішення цієї проблеми ми підійшли комплексно. Нами вже досліджувались прояви симетрії в окремих явищах фізики [6; 7; 8]. В даній статті ми пропонуємо розглянути цілісний підхід з вивчення симетрії як одного з вибраних питань теоретичної фізики.

Поняття «симетрія» є фундаментальним, що дає змогу досліджувати математичні моделі будь-яких фізичних об'єктів та виявити їх загальні властивості. *Симетрія* – це єдність збереження і зміни, інваріантності і перетворення. Водночас, симетрія є більш загальною властивістю фізичного об'єкту, ніж інваріантність.

Варто показати студентам й інші риси симетрії – це загальна властивість фізичних об'єктів; має різні форми (симетрія речей, властивостей, відношень тощо); органічно пов'язана з принципами збереження.

*Принципи збереження* – це принципи збереження речей чи їх певних характеристик, або властивостей чи відношень. Принципів збереження в

фізиці багато, а тому їх намагаються класифікувати певним чином. Найбільш перспективна класифікація законів збереження основана на властивостях симетрії (табл. 1), бо вони строго і однозначно пов'язані: кожній формі симетрії відповідає певний клас законів збереження. Студентам варто наголосити, що чим сильніші взаємодії, тим симетричніші вони. Є сильні взаємодії, які не порушують всі перелічені вище симетрії (за винятком не названих). Електромагнітні взаємодії порушують закон збереження ізотопічного спіну. Слабкі взаємодії порушують збереження парності, дивності, ізоспіну, комбінованої парності тощо. Гравітаційні взаємодії поки що є мало дослідженими. Додатково суб'єктам навчання слід виділити принципи відносності класичної фізики; принцип відносності Ейнштейна; закон збереження симетричності; принцип метричної інваріантності – незалежність законів від вибору одиниць вимірювання; принцип еквівалентності. Крім того, слід виділити перетворення, що не ведуть до інваріантності. Серед них виділяють зміну масштабів; обертання, прискорений рух тощо.

Таблиця 1

## Класифікація принципів збереження

Форма симетрії	Принцип інваріантності	Закон збереження
Однорідність часу	Інваріантність при трансляції в часі	Енергії
Однорідність простору	Інваріантність при трансляції в просторі	Імпульсу
Ізотропність простору	Інваріантність відносно поворотів в просторі	Моменту імпульсу
Симетрія ЕМ – потенціалів чи квантово-механічної фази	Інваріантність характеристик ЕМ – поля чи хвильової функції	Електричного заряду
Дзеркальна симетрія	$P$ -інваріантність (інваріантність $n$ – простору)	$P$ -парності
Відбивання часу	$T$ -інваріантність	$T$ -парності
Симетрія зарядового спряження	$C$ -інваріантність	$C$ -парності
Дзеркальна і часова інваріантність	$CP$ -інваріантність	$CP$ -парності
Симетрія відбивання часу і зарядова симетрія	$CT$ -симетрія	$CT$ -парність
Симетрія зарядова і дзеркальна	$PT$ -симетрія	$PT$ -парність
Симетрія $CPT$	$CPT$ -інваріантність	$CPT$ -парність
Симетрія відносно перестановки частинок	Принципи тотожності	Типи симетрії хвильової функції
Симетрія взаємодій	Принципи взаємоперетворення	Закони збереження взаємодій

Для вивчення симетрії ми пропонуємо за основу обрати основні властивості простору і часу по відношенню до симетрій різного типу (за В. В. Мултановським) та отримати закони збереження в нерелятивістській механіці. Для того, щоб розкрити сутність питання ми поряд із класичним підходом до отримання законів збереження (наслідків основних теорем механіки про зміну: імпульсу, моменту імпульсу, кінетичної енергії) пропонуємо вказати на можливість їх отримання, враховуючи симетрії простору і часу (однорідність простору і часу, ізотропність простору [4]).

Це, на нашу думку, є більш перспективним підходом адже симетрія є фундаментальним поняттям і не є наслідком феноменологічного узагальнення експериментальних спостережень, що систематизовані у законах Ньютона.

Виходячи з вище сказаного, ми пропонуємо вивчати зі студентами закони збереження в нерелятивістській механіці та їх зв'язок з симетріями простору і часу у наступній послідовності.

Для того, щоб розкрити сутність питання «закони збереження в нерелятивістській механіці та їх зв'язок з симетріями простору і часу» необхідно відповісти на наступні запитання: дати означення симетрії – однорідності й ізотропності простору, однорідності часу; показати як одержуються закони збереження в механіці з симетрії простору і часу; розглянути класифікацію принципів збереження; висвітлити закони збереження в мікросвіті та їх зв'язок із симетріями простору-часу.

Простір і час, а також їх геометрична модель мають властивості симетрії. Студентам відомо, що простір є однорідним і ізотропним, а час – однорідний. В той же час, симетрія – це здатність тіл, процесів, явищ, взаємодій зберігатись або зберігати певні властивості при виконанні над ними певних процесів перетворення. Таким чином, поняття симетрії містить в собі два моменти: збереження і перетворення, перетворення і збереження. Тому однорідність і ізотропність простору і однорідність часу є симетріями простору і часу.

*Однорідність простору* – це симетрія фізичних процесів і законів відносно трансляції симетрії в просторі (трансляція тіла чи системи тіл). Аналогічно, *ізотропність простору* є симетрія відносно правила повороту системи, а *однорідність часу* – симетрія відносно перетворення-трансляції системи в часі. Вказані типи симетрії зв'язані з принципом відносності Галілея – принципом фізичної рівноправності всіх інерціальних систем відліку. Як відомо: закони класичної механіки в усіх інерціальних системах відліку (ІСВ) однакові. Отже, жодним механічним дослідом в ІСВ не можна виявити рухається ця система рівномірно і прямолінійно чи нерухома (1636 р. Галілей).

Математично принцип відносності виражає інваріантність, незмінність, збереження законів механіки відносно перетворення координат при переході від однієї ІСВ до іншої, тобто відносно

перетворень Галілея. В цьому випадку ми маємо справу з перетвореннями, що виконуються над фізичними системами, але при цьому зберігаються закони механіки. Отже, принцип відносності може бути розглянутий як симетрія.

Всі розглянуті типи перетворень мають спільну ознаку – це просторово-часові перетворення, бо координати і час в них можна обрати які завгодно. З точки зору теорії груп кожне з перетворень утворює групу перетворень.

Далі ми пропонуємо розглянути деякі закони збереження:

I. *Збереження енергії.* Цей закон виконується в замкнених системах і в системах, які знаходяться в стаціонарних потенціальних полях. Замкнена система:

$$U(\mathbf{p}_i) = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j}^n \sum_{i \neq j}^n U_{ij}(\mathbf{p}_{ij}).$$

Однорідність часу – еквівалентність різних моментів часу для стану системи; тому  $U(\mathbf{p}_i)$  від часу не залежить і тому: Механічна енергія зберігається в процесі руху в замкнених механічних системах і в системах, що перебувають у стаціонарних потенціальних силових полях. Цей закон є наслідком однорідності часу.

Як відомо, для будь-якої механічної системи, що знаходиться в стаціонарному потенціальному полі, можна ввести поняття повної потенціальної енергії. У замкненій системі потенціальна енергія  $U^{(i)}(\mathbf{p}_i)$  складається з потенціальної енергії парної взаємодії частинок:

$$U^{(i)}(\mathbf{p}_i) = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j}^n \sum_{i \neq j}^n U_{ij}(\mathbf{p}_{ij}).$$

Внаслідок однорідності часу ця потенціальна енергія явно від часу не залежить, тобто  $\frac{\partial U^{(i)}}{\partial t} = 0$ .

Якщо система перебуває у зовнішньому стаціонарному потенціальному полі то її повна потенціальна енергія складається з двох частин – зовнішньої і внутрішньої, тоді:

$$U(\mathbf{p}_i) = \sum_i U_i^{(e)} + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j}^n \sum_{i \neq j}^n U_{ij}(\mathbf{p}_{ij}).$$

Оскільки зовнішнє поле стаціонарне, то маємо  $\frac{\partial U^{(e)}}{\partial t} = 0$ . Отже, зміна повної потенціальної енергії з часом визначатиметься з рівняння:

$$\frac{dU}{dt} = \sum_i \frac{\partial U}{\partial \mathbf{p}_i} \frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial t} = \sum_i \frac{\partial U}{\partial \mathbf{p}_i} \mathbf{v}_i.$$

Внутрішні і зовнішні поля потенціальні, а тому  $m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}_i} \Rightarrow$

$$m_i \mathbf{v}_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -\mathbf{v}_i \frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}_i} \Rightarrow \sum_i m_i \mathbf{v}_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \sum_i \mathbf{v}_i \frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}_i}.$$

Отже:

$$\frac{d}{dt} \sum_i \frac{m v_i^2}{2} = -\frac{dU}{dt}; \frac{dT}{dt} = -\frac{dU}{dt} \Rightarrow \frac{d}{dt} (T + U) = 0; \frac{dE}{dt} = 0; E = \text{const.}$$

Механічні системи, в яких повна енергія зберігається називають консервативними.

Для випадку коли система перебуває в нестационарних силових потенціальних полях, також можна ввести поняття повної потенціальної енергії.

$$U(\mathbf{r}_i, t) = \sum_i U_i^{(e)} + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \sum_{i \neq j} U_{ij}(\mathbf{r}_{ij}).$$

Тоді  $E = T + U$  – не зберігається і матиме місце наступне співвідношення

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial U^{(e)}}{\partial t},$$

і ми маємо закон про зміну механічної енергії за рахунок зміни зовнішнього поля.

II. *Закон збереження імпульсу.* Закон збереження імпульсу є наслідком однорідності простору, тобто наслідком симетрії простору. Однорідність простору – при трансляції системи на довільний скінчений вектор властивості системи не змінюються. Отже, не змінюється і потенціальна енергія, тобто:

$$dU = \sum_i \frac{\partial U^{(i)}}{\partial \mathbf{r}_i} d\mathbf{r}_i; \Delta U = \Delta \mathbf{r} \sum_i \frac{\partial U^{(i)}}{\partial \mathbf{r}_i}.$$

Внаслідок однорідності

$$\Delta U \equiv 0 \Rightarrow \sum_i \frac{\partial U^{(i)}}{\partial \mathbf{r}_i} = 0.$$

За другим законом Ньютона для замкненої механічної системи:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}_i} \Rightarrow \frac{d}{dt} (m_i \mathbf{v}_i) = -\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}_i} \Rightarrow \frac{d}{dt} \sum_i m_i \mathbf{v}_i = -\sum_i \frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}_i}; \frac{d\mathbf{P}}{dt} = 0; \mathbf{P} = \text{const.}$$

Якщо вектор повного імпульсу системи  $\mathbf{P}$  зобразити аналітично як

$$\mathbf{P} = P_x \mathbf{i} + P_y \mathbf{j} + P_z \mathbf{k},$$

тоді  $P_x = C_1; P_y = C_2; P_z = C_3 = \text{const}$ , тобто маємо три незалежні закони при аналітичному представленні імпульсу системи матеріальних точок.

III. Закон збереження моменту імпульсу. Закон збереження моменту імпульсу є наслідком ізотропності простору. Ізотропність простору – симетрія відносно обертання, це означає, що механічні властивості замкненої системи (втому числі і потенціальна енергія) не змінюються при повороті системи як єдиного цілого відносно довільного напрямку в просторі на будь-який кут. Тоді, при повороті на малий кут  $\Delta\phi$ , радіус-вектори частинок системи одержують приріст:  $\Delta\vec{r}_i = [\Delta\phi, \vec{r}_i]$ ;  $U = U(\vec{r}_i)$ . Отже, зміну потенціальної енергії системи у цьому випадку можна записати так:

$$\Delta U = \sum_i \frac{\partial U}{\partial \vec{r}_i} \Delta \vec{r}_i = \sum_i \frac{\partial U}{\partial \vec{r}_i} [\Delta\phi, \vec{r}_i] = \Delta\phi \sum_i \left[ \vec{r}_i, \left( -\frac{\partial U}{\partial \vec{r}_i} \right) \right].$$

Потенціальна енергія при повороті не змінюється, а тому

$$\Delta U \equiv 0; \Delta\phi \neq 0; \Rightarrow \sum_i \left[ \vec{r}_i, \left( -\frac{\partial U}{\partial \vec{r}_i} \right) \right] = 0; \frac{d\vec{P}_i}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial \vec{r}_i}.$$

Але  $\vec{F}_i = -\frac{\partial U^i}{\partial \vec{r}_i}$  – сила, що діє на  $i$ -ту частинку з боку всіх інших частинок, а тому  $\left[ \vec{r}_i, \frac{d\vec{P}_i}{dt} \right] = 0 \Rightarrow \frac{d}{dt} [\vec{r}_i, \vec{P}_i] = 0; \sum_i [\vec{r}_i, \vec{P}_i] = 0; \vec{L} = \text{const.}$

Для замкненої механічної системи зберігається величина і напрямок моменту імпульсу цієї системи.

На завершення вивчення даної теми варто розглянути застосування симетрії в фізиці. Наприклад, у класичній механіці, при переході від однієї інерціальної системи відліку до іншої (від  $K$  до  $K'$ ) на сталий вектор трансляції  $x_0$ :

$$x' = x - x_0; y' = y; z' = z; t' = t,$$

ми маємо наслідок щодо величини прискорення та діючої сили

$$a'_x = a_x; a'_y = a_y; a'_z = a_z; F'_x = F_x; F'_y = F_y; F'_z = F_z;$$

тому другий закон Ньютона у будь-якій інерціальній системі відліку є інваріантним за типом представлення:

$$ma'_x = F'_x; ma'_y = F'_y; ma'_z = F'_z.$$

У квантовій механіці для хвильової функції мікрооб'єкта  $\phi(\vec{r}) \rightarrow \phi(\vec{r} + \vec{\xi})$ , де  $\vec{\xi}$  – мала трансляція початку відліку даної системи відліку,  $\phi(\vec{r} + \vec{\xi})$  доцільно розкласти в ряд Тейлора

$$\phi(\vec{r} + \vec{\xi}) = \phi(\vec{r}) + \frac{\partial \phi}{\partial \vec{r}} \vec{\xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \vec{r}^2} \xi^2 + \dots \approx \left( 1 + \vec{\xi} \frac{\partial}{\partial \vec{r}} \right) \phi(\vec{r})$$

і ввести оператор паралельного переносу

$$\hat{T}\phi(\vec{r}) = \left( 1 + \vec{\xi} \frac{\partial}{\partial \vec{r}} \right) \phi(\vec{r}),$$

який зручно подати через оператор імпульсу, враховуючи, що

$$\hat{T} = 1 + \xi \frac{\partial}{\partial P} = 1 + \xi \nabla; \quad P = -i\eta \frac{\partial}{\partial R} = -i\eta \nabla; \quad \nabla = -\frac{P}{i\eta} = \frac{iP}{\eta},$$

маємо  $\hat{T} = 1 + \frac{i}{\eta} P \xi$  або у загальному випадку

$$\hat{T} = 1 + \frac{i}{\eta} P \xi + \frac{1}{2} \frac{(i \xi P)^2}{\eta^2} + \dots = e^{\frac{i}{\eta} P \xi}.$$

Тоді згідно квантово-механічного рівняння руху

$$\frac{d\hat{T}}{dt} = \frac{\partial \hat{T}}{\partial t} + \{\hat{H}, \hat{T}\},$$

де  $\partial \hat{T} / \partial t = 0$  оскільки оператор паралельного переносу хвильової функції  $\hat{T}$  у імпульсному представленні явно від часу незалежний. Щодо квантово-механічних дужок Пуассона  $\{\hat{H}, \hat{T}\} = \frac{i}{\eta} [\hat{H}, \hat{T}]$ , то потрібно перевірити операцію комутації оператора Гамільтона  $\hat{H}$  і оператора паралельного переносу  $\hat{T}$ :

$$[\hat{H}, \hat{T}] = \left[ \left( \frac{\hat{p}^2}{2m} + U(R) \right), e^{\frac{i}{\eta} P \xi} \right] \approx \left[ \left( \frac{\hat{p}^2}{2m} + U(R) \right), \left( 1 + \frac{i}{\eta} P \xi \right) \right] = \frac{i}{\eta} \xi [U(R), P],$$

де оператор потенціальної енергії і оператор імпульсу, що є комутуючими операторами, а отже  $\{\hat{H}, \hat{T}\} = 0$ . Отже,

$$\frac{d\hat{T}}{dt} = 0 \Rightarrow \hat{T} = \text{const}.$$

Отриманий результат вказує на те, що хвильова функція мікрооб'єкта  $\phi(R) \rightarrow \phi(R + \xi)$ , за умов малої трансляції початку відліку даної системи відліку, не змінює свого функціонального представлення і математичний образ хвильового поля мікрочастинки, що зображується хвильовою функцією змінюватись не буде, залишаючись інваріантним.

У результаті проведених досліджень показана доцільність підпорядкування змісту навчального матеріалу одному з фундаментальних понять. Це в свою чергу сприяє формуванню сучасного способу науково-теоретичного мислення суб'єктів навчання та забезпечує узагальнення і систематизації знань з фізики та формування науково світогляду. Подальші напрямки дослідження пов'язані із пошуком інших фундаментальних понять фізики як науки та їх висвітлення у системі неперервної фізичної освіти.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Будний Б. Є. Теоретичні основи формування в учнів системи фундаментальних фізичних понять : автореф. Дис. на здобуття наук.

- ступеня канд. Пед. наук : спец. 13.00.02 «Теорія та методика навчання (фізика)» / Б. Є. Будний. – К., 1997. – 51 с.
2. Ковалев И. З. Учение о симметрии в курсе физики средней школы : автореф. Дис. на соиск. Учен. Степени канд. Пед. наук : спец. 13.00.02 «Теория и методика обучения (физика)» / И. З. Ковалев – К., 1976. – 24 с.
  3. Коновал О. А. Теоретичні і методичні засади вивчення електродинаміки як релятивістської теорії у вищих педагогічних навчальних закладах : дис. ... д-ра пед. наук : 13.00.02 / Олександр Андрійович Коновал. – К., 2010. – 468 с.
  4. Мултановский В. В. Курс теоретической физики / Мултановский В. В. – М. : Просвещение, 1988. – 304 с.
  5. Осадчук Л. И. Методика преподавания физики. Дидактические основы / Осадчук Л. И. – Киев-Одесса : Вища школа, 1984. – 351 с.
  6. Подопригора Н. В. Закон збереження електричного заряду та його інваріантність відносно калібрувальних перетворень / Н. В. Подопригора // Наукові записки. Серія : педагогічні науки. – Кіровоград, 2007. – Вип. 72. – Ч. 1. – С. 211–218.
  7. Садовий М. І. Симетрії елементарних частинок / М. І. Садовий, О. М. Трифонова // Наукові записки. Серія : Педагогічні науки. – Кіровоград, 2005. – Вип. 60. – Ч. 1. – С. 283–287.
  8. Трифонова О. М. Взаємозв'язки принципів науковості та наочності в умовах кредитно-модульної системи навчання квантової фізики студенті вищих навчальних закладів : дис. ... канд. пед. наук : 13.00.02 / Олена Михайлівна Трифонова. – Кіровоград, 2009. – 216 с.