

УДК 37.091.64:373.3/5]:5

DOI: 10.31499/2706-6258.2(6).2021.250427

## **ДОБІР І КОНСТРУЮВАННЯ ЗМІСТУ НАВЧАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗІ ШКІЛЬНОЇ ПРИРОДНИЧОЇ ОСВІТИ В КОНТЕКСТІ СУЧАСНИХ ПРОВІДНИХ ОСВІТНИХ ПАРАДИГМ (НА ПРИКЛАДІ ВИВЧЕННЯ ОСНОВ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ В ЗЗСО)**

**Мартинюк Михайло**, доктор педагогічних наук, професор, дійсний член НАПН України, завідувач кафедри фізики та інтегративних технологій навчання природничих наук, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини.

ORCID: 0000-0002-1608-9148

E-mail: m.t.martynuik@udpu.edu.ua

**Миколайко Володимир**, кандидат педагогічних наук, проректор з міжнародних зв'язків та стратегічного розвитку, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини.

ORCID: 0000-0002-0515-1241

E-mail: v.mykolaiko@udpu.edu.ua

**Підгорний Олександр**, викладач кафедри фізики та інтегративних технологій навчання природничих наук, аспірант кафедри педагогіки та освітнього менеджменту, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини.

ORCID: 0000-0002-1614-0417

E-mail: o.v.pidgorny@gmail.com

**Хитрук Валентин**, кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри фізики та інтегративних технологій навчання природничих наук, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини.

ORCID: 0000-0003-1978-9016

E-mail: valikkhit@gmail.com

*У статті обґрунтовано процедуру добору і конструювання цілісного змісту навчальних матеріалів, недиспаратних щодо морального становлення особистості учня та прогностично-перспективних щодо організації навчально-пізнавальної діяльності й розгортання психологічних процесів, провідних в освітній діяльності, насамперед реалізації механізмів і процедур критичного мислення. Специфічним завданням статті є обґрунтування нового змісту навчання основ спеціальної теорії відносності в закладах загальної середньої освіти та в методичній системі підготовки майбутніх учителів фізики.*

**Ключові слова:** природнича освіта; особистісно орієнтований зміст навчання; критичне мислення; вивчення основ спеціальної теорії відносності; очікувані (прогнозовані) результати навчання.

**SELECTION AND CONSTRUCTION OF THE CONTENT  
OF EDUCATIONAL MATERIALS OF SCHOOL NATURAL  
EDUCATION IN THE CONTEXT OF MODERN LEADING  
EDUCATIONAL PARADIGMS (ON THE EXAMPLE  
OF STUDYING THE BASES OF THE SPECIAL THEORY  
OF RELATIVITY AT SCHOOL)**

**Martyniuk Mykhailo**, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine, Head of the Department of Physics and Natural Sciences Integrative Learning Technologies, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University.

ORCID: 0000-0002-1608-9148

E-mail: m.t.martynuik@udpu.edu.ua

**Mykolaiko Volodymyr**, PhD in Pedagogical Sciences, Vice-Rector for International Relations and Strategic Development, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University.

ORCID: 0000-0002-0515-1241

E-mail: v.mykolaiko@udpu.edu.ua

**Pidhorneyi Oleksandr**, Lecturer at the Department of Physics and Natural Sciences Integrative Learning Technologies, PhD student of the Department of Pedagogy and Educational Management, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University.

ORCID: 0000-0002-1614-0417

E-mail: o.v.pidgorny@gmail.com

**Khytruk Valentyn**, PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Natural Sciences Integrative Learning Technologies, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University.

ORCID: 0000-0003-1978-9016

E-mail: valikkhit@gmail.com

*A brief overview of the results of theoretical and experimental research on the selection and structuring of educational materials in the context of the ideas of humanization and fundamentalization of the content of school science is presented including physical education. The paper shows that when constructing the content of such educational materials, it is necessary to present them in the context of historical development and formation of relevant knowledge, and the proposed content structures provided not only scientific and integrity content of school science education but also the development of the personality of a school-age child.*

*The specific task of this article is to substantiate the new content of teaching the basics of the special theory of relativity in general secondary education and in the methodological system of training future physics teachers. The results obtained in the process of theoretical and experimental research can be used by students of general secondary and higher pedagogical education, graduate students, teachers and methodologists.*

**Keywords:** *natural education; personality-oriented content of education; critical thinking; study of the basics of special relativity; expected (predicted) learning outcomes.*

У зв'язку з модернізацією змісту загальної середньої освіти, яка проводиться в контексті концептуальних ідей Нової української школи (НУШ), чи не найбільш помітною є дискусія щодо інтеграції й диференціації знань учнів. Зокрема, це стосується шкільної природничої освіти. Нині природничо-наукова освіта в школах України має системні прогалини, про що, зокрема, йдеться в матеріалах досліджень у межах міжнародного проекту PISA [11]. Є й певні орієнтири щодо модернізації шкільної природничої освіти – дидактична система STEAM-освіти [1]. Однак модернізації змісту шкільної природничої освіти шляхом системної реалізації гуманітарного потенціалу власне природничо-наукового знання як знання про розвиток реального світу (природи, людини і суспільства), на наш погляд, приділяється недостатньо уваги. Натомість розвиток природничо-наукових знань (у контексті еволюції концептуальних ідей, фундаментальних положень і основоположних понять, історії становлення і розвитку наукової картини світу, історичних подій та особистостей тощо), сучасні технології і засоби отримання й подання інформації, сучасні можливості педагогічної комунікації учасників освітнього процесу створюють умови щодо успішної реалізації зазначеного вище потенціалу.

Нині реалізація гуманітарного потенціалу шкільної природничої освіти є особливо актуальною: як відомо, гуманізація і фундаменталізація є провідними наративами становлення НУШ.

Метою статті є обґрунтування проблеми реалізації провідних освітніх парадигм НУШ засобами добору і конструювання змісту навчальних матеріалів, недиспаратних щодо морального становлення особистості дитини шкільного віку, а також прогностично-перспективних щодо організації навчально-пізнавальної діяльності й формування операційних процедур критичного мислення учня на прикладі вивчення основ спеціальної теорії відносності (СТВ) у ЗЗСО.

Нині теорія відносності – це одна з п'яти фундаментальних фізичних теорій, які є основою сучасного точного (наукового) природознавства і ядром сучасної наукової картини світу. Тому вивчення основ СТВ є важливою складовою шкільної природничої, зокрема фізичної, освіти. Теоретичні основи методики вивчення відповідної теми розроблені: С. У. Гончаренком [3], О. А. Коновалом [5], Б. М. Яворським [8] й іншими вченими. Вони реалізовані в усіх національних шкільних підручниках з фізики для учнів старших класів. У них основи СТВ, як структурно виокремлену тему шкільного курсу фізики (10 клас), подають описово, але по суті – це теорія прогностична. Пропонований у них змістовий контент з основ СТВ, за визнанням абсолютної більшості методистів й учителів-практиків, є досить складним для осягнення пересічним учнем і таким, що не забезпечує позитивної мотивації учіння. Такою є реальна діяльність навчання й нині. Тому стан вивчення основ СТВ у ЗЗСО не можна вважати задовільним. Евристичний потенціал, гуманітарний контент та місце цієї теорії у науковому і шкільному природничому знанні мають бути сповна реалізовані в сучасній шкільній природничій освіті. А головне – вони є такими, які наразі сповна відповідають цілям і завданням модернізації змісту сучасної загальної середньої природничої освіти в контексті Концепції «Нова українська школа».

Нижче пропонуємо стислий огляд результатів дослідження щодо добору і структурування навчальних матеріалів з теми «Основи спеціальної теорії відносності» (X клас – [6]) у контексті гуманізації і фундаменталізації змісту шкільної природничої,

зокрема фізичної, освіти. У нашому досвіді пропонований зміст навчальних матеріалів передбачає їхній поділ на дві логічно завершені частини.

#### **Частина перша. Передумови виникнення спеціальної теорії відносності**

• **Швидкість поширення світла і гіпотеза світлового ефіру.** Чи не єдиним з рухів із «надзвичайно» великою швидкістю, який досліджували експериментально, був процес поширення світла. Швидкість поширення світла вимірювали в різні часи: Галілео Галілей (1607 р.), Олаф Ремер (1676 р.), Арман Фізо (1849 р.), Альберт Майкельсон (1879 р.) й інші.

Як наслідок було встановлено, що швидкість поширення світла дорівнює  $\approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Виявилося, що швидкість світла у повітрі, воді й інших середовищах є різною та безпосередньо залежить від діелектричних і магнітних властивостей середовища.

Залежність швидкості поширення світла від властивостей середовища свідчила про хвильову природу світла та про те, що світлова хвиля є поперечною, тобто подібною до хвиль у пружному середовищі. І щоб світлова хвиля могла поширюватися з такою великою швидкістю, середовище, яке забезпечує механізм цього поширення, повинно мати дивовижні властивості: бути надзвичайно пружним, а отже, мати велику густину, та бути прозорим і не перешкоджати рухам тіл з відносно великою густиною (наприклад, руху Землі чи інших небесних тіл). Неймовірно за фізичними властивостями гіпотетичне середовище, яке мало забезпечувати механізм поширення світла в ньому, було названо світлоносним «ефіром». В історичному плані гіпотеза «ефіру» відіграла значну, але як виявилось тимчасову, перехідну роль у розвитку наукового природознавства. Проте, як й інші гіпотези у науковому природознавстві, гіпотеза світлоносного ефіру мала бути підтверджена дослідним шляхом. Уперше такий дослід було виконано А. Фізо. В основу дослідження покладено інтерференційний метод визначення лінійних розмірів тіл (та їхніх швидкостей), який на той час був досить точним. (Примітка: з огляду на обмеження розмірів статті, конкретний зміст та опис того чи іншого дослідження нами тут не подається). У цьому дослідженні визначався вплив рухомого середовища (води) на швидкість поширення світла у напрямку руху води та в протилежному до нього напрямку. Дослід А. Фізо показав, що існує відмінність у результатах вимірювання швидкостей поширення світла у напрямку руху середовища (води) та у протилежному напрямку. Постала необхідність пояснити цю відмінність на основі наявних на той час знань, тобто на основі уявлень класичної механіки й класичної електродинаміки. І це виявилось надзвичайно складним завданням. Як наслідок, учені-фізики пропонували різні припущення (гіпотези, додаткові умови тощо), але вони не мали доказового характеру, зокрема їх було неможливо пояснити на основі наявних на той час фізичних теорій.

Аналогічні дослідження щодо виявлення «ефіру» проводилися і надалі. Найвизначнішим з-поміж них був дослід Майкельсона-Морлі.

Наявність «ефіру» як абсолютного простору ці та інші дослідження не підтвердили. Але ж на основі уявлень про такий простір базувалося на той час все наукове природознавство! Так у фізичній науці виникла ситуація, яку вслід за А. Пуанкаре стали називати «кризою фізики». Дещо пізніше відповідну проблему стали називати й

«кризою природознавства».

*Ілюстративні матеріали.* Схеми дослідів Армана Фізо (1849 р.) й Альберта Майкельсона (1879 р.); портрети: Галілео Галілея (1607 р.), Олафа Ремера (1676 р.), Армана Фізо (1819–1896 рр.), Альберта Майкельсона (1852–1931 рр.), Анрі Пуанкаре (1854–1912 рр.). (*Примітка:* тут і далі зазначені в ілюстративних матеріалах прізвища вчених використовувалися в нашому дослідженні і як ключові слова для організації особистісно орієнтованої інформаційно-пошукової роботи учнів в процесі реальної діяльності навчання).

• **Виникнення єдиної теорії електричних і магнітних явищ. Електромагнітна природа світла. Релятивістська фізика.** Існування «особливого» середовища, у якому відбуваються електричні й магнітні явища, передбачена і єдиною теорією електромагнітних явищ Максвелла-Герца-Лоренца. Ця теорія була створена наприкінці XIX століття, а її ядром є рівняння Дж. Максвелла. Наслідком цих рівнянь є висновок про можливість існування змінних електричного і магнітного полів які, послідовно перетворюючись одне в одне, охоплюють усе нові й нові частини простору і таким чином поширюються в ньому. Так вперше було теоретично передбачено, а згодом й підтверджено експериментально, існування електромагнітних хвиль. Згідно з цією теорією швидкість поширення електромагнітних хвиль визначається за формулою: 
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (1),$$
 де  $v$  – швидкість поширення електромагнітної хвилі у

середовищі з діелектричною проникністю  $\epsilon$  (читається «епсилон») і магнітною сприйнятливістю  $\mu$  («мю»).

З формули (1) слідує, що у випадку фізичного вакууму, тобто коли  $\epsilon = 1$  ;  $\mu = 1$  , швидкість поширення електромагнітної хвилі дорівнює швидкості світла у вакуумі. Так виникла, а згодом була й підтверджена думка, що світло це і є електромагнітна хвиля. Як наслідок, встановлені раніше закони поширення світла та оптичні методи дослідження природних явищ поширилися й на дослідження електродинамічних явищ. Це, зокрема, забезпечило велику точність вимірювання довжин електромагнітних хвиль та швидкостей їхнього поширення в тих чи тих середовищах. Це, зрештою, й обумовило проведення дослідів Фізо і Майкельсона-Морлі, описаних вище.

*Ілюстративні матеріали.* Портрети: Джеймса Максвелла (1831–1879 рр.), Генріха Герца (1857–1894 рр.), Гендріка Лоренца (1853–1928 рр.).

• **Релятивістське зменшення лінійних розмірів тіла у напрямку його руху.**

Рух електрично заряджених тіл (катодних променів, бета-випромінювання тощо) і поширення створюваних ними електромагнітних полів є прикладами так званих релятивістських рухів, тобто рухів зі швидкостями, сумірними зі швидкістю світла (з лат. *relativus* – відносний, співвідносний). Результати дослідження таких рухів в останню чверть XIX століття обумовили виникнення окремої на той час галузі фізичних знань – електродинаміки рухомих тіл, а згодом – *релятивістської фізики*. Дослідження релятивістських рухів свідчили про наявність у природі особливих явищ, які мають місце лише у разі руху матеріальних тіл із релятивістськими швидкостями. Ці явища отримали назву *релятивістських ефектів*.

Нідерландський фізик Г. Лоренц та ірландський фізик Дж. Фіцджеральд незалежно один від одного запропонували гіпотезу про залежність масштабів

середовища, у якому поширюється електромагнітна взаємодія, від її швидкості. Пояснюючи результати досліду А. Фізо про вплив рухомого середовища на швидкість поширення світла в ньому, вони дійшли висновку про «скорочення» розмірів тіл у напрямку їхнього руху:

$$\Delta l = l_0 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) \quad (2).$$

Скорочення довжини тіла у напрямку його руху із релятивістською швидкістю тепер називають «скороченням Лоренца-Фіцджеральда».

Скорочення Лоренца-Фіцджеральда суперечило уявленням класичної фізики про простір і час, які на той час вважалися абсолютними, тобто не залежними одне від одного та не змінними. У свою чергу це скорочення підтверджується дослідним шляхом. Так виникло протиріччя між класичними уявленнями про простір і час та виявленими закономірностями руху тіл із релятивістськими швидкостями. Принагідно зазначимо, що окремі вчені-фізики на той час уже висловлювали сумніви щодо абсолютності простору і часу, а також висловлювали гіпотезу про залежність простору і часу від руху та взаємодії матеріальних тіл і явищ (точніше від фізичного стану середовища). Але ці припущення не були доказовими.

*Ілюстративні матеріали.* Портрети: Джордж Фіцджеральд (1851–1901 рр.).

**4. Ефект сповільнення часу у рухомих системах відліку.** Наявність «скорочення Лоренца-Фіцджеральда» означає, що час проходження «скороченої» відстані, а отже, і тривалість певної події у рухомій системі відліку буде меншою.

Розрахунок показує, що:  $t = \frac{l}{v} \Rightarrow t = t_0 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow t > t_0$  (3), де  $t_0$  – час, виміряний у

нерухомій системі відліку;  $t$  – час за годинником у рухомій (відносно нерухомої) системі відліку.

**5. Взаємозв'язок маси й енергії тіла та гранична швидкість передачі взаємодії** (читай: фізичного сигналу). На основі дослідження рухів заряджених тіл (електронних пучків і катодних променів) у різних середовищах, видатний англійський фізик Дж. Дж. Томсон виявив взаємозв'язок маси й енергії (1879 р.). Згодом (1881 р.) він довів, що при наближенні швидкості зарядженого тіла до швидкості світла у вакуумі енергія тіла має зростати до нескінченності. У свою чергу це означає, що швидкість поширення світла у вакуумі є граничною швидкістю, досягнення якої реальним (інертним) тілом є неможливим, тобто такого зростання не може бути.

У 1900 році А. Пуанкаре запропонував формулу  $E = mc^2$  (4), згідно з якою квант світла повинен мати масу:  $m = \frac{E}{c^2}$ , де  $E$  – енергія мінімальної «часинки» світла,

$c$  – швидкість світла.

*Ілюстративні матеріали.* Портрети: Джозефа Томсона (1856–1940 рр.), Анрі Пуанкаре (1854–1912 рр.).

**6. Релятивістський закон додавання швидкостей.** У 1900 році французький математик та астроном Анрі Пуанкаре встановлює, що при додаванні рухів зі

швидкостями, сумірними зі швидкістю поширення світла у вакуумі, класичний закон додавання швидкостей ( $v = v_{\text{відн}} + v_{\text{переносн}}$ ) не справджується. «Релятивістські» швидкості, за розрахунками А. Пуанкаре, додаються за законом:

$$1 + \frac{v_{\text{відн}} v_{\text{переносн}}}{c^2} \Rightarrow 1 + \frac{v_1 v_2}{c^2} \quad (5)$$

де  $v_1$  – швидкість тіла, виміряна в одній із систем відліку, а  $v_2$  – швидкість тіла, виміряна в рухомій системі відліку.

Формула (5) є узагальненням експериментальних даних, а тому сумнівів у її достовірності не може бути. Проте вона суперечить класичному закону додавання швидкостей  $v = v_1 + v_2$  (6), який був встановлений для випадків руху тіл зі швидкостями, значно меншими від швидкості світла. Цю розбіжність фізична наука того часу не змогла пояснити.

*Ілюстративні матеріали.* Портрет: Анрі Пуанкаре (1854–1912 рр.).

**7. Принцип відносності й електродинаміка рухомих середовищ.** З часів Г. Галілея (середина XVII ст.) і до кінця XIX ст. у фізиці не піддавали сумніву механічний принцип відносності Г. Галілея.

Вважалося, що механічний принцип відносності, а згодом і відповідний (перший) закон Ньютона мають свого роду «допоміжну роль» у системі знань про закони механічного руху. Адже ним вказується на умови застосування законів руху тіл під дією певних сил та необхідність пошуку таких систем відліку (інерціальних систем), де всі закони механіки справджуються. Аналогічна «роль» принципу відносності відводилася й при поясненні досліду А. Фізо та досліду А. Майкельсона й Е. Морлі.

Як наукова гіпотеза з'явилася пропозиція окремих учених-фізиків – поширити механічний принцип відносності на електродинамічні, світлові та інші фізичні явища. Згодом така гіпотеза була підтверджена експериментально. Найбільш близько до осмислення принципу відносності як загального закону природи був А. Пуанкаре (1903 р.). У 1904 р. він розглядає принцип відносності як фундаментальний закон природи, називаючи його одним з основних принципів фізики. Проте А. Пуанкаре підкреслював, що принцип відносності потребує додаткового експериментального підтвердження, бо передбачає наявність абсолютного простору, існування якого також не підтверджено експериментально. Як стверджував сам А. Пуанкаре, зазначене вище тлумачення принципу відносності трактувалося ним у «винятково філософському плані» [8].

А. Пуанкаре вперше висловив й гіпотезу, що із принципу відносності слідує і граничне обмеження швидкості поширення сил тяжіння, а також що ця гранична швидкість має дорівнювати швидкості світла у вакуумі. Отже, ідея про взаємозв'язок принципу відносності і принципу сталості світла також висловлювалася ще до відкриття спеціальної теорії відносності.

*Висновки до першої частини змістового наповнення теми «Основи СТВ».* Відкриття електромагнітної природи світла та дослідження рухів електрично заряджених тіл зі швидкостями, сумірними зі швидкістю світла, виявили ряд

релятивістських ефектів (закономірностей, явищ), пояснити які у межах класичної механіки виявилось неможливим. Такими ефектами є: залежність швидкості руху тіла і тривалості подій від швидкості руху системи відліку, в якій рух цього тіла розглядають; залежність розмірів тіла від вибору системи відліку, в якій це тіло розглядають, тощо.

Виявилось, що закони класичної механіки справджуються лише при рухах зі швидкостями, які є значно меншими від швидкості поширення світла. При релятивістських швидкостях закони класичної механіки «не спрацьовують». Так визначилися *межі беззастережного застосування законів класичної механіки – це лише рухи зі швидкостями, значно меншими від швидкості поширення світла.*

Найголовнішим для фізичної науки на зламі XIX–XX століть виявився висновок про те, що пояснити релятивістські ефекти можна, якщо вважати, що просторові й часові характеристики середовища не є абсолютними, а такими, що залежать від фізичних процесів, які в цьому середовищі відбуваються. Усе частіше стали висловлюватися пропозиції щодо критичного аналізу класичних понять простору і часу.

### **Частина друга. Основні положення спеціальної теорії відносності та їхні наслідки**

Спроби багатьох учених-фізиків, зокрема й нікому не відомого на той час працівника патентної служби А. Ейнштейна, пояснити закономірності руху тіл з релятивістськими швидкостями стали підґрунтям, на якому виникли геніальні наукові ідеї, що згодом привели людство до сучасних уявлень про наукову картину світу.

У 1905 році вийшла стаття А. Ейнштейна «До електродинаміки рухомих середовищ». Згодом ця стаття була оцінена істориками-фізиками як перший виклад нової фізичної теорії – спеціальної теорії відносності.

Подальше становлення СТВ тривало ще кілька років по тому. І в цьому «процесі» брали плідну участь фізики й математики різних країн світу. Вважається, що остаточно СТВ була створена у зв'язку із побудовою німецьким математиком Г. Мінковським (1864–1909 рр.) її математичної моделі (1907 р.) [8]. У своїй праці Г. Мінковський показав, що СТВ А. Ейнштейна може бути описана в чотиривимірному просторі (відомому зараз як простір Мінковського, хоча геометрія такого простору була обґрунтована ще на початку XIX ст. (Б. Ріманом і М. Лобачевським)). У ньому час і простір є вимірами єдиного простору-часу. Чотиривимірний простір і є геометрією спеціальної теорії відносності. Надалі ця математична модель допомогла А. Ейнштейнові остаточно визначитися, що запропонована ним у статті «До електродинаміки рухомих середовищ» (1905 р.) теорія, як спосіб пояснення закономірностей електродинаміки рухомих тіл, має більш фундаментальне значення. Тому вже у 1907 р. А. Ейнштейн дає більш повне тлумачення своєї теорії, що й відображено у назві відповідної праці: «Про принцип відносності і його наслідки». Принагідно зазначимо, що дискусії щодо достовірності СТВ та її визнання тривали ще декілька десятків років потому. Подекуди вони тривають і нині.

- **Принцип відносності А. Ейнштейна.** На початку названої вище статті «До електродинаміки рухомих середовищ» А. Ейнштейн насамперед чітко означив суть *принципу відносності як абсолютного закону природи.* Надалі зазначені вище «припущення» А. Ейнштейн розглядає як один з основних принципів (постулатів), на яких він розбудовує нову фізичну теорію – *спеціальну теорію відносності (СТВ).*

- **Постулати спеціальної теорії відносності.** Ядром спеціальної теорії



відносності є два вже відомі вам твердження, які у цій теорії визначені як основні принципи (постулати).

*Перший постулат СТВ: в інерціальних системах відліку всі закони природи однакові.* Це означає, що, розглядаючи релятивістські рухи в різних (рухомій і нерухомій) інерціальних системах відліку, ми не зможемо з'ясувати, яка з них рухається, а яка перебуває в спокої. Це означає, що жодні досліди в будь-якій галузі фізики (механіці, електродинаміці, молекулярній фізиці, ядерній фізиці тощо) не дозволяють визначити, перебуває ця інерціальна система відліку у стані руху чи спокою. А отже, жодну з цих систем не можна вважати переважною (абсолютною) стосовно іншої.

*Другий постулат СТВ: швидкість поширення світла у вакуумі однакова у всіх напрямках і не залежить від руху джерела світла та вибору інерціальної системи відліку.* Сталість швидкості поширення світла є фундаментальною властивістю природи. Жодне матеріальне тіло, окрім фотона та квантів інших фізичних полів, не може досягнути такої швидкості. Отже, швидкість поширення світла у вакуумі є максимально можливою швидкістю поширення будь-якої взаємодії.

Принцип сталості швидкості поширення світла узгоджується з результатами досліду А. Фізо та досліду А. Майкельсона й Е. Морлі (1887 р.). Як відомо, ці досліди не виявили різниці у швидкостях світла, виміряну у напрямку орбітального руху Землі та в перпендикулярному до нього напрямку. Нині принцип сталості світла підтверджується й спостереженнями за подвійними зорями, які обертаються навколо спільного центру з величезною швидкістю, та багатьма іншими спостереженнями.

• **Відносність одночасності просторово розділених подій. Залежність часу від вибору системи відліку.** Установити одночасність подій можна лише за допомогою годинників, які йдуть *синхронно*, тобто таких, що показують узгоджений час у момент, коли відбувається подія. Якщо вже синхронізовані годинники розділити (один – у нерухомій системі відліку, а інший – у рухомій системі відліку), то за показами цих годинників можна робити висновок про одночасність чи неодноразність подій. Дві просторово розділені події, які є одночасними в нерухомій системі відліку, спостерігатимуться в іншій, рухомій системі відліку як такі, що розділені і в часі. (Примітка. Щоб переконатися у цьому, на перший погляд, дивному результаті, користуються уявним експериментом з потягом та двома спостерігачами, один з яких перебуває в поїзді, а інший – на пероні – [9]).

Таким чином: дві події, що синхронізовано відбулися в різних точках простору, які є одночасними в одній системі відліку, не будуть одночасними в інших системах відліку, які рухаються рівномірно і прямолінійно відносно першої. І чим більша швидкість руху спостерігача, тим більшою буде «величина» неодноразності.

Очевидним є й наступний висновок: у релятивістській механіці час не є абсолютним; він залежить від вибору системи відліку (читай: від швидкості її руху). Отже, у кожній системі відліку свій власний час!

• **Відносність геометричних розмірів тіл (масштабів, довжини).** Спільне застосування першого і другого постулатів А. Ейнштейна обумовлює висновок:

*Простір і час не є незалежними одне від одного. Тобто релятивістський рух тіла слід розглядати не окремо в просторі й окремо в часі, а в єдиному вимірі «простір-час». Суть цього виміру була з'ясована вченими (насамперед фізиками й*

математиками) пізніше.

А. Ейнштейн шляхом відповідних обчислень отримує формулу, за якою визначають довжину тіла і час у рухомих системах відліку через значення цих же величин у нерухомій системі відліку (відповідно)

$$\Delta l = l_0 - l = l_0 - l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = l_0 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) \quad (7)$$

Рівність (7) формально співпадає з формулою Лоренца-Фіцджеральда (2). Але формула А. Ейнштейна (7) вказує на загальну закономірність усіх тіл, які рухаються з релятивістськими швидкостями у всіх без винятку середовищах. Натомість формула Лоренца-Фіцджеральда вдало пояснювала лише відповідний результат окремих фізичних дослідів за умови існування гіпотетичного «ефірного» середовища.

Скорочення розмірів тіл, що рухаються з релятивістськими швидкостями, яке визначають за формулою А. Ейнштейна (7), за пропозицією самого А. Ейнштейна, справедливо (й етично правильно) називають у науці «лоренцовим скороченням».

• **Релятивістський закон додавання швидкостей (А. Ейнштейна).** На основі постулатів відносності та швидкості світла, А. Ейнштейн вивів формулу:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}}, \quad (8)$$

де:  $v_1$  – швидкість тіла в рухомій системі відліку;  $v_2$  – швидкість руху цієї системи відліку відносно нерухомої;  $v$  – швидкість руху в нерухомій системі відліку.

Формально, релятивістський закон додавання швидкостей А. Ейнштейна є таким самим, як і аналогічний закон, записаний з метою пояснення результатів дослідів А. Фізо та А. Майкельсона й Е. Морлі (5). Натомість формула А. Ейнштейна (8) виражає загальний закон природи, який справджується під час релятивістських рухів будь-яких тіл.

Якщо у формулу (8) покласти, що  $v_1 = c$  і  $v_2 = c$ , а швидкість тіла в рухомій системі відліку вважати рівною швидкості тіла в будь-якій нерухомій системі відліку  $v$  дорівнюватиме:

$$v = \frac{v \cdot c}{1 + \frac{v \cdot c}{c^2}} \Rightarrow \frac{v \cdot c}{1 + \frac{v \cdot c}{c^2}} = c \quad (9)$$

Отже, ми приходимо до висновку, що швидкість світла у всіх інерціальних системах відліку (і рухомих, і нерухомих) дійсно є однаковою. Це означає, що швидкість світла у вакуумі є однаковою у всіх напрямках та не залежною від відносного руху джерела і приймача світла. Пізніше було доведено й наступне: швидкість світла у вакуумі є максимальною швидкістю передачі фізичної взаємодії (читай – фізичного сигналу).

*Ілюстративні матеріали.* Портрет Едварда Морлі (1838–1923 рр.).

• **Закон взаємозв'язку маси й енергії.** Відповідно до закону збереження імпульсу, а він справджується для будь-яких замкнутих механічних систем, А. Ейнштейн отримав формулу:  $E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$ , де:  $E$  – енергія тіла,  $m$  – маса тіла,  $p$  – імпульс тіла ( $p = mv$ ),  $v$  – швидкість тіла. Згідно з цією формулою, енергія нерухомого тіла ( $v=0$ ) не перетворюється в нуль, а дорівнює  $E^2 - 0 = m^2 c^4 \Rightarrow E = mc^2$  де,  $c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$  – швидкість світла у вакуумі.

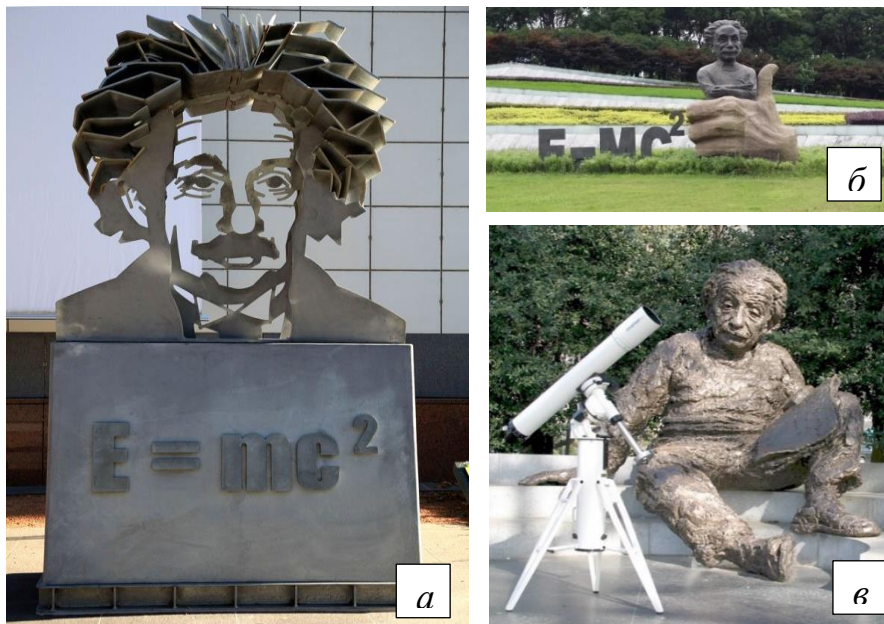
Енергія  $E = mc^2 = m (3 \times 10^8)^2$  Дж визначається лише масою тіла, тому її називають «власною», або нульовою, енергією. Як особливий вид енергії, нульову енергію позначають символом  $E_0$ . Отже:

$$E_0 = mc^2, (10)$$

Нульова енергія – це дуже велика енергія! Наприклад, тілу масою один грам ( $m = 10^{-3} \text{ кг}$ ) відповідає нульова (власна) енергія:

$$E_0 = mc^2 = 10^{-3} \text{ кг} \cdot \left( 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ Дж} = 90\,000\,000\,000\,000 \text{ кДж}$$

Фізичний зміст формули (10) та її практичне значення є настільки важливими, що її не дарма називають найголовнішим практично застосовним здобутком творчості А. Ейнштейна. І це навіть відображено в численних пам'ятках культури у планетарному вимірі (рис. 1).



*Рис. 1. Пам'ятники А. Ейнштейну: а) Австралія (Канберра), б) Китай (Суджоу), в) США (Вашигтон) і багато ін.*

- **Взаємоперетворення енергії спокою і кінетичної енергії.**

Якщо в результаті деякого фізичного процесу енергія спокою тіла змінилася, то це означає, що змінилася його маса. Відповідна цьому зміна може бути визначена за формулою:

$$\Delta E_0 = \Delta mc^2 \quad \text{або} \quad \Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2} \quad (11)$$

Наприклад, у ядерних і хімічних реакціях енергія спокою може переходити в кінетичну енергію продуктів реакції, якщо сума мас частинок, які вступають у реакцію, більше суми мас продуктів реакції. Зокрема, при анігіляції позитрона і нейтрона у два фотони вся енергія спокою електрона і позитрона переходить у кінетичну енергію фотонів.

*Висновки до другої частини змісту навчальних матеріалів з теми «Основи СТВ»:*

- ✓ Зі створенням теорії відносності А. Ейнштейна, наявність «ефірного» середовища відкидається в науці остаточно!
- ✓ СТВ стала основою для пояснення релятивістських ефектів з точки зору єдиної наукової теорії, а не на основі окремих і гіпотетичних припущень.
- ✓ Принцип відносності набуває статусу абсолютного (тобто такого, який не потребує ніяких додаткових обґрунтувань) закону природи. Цей принцип є беззастережним доказом того, що світ реальних речей у природі є об'єктивним, тобто таким, що не залежить від того, вивчає його людина чи ні. Отже, СТВ – є основою сучасного наукового світогляду.
- ✓ Висновок СТВ щодо взаємозв'язку простору і часу та їхньої залежності від стану фізичного середовища (властивостей тіл і подій у ньому) є основою сучасної (цілісної) природничо-наукової картини світу.
- ✓ СТВ дає описання фізичних процесів, які відбуваються в інерціальних системах відліку, тобто системах, які рухаються одна відносно одної рівномірно і прямолінійно. Створивши цю теорію, А. Ейнштейн окреслив і наступний етап наукових пошуків – встановити відповідають закони СТВ (як і наслідки з них) для інших, реальних систем відліку, тобто таких, які рухаються прискорено одна відносно одної. На початку, як стверджував А. Ейнштейн, це треба проаналізувати на прикладі систем відліку, які рухаються одна відносно одної зі сталим прискоренням. Так було окреслено магістральний шлях становлення нової, загальної теорії відносності (теорії тяжіння). Нині теорія відносності складає суть цілісної теорії відносності як однієї з фундаментальних фізичних теорій.

*Ілюстративні матеріали.* Портрет: молодого А. Ейнштейна, окремі пам'ятники А. Ейнштейну (Німеччина, США, Китай, Австралія та ін.). Фото графіті: портрет А. Ейнштейна з формулами (КПІ, Україна) тощо.

**Частина третя. Найважливіші застосування теорії відносності**

- Теорія відносності А. Ейнштейна вперше науково (зокрема, цілісно і сповна доказово) пояснила суть релятивістських ефектів, не вдаючись до тих чи тих часткових припущень, «прив'язаних» до уявлень про абсолютний простір і час. Таких в природі не існує! Ця теорія остаточно довела об'єктивність (тобто незалежність) фізичних явищ

і подій у природі на основі єдиної наукової системи поглядів. Як і всяка інша фундаментальна фізична теорія, СТВ виявилася надзвичайно прогностичною і... практичною. Зокрема, вона спричинила виникнення ряду нових наукових ідей та практичних застосувань.

- Згідно з теорією відносності, маса частинки/тіла є мірою її/його власної енергії, тобто енергії спокою. Математично це можна представити виразом:  $E_0 = mc^2 \Rightarrow E_0 \propto m$ , оскільки  $c^2$  – величина стала.

*Уявлення про енергію спокою з'явилося в науці вперше!*

- *Створення квантової теорії світла.* Формула (11) свідчить, що при випромінюванні світла маса випромінювального тіла зменшується, а при поглинанні світла – збільшується. Цей наслідок із теорії відносності відіграв революційну роль у подальшому розвитку теорії оптичних явищ, квантової фізики (зокрема, квантової оптики) та інших розділів сучасної фізичної науки. За відкриття закону фотоефекту А. Ейнштейну було (1921 р.) присуджено Нобелівську премію – найважливішу міжнародну відзнаку за наукові досягнення світового масштабу.

- Відкриття А. Ейнштейном закону взаємозв'язку маси й енергії, надалі – створення загальної теорії відносності (теорії тяжіння) суттєво вплинуло на астрономічну науку. Наприклад, наявність у кванта світла маси пояснюється гравітаційне відхилення світлових променів від далеких зірок, які проходять поблизу Сонця.

Загальна теорія відносності передбачила існування чорних дір – космічних об'єктів, навколо яких гравітація є такою сильною, що навіть світло, потрапляючи у чорну діру, не може її покинути. Загальна теорія відносності передбачила також існування гравітаційних хвиль, які породжуються прискореним рухом масивних тіл і поширюються у просторі зі швидкістю світла. Експериментально існування таких гравітаційних хвиль було підтверджено у 2015 році.

- Законами теорії відносності користуються не лише вчені-фізики, а й інженери; наприклад ті, хто будує прискорювачі елементарних частинок. Закон взаємозв'язку маси й енергії є основою для побудови та експлуатації атомних електростанцій.

Отже, теорія відносності нині є наукою *інженерною!*

- *Теорія відносності і GPS.*

Глобальна система навігації та визначення положення (англ. Global Positioning System, або GPS) стала незамінною в навігації, торгівлі, військовій справі, транспорті та багатьох інших галузях діяльності сучасної людини і суспільства загалом. Усе – від комп'ютеризованих карт в автомобілях до крилатих ракет – базується на можливості синхронізації сигналів з точністю до 50 мільярдних часток секунди для визначення положення будь-якого об'єкта на Землі з великою точністю. Але для того, щоб забезпечити таку точність, необхідно вносити певні поправки до законів Ньютона згідно з теорією відносності, бо під час руху супутників відбувається невеликий зсув частоти радіохвиль. Якщо нехтувати відповідними поправками, то годинники на супутниках глобальної системи будуть спішити на 40 мільйонних часток секунди в день. Це спричинить суттєві порушення в процесі визначення положення об'єктів на Землі.

– Перелік застосувань теорії відносності можна значно продовжити.

*Ілюстративні матеріали.* Гравітаційне притягання квантів світла при його проходженні поблизу масивних небесних тіл (схема) – [9]. Найбільший у світі прискорювач елементарних частинок (Швейцарія) – фото, теорія відносності і GPS – електронний ресурс, колаж «Від ідеї – до вічності» – [9], освітньо-популярний фільм «Що таке теорія відносності?» – [URL: <https://www.youtube.com/watch?v=IsuwQsDYJrk>].

Педагогічна ефективність реалізації представлених вище навчальних матеріалів з теми «Основи СТВ» була підтверджена нами за допомогою методу експертних оцінок та шляхом впровадження в реальну діяльність навчання у закладах загальної середньої освіти та в освітньому середовищі підготовки майбутніх учителів фізики. Частково запропонований нами підхід було реалізовано при написанні підручника «Фізика 10» [9], який був рекомендований експертною комісією до видання.

Як наслідок, ми дійшли наступних висновків.

У процесі вивчення відповідної теми можна досягати позитивних (очікуваних) результатів навчання (у частині їхньої знаннєвої, діяльнісної та мотиваційно-оцінювальної складових). Учителі й здобувачі освіти стверджують, що модернізований нами зміст навчання основам спеціальної теорії відносності є цілком доступним для засвоєння всіма здобувачами освіти, сповна забезпечує позитивну мотивацію учіння тощо.

Для цього при конструюванні змісту таких навчальних матеріалів необхідно, щоб запропоновані змістові структури забезпечували не лише науковість і цілісність змісту шкільної природничої освіти, а й, що особливо важливо, були недиспаратними щодо процесу морального становлення особистості дитини шкільного віку [3]. У цьому контексті формування навчальних матеріалів має здійснюватися у напрямі створення особистісної форми їхнього змістового контенту. Слід висвітлювати знання у розвитку та показувати, яким складним і довгим є шлях до істини, яка сьогодні формується у вигляді рівняння або закону. Використовуючи на уроках відомості з історії фізики, потрібно показувати, що немає знання без особистості людини, яка його творить. Тому при висвітленні того чи іншого закону (теорії) важливим є звертання до критичного аналізу відповідної ролі тієї чи іншої особистості.

Новизна навчального матеріалу має передбачати раптовість багатьох висновків і законів. При цьому надзвичайно важливим є створення проблемної ситуації як джерела-чинника подальшої продуктивної навчально-пізнавальної діяльності учнів у процесі вивчення нового матеріалу. При вивченні частково вже відомого навчального матеріалу необхідно подавати його під новим кутом зору; насамперед варто наголошувати, що це «нове» відображає інший бік фізичної теорії, фізичного явища або об'єкта.

Особливо важливо знайомити учнів з практичним використанням матеріалу, який вивчають на уроці; методичні підходи до цього можуть бути різними: у вступній бесіді або під час пояснення нового матеріалу, під час закріплення вивченого, при виконанні навчальних проєктів, перевірці знань учнів, під час проведення екскурсії тощо.

Необхідно використовувати інформацію про сучасні досягнення науки. Зокрема, потрібно не лише вказувати межі використання понять, законів і теорій класичної фізики, а й висвітлювати суперечності між її законами та новими фактами,

встановленими сучасною наукою. Це підвищує інтерес учнів до фізики як науки. Необхідно, щоб учні усвідомили, що особливий (і подекуди революційний) триумф науки, як правило, досягається в момент встановлення заборон. Наприклад, коли було визнано, що неможливо побудувати вічний двигун, – виникла термодинаміка; коли стало очевидно, що різні характеристики мікрочастинок неможливо виміряти одночасно з довільною точністю, – остаточно сформулювалася квантова механіка тощо.

Вважаємо за необхідне виокремити й наголосити на важливості візуалізації змісту навчальних матеріалів. Тут йдеться про когнітивну візуалізацію як могутній засіб у підтримці психологічних процесів, які супроводжують сприймання, осмислення й подальше опрацювання учнем навчальної інформації. Позитивна й багатоаспектна роль когнітивної візуалізації сповна доведена в процесі нашого дослідження. Розвивальну функцію пояснюємо тим, що в результаті застосування візуальних образів активізуються емоційно-образні компоненти мислення, забезпечується когнітивне структурування змісту знань, когнітивне моделювання елементів структури діяльності й процесів взаємодії об'єктів, також здійснюється конструювання нових мислеобразів і нових візуальних форм, необхідних для вивчення та розуміння навколишньої дійсності та загальнолюдських цінностей [2, с. 94].

Набування здобувачем освіти тих чи інших компетентностей можна ефективно здійснювати через призму добору і конструювання змісту навчальних матеріалів, який би спонукав до опанування процедур і механізмів критичного мислення з урахуванням індивідуальних та суспільних цінностей здобувачів освіти, у цьому разі – дітей старшого шкільного віку та студентів-першокурсників фізичних спеціальностей педагогічних закладів вищої освіти. Переконані, що одним із магістральних напрямів фундаменталізації шкільної природничої освіти, як складника культури, є системна і послідовна освітня практика щодо реалізації гуманітарного потенціалу сучасного природничо-наукового знання.

Вважаємо, що надалі необхідно реалізувати науково-методичний супровід конструювання особистісно орієнтованого змістового контенту з усіх інших тем шкільного курсу фізики, з метою його подальшого відображення в шкільних підручниках нового покоління та в інших навчальних матеріалах. На додаток, можна стверджувати, що добір і конструювання особистісно орієнтованого змісту навчальних матеріалів є наскрізною лінією реалізації концептуальних ідей Нової української школи.

#### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Гриневич Л., Елькін О., Калашнікова С. та ін. Нова українська школа: концептуальні засади реформування середньої школи / заг. ред. М. Грищенко [ухвалено рішенням колегії МОН України від 27.10.2016]. Київ, 2016. 34 с.
2. Грітченко А. Г., Мартинюк М. Т., Шут М. І. Сучасні технології візуалізації навчальної інформації у професійній підготовці учителів. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія педагогічна*, Кам'янець-Подільський, 2020. С. 92–101.
3. Енциклопедія освіти / Акад. пед. наук України; гол. ред. В. Г. Кремень. К.: Юрінком Інтер, 2008. 1040 с.
4. Кремень В. Г. Філософія людиноцентризму в освітньому просторі. Київ: Т-во «Знання» України, 2011. 520 с.
5. Критично-конструктивний підхід до вивчення спеціальної теорії відносності в профільних класах закладів загальної середньої освіти: навч.-метод. посіб. / А. О. Соломенко, О. А. Коновал,

- М. А. Слюсаренко, Т. І. Туркот; за ред. О. А. Коновала. Кривий Ріг: КДПУ, 2018. 150 с.
6. Навчальна програма «Фізика і Астрономія 10–11 клас» / авторський колектив під керівництвом Ляшенка О. І. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-10-11-klas/2018-2019/fizika-i-astronomiya-10-11-avtorskij-kolektiv-pid-kerivnicztvom-lyashenka-o-i.doc> (дата звернення: 15.10.2021).
  7. Окунь Л. Б. Понятие массы. *Успехи физических наук*. 1989. Т. 158, Вып. 3. С. 511–530.
  8. Спасский Б. И. История физики: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Высшая школа, 1977. Ч. II. 309 с.
  9. Шут М. І., Мартинюк М. Т., Благодаренко Л. Ю. Фізика (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Ляшенка О. І.): підручник для 10 класу закладів загальної середньої освіти. К.; Ірпінь: Перун, 2018. 288 с.: іл.
  10. Яворський Б. М. Основные вопросы современного школьного курса физики: пособие для учителей. М.: Просвещение, 1989. 320 с.
  11. PISA: природничо-наукова грамотність / уклад. Т. С. Вакуленко, С. В. Ломакович, В. М. Терещенко, С. А. Новікова; перекл. К. Є. Шумова. Київ: УЦОЯО, 2018. 119 с.

### REFERENCES

1. Hrynevych, L., Elkin, O., Kalashnikova, S. et al. (2016). Nova ukrainska shkola: kontseptualni zasady reformuvannya serednoi shkoly. M. Hryshchenko (Ed.). Kyiv [in Ukrainian].
2. Hritchenko, A. H., Martyniuk, M. T., Shut, M. I. (2020). Suchasni tekhnologii vizualizatsii navchalnoi informatsii u profesiinii pidhotovtsi uchyteliv. *Zbirnyk naukovykh prats Kamianets-Podilskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Ohienka. Seriya pedahohichna – Collection of research papers Kamianets-Podilskiy Ivan Ohiienko National University. Pedagogical Education, 92–101* [in Ukrainian].
3. Entsyklopediia osvity. Akad. ped. nauk Ukrainy. V. H. Kremen (Ed.). (2008). Kyiv: Yurinkom Inter [in Ukrainian].
4. Kremen, V. H. (2011). Filosofiia liudynotsentryzmu v osvitnomu prostori. Kyiv: T-vo “Znannia” Ukrainy [in Ukrainian].
5. Krytychno-konstruktyvnyi pidkhid do vyvchennia spetsialnoi teorii vidnosnosti v profilnykh klasakh zakladiv zahalnoi serednoi osvity. (2018). A. O. Solomenko, O. A. Konoval, M. A. Sliusarenko, T. I. Turkot; O. A. Konoval (Ed.). Kryvyi Rih: KDPU [in Ukrainian].
6. Liashenka, O. I. et al. Navchalna prohrama “Fizyka i Astronomiia 10–11 klas”. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-10-11-klas/2018-2019/fizika-i-astronomiya-10-11-avtorskij-kolektiv-pid-kerivnicztvom-lyashenka-o-i.doc> [in Ukrainian].
7. Okun, L. B. (1989). Ponyatie massy. *Uspehi fizicheskikh nauk – Advances in Physical Sciences. Vol. 158, issue 3, 511–530* [in Russian].
8. Spasskij, B. I. (1977). Istorija fiziki. *Uchebnoe posobie dlya vuzov*. Moskva: Vyssha Shkola, part 2 [in Russian].
9. Shut, M. I., Martyniuk, M. T., Blahodarenko, L. Yu. (2018). Fizyka (riven standartu, za navchalnoiu prohramoiu avtorskoho kolektyvu pid kerivnytstvom Liashenka O. I.). Kyiv; Irpin: Perun [in Ukrainian].
10. Javorskij, B. M. (1989). Osnovnye voprosy sovremennoho shkolnogo kursa fiziki. M.: Prosveshhenie [in Russian].
11. Vakulenko, T. S., Lomakovych, S. V., Tereshchenko, V. M., Novikova, S. A. PISA: pryrodnycho-naukova hramotnist. (2018). Kyiv: UTsOIaO [in Ukrainian].