

## ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕПЛОВИХ ХВИЛЬ У ПРОЦЕСІ ФОРМУВАННЯ ОСОБИСТОСТІ ВЧИТЕЛІВ ФІЗИКИ ТА ПРИРОДНИЧИХ ДИСЦИПЛІН

Олег ВОЛЧАНСЬКИЙ

*У роботі аналізується вивчення студентами хвильових процесів у вузівській лабораторії. Пропонується доповнити його дослідженням властивостей теплових хвиль. Представлена віртуальна лабораторна робота по вивченню теплових хвиль.*

*The studying of wave processes by students in a teaching laboratory is under analysis in the work. It suggests to add the investigation of the thermal wave properties into the syllabus. The virtual installation scheme for thermal wave properties studying is presented.*

**Постановка проблеми.** Майбутні вчителі фізики та дисциплін природничого циклу (географія, біологія, природознавство) повинні глибоко розуміти наукову сутність природних явищ, що стосуються їхньої спеціальності. Крім того, актуальним є питання практичного спрямування отриманих знань, наприклад, уміння застосовувати інформацію, набуту при вивченні предметів фізико-математичного циклу, для засвоєння відповідних розділів базових дисциплін, що входять до програм тієї чи іншої природничої спеціальності.

Одним із фундаментальних понять у сучасній фізиці є поняття коливальних процесів та розповсюдження їх у просторі у вигляді хвиль. Поряд з елементарними порціями речовини – атомами і молекулами в курсі сучасної фізики впевнено отримали місце кванти механічних коливань – фонони, електромагнітних – фотони, спінових – магнони і т.д. Більше того, при вивченні багатьох явищ мікросвіту доводиться розглядати мікрочастинки не як тіла, а як кванти хвиль де Бройля. Тому важливим є формування у майбутніх вчителів розуміння динаміки

хвильових процесів, універсальності законів коливальних явищ у природі.

**Аналіз попередніх досліджень.** Вивченню хвильових процесів приділяється велика увага в курсі фізики. Виконання відповідних лабораторних робіт заплановано при вивченні розділів “Механіка”, “Електрика і магнетизм”, “Оптика”, “Атомна та ядерна фізика” [1]. На жаль, при всій різноманітності досліджуваних властивостей коливань та явищ, що супроводжують їх розповсюдження (інтерференція, дифракція, поляризація, затухання, розсіяння, дисперсія, закони фотоэффекту, дискретність спектрів атомів і молекул і т.д.) в лабораторних роботах з загального курсу фізики традиційно працюють тільки з двома видами хвиль: механічними та електромагнітними [2].

**Виділення невирішених раніше частин проблеми.** Водночас поза межами лабораторного практикуму залишаються інші типи хвиль, зокрема такий цікавий вид, як теплові. Теплові хвилі виникають при модульованому в часі нагріванні зразка. Результуючі коливання температури, що поширюються від місця нагріву, отримали назву теплових або температурних хвиль [3]. Особливістю цих хвиль, на відміну від акустичних та електромагнітних, є сильне затухання (порядку 500 разів на довжині хвилі  $\lambda_T$ ), а також залежність  $\lambda_T$  та фазової швидкості від частоти модуляції джерела нагріву ( $\lambda_T \sim \omega^{-1/2}$ ). Ця унікальна властивість робить теплові хвилі незамінним інструментом при пошаровій безруйнівній діагностиці невеликих за розмірами об'єктів,

наприклад, виробів мікроелектроніки [4, 5].

**Формулювання мети статті.** В даній роботі пропонується доповнити програму курсу загальної фізики вивченням властивостей теплових хвиль, зокрема роботою лабораторного практикуму. Окрім збільшення обсягу знань студентів про хвильові процеси, вивчення даного типу хвиль дозволило б поліпшити викладання розділу “Термодинаміка та молекулярна фізика”, у якому експериментальне дослідження хвильових процесів зводиться лише до використання звукових хвиль при вимірюванні теплоємності [2].

**Виклад основного матеріалу дослідження.** При вивченні теплових хвиль студенти мають можливість спиратися на раніше засвоєну у розділі «Механіка» інформацію:

1. Фізика хвильового процесу.
2. Основні характеристики хвилі: довжина хвилі, амплітуда, період, частота, фаза, рівняння хвильового фронту, фазова та групова швидкості хвилі.
3. Відбивання, інтерференція та дифракція хвиль.
4. Енергетичні характеристики хвильового процесу.

Для отримання якісної картини умов виникнення і розповсюдження теплових потоків доцільно розглянути одновимірне рівняння теплопровідності для випадку, коли в деякому середовищі в напрямку осі  $x$  відбувається тепловий потік густиною  $\vec{j}(x, t)$ . Виділимо в цьому напрямку циліндр площею поперечного перерізу  $S$  та висотою  $dx$  (Рис.1).

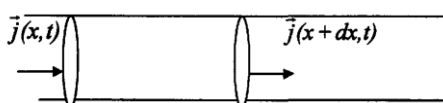


Рис. 1.

Кількість теплоти, що надходить до циліндру через ліву основу за час  $dt$

дорівнює  $j(x, t)Sdt$ . За цей же час через праву основу виходить кількість теплоти  $j(x + dx, t)Sdt$ . Тоді кількість теплоти, що залишається в циліндрі:

$$dq = (j(x, t) - j(x + dx, t))Sdt = -\frac{dj}{dx} Sdxdt. \quad (1)$$

З іншого боку, за означенням теплоємності  $dq = Cdm dT$ , де  $dm = \rho Sdx$  – маса циліндра,  $C$  – питома теплоємність,  $dT$  – збільшення температури, тобто

$$dq = C\rho Sdx dT \quad (2)$$

Порівнюючи рівняння (1) та (2) отримуємо:

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial j}{\partial x} \quad (3)$$

Враховавши, що потік тепла пропорційний градієнту температури і напрямлений у бік її зменшення ( $j = -\chi \frac{\partial T}{\partial x}$ , де  $\chi$  – коефіцієнт теплопровідності), остаточно запишемо однорідне рівняння теплопровідності:

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Якщо в середовищі присутні джерела тепла, то в рівнянні теплопровідності додатково з'явиться об'ємна густина потужності тепловиділення  $w = \frac{\partial^2 q}{\partial t \partial x}$ :

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + w. \quad (5)$$

Щоб отримати якісне уявлення про виникнення і властивості теплових хвиль в конденсованому середовищі, розглянемо наступну найпростішу одновимірну модель. Нехай поверхня напівнескінченного ізотропного твердого тіла розташована в площині  $x=0$  і рівномірно освітлюється світлом, модульованим за інтенсивністю по закону:

$$I = I_0(1 + \cos(\omega t))/2. \quad (6)$$

Для спрощення розрахунків розв'яжемо задачу у комплексному

вигляді. Припустивши, що вся поглинута світлова енергія перетворюється в теплову, можемо записати рівняння теплопровідності:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha \frac{I_0}{2} e^{-\alpha x} e^{i\omega t}, \quad (7)$$

де  $c$ ,  $\rho$ ,  $\chi$  і  $\alpha$ - питомі теплоємність і густина, теплопровідність і коефіцієнт оптичного поглинання матеріалу,  $T$  - модульована температура зразка.

Відкинувши із фізичних міркувань доданок із зростаючою вглиб зразка температурою і нехтуючи тепловідводом у навколишнє середовище, отримуємо змінну температуру на глибині  $x$  у комплексному вигляді:

$$T(x,t) = \frac{I_0}{2\chi\eta - \alpha^2} (e^{-\alpha x} e^{i\omega t} - \frac{\alpha}{\eta} e^{-x/l} e^{i(\omega t - x/l)}) = T_1 + T_2 \quad (8)$$

$$\text{де } \eta = (1+i)(\alpha c\rho/2\chi)^{1/2} = \frac{(1+i)}{l};$$

$$l = (2\chi/\alpha c\rho)^{1/2}.$$

Перший доданок ( $T_1$ ) описує коливання температури, зумовлені поглинанням світла в даній точці, а другий ( $T_2$ ) відповідає теплу, що надійшло від інших ділянок середовища і описує власне теплову хвилю. Видно, що на відміну від електромагнітних і акустичних хвиль, у рівнянні теплової хвилі явно присутнє у явному вигляді затухання амплітуди з глибиною:

$$T_2(x) = T(0)e^{-x/l} \cos(\omega t - x/l) \quad (9)$$

Довжина теплової дифузії  $l = (2\chi/\alpha c\rho)^{1/2}$  відповідає глибині затухання хвилі в  $e$  разів. Із рівняння поверхні рівної фази  $\phi = \omega t - x/l$  можна отримати, що швидкість хвильового фронту:  $v = \omega l = (2\omega\chi/c\rho)^{1/2}$  залежить від частоти модуляції падаючого світла. Довжина хвилі  $\lambda = vT = 2\pi l$ , тобто тепла хвиля затухає на своїй довжині  $\lambda$  в  $e^{2\pi} \approx 500$  разів.

Застосуємо отримані результати до теплових хвиль, що збуджуються в поверхневому шарі Землі добовими й

річними коливаннями освітленості її поверхні Сонцем. Для спрощення вважатимемо, що сонячне світло досить добре поглинається земною поверхнею ( $\alpha \gg \eta$ ), а коливання освітленості носять гармонійний характер. Тоді коливання температури на глибині  $x$ :

$$T(x,t) = \frac{I_0}{2\chi\eta} e^{-x/l} e^{i\omega t}. \quad (10)$$

Періодами таких коливань у нашій задачі будуть відповідно доба та рік. Глибина проникнення добових та річних температурних хвиль згідно з формулою (9) пов'язані співвідношенням

$$l_{\text{річна}}/l_{\text{добова}} = (T_{\text{річний}}/T_{\text{добовий}})^{1/2} = 365^{1/2} = 19. \quad (11)$$

Аналогічне співвідношення характерне й для швидкостей поширення даних хвиль. Дійсно, експериментально було встановлено, що коливання температури, зумовлені нагріванням земної поверхні вдень і охолодженням уночі не впливають на температуру Землі вже на глибині 1м, а сезонні – на глибині 20 м [3, с.179]. Глибше температура Землі зовсім не залежить від теплових коливань на її поверхні. Викладення даного матеріалу повинно роз'яснити майбутнім фізикам, географам, природознавцям відомий їм факт, що сезонні коливання температури земної поверхні проникають тільки на досить незначні глибини.

Сильне затухання теплових хвиль дозволяє використовувати їх як унікальний інструмент при пошаровій діагностиці оптично непрозорих невеликих за розмірами об'єктів, наприклад, виробів мікроелектроніки [4]. На досліджуваний зразок направляють добре сфокусоване і модульоване за інтенсивністю випромінювання. В ділянці модульованого нагріву середовища створюється своєрідний "тепловий зонд", переміщуючи який можна досліджувати внутрішню будову зразка,

виявляючи місця неоднорідності його теплових властивостей (тріщини, порожнини, фазові межі і т.д.). Причому розмірами зонду, а також глибиною зондування, можна згідно з формулою  $l = (2\chi/\omega\rho)^{1/2}$  керувати, змінюючи частоту модуляції джерела нагріву  $\omega$ .

Водночас, сильне затухання теплових хвиль робить практично неможливим безпосередню реєстрацію (наприклад піроелектричними

датчиками) при їх вивченні в лабораторії, що ставить, на перший погляд, велику перепону для їх застосування. На звукових та ультразвукових частотах глибина затухання теплових хвиль в конденсованому середовищі сягає від 1 см (для частот порядку 10 Гц) до 1 мкм для частот порядку 10 МГц. Відповідні величини для алюмінію, кремнію та германію наведені в табл.1.

Табл.1.

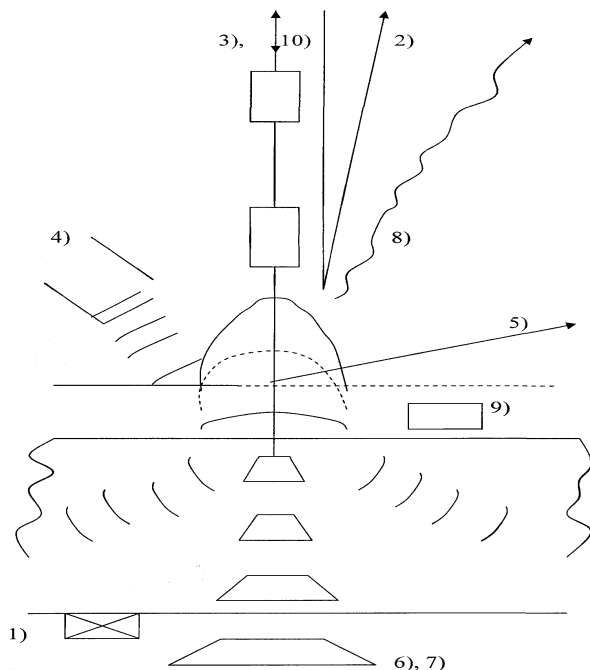
| Матеріал | Густина, кг/м <sup>3</sup> | Питома теплоємність, кДж/кгК | Теплопровідність, Дж/м·с К | Довжина теплової дифузії $l = (2\chi/\omega\rho)^{1/2}$ , мкм на різних частотах модуляції ( $\nu = \omega/2\pi$ ) |                 |                 |                 |                 |
|----------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|          |                            |                              |                            | $\nu = 10$ Гц  | $\nu = 10^2$ Гц | $\nu = 10^3$ Гц | $\nu = 10^4$ Гц | $\nu = 10^5$ Гц |
| Al       | 2700                       | 0,88                         | 2,01                       | 1870   | 590             | 187             | 59              | 18,7            |
| Si       | 2330                       | 0,70                         | 1,89                       | 1900   | 610             | 190             | 61              | 19,0            |
| Ge       | 5320                       | 0,70                         | 0,71                       | 3670   | 1160            | 367             | 116             | 36,7            |

Однак, існує досить багато методів [5], які дозволяють фіксувати об'ємний розподіл нестационарних теплових полів за рахунок супутніх фізичних явищ.

На рис.2. наведена зведена схема, що зображає механізм детектування теплових хвиль різними методами:

1 – реєстрація акустичного зміщення поверхні зразка п'єзоелектричним перетворювачем, що знаходиться з ним в безпосередньому контакті;

2 – реєстрація відбивання пробного пучка при деформації поверхні зразка;



- 1)- метод п'єзодатчика;
- 2)- метод реєстрації кута фотовідбивання;
- 3)- інтерференційний метод;
- 4)- газомікрофонний метод;
- 5)- метод ефекту міражу
- 6)- метод термолінзи;
- 7)- метод рефракційної інтерферометрії;
- 8)- метод фототермічної радіометрії
- 9)- контактне вимірювання температури;
- 10)- метод фотовідбивання.

Рис.2.

3 – інтерференційний метод, що реєструє зміну різниці ходу відбитого пробного пучка при зміщенні поверхні зразка.

4 – газомікрофонний метод – мікрофон реєструє акустичні хвилі, що виникають при тепловому розширенні шару газу, що прилягає до зразка;

5 – метод ефекту міражу (фотодефлекційний метод) – детектування відхилення пробного променя при проходженні його через область з градієнтом показника заломлення, що викликаний модульованим нагрівом зразка;

6 – метод термолінзи – термоіндукований градієнт показника заломлення викликає розфокусування пробного пучка, що проходить через ділянку змінного нагріву;

7 – рефракційна інтерферометрія - інтерферометром реєструють фазову затримку пробного пучка хвиль при його проходженні скрізь ділянку середовища з градієнтом показника заломлення ;

8 – метод фототермічної радіометрії – реєстрація теплового випромінювання зразка, викликаним модульованою зміною його температури;

9 – контактні методи вимірювання модульованої температури поверхні зразка (піродатчики, термопари, термістора, болометри і т.д.);

10 – реєстрування з допомогою пробного променя показника відбивання показника при нагріванні.

Аналіз літератури показує, що найбільш розповсюдженим методом дослідження властивостей теплових хвиль є метод п'єзодатчика, коли п'єзоелектричний перетворювач, що знаходиться в безпосередньому контакті зі зразком, реєструє акустичні хвилі, що виникають всередині зразка за рахунок термопружного розширення в ділянці модульованого нагріву (метод

1 на рис.2). Хоча метод п'єзодатчика і є одним з найпростіших у фототермоакустиці, однак на практиці для отримання прийняттого рівня акустичного сигналу доводиться використовувати достатньо потужні лазери та високочутливу вимірювальну апаратуру. Не дуже просто також здійснити амплітудну модуляцію випромінювання лазера з можливістю змінювати її в необхідному діапазоні частот. Далеко не кожен навчальний заклад може дозволити собі створити таку установку в навчальній лабораторії. Приємним винятком є фізичний факультет Київського національного університету ім. Т.Шевченка, де така установка створена і використовується в навчальному процесі [6].

У даній статті пропонується використання віртуальної лабораторної роботи, за допомогою якої можна було б моделювати експеримент для вивчення властивостей теплових хвиль. В роботі вивчається сильнозатухаючий характер теплових хвиль і залежність глибини затухання від частоти. Модельні зразки являють собою пластинки із різних матеріалів (алюміній, кремній, германій), всередині яких на різних глибинах створені порожнини, як показано на умовному розрізі зразка (рис. 3), пустоти показані темним кольором).

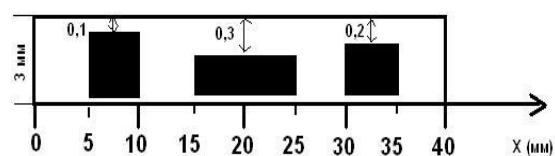


Рис.3

На першому етапі після запуску програми і ознайомлення з блок-схемою установки студентам пропонується задати параметри експерименту: матеріал зразка, топологія залягання ділянок з порушеними тепловими властивостями,

частота модуляції (рис.4). Після цього іде запуск сканування поверхні зразка фокусованим лазерним пучком і автоматична побудова комп'ютером графіку залежності сигналу п'єзодатчика від положення зондуючого променя. На тих ділянках зразка, де теплова хвиля починає розсіюватись на підповерхневому дефекті, змінюється сигнал п'єзодатчика.

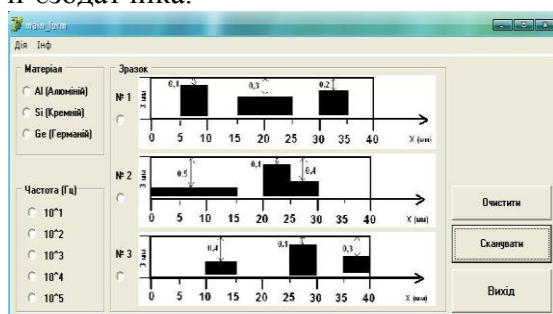


Рис.4

Як приклад на рис. 5 наведені отримані за допомогою описаної програми термохвильові топограми алюмінієвого зразка на двох різних частотах модуляції.

Із топограми, знятої на частоті 100 Гц (рис. 5 (а)) видно, що сигнал суттєво зростає там, де лазерний пучок зондує ділянки з погіршеними умовами відводу тепла (підповерхнева порожнеча). Топограма на частоті 1000 Гц для того ж зразка наведена на рис.5(б). В цьому випадку глибина проникнення теплової хвилі менше від глибини залягання більшості дефектів. З малюнку видно, що сигнал від всіх ділянок практично однаковий, а значить “тепловий зонд” майже “не відчуває” ніяких порушень структури зразка.

На основі цих даних визначається довжина теплової хвилі на різних частотах модуляції і порівнюються з розрахунковими. Робиться висновок про сильнозатухаючий характер теплових хвиль і залежність їх довжини та глибини затухання та від частоти модуляції джерела нагріву.

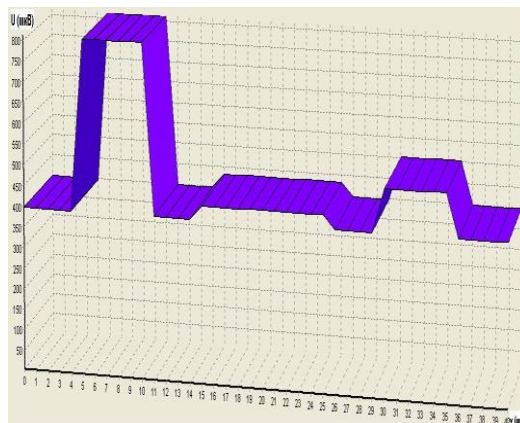


Рис. 5 (а), частота модуляції 100 Гц

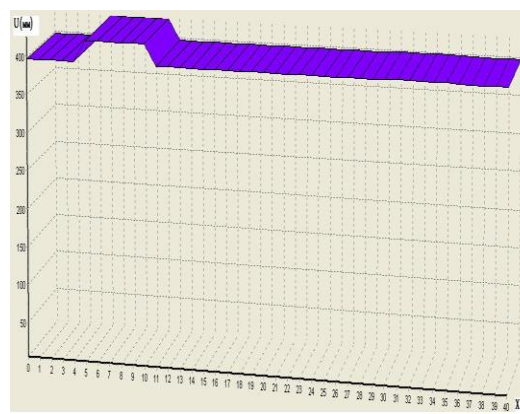


Рис. 5 (б), частота модуляції 1000 Гц

**Висновки з даного дослідження.** Виконання запропонованих у даній роботі досліджень дозволить студентам глибше вивчити особливості хвильових процесів та краще осягнути універсальність коливальних процесів в природі на прикладі теплових хвиль, а також закріпити знання розділу «Термодинаміка».

**БІБЛЮГРАФІЯ**

- 1.Програми для фізико-математичних факультетів педінститутів. Зб.№ 2. За заг ред. М.І.Шкіля та Г.П.Грищенка. – К.: РОВО “Укрвузполіграф”, 1992 – 144 с.
- 2.Лабораторный практикум по общей физике (под ред. Е.М.Гершензона, Н.Н.Малова. – М.: Просвещение, 1985. – 351 с.
- 3.Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2 – М.: Наука, 1975. – 551 с.
- 4.Rosencwaig A. Thermal wave microscopy with photoacoustics // J.Appl.Phys. – 1980. – Vol.51, №4. – P.2210-2211.

5. Жаров В.П., Летохов В.С. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия – М.: Наука, 1975. – 320 с

6. Волчанський О.В., Кузьмич А.Г. Стенд для вивчення властивостей теплових хвиль за допомогою термоелектричного ефекту // Наукові записки.- Випуск 77.- Серія: Педагогічні науки. - Кіровоград: РВВ КДПУ ім.В.Винниченка.- 2008. - Частина 1, С.311-315.

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

**Волчанський Олег Володимирович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та методики її викладання Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка.

*Наукові інтереси:* фототермічні та фотоакустичні явища в напівпровідниках, методика викладання фізики, реформування вищої освіти України.

## ОКРЕМІ АСПЕКТИ СПІВВІДНОШЕННЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО І ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗНАННЯ У НАВЧАННІ ФІЗИКИ

**Олександра ГУР'ЄВСЬКА**

*У статті розглядається важливість знайдення оптимального співвідношення між фундаменталізацією і професійною спрямованістю освіти у процесі підготовки майбутнього вчителя фізики в педагогічному вузі. Встановлюється співвідношення фундаментального та технологічного знання в змісті курсу фізики та методики її навчання.*

*In the article importance of finding of optimum betweenness is examined fundamentalization and professional orientation of education in the pedagogical institute of higher. Correlated fundamental and technological knowledge in maintenance of studies of physics.*

### **Постановка проблеми.**

Об'єктивні процеси та соціальні перебудови в суспільстві, які останнім часом пов'язані з розвитком демократизації в Україні, поставили перед педагогічною наукою комплекс проблем. Зокрема, заслуговує уваги проблема модернізації вищої педагогічної освіти, забезпечення науково обґрунтованих змін у стратегіях і структурі освітньої галузі в цілому, пошук нового змісту, методів, форм навчання і технологій реалізації цих змін при підготовці майбутніх учителів й утвердження професіоналізму в системі освіти. Пріоритетним у сучасній системі освіти є підхід, що орієнтований на інтереси особистості студента, адекватні

сучасним тенденціям суспільного розвитку і спрямовані на реалізацію активних форм взаємодії суб'єктів навчально-виховного процесу.

Перспективні напрямки розвитку освіти стосуються і характерні для торкаються навчання фізики. Однак сучасні потреби особистості студента в інтелектуальному, світоглядному і духовно-культурному збагаченні у процесі навчання фізики та реальні можливості освітнього середовища вищих педагогічних навчальних закладів є суперечливими. Розвиток науки фізики та інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), перехід загальноосвітніх навчальних закладів (ЗНЗ) до профільної освіти педагогічних університетів до ступеневої в умовах безперервної відкритої фізичної освіти, заснованої на особистісно-орієнтованому навчанні, потребують перегляду теоретико-методичних засад традиційного підходу і створення на цій основі нової моделі навчання фізики.

Модернізована освітня парадигма, орієнтована на створення умов для розвитку особистості і фундаменталізації наукового знання (перенесення акцентів на теоретичні методи пізнання – ідеалізацію,