

## ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ КУРСУ «ТЕРМОДИНАМІКА І СТАТИСТИЧНА ФІЗИКА»

*Школа О.В.,*

*докторант,*

*Національний педагогічний університет імені М.П. Драгоманова*

Стаття присвячена аналізу деяких проблемних питань курсу “Термодинаміка і статистична фізика”, що потребують самостійного творчого опрацювання та мають важливе значення в фундаментальній та фаховій підготовці майбутнього вчителя фізики.

Статья посвящена анализу некоторых проблемных вопросов курса “Термодинамика и статистическая физика”, которые требуют самостоятельной творческой проработки и имеют важное значение в фундаментальной и профессиональной подготовке будущего учителя физики.

The article is devoted to the analysis of some problem questions of educational course “Thermodynamics and statistical physics”. These problems need independent creative working out and have important a pedagogical value in professional and fundamental preparation of future physics teacher.

**Постановка проблеми.** Підготовка висококваліфікованих фахівців була й залишається найважливішим завданням вітчизняної вищої педагогічної школи. У сучасних умовах модернізації вищої освіти в контексті європейських вимог, перенесення уваги з процесу навчання на його результат, запровадження діяльнісного, особистісно зорієнтованого, компетентнісного та кредитного підходів, актуальною залишається проблема підвищення рівня та якості фахової підготовки майбутнього вчителя фізики. Загально визнано, що основу його професіоналізму, конкурентоспроможності та мобільності складають фундаментальні наукові знання. Останні, зокрема, формуються під час вивчення студентами курсу теоретичної фізики, що є завершальним етапом їх фундаментальної підготовки. Саме на його засадах відбувається систематизація у сприйнятті та відображенні явищ навколишнього світу в процесі їх пізнання, формується світогляд, науковий стиль мислення, шліфується інтуїція та компетенції майбутнього фахівця.

Як свідчить практика викладання, курс теоретичної фізики взагалі, а термодинаміки і статистичної фізики зокрема, є таким, що важко засвоюється, оскільки відрізняється високим рівнем формалізації основних понять, законів і теорій та відповідним рівнем математичного апарату. За сучасних умов стійкої тенденції зменшення обсягу аудиторних годин та підвищення ролі самоосвітньої навчальної діяльності студентів необхідною умовою ефективної фундаментальної підготовки поряд з традиційним формами навчання є, на наш погляд, творча, професійно зорієнтована самостійна робота, організована під керівництвом викладача з кожної теми (змістового модуля) навчального курсу. З пасивного споживача знань студент має перетворитися на активного їх творця, оскільки справді фундаментальним є саме особистісне знання. Створення умов, які б спонукали студентів до самостійного пошуку, саморозвитку, самовдосконалення й самореалізації є чи не головним завданням роботи сучасного викладача. У зв'язку з цим постає проблема підвищення ефективності самостійної роботи майбутніх учителів фізики з ключових, проблемних питань навчального курсу, що сприятимуть активізації пізнавальної

діяльності, оволодінню методологією наукового пізнання, розв'язанню теоретичних і практичних питань сучасної науки, а, отже, підвищенню рівня та якості їх фундаментальної і фахової підготовки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз науково-методичної літератури свідчить про те, що проблемі вдосконалення фахової підготовки майбутнього вчителя та різним аспектам організації навчання фізики у вищій школі присвячені дослідження П. Атаманчука, Л. Благодаренко, І. Богданова, О. Бугайова, Б. Будного, Г. Бушка, С. Величка, В. Вовкотруба, С. Гончаренка, О. Іваницького, Л. Калапуші, А. Касперського, О. Коновала, Е. Коршака, Д. Костюкевича, О. Ляшенка, М. Мартинюка, В. Мендерецького, А. Павленка, Ю. Пасічника, В. Савченка, М. Садового, О. Сергєєва, В. Сергієнка, Н. Сосницької, Н. Стучинської, Б. Суся, І. Тичини, В. Шарко, М. Шута та ін. Зазначимо, що комплексні дослідження, присвячені науково-методичним засадам навчання курсу теоретичної фізики, що відображають сучасні ідеї й тенденції розвитку вищої педагогічної освіти в контексті європейських вимог та дозволяють формувати професійну компетентність майбутніх учителів фізики на сьогодні майже відсутні. У зв'язку з цим **метою статті** є короткий аналіз деяких проблемних питань навчального курсу “Термодинаміка і статистична фізика” як складової теоретичної фізики, що потребують самостійного творчого опрацювання (або можуть стати основою для розробки індивідуальних творчих завдань) та мають важливе значення в фундаментальній і фаховій підготовці майбутнього вчителя фізики.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** *Закони статистичної термодинаміки та їх наслідки.* Узагальнення великої кількості дослідних фактів про природу теплоти та її перетворення в механічну роботу свідчило про те, що в макроскопічних процесах та явищах спостерігаються переходи різних видів енергії у внутрішню енергію системи й навпаки. Кількісний бік цих взаємоперетворень, як відомо, описують першим законом термодинаміки. Існує кілька його еквівалентних формулювань, але, по суті, він є *законом збереження та перетворення енергії для теплових процесів*. Застосування цього положення до теплових процесів історично означало відкриття внутрішньої енергії як нового виду енергії (до цього природу теплових явищ розуміли як рух особливої субстанції – теплецю).

Перший закон термодинаміки, незважаючи на фундаментальність, дає кількісний баланс енергії для будь-яких фізичних процесів, але не розкриває якісної різниці різних видів енергії і тому не може визначити напрям їх перебігу. Детальний аналіз теореми С. Карно привели Р. Клаузіуса у 1854 р. до відкриття другого закону термодинаміки та введення нової фізичної величини ентропії  $S$  (від грецького *entropia* “поворот”, “перетворення”):  $dS = \delta Q/T$ . Узагальнюючи вираз першого закону термодинаміки, він отримав:

$$dU \leq TdS - \delta A,$$

де знак рівності відповідає рівноважним, а нерівності – нерівноважним (необоротним) процесам. Це співвідношення називають *основним термодинамічним рівнянням*. Еквівалентним формулюванням другого закону термодинаміки є постулати В. Кельвіна, М.Планка та положення про неможливість побудови вічного двигуна другого роду.

Пояснюючи необоротність теплових процесів у природі, Л. Больцман у 1872 р. встановив статистичний зміст ентропії (кількісна міра ступеня молекулярного безладу в системі; параметр, що характеризує ступінь нерівноважності макроскопічного стану системи):

$$S = k \ln \Omega,$$

де  $\Omega$  статистична вага стану системи (число способів /мікростанів/, якими може бути реалізований макроскопічний стан системи) [1, с.104]. Після фундаментального відкриття Л. Больцмана статистичне трактування законів термодинаміки стали пов'язувати з поняттям ентропії: 1) ентропія системи є однозначною функцією її стану; 2) ентропія замкненої системи не може зменшуватись: вона або зростає, якщо в системі відбуваються необоротні процеси, або залишається сталою, якщо система перебуває в рівновазі і всі процеси в ній є оборотними ( $dS \geq 0$ ).

Відкриття третього закону термодинаміки пов'язано з визначенням ентропійної сталої та квантовими особливостями термодинамічних систем, а саме з дискретністю спектру їх енергії та наявністю основного стану з найменшою енергією. Згідно статистичної теорії основний енергетичний стан багатьох рівноважних систем невироджений, тому їх ентропія за  $T \rightarrow 0K$  перестає залежати від усіх термодинамічних параметрів і на межі  $T = 0K$  наближається гранично до деякого сталого значення, яке можна взяти за нуль:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = k \ln \Omega(E_{\min}) = 0.$$

Це твердження являє собою зміст так званої теплової теореми Нернста (1906 р.), з якої виходить положення про недосяжність абсолютного нуля температур і неможливість побудови вічного двигуна третього роду. При цьому недосяжність  $T = 0 K$  призводить лише до неможливості переходу від додатних до від'ємних температур. Теорема Нернста не виключає можливості існування поряд з додатними й від'ємних температур, що й було доведено у 1951 р. експериментами Е. Парселла і Р. Паунда з дослідження властивостей системи ядерних спінів у дуже чистих кристалах фтористого літію  $LiF$  за наявності зовнішнього магнітного поля [2, с.103].

Під час встановлення фізичної сутності законів статистичної термодинаміки дуже важливим є аналіз їх наслідків.

1). Аналізуючи відоме рівняння першого закону та положення про неможливість вічного двигуна першого роду, студенти мають чітко усвідомлювати, що можливі два різних способи зміни внутрішньої енергії термодинамічної системи при взаємодії із зовнішніми тілами: шляхом виконання роботи (у формі роботи) та за теплообміну (у формі теплоти). Робота і теплота мають ту загальну властивість, що вони існують лише в процесі передачі енергії, а їх числові значення суттєвим чином залежать від виду цього процесу. Проте між теплою і роботою існує глибока якісна різниця, оскільки вони виступають нерівноцінними формами передачі енергії. Виконання роботи над системою може безпосередньо привести до збільшення будь-якого виду енергії системи (кінетичної, потенціальної, внутрішньої). Надання системі теплоти, тобто збільшення енергії хаотичного руху її частинок, безпосередньо призводить до збільшення внутрішньої енергії системи. Отже, *робота є макроскопічним способом передачі енергії від одного тіла до*

іншого. Термін “макроскопічна” підкреслює той факт, що робота завжди пов’язана з макроскопічними переміщеннями тіл або їх частин. *Теплота є мікроскопічним способом передачі енергії.*

2). З другого закону термодинаміки виходить можливість побудови *абсолютної шкали температур*. Для оборотного циклу Карно маємо:

$$T_1 / T_2 = Q_1 / Q_2.$$

Як бачимо, відношення температур теплових резервуарів дорівнюють відношенням кількостей теплоти, якими вони обмінюються з робочим тілом цілком незалежно від його природи, що свідчить про абсолютний характер цих температур. Отже, це співвідношення можна покласти в основу порівняння температур двох тіл. Якщо ці тіла вибрані в якості нагрівача і холодильника в оборотному циклі Карно, то, вимірюючи  $Q_1$  і  $Q_2$ , можна визначити відношення  $T_1 / T_2$ .

Лишається тільки ввести певну одиницю температури, для чого, звичайно, треба скористатися сталими температурними точками. Але на відміну від емпіричних шкал, для градування яких було потрібно не менше двох опорних точок (плавлення льоду і кипіння води), тепер досить лише однієї, бо за іншу править абсолютний нуль. Приписавши точці плавлення чистого льоду за нормальних умов температуру  $273,15\text{K}$ , ми дістанемо цілком бездоганну в теоретичному відношенні *абсолютну температурну шкалу (шкалу Кельвіна)*.

3). Для розуміння другого закону термодинаміки істотне значення має *статистичне трактування стану рівноваги системи як найімовірнішого за заданих зовнішніх умов*. Через внутрішній рух частинок в системі рівноважний стан не є нерухомим, застиглим, однозначно визначеним. У цьому стані система перебуває найбільший час, тому ми спостерігаємо його частіше від інших. Проте спостереження виявляють часті малі відхилення від рівноваги – флуктуації (рис. 1). Великі відхилення взагалі можливі, але трапляються дуже рідко. Отже, *статистична теорія передбачає існування флуктуацій, тобто явищ, які проходять зі зменшенням ентропії* (термодинаміка таких процесів не розглядає).

*Статистично трактується й перехід системи від нерівноважних станів до рівноважного*. За статистичною теорією такий процес не є жорстко детермінованим і не обов’язково проходить весь час у бік рівноважного стану: він супроводжується малими відхиленнями від основного напрямку. Повільне зростання ентропії має місце лише в середньому, завдяки загальній тенденції в зміні станів системи. Отже, статистика показує, що закон зростання ентропії не є абсолютним законом природи.

4). *Негентронія*. Зазначимо, що перехід у стан статистичної рівноваги властивий тільки ізолюваним системам. Якщо система не замкнена, то остання в ній не може настати. Наприклад, життя на Землі постійно розвивається і живі організми не виявляють тенденції до переходу у стан з максимальною ентропією. Вони постійно взаємодіють з навколишнім середовищем, дістаючи від нього продукти харчування, повітря, світло, воду, теплоту. Щодо таких систем другий закон не містить у собі ніяких тверджень. Якщо живий організм повністю ізолювати від навколишнього середовища, перетворивши на замкнену систему, то очевидно, що без повітря та обміну речовин він дуже швидко перейде до стану термодинамічної

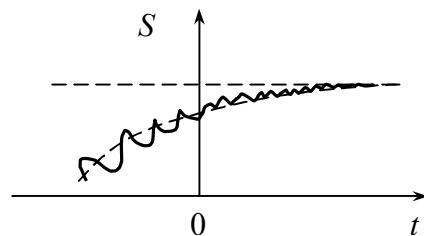


рис.1

рівноваги з середовищем. Отже, тенденція до дезорганізації і невпорядкованого руху превалює в замкнених системах, тоді як для незамкнених (відкритих) систем з характерним для них високим рівнем організації можливий як завгодно довго впорядкований рух і розвиток за висхідною лінією. Такі системи прийнято характеризувати негентропією, яка за фізичною суттю аналогічна ентропії і для відкритих систем також зростає з часом [3, с.144].

Суперечності між другим законом термодинаміки і прикладами високоорганізованого навколишнього світу привели до появи в середині ХХ ст. *нерівноважної термодинаміки*, значний внесок в яку зробили Г. Хакен, І. Пригожин, де Гроот, Л. Онзагер та ін. Бельгійський фізик російського походження Ілля Романович Пригожин за роботи в цій області в 1977 р. зокрема був удостоєний Нобелівської премії. Як підсумок, завдяки розвитку нелінійної нерівноважної термодинаміки з'явилася абсолютно нова наукова дисципліна *синергетика* – наука про самоорганізацію і стійкість відкритих систем/структур різної природи: фізичних, хімічних, біологічних, соціальних та ін.

5). Статистична фізика дозволяє визначити *межі застосування законів термодинаміки*. Як відомо, через велику кількість молекул у макроскопічних тілах всі процеси в природі є практично необоротними; імовірність процесів переходу макросистеми від рівноважних до нерівноважних станів в цілому досить мала. Але для малих об'єктів з невеликим числом частинок імовірність випадкових відхилень від рівноваги (флуктуацій) стає помітною. Саме флуктуаціями тиску в малих об'ємах пояснюють броунівський рух; флуктуаціями густини газу в об'ємах, розміри яких сумірні з довжиною світлової хвилі, пояснюють розсіювання світла в атмосфері Землі та блакитний колір неба; флуктуаціями густини в малих об'ємах пояснюють механізм виникнення нової фази у пересиченій парі та розчинах тощо. Спостереження флуктуацій слугує важливим доказом *статистичної теорії необоротності макропроцесів*, яку створив на початку ХХ століття Л. Больцман [4, с.60].

Сфера поширення законів термодинаміки обмежена розмірами об'єктів дослідження, які мають бути досить великими, щоб забезпечити вирівнювання випадкових явищ мікросвіту. Однак цю вимогу задовольняють навіть розміри піщинки, яка містить молекул більше, ніж відер води Чорне море. Проте завдяки прогресу експериментальної техніки науковому вивченню сьогодні стали доступні області речовини, які складаються з порівняно невеликої кількості частинок. Через невизначеність рівноважного стану такої мікросистеми всі процеси в ній будуть оборотними і флуктуації стануть помітними. Такі системи слід вивчати вже методами механіки, а не статистики. Властивості великої сукупності частинок як цілого не є простою сумою властивостей окремих частинок. На певному ступені збільшення кількості частинок в системі, що рухаються окремо за законами механіки, породжує новий вид руху – тепловий рух. Другий закон термодинаміки не можна застосовувати до окремих молекул та ультрамікроскопічних областей речовини, але він вступає у свої права за певної (великої) кількості молекул у системі. Отже, нижньою межею термодинаміки є системи скінчених, а не елементарно малих, розмірів з відповідно малим числом ступенів вільності.

Маємо й верхню межу: об'єкти в термодинаміці можуть бути дуже великими, але не нескінченними. У середині ХІХ століття необґрунтоване поширення законів термодинаміки на весь Всесвіт призвів В. Томсона (1852 р.), а трохи пізніше Р. Клаузіуса, до ідеї про “теплову смерть” Всесвіту. Згідно останньої, всі процеси у Всесвіті є тільки процесами релаксації

(переходами до рівноважного стану), які врешті-решт призведуть до встановлення в ній повної термодинамічної рівноваги: припиняться всі процеси перетворення енергії з одних в інші, всі неоднорідності густини речовини, хімічного складу, різниці температур зникнуть, Сонце та зірки погаснуть, життя на планетах стане неможливим, настане повний спокій і вже назавжди.

Цю гіпотезу не можна прийняти як з філософської, так і з точки зору статистичної фізики. Згідно першої виходить якщо не кількісне, то якісне зникнення матерії (втрата її здатності до саморуху), згідно іншої, сьогодні встановлено, що немає ніяких фізичних підстав для прямого перенесення законів термодинаміки на безмежний Всесвіт, який, до речі, постійно змінюється з часом. Питання про релаксацію Всесвіту не можна вважати питанням однієї статистичної термодинаміки, оскільки воно пов'язане з космологією, питаннями про еволюцію зірок, галактик і т.д. Переходячи до космічних масштабів, поняття, якими оперує другий закон термодинаміки (“температура”, “ентропія”, “ізолювана система”, “термодинамічний стан”) втрачають, або, в усякому разі, докорінно змінюють свій зміст. Справді, чи можна вважати Всесвіт ізолюваною системою в тому розумінні, яке звичайно вживають у термодинаміці? Чи можна взагалі стверджувати, що “термодинамічний стан Всесвіту” визначатиметься тими самими параметрами, що й для звичайних систем, а не якимось цілком новими (як, наприклад, “космічний тиск”, який залежить від середньої кількості руху космічних тіл)? Безперечно, ні.

Ще у 80-х роках XIX ст. Л. Больцман, виходячи з розвинутих ним уявлень про флуктуації, довів, що навіть коли Всесвіт був би замкненою системою, термодинамічна рівновага в ньому все одно час від часу самовільно порушувалася, що вже само по собі виключає можливість “теплової смерті”. Але, як зазначалося вище, поняття замкненої системи взагалі не можна застосовувати до безмежного Всесвіту, що автоматично знімає проблему. Експериментальні дані свідчать, що чим далі простягається наш погляд, тим більш нерівноважним виявляється стан матерії. Сьогодні доведеним є факт розширення галактик (розширення Всесвіту). На цю думку наводить факт червоного зміщення ліній віддалених галактик. Виникає питання: чи наближається при цьому густина матерії до нуля? У будь-якому випадку це питання не можна вирішувати тільки в рамках статистичної термодинаміки. Це питання так званої космологічної термодинаміки, яка тільки формується. Повне з'ясування законів еволюції Всесвіту – справа майбутнього. Тоді, ймовірно, і буде подано вичерпне спростування гіпотези про “теплову смерть” Всесвіту.

Отже, другий закон термодинаміки застосовують лише до замкнених (адіабатичних) термодинамічних систем і не має сенсу поширювати його на весь Всесвіт. Він не стосується гравітаційних, ядерних та електромагнітних процесів. Не поширюється він також і на броунівський рух, який не виявляє ніякої тенденції до припинення. Тому другий принцип не можна вважати таким загальним законом, яким є, наприклад, закон збереження енергії для теплових процесів (перший закон термодинаміки). Ентропією можна характеризувати великі й малі тіла, але вона не має сенсу щодо окремих молекул [5, с.112].

Ентропія – єдина відома функція стану системи, яка однозначно збільшується з часом. Ця обставина дає змогу іноді вважати її своєрідним показником напрямку часу від минулого до майбутнього. Спроба пов'язати плинність часу зі зміною ентропії має деякі підстави. Якщо плинність часу від минулого до майбутнього ототожнювати зі зростанням

ентропії, то зменшення останньої (наприклад, через флуктуації) слід пов'язати зі зворотним напрямом часу – від майбутнього до минулого. Проте напрям часу не можна вивести з ускладнення матерії в процесі розвитку, оскільки розпад систем потрібно було б пов'язати зі зворотним напрямом плинності часу, що неприпустимо. Не час є похідним від окремої фізичної характеристики системи – ентропії, а, навпаки, зростання ентропії є похідним щодо змін матерії в часі.

**Висновки та перспективи подальших пошуків у напрямку дослідження.** У сучасних умовах оновлення вищої педагогічної освіти в контексті європейських вимог, перенесення уваги з процесу навчання на його результат, запровадження особистісно зорієнтованого, компетентнісного та кредитного підходів актуальною залишається проблема підвищення рівня та якості фахової підготовки майбутнього вчителя фізики. Основу його професіоналізму, конкурентоспроможності та мобільності складають фундаментальні наукові знання. Останні формуються, зокрема, під час вивчення майбутніми фахівцями курсу теоретичної фізики. Успішне розв'язання теоретичних і практичних завдань навчального курсу можливо за умов ґрунтовного опрацювання студентами його основних/проблемних питань під час самостійної роботи, що повинно стати предметом ретельного контролю з боку викладача. У зв'язку з цим постає проблема розробки системи відповідних індивідуальних творчих завдань з ключових, проблемних питань навчального курсу, що сприятимуть активізації пізнавальної діяльності майбутніх учителів фізики, оволодінню методологією наукового пошуку, розв'язанню теоретичних і практичних питань сучасної науки, а, отже, підвищенню рівня та якості їх фундаментальної і фахової підготовки.

### Список використаної літератури

1. Ансельм А. И. Основы статистической физики и термодинамики / А. И. Ансельм. – М. : Просвещение, 1973. – 423 с.
2. Булавін Л. А. Молекулярна фізика / Л. А. Булавін. – К. : Знання, 2006. – 567 с.
3. Венгер Є. Ф. Основы статистичної фізики і термодинаміки / І. Ф. Венгер. – К. : Вища школа, 2004. – 255 с.
4. Корольок С. Л. Основы статистичної фізики та термодинаміки / С. Л. Корольок, С. В. Мельничук, О. Д. Валь. – Чернівці : Книги ХХІ, 2004. – 347 с.
5. Школа О. В. Основы термодинаміки і статистичної фізики : навч. посібник / Олександр Школа. – Донецьк : Юго-Восток, 2009. – 374 с.