

ЕНТРОПІЯ, ХАРАКТЕРИСТИЧНІ ФУНКЦІЇ ТА TS-ДІАГРАМА ТЕРМОДИНАМІЧНОГО ПРОЦЕСУ (КОНКРЕТИЗАЦІЯ, УНАОЧНЕННЯ)

«Якби у результаті якоїсь світової катастрофи всі нагромаджені наукові знання були б знищені, і до прийдешніх поколінь живих істот перейшла б тільки одна фраза, то яке твердження, складене з найменшої кількості слів, принесло б найбільшу інформацію? Я вважаю, що це - атомна гіпотеза: всі тіла складаються з атомів - маленьких тілець, які знаходяться у безперервному русі, притягуються на невеликій відстані, але відштовхуються, якщо щільніше притиснути їх одне до одного».

Р. Фейнман (1918-1988), амер. фізик-теоретик

Автором виокремлена тема курсу фізики «Ентропія S та характеристичні функції стану термодинамічної системи», що конче потребує **конкретизації** висвітлення зв'язків між об'єктами вивчення, хоч у цілому перевага надається прийому **абстрагування**. При обґрунтуванні необхідності пропозицій конкретизуючих доповнень викладу вказаної теми автор спирається на висновки психології та педагогіки.

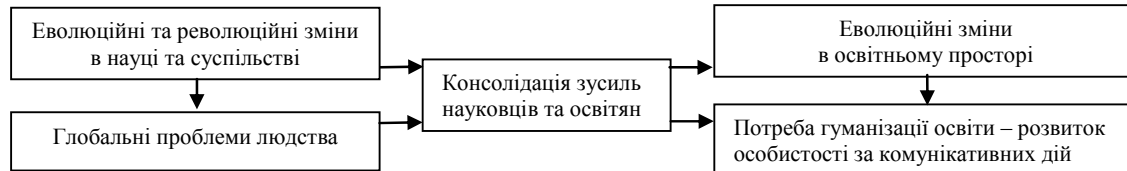
План вивчення теми подається таблицею об'єктів вивчення з їх аналітичними виразами. Мотивуючим чинником є демонстрація TS -діаграми циклу Карно (з курсу технічної термодинаміки), акцент на її доцільності і своєрідній простоті у порівнянні з pV -діаграмою цього циклу.

Можливість взяти OS вісю координат обґрунтовується аналітично та візуально – через демонстрацію розподілів двох молекул по двох і трьох просторово-енергетичних комірках; формулюються висновки.

Далі обґрунтовується існування максимального значення ентропії S_{\max} та показ характеристичних функцій на TS -діаграмі ізотермічного процесу.

Основними **доповненнями**, запропонованими автором для конкретизації фактичного матеріалу вказаної теми і його згрупування, є **цілісний табличний образ** – розподіл двох молекул по просторово-енергетичних комірках (статистика Больцмана) та **цілісний графічний образ** комплексу характеристичних функцій на TS -діаграмі (авторський). Автор стверджує, що ці доповнення сприяють засвоєнню фізичних понять вказаної теми.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. «Все тече, все змінюється», - відмічав Геракліт у VI ст. до н.е. **Зміни** в науковому і освітньому просторі можна подати схемою:



Зміни у науці і суспільстві зазвичай ведуть до змін в освіті. Для розв'язання відповідних проблем віднаходяться резерви - творчі напрацювання науковців та освітян (корекція змісту матеріалу, інтеграція знань з фундаментальних, загально-технічних та спеціальних дисциплін, підбір методичних підходів та організаційних форм з опорою на висновки психології та педагогіки).

Розумові здібності кожного студента потребують **навантаження** для свого **розвитку**; емоційні здібності потребують підживлення, тому навчальний матеріал треба висвітлювати так, щоб він викликав позитивний емоційний відгук.

Якщо відсутнє підґрунтя для розуміння навчального матеріалу у певній його частині (а така проблема виявлена у навчальних посібниках і підручниках загального курсу фізики при висвітленні включених у програму питань «Ентропія. Характеристичні функції стану термодинамічної системи»), то це негативно впливає на психічний стан студента. У кращому разі тут спрацьовує шаблон трьох «з»: «зазубрив, здав, забув». Але підхід механічного запам'ятовування - ганебний для ВТНЗ! Тут повинен формуватися стійкий **інтерес** до науки і особливо - **методологія** пізнання і самоосвіти.

Треба всебічно стимулювати процес мислення. Коли студент слухає виклад нового матеріалу, спостерігає демонстрацію фізичного експерименту чи аналіз діаграми, то спочатку включаються в роботу його відчуття і сприйняття. І тільки після цього - запам'ятовування, встановлення асоціацій, осмислення, переробка тощо [16, с. 517].

Як відомо, шляхом формування образного мислення (ейдетичні методики) можна із звичайного учня зробити навіть обдарованого! [3, с. 36]

Для процесу вивчення фізики образне мислення має велике значення. Образна пам'ять довго утримує, зокрема, такі математичні образи, як лінії, фігури, тіла, взаєморозміщення їх елементів. Правильно сформована образна модель явища, що вивчається, допомагає не тільки проникнути в суть цього явища, але і знайти шляхи до розв'язання творчих задач.

Отже, **викладач** як організатор навчального процесу **повинен** обирати оптимальні форми, методи і прийоми побудови навчального процесу, коригувати зміст навчального матеріалу шляхом уточнення, доповнення, конкретизації, верифікації, абстрагування, унаочнення тощо.

Аналіз досліджень і публікацій. Однією з проблем, що потребують негайного розв'язання, є, як вказувалось вище, недостатність змісту навчального матеріалу з теми «Ентропія. Характеристичні функції стану термодинамічної системи» у рекомендованих підручниках і посібниках [1,4,5,7,8,11,15,17,18,19] та ін. Тут має місце намагання змістити пріоритети у бік абстрактного мислення, але не вистачає конкретизуючих ланок для ланцюжка логічних міркувань, витісняється образне мислення, таке цінне і необхідне.

У підручнику [8, с. 406] автори І.М. Кучерук та інші фактично підводять до побудови TS -діаграми, вказуючи, що вираз $\delta Q = TdS$ для елементарної кількості теплоти має таку ж структуру, як і для елементарної роботи $\delta A = pdV$. Звідси T - термічна узагальнена сила, інтенсивний параметр теплообміну, S - узагальнена координата, екстенсивний параметр теплообміну.

Але останній вислів потребує обґрунтування, конкретизації (тут у пригоді стає розгляд станів 1 і 2 термодинамічної системи на мікрорівні).

Стосовно характеристичних функцій стану термодинамічної системи у ряді переглянутих посібників та підручників загального курсу фізики надається лише коротка словесна інформація та аналітичні вирази.

Постановка завдання. Оскільки виклад матеріалу вказаної теми у посібниках та підручниках загального курсу фізики важко сприймається студентами (за відсутності графічного тлумачення і конкретизації), автор пропонує більш деталізований підхід висвітлення теми.

Зміст програмового матеріалу розділу «Термодинаміка» загального курсу фізики для ВТНЗ слід **доповнити**:

- у частині підтвердження ймовірнісного характеру ентропії S , її зв'язку з об'ємом;
- у частині введення TS -діаграми для зображення характеристичних функцій стану термодинамічної системи та показу інших її переваг (унаочнення чинників впливу на ККД циклу Карно, другого закону термодинаміки тощо);
- у частині тлумачення внутрішньої енергії U , вільної енергії F як міри **якісно-споріднених** форм руху матерії; а також тлумачення ентропії як міри обезцінення енергії.

Пропонується розгляд цих питань на прикладі робочого тіла теплового двигуна в процесі 1-2 прямого циклу Карно.

Викладення матеріалу та результати. Розгляд теми «Ентропія. Характеристичні функції стану термодинамічної системи» доцільно почати з показу зведеної таблиці цих понять (табл. 1), де розміщена основна інформація, отримана з підручників загального курсу фізики, курсу технічної термодинаміки та інших.

S, U, I, F, Z - це функції стану термодинамічної системи, останні чотири з них називаються характеристичними функціями (або термодинамічними потенціалами), оскільки вони та їх похідні дають можливість охарактеризувати термодинамічні властивості системи. В останній колонці табл. 1 - необхідна умова характеристичності функції - її повний диференціал.

Таблиця 1

Назва функції стану т-д. системи	Формула	Повний диференціал
Ентропія: (за Больцманом) (за Клаузіусом)	$S = k \ln W$ $dS = \frac{\delta Q}{T} \rightarrow$	
Внутрішня енергія	$U = C_p \nu RT$	$dU = TdS - pdV$
Ентальпія (або теплова функція)	$I = C_p \nu RT = U + pV$	$dI = TdS - Vdp$
Вільна енергія (від <i>Free</i>)	$F = U - TS$	$dF = -pdV - SdT$
Термодинамічний потенціал Гіббса	$Z = U - TS + pV = I - TS$	$dZ = Vdp - SdT$

Основними з п'яти функцій стану термодинамічної системи вважається ентропія S та внутрішня енергія U . Це фундаментальні поняття, вони відіграють вирішальну роль у формуванні наукової картини світу як основи вироблення наукового світогляду.

(Слід відмітити, що формула ентропії Л. Больцмана, яка є вершиною його вчення про світобудову, висічена в якості епітафії на його пам'ятнику).

Студенти повинні добре орієнтуватися у різних класифікаціях енергії, пам'ятати, що ентропія є мірою обезцінення енергії, і вміти застосовувати свої знання при аналізі різних явищ, і, зокрема, при аналізі процесів роботи теплових двигунів, технічних установок тощо.

Для кращого сприйняття матеріалу теми пропонуємо подати характеристичні функції у **графічній інтерпретації**. Найпростішою, напевно, буде інтерпретація в координатах S, T , які широко використовуються у технічній термодинаміці. Наприклад, для зображення циклу Карно користуються не тільки pV -діаграмою (рис. 1), а й TS -діаграмою (рис. 2). Тут процеси 1-2-3-4-1 - відрізки прямих ліній (а не кривих, як на рис.1).

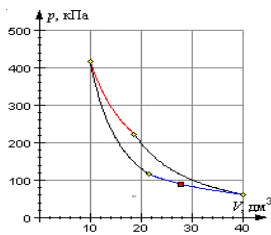


Рис. 1

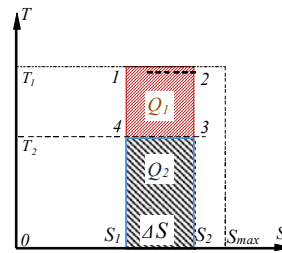


Рис. 2

У довіднику [7, с.192]

пропонується цикл Карно подавати pV - і TV -діаграмами. Зауважимо, що тут на TV -діаграмі цикл Карно помилково подано паралелограмом, а треба трапецією, рис. 3 - за пропорцією

$$(V_2/V_1)=(V_3/V_4).$$

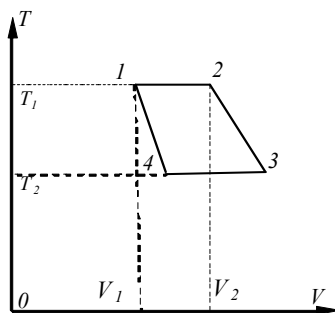


Рис. 3

Звертаємо увагу, що точне перенесення процесів із pV -діаграми на TS -діаграму подано, зокрема, у підручнику [17, с.63].

Переконливим **обґрунтуванням** правомірності вибору OS віссю координат буде **виявлення зв'язку між ентропією S і об'ємом V** та унаочнення цього зв'язку.

З означення ентропії за Клаузіусом, тобто з аналітичного виразу ентропії в диференціальній формі

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

можна одержати вираз **зміни ентропії**, зокрема, в ізотермічному процесі 1-2 (яка широко використовується в термодинаміці)

$$S_2 - S_1 = \nu R (\ln V_2 - \ln V_1). \quad (1)$$

З розглянутих аналітичних виразів приросту ентропії маємо **висновок 1**: при зростанні об'єму газу в ізотермічному процесі зростає його ентропія.

Залежність (1) між ентропією та об'ємом підтверджує правомірність вибору OS віссю координат, і отже, побудови TS -діаграми.

Оскільки $\nu R = kN$, маємо із (1)

$$\Delta S = \nu R \ln \frac{V_2}{V_1} = kN \ln \frac{V_2}{V_1} = k \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^N \quad (2)$$

Щоб ця залежність краще сприймалась, пропонуємо її **візуалізувати**, звернувшись до розгляду ізотермічного процесу 1-2 на мікрорівні.

Спочатку нагадаємо, що **макростан** газу з фіксованими значеннями макропараметрів фактично являє собою **зміну мікростанів**, які відрізняються один від одного знаходженням молекул в різних частинах об'єму та перерозподілом енергії між ними. У переглянутій літературі зазвичай надається означення термодинамічної ймовірності та ентропії даного стану системи.

Термодинамічною ймовірністю W даного стану системи називається кількість мікростанів, що відповідає цьому макростану.

Ентропією даного стану системи називається функція $S = k \ln W$, де k - стала Больцмана.

Зміна ентропії двох станів

$$\Delta S = k \ln \frac{W_2}{W_1}. \quad (3)$$

Відмітимо, що у довіднику [7, с.197] після цих означень розглядається безчисловий приклад, і вже в ньому наводяться формулювання означень макро- й мікростанів.

Тепер розглянемо ізотермічний процес 1-2 прямого циклу Карно, де об'єм газу під поршнем (рис. 4) збільшується від V_1 до V_2 .

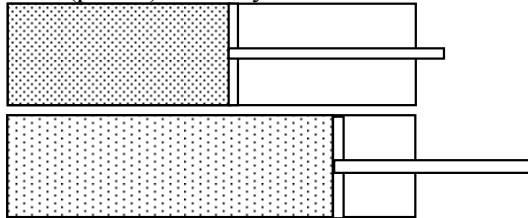


Рис. 4

Нехай маємо відношення цих об'ємів $(V_2/V_1)=3/2$. Розглядаючи стан 1 на мікрорівні, в об'ємі V_1 виділимо $n_1=2$ малесенькі комірки, що містять $N_1=2$ молекули з мітками a та b , то розподіл їх по комірках матиме вигляд (табл. 2).

Кількість варіантів розподілу, як відомо з математики, $\omega_1 = n_1^{N_1} = 4$.

Таблиця 2

Варіанти i	1	2	3	$4(=n^N)$	$\sum_{i=1}^4 p_i = 1$
комірки: I	ab	a	b	-	
II	-	b	a	ab	
ймовірність $p_i = \left(\frac{1}{n}\right)^N$	$\frac{1}{2^2}$	$\frac{1}{2^2}$	$\frac{1}{2^2}$	$\frac{1}{2^2}$	

Таблиця 3

i	1	2	3	...	$9(=n^N)$
комірки: I	ab	a	b	...	-
II	-	b	a	...	-
III	-	-	-	...	$-ab$
ймовірність $p_i = \left(\frac{1}{n}\right)^N$	$\frac{1}{3^2}$	$\frac{1}{3^2}$	$\frac{1}{3^2}$...	$\frac{1}{3^2}$

Далі розглянемо стан 2. Об'єм збільшився так, що $N_1=2$ молекули вже займають не 2, а 3 комірки ($n_2=3$). Тоді $\omega_2 = n_2^{N_1} = 9$ (табл. 3). Система сама змінила стан 1 на стан 2.

З розгляду газових станів 1 і 2 на мікрорівні можемо зробити висновки.

Висновок 2: з розширенням газу розширюється таблиця варіантів розподілу молекул по коміркам Больцмана.

Висновок 3: з розширенням газу зростає хаос, оскільки ймовірність попадання конкретної молекули газу в дану комірку зменшується (у нашому випадку з $1/2$ до $1/3$), і отже, місцезнаходження конкретної молекули важче визначити.

Розгляд станів 1 і 2 на мікрорівні дає можливість продовжити рівність (2)

$$\Delta S = k \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^N = k \ln \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^N,$$

оскільки брали $\frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{3}{2}$.

Висновок 4: розуміння змісту виразу $\omega_1 = n_1^{N_1}$ дозволяє уявити зміст виразу $(n_2/n_1)^N$, а отже, й $(V_2/V_1)^N$ та W_2/W_1 із виразу (3), тобто дозволяє виявити асоціативний зв'язок між означеннями приросту ентропії за Больцманом і за Клаузіусом. І це є своєрідною верифікацією означення (3) приросту ентропії за Больцманом.

З висновків 1-4 випливає висновок 5: зі зростанням **хаосу** зростає ентропія. Ентропія є мірою хаотичності руху молекул, мірою невпорядкованості термодинамічної системи.

З висновку 2 та ін. маємо висновок 6: табл. 2 й 3 в парі легко запам'ятовуються як цілісний образ - збільшення ентропії даної кількості газу зі збільшенням його об'єму (у табл. 2 є тільки 4 варіанти розподілу молекул, а в табл. 3 їх аж 9).

Оскільки за означенням Клаузіуса зміна ентропії системи в ізотермічному процесі, який є оборотним, буде

$$\Delta S = \frac{Q}{T},$$

то на TS -діаграмі (рис. 5) зміна ентропії ΔS - це основа прямокутника площею Q і висотою T .

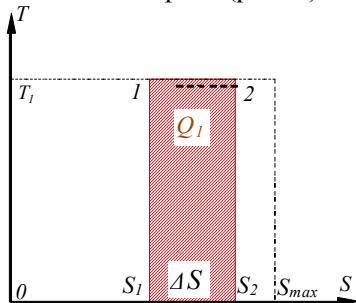


Рис. 5

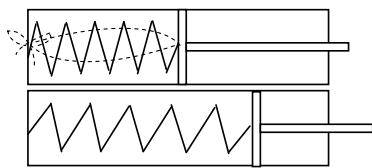


Рис. 6

Аналізуючи табл. 2, бачимо, що є заповнені комірки і є пусті комірки. То і на поршень наноситимуться удари меншої кількості молекул у середньому. Звідси *висновок 7*: енергія молекул системи у стані 2 частково обезцінилась у порівнянні з енергією у стані 1 (хоч кожна молекула має в середньому ту ж кінетичну енергію). І саме зміна ентропії є мірою обезцінення енергії термодинамічної системи. Енергія ударів молекул об *стілки циліндра* - це обезцінена або зв'язана енергія TS .

Рис. 4 асоціюється з рис. 6, де бачимо «зв'язану енергією» стисненої (до певної міри) пружини у стані 1 і стані 2.

Поняття *вільної енергії F* як здатності термодинамічної системи виконувати роботу асоціюється з потенціальною енергією стисненої пружини.

На рис. 7 *зв'язана енергія* стану 1 - це прямокутник над відрізком OS_1 , а *зв'язана енергія* стану 2 - це прямокутник над відрізком OS_2 . Прямокутник над відрізком S_1S_2 - це максимально можлива *робота* $A=Q$ в ізотермічному процесі 1-2.

Оскільки замкнена термодинамічна система завжди через деякий скінчений проміжок часу *прийде до стану рівноваги* - незалежно від початкового стану (це загальний закон термодинаміки), а в стані рівноваги ентропія системи максимальна, то на рис. 7 слід показати S_{max} .

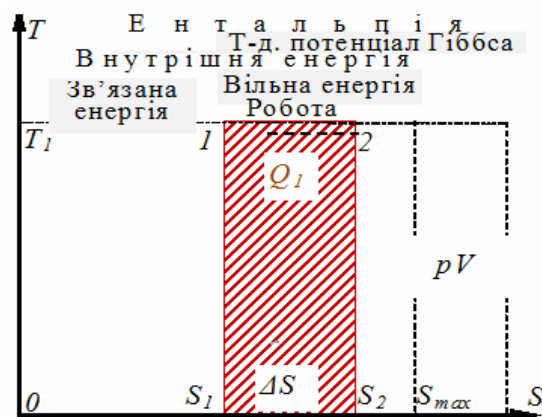


Рис. 7

Прямокутник над відрізком S_1S_{max} - це *вільна енергія* F_1 у стані 1.

У стані 2, коли газ буде мати ентропію S_2 , його вільна енергія - це прямокутник над S_2S_{max} . Тоді робота $A=F_1-F_2$.

Внутрішня енергія $U = F + TS$, *ентальпія* I та *термодинамічний потенціал Гіббса* Z теж подані відповідними прямокутниками на рис. 7.

Отже, зображення характеристичних функцій (в комплексі) на TS -діаграмі ізотермічного процесу 1-2 є унаочненням їх логічних зв'язків:

послідовні значення ентропії S_1S_2 є показниками наближення системи до рівноважного стану; ентропія системи є показником можливості

реалізації в ній термодинамічних процесів;

внутрішня енергія $U = F + TS$ не змінюється *кількісно*, але змінюється її *якість* (обезцінюється);

внутрішня енергія U , вільна енергія F , зв'язана енергія TS - є мірою споріднених форм руху матерії, а ентропія є мірою обезцінення внутрішньої енергії.

Додамо, що TS -діаграму циклу Карно (див. рис. 2) можна використати як унаочнення при аналізі чинників впливу на ККД циклу.

Крім того, TS -діаграму ізотермічного процесу доцільно використати при тлумаченні II закону термодинаміки. Коли є реальні втрати тепла ($Q_{газу} < Q_{нагрівника}$), то процес необоротний (пунктир під 1-2 на рис. 5). Тоді, розглядаючи елементарні відрізки процесу, одержимо

$$dS_{об} > \frac{\delta Q_{газу}}{T}.$$

Це один з виразів II-го закону термодинаміки.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Розробка запропонованого підходу викладу теми викликана необхідністю підвищення ефективності освітнього процесу. Це

виявляється можливим завдяки тому, що традиційний текст теми (з аналітичними символами) унаочнюється графічними символами, конкретизується.

Оскільки у навчальні програми вносяться зміни після відповідних нарабок і пропозицій науковців та освітян, і зараз до програми загального курсу фізики введено розгляд понять ентропії та характеристичних функцій термодинамічних процесів, а у відповідній літературі ці питання недостатньо висвітлені, то автор пропонує ввести наступні апробовані **доповнення**:

Верифікація означення приросту ентропії у формулюванні Больцмана через таблиці (як цілісний образ) розподілу варіантів заповнення просторово-енергетичних комірок Больцмана.

Унаочнення логічних зв'язків між ентропією і характеристичними функціями стану термодинамічної системи - шляхом введення в курс фізики TS -діаграми (з курсу термодинаміки), створення цілісного графічного зображення комплексу характеристичних функцій на TS -діаграмі ізотермічного процесу.

Наразі ці доповнення можна подати в опорному конспекті, а у подальшому - як доповнення до підручника.

Автор сподівається на позитивні відгуки.

Список літератури

1. **Болгарский А.В., Голдобеев В.И., Идеатулин Н.С., Толкачев Д.Ф.** Сборник задач по термодинамике и теплопередаче. – М.: Высшая школа, 1972. – 304 с.
2. **Грищенко Г.** Курс теоретичної фізики. Основні поняття статистичної фізики: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – К.: НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2005. – 43 с.
3. **Гулка З., Тудес С.** Ейдетичні методи у навчанні. // Педагогічні науки. Зб. наук. праць. – Вип. 15. – ч.1. – Херсон: Айлант, 2000. – С. 36-40.
4. **Ицкович А.М.** Основы теплотехники. – М.: Высшая школа, 1970. – 304 с.
5. **Карякин Н.И., Быстров К.Н., Киреев П.С.** Краткий справочник по физике. – М.: Высшая школа, 1962. – 560 с.
6. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров (перевод с англ.) / «Наука». – М. – 1968. – 720с.
7. **Кузьмичев В.Е.** Законы и формулы физики. Справочник. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
8. **Кучерук І.М., Горбатюк І.Т., Луцик П.П.** Загальний курс фізики: Навч. посібник для студентів вищих техн. і пед. закладів освіти. Т.1. – К.: Техніка, 1999. – 536 с.
9. **Микольченко В.С.** Философсько-світотглядні засади освіти. // Підготовка фахівців у системи професійної освіти. Матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції. – Кривий Ріг: КТУ, 2009.- С. 23-25.
10. **Мякишев Г.Я.** Динамические и статистические закономерности в физике. – М.: Наука, 1973. – 171 с.
11. **Несмашний Є.О.** Класична механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – Кривий Ріг: Видавничий Дім, 2008.- 211 с.
12. **Осипов А.И.** Термодинамика вчера, сегодня, завтра. Часть 1. Равновесная термодинамика / Соросовский Образовательный Журнал. 1999. №4. – С. 79-85.
13. **Повар С.В.** Энтропия, хаос і порядок (сучасне розуміння) // Вісник КНУ, Випуск №35. – Кр.Ріг: Вид. центр КНУ, 2013. – С. 249-253
14. **Повар С.В., Повар Н.В.** Приклади застосування теорії ймовірностей. // Природнична освіта і наука для сталого розвитку України: проблеми і перспективи/ матеріали Всеукраїнської науково-практичної конф. – Суми: Вид-во «Ярославна», 2014 р. – С. 56-58.
15. **Савельев И.В.** Курс общей физики, т.1. – М.: Наука, 1978. – 470 с.
16. **Столяренко Л.Д.** Основы психологии. – Ростов н/Д: Феникс, 2001. – 672 с.
17. **Техническая термодинамика.** Учебник для ВТУЗов под. ред. **В.И. Крутова.** – М.: Высшая школа, 1971. – 472 с.
18. **Фриш С.Э., Тиморева А.В.** Курс общей физики, т.1. – М.: Госизд.техн.-теорет.лит., 1954. – 464 с.
19. **Яворский Б.М. и Детлаф А.А.** Справочник по физике: 3-е изд.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 624 с.

Рукопис подано до редакції 28.03.15