

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

О.О. Штофель

Визначення зміни ентропії під час фазового переходу першого роду

Лабораторний практикум

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Моделювання фізичних процесів»
спеціальності Е5 Фізика та астрономія

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
2025

УДК 53.02 :533.1
Ш92

Автор: *Штофель Ольга Олександрівна*, канд. техн. наук.

Рецензент *Красікова І.Є.*, канд. фіз.-мат. наук., Інститут проблем матеріалознавства ім.І.М.Францевича Національної академії наук України

Відповідальний редактор *Савченко Д.В.*, д-р. фіз.-мат. наук, доцент

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 9 від 26.06.2025 р.)
за поданням вченої ради фізико-математичного факультету
(протокол № 7 від 04.06.2025 р.)*

Штофель О.О.
Ш92 Визначення зміни ентропії під час фазового переходу першого роду [Електронний ресурс] : лаб. практикум: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Моделювання фізичних процесів» спец. Е5 Фізика та астрономія/ О.О. Штофель ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 12 с.

Викладено теоретичні основи та методику визначення зміни ентропії за результатами дослідження плавлення олова. Методичний матеріал до лабораторної роботи призначені для здобувачів освіти ступеня бакалавр за спеціальністю Е5 Фізика та астрономія. Лабораторний практикум також може бути корисним для малих груп (до 10 осіб) при виконанні лабораторних робіт з курсу молекулярної фізики та термодинаміки для здобувачів освіти ступеня бакалавр за іншими технічними, інженерними спеціальностями.

УДК 53.02:533.1

Реєстр. № НП 24/25-600. Обсяг 0,42 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідectво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

©О.О. Штофель, 2025
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

Лабораторна робота. Визначення зміни ентропії під час фазового переходу першого роду на прикладі плавлення олова

Мета роботи: вивчення I і II законів термодинаміки, визначення приросту ентропії під час фазового переходу першого роду на прикладі плавлення олова.

Обладнання:

Теоретичні відомості

Теплоємність твердих тіл

Теплоємністю твердого тіла називається відношення кількості тепла dQ поглиненого тілом під час незначної зміни його температури до самої зміни температури dT [1].

$$C = \frac{\delta Q}{dT}.$$

Питома теплоємність речовини є фізична величина, яка дорівнює кількості теплоти dQ , необхідної для нагрівання одиниці маси речовини на один Кельвін.

$$c = \frac{\delta Q}{mdT}.$$

Таким чином кількість теплоти, яка необхідна для нагріву тіла визначається як

$$\delta Q = cmdT$$

Молярна теплоємність C_μ , дорівнює кількості теплоти яка необхідна для нагріву одного моля речовини на один Кельвін:

$$C_\mu = \frac{\delta Q}{\nu dT},$$

де $\nu = \frac{m}{\mu}$ – кількість речовини зразка.

Питома теплоємність пов'язана з молярною співвідношенням

$$C_\mu = c\mu.$$

Тверде тіло - це агрегатний стан речовини, якій відрізняється стабільністю форми. Тепловий рух атомів твердого тіла визначається малими коливаннями навколо середнього положення. Всі речовини (за винятком гелію) при достатньо низьких температурах переходять в твердий стан. При нагріванні твердого тіла енергія витрачається на збільшення енергії коливань атомів [2].

Згідно молекулярно-кінетичної теорії середня кінетична енергія, яка відповідає одному степеню свободи ($i = 1$) атома твердого тіла

$$\langle E_K \rangle_1 = \frac{i}{2} kT = \frac{1}{2} kT.$$

Повна енергія коливань атомів в одному напрямку складається з кінетичної та потенціальної енергії, які дорівнюють одна одній, може бути визначена за формулою

$$\langle E \rangle_1 = \langle E_K \rangle_1 + \langle E_{II} \rangle_1 = 2 \cdot \frac{1}{2} kT = kT.$$

Так як за поступального руху кожен атом має три ступеня свободи ($i = 3$), то повна енергія одного атома твердого тіла дорівнює:

$$\langle E \rangle = 3kT.$$

Внутрішня енергія одного моля ($\nu = 1$) дорівнює:

$$U = 3N_A kT = 3RT.$$

де N_A - число Авогадро ($N_A = 6.02214084(18) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$); R - універсальна газова стала ($R = 8.3144626182 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

В умовах постійного об'єму все тепло витрачається на збільшення внутрішньої енергії. При цьому молярна теплоємність твердого тіла визначається рівнянням:

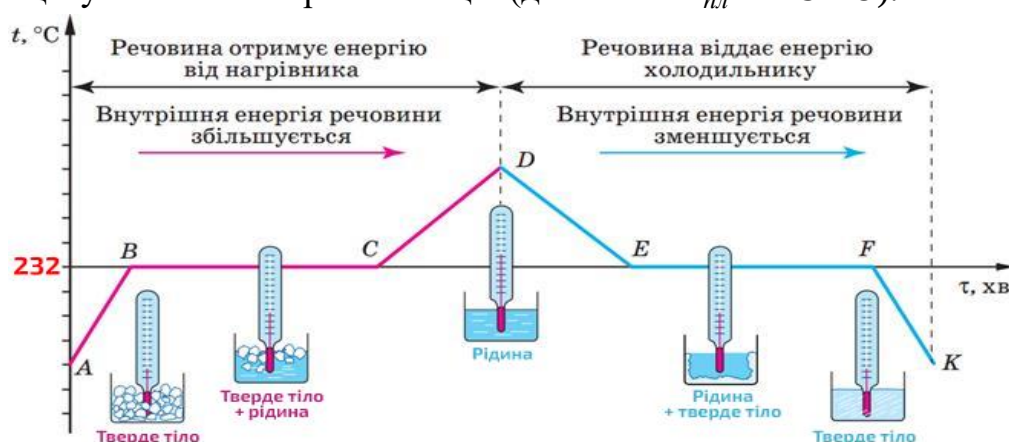
$$C_v = \left(\frac{dU}{dT} \right)_v = 3R \cong 25.12 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}$$

Формула показує, що молярна теплоємність твердих тіл є сталою та однаковою для всіх речовин.

Це твердження називають законом Дюлонга-Пті. Як показує практика за нормальних температур молярна теплоємність твердих тіл близька до значення $25.12 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}$.

Плавлення та кристалізація.

Плавлення - перехід речовини із кристалічного (твердого) стану в рідкий [3]. Плавлення відбувається з поглинанням тепла. Нижче показана типова діаграма процесу плавлення-кристалізація (для олова $T_{пл} = 232^\circ\text{C}$):



При нагріванні твердого тіла внутрішня енергія росте, збільшується амплітуда коливань атомів у вузлах кристалічної решітки, при цьому росте температура (відрізок кривої **А-В**). Коли вона підвищується до температури

плавлення $T_{пл}$ амплітуда коливань атомів досягає величини, при якій відбувається руйнування кристалічної решітки - тверде тіло починає плавитись.

Кількість тепла, надана даній масі олова при нагріванні:

$$Q_1 = \int_{T_0}^{T_{пл}} c m dT,$$

де Q_1 - теплота, передана даному тілу під час нагрівання, Дж; c - питома теплоємність олова, Дж/кг·К; m - маса олова, кг; T_0 - кімнатна температура, К; $T_{пл}$ - температура плавлення олова, К.

Процес плавлення проходить ізотермічно, тобто при постійній температурі (горизонтальна пряма **B-C**), що обумовлено питомою теплотою плавлення, яка визначається кількістю тепла, яке необхідно для плавлення одиниці маси речовини.

Кількість тепла, надана даній масі олова при плавленні:

$$Q_2 = \lambda m,$$

де Q_2 - теплота, передана цій масі олова під час плавлення, Дж; λ - питома теплота плавлення, Дж/кг; m - маса олова, кг.

Після закінчення процесу плавлення виникає рідка фаза і починає підвищення температури (**C-D**).

За зупинки нагріву рідини і початку її охолодження, буде спостерігатися віддзеркалення частини діаграми A-D, температура почне знижуватись (**D-E**), і коли температура знизиться до $T_{пл}$, почнеться зворотній процес плавленню - процес кристалізації. При цьому атоми та молекули, з'єднуються та створюють кристалічну решітку.

Процес кристалізації (**E-F**) проходить за постійної температури із виділенням тепла, яке дорівнює теплу витраченого на плавлення. Коли процес кристалізації закінчиться, почнеться охолодження твердого тіла (**F-K**).

Зміна ентропії під час плавлення твердого тіла.

Будь яка зміна стану тіла може бути представлена як підсумок великого числа малих змін. При кожній окремій зміні стану система або поглинає або виділяє малу кількість тепла δQ .

Кількість тепла, поглиненого або виділеного системою при переході із одного стану в інший, залежить від способу переходу та не є функцією стану. Але, якщо взяти відношення теплот до температур, при яких вона була виділена або поглинена, то з'явиться, що ці величини, так звані **приведені температури** рівні між собою [4].

$$\left| \frac{\delta Q_1}{T_1} \right| = \left| \frac{\delta Q_2}{T_2} \right|$$

Ця особливість приведеної теплоти дозволяє ввести окрему термодинамічну характеристику - ентропію, яка має фундаментальне значення в фізиці.

Усі процеси в природі незворотні. Усякий процес, за якого система переходить з одного стану в інший, протікає таким чином, що не можна провести його у зворотному напрямку без змін у навколишніх тілах. Це пов'язано з розсіюванням частини енергії в будь-якому процесі за рахунок тертя, випромінювання та інших причин. У будь-якому з них змінюється стан у цілому, частина енергії системи розсіюється. Для характеристики цієї спільної для всіх систем властивості вводиться фізична величина - ентропія, що є мірою марності внутрішньої енергії з погляду здійснення роботи (міра безладу).

Слово ентропія в перекладі з грецької мови означає слово "всередину", повернення. Мається на увазі перетворення енергії в оборотних процесах. Термін ентропія був запропонований Клаузіусом для позначення функції стану термодинамічної системи. Однозначна функція стану, повним диференціалом якої є приведена теплота називається ентропією.

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

де S - ентропія, Дж/К; Q - теплота, отримана даною системою або віддана нею, Дж; T - абсолютна температура, К.

Ентропією називається функція стану системи, диференціал якої в елементарному оборотному процесі дорівнює відношенню нескінченно малої кількості тепла dQ , наданого системі, до абсолютної температури T .

Загальна зміна ентропії в будь-якому процесі

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

У всіх випадках у результаті передачі теплоти Q від нагрітого тіла до холодного відбувається вирівнювання їхніх температур. При цьому знижується можливість здійснення роботи, зменшується гранично високий ККД. Водночас підвищується частка зв'язаної енергії, збільшується ентропія. При повному вирівнюванні температур ККД стає рівним нулю. При цьому ентропія досягає максимуму, а енергія системи цілком не може бути використана для здійснення роботи. Повне значення ентропії в системі не піддається обліку, але в ізольованій системі можна знайти зміну ентропії в будь-якому процесі.

Кожний стан системи визначається значенням ентропії. В кожному замкненому оборотному процесі зміна ентропії дорівнює нулю.

$$\Delta S = \oint dS = \oint \frac{dQ}{T}.$$

При необоротному процесі ентропія системи росте $\Delta S \geq 0$.

Процес переходу речовини з твердого стану в рідкий складається з двох етапів:

1. Нагрівання твердого тіла від початкової температури T_0 до температури плавлення $T_{пл}$. Зміна ентропії на цьому етапі

$$\Delta S_1 = \int_{T_0}^{T_{пл}} \frac{dQ_1}{T} = \int_{T_0}^{T_{пл}} \frac{cm dT}{T} = cm \ln \frac{T_{пл}}{T_0}.$$

2. Плавлення тіла. Температура залишається постійною ($T_{пл} = const$). Зміна ентропії на цьому етапі

$$\Delta S_2 = \frac{Q_2}{T} = \frac{\lambda m}{T_{пл}}.$$

Загальна зміна ентропії в процесі плавлення

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = cm \ln \frac{T_{пл}}{T_0} + \frac{\lambda m}{T_{пл}}.$$

Опис експериментальної установки

Установка призначена для експлуатації в закритих приміщеннях при температурі навколишнього повітря від $+10^\circ\text{C}$ до $+35^\circ\text{C}$ і відносній вологості не більше 80%.

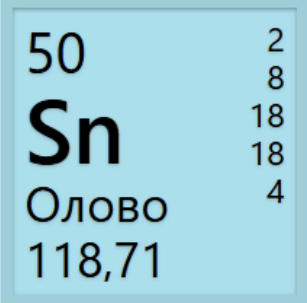
Технічні характеристики установки:

Максимально допустима температура в печі плавлення, $^\circ\text{C}$	250
Початковий опір спіралі нагрівача печі, Ом	8.5 ± 0.5
Межі регулювання струму нагрівача, А	2.4-3.2
Межі регулювання напруги блоку живлення нагрівача, В	20-28

Рекомендований режим проведення експерименту:

Потужність нагріву, Вт	70 ± 5
Час безперервної роботи, не більше, год.	6

Характеристика олова:

	2	Питома теплоємність, Дж/кг·К	230
	8	Питома теплота плавлення, Дж/кг	$5.86 \cdot 10^4$
	18	Маса олова в тиглі, г	150
	18	Температура плавлення $T_{пл}$, К ($^\circ\text{C}$)	505.08 (231.93)
	4	Температура кипіння, К ($^\circ\text{C}$)	2875 (2602)
		Густина твердого олова, кг/м ³	7310
		Густина рідкого олова, кг/м ³	6990

Установка має настільну конструкцію, яка включає: пічку 1 і блок управління з джерелами живлення 2.



Поточна температура олова в тиглі визначається по цифровому датчику температури.

Цифровий таймер відраховує час в секундах від початку нагріву. Тигель печі виконаний з кварцового скла, за якою розташований вентилятор, призначений для охолодження печі після закінчення дослідів. В якості нагрівача печі використовується ніхромові спіраль, вміщена в кварцові трубки малого діаметру.

Оскільки опір спіралі змінюється від її температури, поточне значення її можна визначити за законом Ома за показаннями цифрових вимірювань струму та напруги. У зв'язку з цим необхідний періодичний контроль за споживаною потужністю по індикатору. Регулювання потужності нагріву відбувається кнопками «Більше»/«Менше». Температура в тиглі печі контролюється по табло. На задній панелі блока розташовані клеми заземлення і запобіжники.

Методика виконання роботи

Під час виконання лабораторної роботи вивчаються процеси нагрівання твердого тіла, його плавлення, нагрівання та охолодження рідкого олова, його кристалізація та охолодження твердого тіла. Для перших двох процесів визначається зміна ентропії, а за останнім температура плавлення олова. Для визначення зміни ентропії необхідно дослідним шляхом знайти значення питомої теплоємності в процесі нагріву твердого олова та значення питомої теплоти плавлення в процесі його плавлення.

Методика експерименту полягає в побудові графіка залежності температури дослідного зразка в часі. По графіку залежності температури від часу визначається час нагріву Δt_1 зразка до температури плавлення, час плавлення Δt_2 та температура плавлення $T_{пл}$. З метою підвищення точності температуру плавлення визначаємо на етапі кристалізації, так як дана температура стабільна на протязі всього часу кристалізації.

Кількість теплоти, яка була виділена нагрівачем на першому етапі:

$$Q_3 = UI t_1,$$

де U - напруга на нагрівачі; I - сила струму в нагрівачі.

У зв'язку з тим, що на нагрів олова піде лише частина кількості теплоти, решта передається в середовище, що оточує тигель з оловом. Приймаємо ККД установки рівним 0.33.

Рівняння теплового балансу для першого етапу:

$$Q_1 \eta = Q_3,$$

де η – коефіцієнт корисної дії установки; Q_1 - кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання олова від температури оточуючого середовища T_0 до температури плавлення $T_{пл}$.

$$Q_1 = cm(T_{пл} - T_0).$$

Отже, з системи

$$\begin{cases} Q_3 = UI t_1 \\ cm(T_{пл} - T_0)\eta = Q_3 \end{cases},$$

теплоємність:

$$c = \frac{UI t_1}{m(T_{пл} - T_0)\eta}$$

З графіку визначаємо момент початку t_1 та кінця плавлення t_2 , час плавлення можливо визначити як:

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1.$$

Кількість теплоти, яка виділена нагрівачем на цьому етапі:

$$Q_4 = UI \Delta t_2.$$

Внаслідок втрат тепла, на плавлення олова піде тільки частина цієї кількості теплоти - Q_2 .

Рівняння теплового балансу для другого етапу:

$$Q_2 \eta = Q_4,$$

Отже, з системи

$$\begin{cases} Q_4 = UI \Delta t_2 \\ \lambda m \eta = Q_4 \end{cases},$$

питома теплота плавлення:

$$\lambda = \frac{UI \Delta t_2}{m \eta}$$

За отриманими експериментальним шляхом теплофізичними характеристиками зразка можливо підрахувати зміну ентропії:

$$\Delta S = cm \ln \frac{T_{пл}}{T_0} + \frac{\lambda m}{T_{пл}}.$$

Порядок виконання роботи

1. Зібрати установку на лабораторному столі керуючись технічним паспортом. Увімкнути установку кнопкою, яка розташована на задньої панелі блоку керування, при цьому загориться табло на передньої панелі блоку. Автоматично увімкнеться термометр, який буде показувати початкову температуру олова. Решта індикаторів будуть показувати нулі.

T_0, K	U, B	I, A	t_1, c	t_2, c	$\Delta t_2, c$	$T_{пл}, K$

2. Записати початкову температуру та перевести її в систему СІ по формулі:

$$T_0 = t_0 + 273.$$

3. Натиснути кнопку «Нагрів»-«1», при цьому загоряється світлодіод та починають працювати вольтметр та амперметр.

4. Натисканням кнопки «ВАТТ» -«більше» виставити потужність нагріву за рекомендованим режимом проведення експерименту. Записати значення напруги та струму.

5. Натиснути кнопку «Нагрів»-«0», при цьому режим потужності буде збережений на весь час проведення роботи.

6. Знову натиснути кнопку «Нагрів»-«1», при цьому таймер почне відлік часу спочатку, у відповідну таблицю записувати час нагріву та температуру олова.

t_i, c	$t, ^\circ C$	T, K
	20	
...	...	...
	280	

7. При досягненні температури олова до 280°C вимкнути нагрівач.

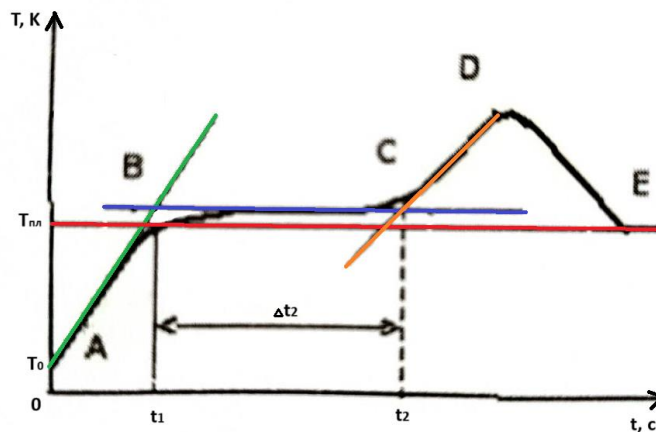
8. Продовжувати записувати значення температури олова за власним секундоміром.

t_i, c	$t, ^\circ C$	T, K
	270	
...	...	...
	80	

9. При досягненні температури 80°C вимкнути установку.

Обробка експериментальних даних

1. На аркуші міліметрового паперу побудувати в масштабі графік залежності температури від часу.
2. На відрізках графіку відповідних нагріву та плавленню провести дотичні (зелена та синя лінії відповідно), точка їх перетину дасть момент початку плавлення олова t_1, c .



3. Провести дотичну до лінії нагріву рідкого олова (помаранчева лінія). Точка перетину її з лінією плавлення дасть час закінчення плавлення t_2, c .
4. По графіку визначити час нагріву олова t_1 олова до температури плавлення та час плавлення t_2 :
 $\Delta t_2 = t_2 - t_1$.
5. По лінії охолодження за постійної температури визначити температуру кристалізації, яка є температурою плавлення.
6. Порівняти значення $T_{пл}$ з табличною величиною та порахувати відносну похибку

$$\delta T = \frac{T_{пл} - T_{пл}^{теор}}{T_{пл}^{теор}} \cdot 100\%$$

7. Порівняти значення питомої теплоємності з табличною величиною та порахувати відносну похибку

$$\delta c = \frac{c - c^{теор}}{c^{теор}} \cdot 100\%$$

8. Порівняти значення питомої теплоти плавлення з табличною

$$\delta \lambda = \frac{\lambda - \lambda^{теор}}{\lambda^{теор}} \cdot 100\%$$

9. Визначити зміну ентропії по формулі

$$\Delta S = cm \ln \frac{T_{пл}}{T_0} + \frac{\lambda m}{T_{пл}}.$$

	експеримент	теорія	похибка, %
$T_{пл}, K$		505.08	
$c, Дж/кг \cdot K$		230	
$\lambda \cdot 10^4, Дж/кг$		5.86	
$\Delta S, Дж/К$			

Контрольні запитання

1. Сформулювати другий закон термодинаміки.
2. Які два тлумачення ентропії Ви знаєте?
3. Які термодинамічні процеси називаються круговими, оборотними та необоротними?
4. Як змінюється ентропія під час різних процесів?
5. За якою ознакою можна безпомилково відрізнити кристалічне тіло від аморфного?
6. Який вигляд мають графіки плавлення аморфного тіла і тіла кристалічного?
7. Чи може змінюватися ентропія за незмінної температури?

Література

1. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Ільчук Г.А., Романишин Б.М. Фізика. Підручник. – Львів: Афіша, 2005-394 с.
2. Воловик П.М. Фізика: Для ун-тів.-К.; Ірпінь: Перун, 2005. -864 с.: іл..
3. Волков О.Ф., Лумпієва Т.П. Курс фізики: У 2-х т. Т.1: Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електростатика. Постійний струм. Електромагнетизм: Навчальний посібник для студентів інженернотехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – 224 с.
4. Курс загальної фізики : навчальний посібник / В.М. Вакалюк, А.В. Вакалюк; Міністерство освіти і науки України, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2021

Використані джерела:

1. Палехін В. П. Курс фізики : підручник / В. П. Палехін. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. – 516 с.
2. Павлов С.М. Основи мікроелектроніки: навчальний посібник / С.М. Павлов. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 224.
3. Яворський Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К. Довідник з фізики для інженерів та студентів вищих навчальних закладів / Переклад з 8-го переробл. і випр. вид. — Т. : Навчальна книга — Богдан, 2007. — 1040 с.
4. Чепурний М. М. Основи технічної термодинаміки / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко — Вінниця: Поділля-2000, 2004. — 358 с.