

Original article

In print article

<https://doi.org/10.26565/2222-5617-2024-41-05>

UDC: 537.6, 378.147, 004.738.5

PACS numbers: 01.40.На, 01.50.Лс, 75.30.Кз

СПЕЦІАЛЬНИЙ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ ЗА ДИСТАНЦІЙНОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ

В. М. Горбач , О. А. Люхтан , О. В. Шурінова 

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, 61022 Харків, Україна

E-mail: v-gorbatch@ukr.net

Надійшла до редакції 2 жовтня 2024 р. Переглянуто 15 листопада 2024 р.

Прийнято до друку 20 листопада 2024 р.

У статті запропоновано методику проведення лабораторної роботи спецпрактикуму 4 курсу за дистанційної форми навчання на прикладі лабораторної роботи «Визначення температури Кюрі з температурної залежності теплоємності феромагнетиків». За дистанційної форми навчання відсутня можливість проведення фізичного експерименту, тому пропонується розширити коло розрахунково-графічних завдань до лабораторної роботи. Студентам видається вже готова таблиця експериментальних даних, у даному випадку, таблиця теплоємності нікелю для інтервалу температур 1÷1500 К.

Під час виконання роботи, студенти, використовуючи отримані експериментальні дані теплоємності нікелю, повинні побудувати графік залежності C_V від температури, розрахувати гратчастий внесок у сумарну теплоємність за моделлю Дебая, обчислити електронну і магнітну складові теплоємності. Необхідні для розрахунку температуру Дебая θ_D і коефіцієнт електронної теплоємності γ студенти знаходять з умови, що за дуже низьких температур магнітною складовою теплоємності можна нехтувати, а граткова складова теплоємності апроксимується кубічною залежністю від температури.

Точка Кюрі є точкою фазового переходу другого роду, в околі якої спостерігаються специфічні аномалії. Згідно з теорією подібності сингулярна частина теплоємності характеризується такими співвідношеннями: $C(t) = (A^\pm/\alpha^\pm)(t^{-\alpha^\pm} - 1) + B^\pm$, де A^- , B^- , A^+ , B^+ – константи, α^- і α^+ – критичні індекси, $t = (T - T_k)/T_k$. Диференціюючи і логарифмуючи ці співвідношення, можна отримати рівняння, що дозволяють визначити критичні індекси $\log|(dC_m)/dT| = -(\alpha^\pm + 1) \log|T - T_c| + D$. Оскільки експериментальне значення температури Кюрі було дано з точністю ± 1 К, то студенти мають побудувати серію графіків $\log |(dC_m)/dT|$ від $\log|T - T_c|$ для різних T_c (від 624.4 К до 628 К через 0.4 К). З тангенса нахилу отриманих прямих визначається критичний індекс для даної температури Кюрі. За теорією подібності критичні індекси мають бути рівними. Тому з перетину кривих $\alpha^-(T)$ і $\alpha^+(T)$ можна визначити справжні значення критичного індексу і температури Кюрі.

Ключові слова: фазовий перехід, магнітна теплоємність, температура Кюрі, критичні індекси, нікель.

Як цитувати: В. М. Горбач, О. А. Люхтан, О. В. Шурінова. Спеціальний лабораторний практикум за дистанційної форми навчання. Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна. Серія «Фізика». Вип. 41, 2024, 43–49. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2024-41-05>

In cites: V. M. Horbatch, O. A. Lyukhtan, E. V. Shurinova. Special laboratory practicum in the distance form of education. Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Physics. Iss. 41, 2024, 43–49. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2024-41-05> (in Ukrainian).

ВСТУП

Друга половина XX століття і початок XXI століття пов'язані зі значними досягненнями науково-технічного прогресу, насамперед у сфері інформаційних технологій і нанотехнологій. Найбільший прогрес стався в інформаційній сфері, тобто в зберіганні, опрацюванні, збиранні, передаванні та використанні інформації за допомогою засобів обчислювальної техніки. Прогрес у царині інформаційних технологій, своєю чергою, призвів до нових видів і форм освітнього процесу, зокрема дистанційної освіти.

У міру свого розвитку дистанційна освіта виявила як позитивні, так і негативні сторони, які сильно впливають на якість освіти. Події, які відбуваються в Україні останніми роками (пандемія коронавірусної інфекції, війна в Україні, еміграція частини населення, віялові відключення світла тощо), змушують перевести навчальний процес на дистанційну форму навчання. Тому пошук і впровадження в навчальну практику нових віддалених форм організації навчального та дослідницького експерименту сьогодні особливо актуальні.

Проблема адаптації лабораторного практикуму до дистанційної форми навчання виникла практично відразу, щойно з'явилися відповідні технології. Якщо теоретичні дисципліни та контрольні-оцінювальну складову навчального процесу можна доволі успішно пристосувати до дистанційної форми навчання, то практикум, який потребує безпосередньої взаємодії з приладами та обладнанням, не може бути повноцінно проведений без присутності студента на робочому місці в лабораторії. Якоюсь мірою реальний фізичний експеримент при дистанційній формі навчання можна замінити віртуальними лабораторними установками та програмами-тренажерами, що імітують процес проведення реального експерименту.

У тих випадках, коли віртуальна установка не повністю відповідає реальному експерименту або немає можливості замінити реальний експеримент віртуальним аналогом, можливий варіант розширення кола завдань під час аналізу експериментальних даних, отриманих під час реального експерименту. У даній статті розглянуто такий підхід на прикладі лабораторної роботи «Визначення температури Кюри з температурної залежності теплоємності феромагнетиків», що входить до переліку робіт спецпрактикуму 4 курсу фізичного факультету «Фізичні властивості магнітовпорядкованих речовин».

У реальній лабораторній роботі досліджується температурна залежність теплоємності нікелю в температурному інтервалі від 300 К до 800 К, що включає точку Кюри, методом адіабатичного калориметра [1]. Для отримання необхідної точності та

дискретності температурної залежності, особливо в районі температури Кюри, процес вимірювання проводять досить повільно, тривалістю не менше двох-трьох годин. Після отримання експериментальних даних студенти проводять обробку даних, здійснюють розрахунки і будують графік температурної залежності теплоємності нікелю.

За дистанційної форми навчання студентам видається вже готова таблиця даних теплоємності нікелю в інтервалі температур $1 \div 1500$ К. У цьому випадку, під час виконання роботи, студент має побудувати графік залежності теплоємності від температури, розрахувати внесок ґратки у сумарну теплоємність за моделлю Дебая, обчислити електронну та магнітну складові теплоємності. Крім того, окремо розглянути область низьких температур ($1 \div 10$ К) і переконатися, що ґраткова складова теплоємності добре апроксимується кубічною залежністю. Для області температур у районі температури Кюри уточнити температуру Кюри та розрахувати критичні індекси.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ

Використані нами значення теплоємності нікелю для інтервалу температур від 1 до 1500 К були взяті з роботи [2]. У цій роботі наведені результати критичної оцінки та аналізу понад 50 робіт з вимірювання теплоємності нікелю, виконаних у провідних лабораторіях і наукових установах різних країн. Автор статті є співробітником Центру інформаційного та чисельного аналізу і синтезу даних (CINDAS), США. Виконана робота дозволила автору статті створити рекомендовану таблицю значень теплоємності нікелю для інтервалу температур $1 \div 2000$ К.

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ДЕБАЯ θ_D ТА КОЕФІЦІЄНТА ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ γ

За дуже низьких температур величини ґраткової, електронної та магнітної складових теплоємності нікелю можуть бути наближено обчислені відповідно до таких рівнянь:

1. Ґраткова складова теплоємності [3]:

$$C_L = \frac{12\pi^4 R}{5\theta_D^3} T^3 = \beta T^3, \quad (1)$$

де R – газова стала, θ_D – температура Дебая,

2. Електронна складова теплоємності [4]:

$$C_e = \frac{\pi^2 R k_B T}{2 E_F} = \gamma T, \quad (2)$$

де k_B – стала Больцмана, E_F – енергія Фермі,

3. Магнітна складова теплоємності [5]:

$$C_m = 0.113k_B \left(\frac{k_B T}{2SJa^2} \right)^{3/2} = \alpha T^{3/2} \quad (3)$$

де J – обмінний інтеграл, S – спінове квантове число, a – стала кристалічної ґратки.

В області дуже низьких температур (1÷4 К) величина магнітної складової теплоємності зневажливо мала порівняно з величинами ґраткової та електронної складових теплоємності [3]. У цьому випадку теплоємність нікелю можна представити як суму тільки двох складових: ґраткової та електронної:

$$C = C_e + C_L = \gamma T + \beta T^3. \quad (4)$$

З'являється можливість розділити ґраткову та електронну складові теплоємності. Це можна зробити наступним чином. Розділимо обидві частини рівняння на T . Отримаємо:

$$\frac{C}{T} = \gamma + \beta T^2. \quad (5)$$

Це рівняння прямої лінії виду $y = kx + b$, де $y = C/T$, $x = T^2$, $b = \gamma$, $k = \beta$.

На рис. 1 наведено отриману залежність C/T від T^2 . Там же наведено рівняння тренда, з якого випливає, що $\beta = 22.07 \times 10^{-6}$, $\gamma = 7.018 \cdot 10^{-3}$. Знання величини β дає змогу обчислити температуру Дебая.

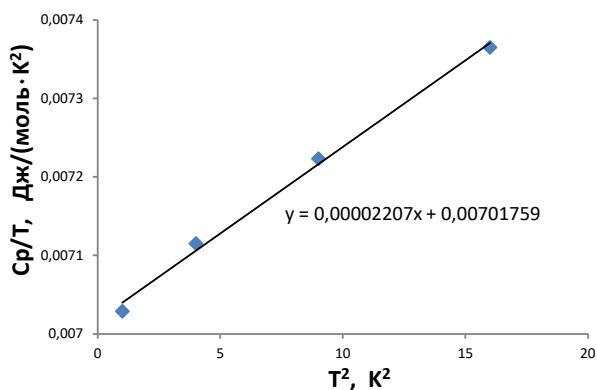


Рис. 1. Експериментальне визначення температури Дебая θ_D та коефіцієнта γ , що характеризує електронну теплоємність металу.

Fig. 1. Experimental determination of the Debye temperature θ_D and the coefficient γ characterising the electron heat capacity of a metal.

$$\theta_D = \sqrt[3]{\frac{12\pi^4 R}{5\beta}} = 444.9 \text{ K} \quad (6)$$

ТЕПЛОЄМНІСТЬ НІКЕЛЮ ТА ЇЇ СКЛАДОВІ В ОБЛАСТІ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР

У цій частині лабораторної роботи студентам пропонується розрахувати й побудувати для області температур 1÷30 К графіки температурних залежностей фононної та електронної складових теплоємності нікелю, сумарної теплоємності (фононної плюс електронної) нікелю та порівняти їх з експериментальними даними (рис. 2). Основним завданням для цієї частини лабораторної роботи є з'ясування області температур для нікелю, в якій виконується закон $C_p = \beta T^3$

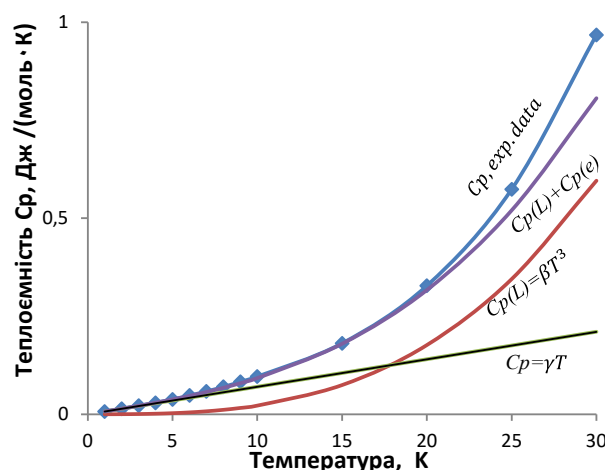


Рис. 2. Температурні залежності теплоємності нікелю та її складових в області низьких температур. Ґраткова складова теплоємності побудована в припущенні виконання закону $C_p = \beta T^3$. Ромбами показано експериментальні дані [2].

Fig. 2. Temperature dependences of the heat capacity of nickel and its components in the low temperature region. The lattice component of the heat capacity is plotted assuming fulfilment of the law $C_p = \beta T^3$. The rhombuses show experimental data [2].

Порівняння температурного ходу сумарної теплоємності з експериментальними даними свідчить про те, що до 18 К ґраткова теплоємність для нікелю добре апроксимується законом $C_p = \beta T^3$.

ОБЧИСЛЕННЯ ҐРАТКОВОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ

Фононну теплоємність розраховували в наближенні Дебая. Інтерполяційна формула для теплоємності в цьому наближенні має вигляд [6]:

$$C_{\text{реш}} = 3R \left[12 \left(\frac{T}{\theta} \right)^3 \int_0^{\theta/T} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} - \frac{3 \left(\frac{\theta}{T} \right)}{e^x - 1} \right] \quad (7)$$

Для обчислення інтеграла зручно використовувати математичні пакети типу Maple, Mathcad, Matlab, Mathematica. Пакет MS Office Excel застосовують рідше і не на повну силу. Проте, цей додаток має великі можливості для інженерних і наукових розрахунків [7]. Одним із пунктів протоколу оформлення лабораторних робіт на даному спецпрактикумі 4 курсу є обов'язкове використання пакета Excel для розрахунків і графічних побудов.

В Excel не передбачено стандартних засобів для обчислення інтегралів. У подібних випадках застосовують різні методи наближеного (чисельного) інтегрування [8]. У цьому випадку було застосовано метод трапецій. Наближена формула методу має вигляд:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{2} \cdot \left(f(a) + f(b) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) \right) \quad (8)$$

Точність будь-якого наближеного методу інтегрування залежить від числа точок розбивки, їх має бути багато. Завдяки функції «автозаповнення», розрахунок матриць точок розбивки і підінтегральних виразів не займає багато часу. Граткова теплоємність, обчислена даним методом із числом точок розбиття 25, непогано відповідає експериментально отриманій. Але оскільки при цьому все-таки доводиться заповнювати досить об'ємні аркуші таблиці, студентам було рекомендовано брати число точок розбивки рівним 10. На рис. 4 порівнюються розраховані температурні залежності для нікелю граткової, електронної, сумарної теплоємностей з експериментальними значеннями.

Як видно з рис 3, теплоємність нікелю містить ще одну складову, пов'язану з наявністю впорядкованої магнітної структури.

Аномальна поведінка теплоємності нікелю в околиці температури 625 К пов'язана з руйнуванням магнітного порядку, з температурою Кюрі. Студентам у цій частині лабораторної роботи пропонується розрахувати і побудувати графік температурної залежності магнітної складової теплоємності. Магнітна складова теплоємності розраховується шляхом віднімання з експериментальної температурної залежності теплоємності граткової та електронної складових ($C_L + C_e$). Отриману таким чином температурну залежність магнітної складової теплоємності наведено на рис. 4.

Екстремальне значення магнітної теплоємності відповідає точці Кюрі. З рисунка видно, що температура Кюрі відповідає 625 К. Слід звернути увагу, що магнітний порядок у точці Кюрі руйнується не стрибком, а спостерігається досить протяжна

область існування областей із залишковим магнітним порядком.

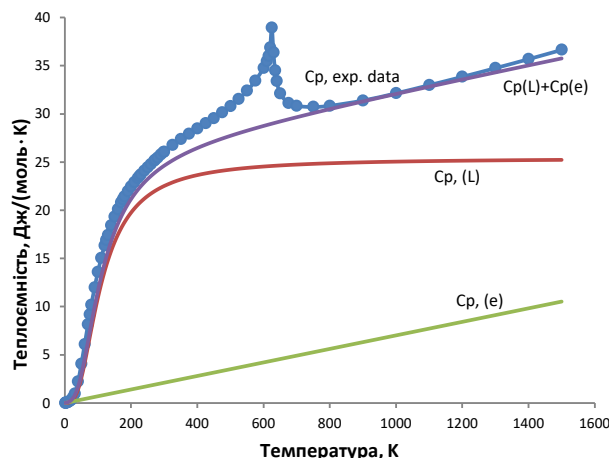


Рис. 3. Температурні залежності теплоємності нікелю та її складових для інтервалу температур 1÷1500 К. Граткова складова побудована на основі теорії Дебая. Колами показано експериментальні дані [2].

Fig. 3. Temperature dependences of the heat capacity of nickel and its components for the temperature range 1 ÷ 1500 K. The lattice component is constructed on the basis of Debye theory. The circles show experimental data [2].

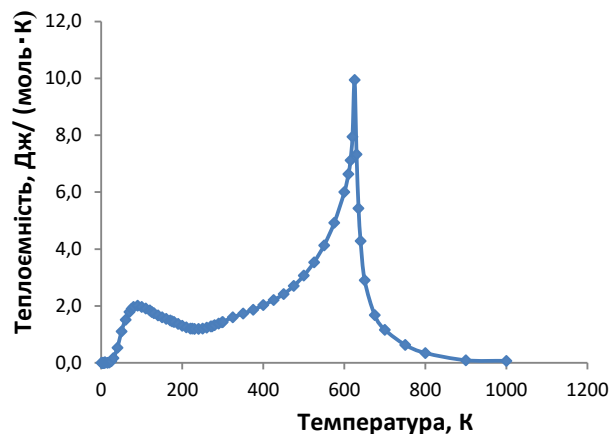


Рис. 4. Температурна залежність магнітної складової теплоємності нікелю. Кругами показано експериментальні дані [2].

Fig. 4. Temperature dependence of the magnetic component of the heat capacity of nickel. The circles show experimental data [2].

ТОЧКА КЮРІ І КРИТИЧНІ ІНДЕКСИ

При нагріванні та досягненні температури Кюрі феромагнетик переходить у парамагнітний стан. Цей перехід є фазовим переходом 2-го роду. В околі фазових переходів другого роду різних речовин

спостерігаються специфічні аномалії, критичні явища. Зокрема, у феромагнетиках в околі точки Кюрі спостерігаються зростання магнітної сприйнятливості, аномальна поведінка теплоємності тощо. Ці аномалії виникають за рахунок сильних флуктуацій різних фізичних величин з нескінченним радіусом кореляції.

Подібність критичних явищ в об'єктах різної фізичної природи дає змогу розглядати їх з єдиної точки зору (теорія масштабних перетворень (скейлінг-теорія) або теорія подібності) [9]. У всіх об'єктів різної фізичної природи поблизу точок фазових переходів другого роду спостерігається однакова або майже однакова температурна залежність низки фізичних властивостей. Для отримання такої залежності фізичну величину виражають у вигляді степеневі функції від приведеної температури $t = (T - T_c)/T_c$. Для сингулярної частини теплоємності за постійного об'єму в околі точки Кюрі зазвичай використовують такі співвідношення [9]:

$$\begin{aligned} C(t) &= (A^-/\alpha^-)(t^{-\alpha^-} - 1) + B^- & (T < T_c) \\ C(t) &= (A^+/\alpha^+)(t^{-\alpha^+}) + B^+ & (T > T_c), \end{aligned} \quad (9)$$

де константи α^- і α^+ є критичними індексами, A^- , B^- , A^+ , B^+ – константи. Ці співвідношення фактично описують внесок магнітної складової теплоємності в загальну теплоємність.

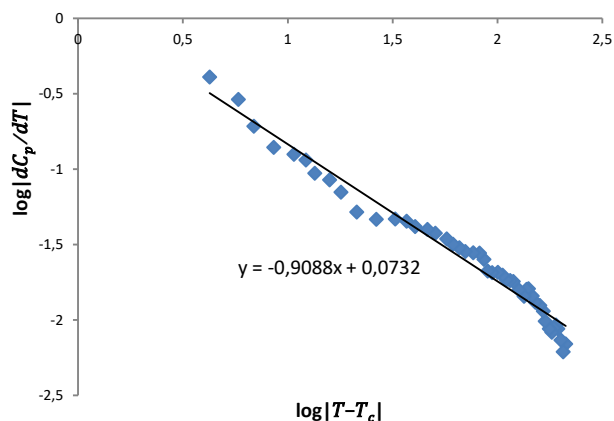


Рис. 5. Приклад залежності $|log|dC_p/dT||$ від $log|T - T_c|$ у припущенні, що значення температури Кюрі $T_c = 626$ К, для інтервалу температур $T < T_c$.

Fig. 5. Example of the dependence of $log|dC_p/dT|$ on $log|T - T_c|$ assuming that the Curie temperature value $T_c = 626$ K, for the temperature range $T < T_c$.

У цій роботі критичні показники визначалися зі співвідношення [10]:

$$log \left| \frac{dC_m}{dT} \right| = -(\alpha^\pm + 1) log|T - T_c| + D, \quad (10)$$

яке виходило з попередніх степеневих рівнянь після диференціювання і логарифмування (D – константа). Оскільки експериментальне значення температури Кюрі визначалося з точністю ± 1 К, то було побудовано серію графіків $log|(dC_m)/dT|$ від $log|T - T_c|$ для різних T_c (від 624.4 К до 628 К через 0.4 К). Графіки являли собою прямі лінії, тангенс нахилу яких дорівнював $-(\alpha^\pm + 1)$. Приклад такого графіка наведено на рис. 5. Критичні індекси α^- визначалися для інтервалу температур $T < T_c$, а критичні індекси α^+ – для інтервалу температур $T > T_c$. З теорії подібності випливає, що обидва критичні індекси мають бути рівними. Тому з перетину кривих $\alpha^-(T)$ і $\alpha^+(T)$ (рис. 6) можна визначити справжнє значення критичного індексу і температури Кюрі.

Як видно з рис. 6, точка Кюрі дорівнює $T_c = 25.6$ К, критичний індекс $\alpha = 0.102$.

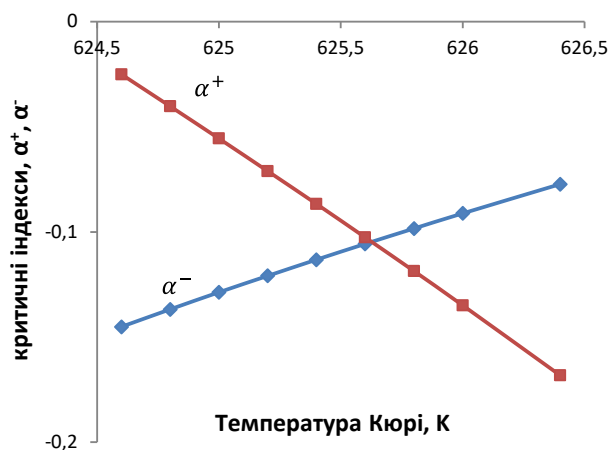


Рис. 6. Залежність критичних індексів α^- і α^+ , розрахованих для інтервалів температур по різні боки точки фазового переходу, від обраної температури Кюрі.

Fig. 6. Dependence of the critical indices α^- and α^+ calculated for the temperature intervals on the different sides of the phase transition point on the selected Curie temperature.

ВИСНОВКИ

Розроблено та відпрацьовано пакет завдань до лабораторної роботи «Дослідження температурної залежності теплоємності феромагнетиків» спецпрактикуму 4 курсу фізичного факультету кафедри загальної фізики за дистанційної форми навчання. Пакет містить у собі взяті з літературних джерел таблицю даних теплоємності нікелю в інтервалі температур 1÷500 К і перелік наступних завдань.

1. Визначення температури Дебая θ_D і коефіцієнта електронної теплоємності γ .

2. Обчислення ґраткової, електронної та магнітної складових теплоємності нікелю.

3. Уточнення температури Кюрі та обчислення критичних індексів.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interests.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ю. А. Попков, Ю. А. Мамалуй, В. Н. Горбач и др.. Методические указания к выполнению лабораторных работ по спецкурсу «Физические свойства магнитоупорядоченных веществ», Ч. 2, Харьковский государственный университет, Харьков (1983), 60 с.
2. P. D. Desai. Int. J. Thermophys. 8, 6, 769 (1987).
<https://doi.org/10.1007/BF00500793>
3. C. Kittel. Introduction to Solid State Physics, John Wiley & Sons, New York (1976), 600 p.
4. N. W. Ashcroft, N. D. Mermin. Solid State Physics, Saunders Collage Publishing, New York (1976), 848 p.
5. C. Kittel. Quantum Theory of Solids, John Wiley & Sons, New York (1987), 528 p.
6. L. D. Landau, E. M. Lifschitz. Statistical Physics, V.5, P.1, Elsvier, Oxford (1967), 562 p.
7. W. J. Orvis. Excel for scientists and engineers, San Francisco, California, Sybex (1998), 547 p.
8. Г. Г. Цегелик. Чисельні методи, Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів (2004), 408 с.
9. H. E. Stanley. Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena, Oxford university press, Oxford (1971), 344 p.
10. T. G. Kollic. Phys. Rev., B16, 4872 (1977).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.16.4872>

REFERENCES

1. Y. A. Popkov, Y. A. Mamaluy, V. N. Horbach etc.. Methodological instructions for laboratory works on the special course «Physical properties of magnetically ordered substances», P. 2, Harkovskiy gosudarstvenniy universitet, Kharkov (1983), 60 p. (In Russian).
2. P. D. Desai. Int. J. Thermophys., 8, 6, 769 (1987).
<https://doi.org/10.1007/BF00500793>
3. C. Kittel. Introduction to Solid State Physics, John Wiley & Sons, New York (1976), 600 p.

4. N. W. Ashcroft, N. D. Mermin. Solid State Physics, Saunders Collage Publishing, New York (1976), 848 p.
5. C. Kittel. Quantum Theory of Solids, John Wiley & Sons, New York (1987), 528 p.
6. L. D. Landau, E. M. Lifschitz. Statistical Physics, V.5, P.1, Elsvier, Oxford (1967), 562 p.
7. W. J. Orvis. Excel for scientists and engineers, San Francisco, California, Sybex (1998), 547 p.
8. G. G. Tsegelyk. Numerical Methods, Ivan Franko Lviv National University, Lviv (2004), 408 p. (in Ukrainian).
9. H. E. Stanley. Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena, Oxford university press, Oxford (1971), 344 p.
10. T. G. Kollic. Phys. Rev., B16, 4872 (1977).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.16.4872>

SPECIAL LABORATORY PRACTICUM IN THE DISTANCE FORM OF EDUCATION

V. M. Horbatch, O. A. Lyukhtan, E. V. Shurinova

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., 61022 Kharkiv, Ukraine

E-mail: v-gorbatch@ukr.net

Received on October 02, 2024. Reviewed on November 15, 2024.

Accepted for publication on November 20, 2024.

The article proposes the methodology of laboratory work of the special workshop of the 4th year at the distance form of education on the example of laboratory work 'Determination of Curie temperature from the temperature dependence of heat capacity of ferromagnets'. At the distance form of education there is no possibility to carry out a physical experiment, so it is proposed to expand the range of calculation-graphic tasks for the laboratory work. Students are given a ready-made table of experimental data, in this case, the table of heat capacity of nickel for the temperature range 1÷1500 K.

In the course of the work, students, using the experimental data obtained for the heat capacity of nickel, should plot the dependence of C_V on temperature, calculate the lattice contribution to the total heat capacity using the Debye model, and calculate the electronic and magnetic components of the heat capacity. Students find the Debye temperature θ_D and the electronic heat capacity coefficient γ necessary for the calculation from the condition that at very low temperatures the magnetic component of the heat capacity can be neglected and the lattice component of the heat capacity is approximated by a cubic dependence on temperature.

The Curie point is the point of phase transition of the second kind, in the vicinity of which specific anomalies are observed. According to the similarity theory, the singular part of the heat capacity is characterized by the following relations:

$C(t) = (A^\pm/\alpha^\pm)(t^{-\alpha^\pm} - 1) + B^\pm(\pm)$, where A^- , B^- , A^+ , B^+ are constants, α^- and α^+ are critical indices, $t = (T - T_c)/T_c$. Differentiating and logarithmising these relations, we can obtain equations that allow us to determine the critical indices $(\log|(dC_m)/dT| = -(\alpha^\pm + 1) \log|T - T_c| + D)$. Since the experimental value of the Curie temperature was given to an accuracy of ± 1 K, students should plot a series of graphs $\log |(dC_m)/dT|$ from $\log|T - T_c|$ for different T_c (from 624.4 K to 628 K through 0.4 K). From the tangent of the slope of the obtained straight lines, the critical exponent for a given Curie temperature is determined. According to the theory of similarity, the critical indexes should be equal. Therefore, from the intersection of the curves $\alpha^-(T)$ and $\alpha^+(T)$, the true values of the critical index and the Curie temperature can be determined.

Keywords: phase transition, magnetic heat capacity, Curie temperature, critical indices, nickel.