

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Фізичний факультет
(назва факультету)

Кафедра загальної фізики



РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Процеси фазоутворення в аморфних та нанокристалічних системах

(повна назва навчальної дисципліни)

для студентів

галузь знань 10 Природничі науки
(шифр і назва)
спеціальність 104 Фізика та астрономія
(шифр і назва спеціальності)
освітній рівень магістр
(молодший бакалавр, бакалавр, магістр)
освітня програма Фізика наносистем
(назва освітньої програми)
спеціалізація Фізика наносистем
(за наявності) (назва спеціалізації)
вид дисципліни обов'язкова

Форма навчання	<u>очна</u>
Навчальний рік	<u>2019/2020</u>
Семестр	<u>1</u>
Мова викладання, навчання та оцінювання	<u>українська</u>
Форма заключного контролю	<u>екзамен</u>

Викладачі: доцент Цареградська Тетяна Леонідівна

(Науково-педагогічні працівники, які забезпечують викладання даної дисципліни у відповідному навчальному році)

Пролонговано: на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

КИЇВ – 2019

Розробники¹: Цареградська Тетяна Леонідівна, кандидат фіз.-мат. наук, доцент,
доцент кафедри загальної фізики
(вказати авторів: ПІБ, науковий ступінь, вчене звання, посада, кафедра)

ЗАТВЕРДЖЕНО
Зав. кафедри загальної фізики


(підпис)

(Боровий М.О.)
(прізвище та ініціали)

Протокол № 10 від 7 травня 2019 р.

Схвалено науково-методичною комісією фізичного факультету

Протокол № 21 від «10» травня 2019 року

Голова науково-методичної комісії


(підпис)

(Оліх О.Я.)
(прізвище та ініціали)

¹ Розробляється лектором. Робоча програма навчальної дисципліни розглядається на засіданні кафедри (циклової комісії – для коледжів), науково-методичної комісії факультету/інституту (раді навчального закладу - коледжу), підписується завідувачем кафедри (головою циклової комісії), головою науково-методичної комісії факультету/інституту (головою ради) і затверджується заступником декана/директора інституту з навчальної роботи (заступником директора коледжу).

ВСТУП

1. Мета дисципліни – отримання глибоких та систематизованих знань з теорії фазоутворення в аморфних та нанокристалічних системах, що включає засвоєння основних законів гомогенної та гетерогенної кристалізації однокомпонентних, бінарних та багатокомпонентних сплавів, вміння розраховувати основні характеристики процесу кристалізації для конкретних бінарних систем.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

1. Знати закони термодинаміки, метод термодинамічних потенціалів, загальні умови термодинамічної рівноваги, умови рівноваги в гомогенних та гетерогенних системах, парціальні та інтегральні термодинамічні функції, термодинамічні функції ідеальних та реальних розчинів, квазіхімічну теорію розчинів.
2. Вміти застосовувати на практиці метод термодинамічних потенціалів Гіббса, аналізувати основні типи діаграм стану двокомпонентних систем за допомогою ізобаро-ізотермічного потенціалу, розраховувати криві рівноваги та будувати діаграми стану.
3. Володіти елементарними навичками графічно визначати парціальні та відносні парціальні термодинамічні функції за відомими інтегральними для бінарних систем, розраховувати парціальні та відносні парціальні функції для одного з компонентів за відомими парціальними функціями другого компонента.

3. Анотація навчальної дисципліни / референс:

В рамках курсу «Процеси фазоутворення в аморфних та нанокристалічних системах» розглядаються як класичні, так і сучасні досягнення в області теорії кристалізації та аморфізації металевих систем; теорія нуклеації бінарних та багатокомпонентних систем. Метою вивчення дисципліни є засвоєння основних законів теорії гомогенної та гетерогенної нуклеації у застосуванні до аморфних металевих систем. Навчальна задача курсу полягає в оволодінні методами розрахунку та експериментальних вимірювань основних параметрів процесу кристалізації для конкретних аморфних систем. Результати навчання полягають в умінні застосовувати закони теорії гомогенної та гетерогенної нуклеації бінарних та багатокомпонентних систем для розв'язання практичних задач. Методи викладання: лекції, консультації, лабораторні роботи. Методи оцінювання: опитування в процесі лекції, контрольні роботи після основних розділів спецкурсу, оцінювання лабораторних робіт, іспит. Підсумкова оцінка виставляється на основі проміжних оцінок (60%) та іспиту (40%).

4. Завдання (навчальні цілі) – ознайомлення студентів з законами теорії гомогенної та гетерогенної кристалізації для однокомпонентних та багатокомпонентних систем, а також процесів аморфізації металевих систем, навчання методам розрахунку основних характеристик процесу кристалізації для конкретних бінарних систем, навчання методам вимірювання параметрів процесу кристалізації аморфних сплавів.

Згідно вимог проекту Стандарту вищої освіти України (другий (магістерський) рівень вищої освіти, галузь знань 10 «Природничі науки», спеціальність 104 «Фізика та астрономія», ОНП «Фізика наносистем» дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних **компетентностей**:

Інтегральних:

Здатність розв'язувати комплексні проблеми в галузі фізики наносистем, що передбачає глибоке переосмислення наявних та створення нових цілісних знань.

Загальних:

ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

ЗК2. Навички використання новітніх інформаційних і комунікаційних технологій.

- ЗК4. Здатність до пошуку, оброблення на аналізі інформації з різних джерел.
 ЗК5. Здатність працювати в міжнародному науковому просторі.
 ЗК8. Здатність застосовувати знання в галузі методів вимірювання у фізиці.

Фахових:

- ФК9. Здатність застосовувати знання з фізики наноструктурних металевих систем та тонких плівок.
 ФК10. Здатність застосовувати знання з фізики аморфних металевих систем.
 ФК14. Здатність застосовувати знання в галузі методів вимірювання фізичних властивостей наносистем.
 ФК15. Здатність використовувати знання й уміння в галузі практичного використання комп'ютерних технологій для дослідження наносистем.

5. Результати навчання за дисципліною: (описуються з детальною достовірністю для розробки заходів оцінювання)

<i>Результат навчання</i> (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація*; 4. автономність та відповідальність*)		<i>Методи викладання і навчання</i>	<i>Методи оцінювання</i>	<i>Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни</i>
Код	Результат навчання			
1.1	Отримання знань з теорії гомогенної та гетерогенної кристалізації металів та сплавів.	<i>Лекції</i>	<i>Модульна контрольна робота</i>	20
1.2	Отримання знань, щодо процесів кристалізації та аморфізації металевих систем.	<i>Лекції</i>	<i>Модульна контрольна робота</i>	20
2.1	Опанування експериментальних методик досліджень властивостей аморфних сплавів. Вміння визначати параметри термостабільності аморфних сплавів.	<i>Лабораторні роботи</i>	<i>Захист лабораторних робіт</i>	10
2.2	Вміння розраховувати основні характеристики процесу кристалізації для конкретних бінарних систем.	<i>Лабораторні роботи</i>	<i>Захист лабораторних робіт</i>	10

6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання (необов'язково для вибіркових дисциплін)

Результати навчання дисципліни	1.1	1.2	2.1	2.2
Програмні результати навчання				
ПРН 1.6. Знати методи отримання, особливості структури та властивостей аморфно-нанокристалічних сплавів.			+	
ПРН 2.10. Вміти визначати метод розрахунку, необхідний для розв'язку конкретної наукової проблеми в області фізики наносистем.	+	+		+

Структура курсу

Курс складається з 2-х змістових модулів: «Теорія гомогенної та гетерогенної кристалізації металів та сплавів», який включає в себе 8 лекцій та 2 лабораторні роботи та «Кристалізація та аморфізація металевих систем», який складається з 7 лекцій та 2-х лабораторних робіт.

* заповнюється за необхідністю, наприклад для практик, лабораторних курсів тощо.

7. Схема формування оцінки:

7.1. Форми оцінювання студентів: (зазначається перелік видів робіт та форм їх контролю / оцінювання із зазначенням Min. – рубіжної та Max. кількості балів чи відсотків)

- семестрове оцінювання:

1. Модульна контрольна робота 1 (12 балів-20 балів). Захист лабораторних робіт(6 балів-10 балів).
2. Модульна контрольна робота 2 (12 балів-20 балів). Захист лабораторних робіт(6 балів-10 балів).

- підсумкове оцінювання у формі екзамену

Підсумкове оцінювання у формі екзамену²: (обов'язкове проведення екзаменаційного оцінювання в письмовій формі)

	ЗМ1/Частина 1 (за наявності)	ЗМ2/Частина 2 (за наявності)	екзамен	Підсумкова оцінка
Мінімум	<u>18</u>	<u>18</u>	<u>24</u>	<u>60</u>
Максимум	<u>30</u>	<u>30</u>	<u>40</u>	<u>100</u>

у випадку комплексного екзамену слід вказати питому вагу складових

Студент не допускається до екзамену, якщо під час семестру набрав менше 36 балів.³

(слід чітко прописати умови, які висуваються викладачами даної дисципліни).

Оцінка за іспит не може бути меншою **24 балів** для отримання загальної позитивної оцінки за курс.

7.2. Організація оцінювання: (обов'язково зазначається порядок організації передбачених робочою навчальною програмою форм оцінювання із зазначенням, у тому числі, результатів навчання, опанування яких перевіряється конкретним оцінюванням).

7.3. Шкала відповідності

Відмінно / Excellent	90-100
Добре / Good	75-89
Задовільно / Satisfactory	60-74
Незадовільно з можливістю повторного складання / Fail	35-59
Незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни / Fail	0-34
Зараховано / Passed	60-100
Не зараховано / Fail	0-59

² Семестрову кількість балів формують бали, отримані студентом у процесі теоретичного засвоєння матеріалу з усіх розділів дисципліни, семінарських занять, виконання практичних, лабораторних, індивідуальних, підсумкових контрольних робіт, творчих робіт впродовж семестру, передбачених робочою навчальною програмою (**100 балів** - для залікових дисциплін, у випадку, якщо дисципліна завершується екзаменом, то розподіл здійснюється за таким алгоритмом: **60 балів (60%) – семестровий контроль і 40 балів (40%) – екзамен**).

³ У випадку, коли дисципліна завершується екзаменом не менше – **20 балів**, а рекомендований мінімум **не менше 36 балів**, оскільки якщо студент на екзамені набрав менше **24 балів** (а це 60% від 40 балів, відведених на екзамен), то вони **не додаються** до семестрової оцінки незалежно від кількості балів, отриманих під час семестру, а в екзаменаційній відомості у графі «результуюча оцінка» переноситься лише кількість балів, отриманих під час семестру.

8. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ І ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

№ п/п	Назва теми	Кількість годин		
		лекції	лабораторні	Самостійна робота
Частина 1. Теорія гомогенної та гетерогенної кристалізації металів та сплавів				
1	<p>Тема 1. Вступ. Загальна характеристика аморфних сплавів. Структура та властивості аморфних сплавів. Методи отримання аморфних сплавів. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Механічні властивості сплавів в аморфному стані. Лабораторна робота 1. Дослідження процесу кристалізації аморфного сплаву дилатометричним методом. Частина 1. Ознайомлення з правилами техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт та правилами оформлення звітів з лабораторних робіт. Ознайомлення з методами обробки результатів, отриманих в ході виконання лабораторних робіт. Підготовка зразка аморфного сплаву до вимірювання.</p>	2	2	8
2	<p>Тема 2. Методи дослідження аморфних сплавів. Метод ДСК, дилатометрична методика, дослідження електроопору, дослідження механічних властивостей, рентгенографічні дослідження, електронномікроскопічні дослідження. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Лабораторна робота 1. Дослідження процесу кристалізації аморфного сплаву дилатометричним методом. Частина 2. Проведення експериментальних дилатометричних досліджень для заданого аморфного сплаву. Хімічні властивості АМС, корозія АМС.</p>	2	2	8
3	<p>Тема 3. Загальна характеристика процесу фазоутворення в металах та сплавах. Основні характеристики та класифікація процесу кристалізації. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Класифікація фазових переходів за Еренфестом. Фазові переходи I та II роду. Рівняння Клапейрона-Клаузіуса та рівняння Еренфеста. Змішані фазові переходи. (повторення матеріалу). Лабораторна робота 1. Дослідження процесу кристалізації аморфного сплаву дилатометричним методом. Частина 3. Обробка результатів експерименту, побудова температурної залежності відносної зміни об'єму при нагріванні та охолодженні. Визначення параметрів термічної стабільності аморфного сплаву.</p>	2	2	8
4	<p>Тема 4. Гомогенна кристалізація однокомпонентних систем. Характеристики процесу кристалізації при гомогенному механізмі нуклеації. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до виконання лабораторної роботи. Магнітні властивості АМС; вплив невпорядкованого розташування атомів на феромагнітні властивості. Захист лабораторної роботи 1. Дослідження процесу кристалізації аморфного сплаву дилатометричним методом.</p>	2	2	8
5	<p>Тема 5. Гетерогенна кристалізація однокомпонентних систем. Модель куполовидного зародка. Характеристики процесу кристалізації при гетерогенному механізмі нуклеації.</p>	2	2	8

	<p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Обробка експериментальних результатів, отриманих при виконанні лабораторної роботи.</p> <p>Універсальні критерії аморфізації (вплив швидкості охолодження, залежність від діаграми стану).</p> <p>Лабораторна робота № 2. Дослідження процесу старіння аморфних сплавів. Частина 1. Підготовка зразків аморфних сплавів до вимірювання. Проведення експериментальних дилатометричних досліджень для вихідного аморфного сплаву.</p>			
6	<p>Тема 6. Кінетика нестационарного зародкоутворення. Ефективний поверхневий натяг. «Гарячі» центри кристалізації. Ударний режим кристалізації.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до виконання лабораторної роботи.</p> <p>Геометричні та хімічні критерії аморфізації.</p> <p>Лабораторна робота № 2. Дослідження процесу старіння аморфних сплавів. Частина 2. Підготовка зразків аморфних сплавів до вимірювання. Проведення експериментальних дилатометричних досліджень для аморфного сплаву того ж самого складу, який був витриманий при кімнатній температурі протягом 3-х років.</p>	2	2	8
7	<p>Тема 7. Теорія гомогенної кристалізації бінарних сплавів. Врахування роботи, що обумовлена флуктуацією концентрації. Робота утворення зародка в бінарній системі при гомогенному зародкоутворенні. Радіус критичного зародка, робота утворення зародка критичного зародка для бінарних сплавів при гомогенному зародкоутворенні.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Обробка експериментальних результатів, отриманих при виконанні лабораторної роботи. Структурні критерії аморфізації.</p> <p>Лабораторна робота № 2. Дослідження процесу старіння аморфних сплавів. Частина 3. Обробка результатів експерименту, побудова температурних залежностей відносної зміни об'єму при нагріванні та охолодженні для вихідного аморфного сплаву та витриманого в нормальних умовах протягом 3-х років. Визначення параметрів термічної стабільності вихідного та витриманого аморфних сплавів.</p>	2	2	8
8	<p>Тема 8. Теорія гетерогенної кристалізації бінарних сплавів. Робота утворення зародка в бінарній системі при гетерогенному зародкоутворенні. Радіус критичного зародка, робота утворення зародка критичного зародка для бінарних сплавів при гетерогенному зародкоутворенні.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>Підготовка до підсумкової модульної контрольної роботи. Електронні критерії аморфізації.</p> <p>Захист лабораторної роботи №2. Дослідження процесу старіння аморфних сплавів</p>	2	2	8
	<i>Модульна контрольна робота 1</i>			
Частина 2. Кристалізація та аморфізація металевих систем				
9	<p>Тема 9. Система рівнянь для розрахунку основних характеристик процесу кристалізації бінарних сплавів. Узагальнення для випадку багатокомпонентних систем.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>Кінетика аморфізації. ТТТ-діаграми.</p> <p>Лабораторна робота № 3. Дослідження впливу термічної</p>	2	2	8

	<p>обробки на властивості аморфних сплавів. Частина 1. Підготовка зразка аморфного сплаву для проведення ізотермічного відпалу.</p> <p>Проведення ізотермічного відпалу аморфного сплаву, при температурі на 50 К нижчій за температуру початку інтенсивної кристалізації даного сплаву протягом 1 години). Проведення (після ізотермічного відпалу) нагрівання сплаву до повної кристалізації.</p>			
10	<p>Тема 10. Особливості процесу кристалізації для модельних бінарних сплавів з різним типом діаграм стану. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Аналіз можливості аморфізації для модельних бінарних сплавів з різним типом діаграм стану: евтектичного типу та типу «сигара».</p> <p>Лабораторна робота № 3. Дослідження впливу термічної обробки на властивості аморфних сплавів. Частина 2. Обробка результатів дилатометричного експерименту, побудова температурних залежностей відносної зміни об'єму аморфного сплаву, для якого був проведений попередній ізотермічний відпал. Визначення параметрів термічної стабільності сплаву після проведеної термічної обробки. Порівняння отриманих результатів з даними для вихідного сплаву. Аналіз отриманих результатів</p>	2	2	8
11	<p>Тема 11. Кінетика нуклеації аморфних металевих сплавів на прикладі системи системи Fe-B.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>Вплив опромінення на структуру та властивості АМС.</p> <p>Захист лабораторної робота № 3. Дослідження впливу термічної обробки на властивості аморфних сплавів.</p>	2	2	8
12	<p>Тема 12. Схильність сплавів до аморфізації, напівемпіричні критерії, вплив легування.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до виконання лабораторної роботи. Аморфні надпровідники.</p> <p>Лабораторна робота № 4. Визначення об'ємної частки кристалічної фази в аморфному бінарному сплаві системи Fe-B після низькотемпературного ізотермічного відпалу.</p> <p>Частина 1. Підготовка зразка бінарного аморфного сплаву системи Fe-B для проведення ізотермічного відпалу.</p> <p>Проведення ізотермічного відпалу бінарного аморфного сплаву системи Fe-B при температурі на 50 К нижчій за температуру початку інтенсивної кристалізації даного сплаву протягом 1 години.</p>	2	2	8
13	<p>Тема 13. Структурна релаксація в аморфних металевих сплавах. Параметри впорядкування аморфного стану. Низькотемпературна релаксація. Кінетика процесів релаксації.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Спінове скло.</p> <p>Лабораторна робота № 4. Визначення об'ємної частки кристалічної фази в аморфному бінарному сплаві системи Fe-B після низькотемпературного ізотермічного відпалу.</p> <p>Частина 2. Обробка результатів експерименту, побудова температурної залежності відносної зміни об'єму бінарного аморфного сплаву системи Fe-B після проведення ізотермічного відпалу при температурі на 50 К нижчій за температуру початку інтенсивної кристалізації протягом 1 години (при нагріванні та охолодженні). Розрахунок та побудова графіка залежності об'ємної частки фази, що закристалізувалася від часу ізотермічного відпалу (на основі експериментальних досліджень відносних змін об'єму)</p>	2	2	8
14	<p>Тема 14. Старіння аморфних сплавів. Температурно-часова стабільність аморфних сплавів.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>Отримання композиційних матеріалів при спрямованій</p>	2	2	8

	кристалізації. Лабораторна робота № 4. Визначення об'ємної частки кристалічної фази в аморфному бінарному сплаві системи Fe-B після низькотемпературного ізотермічного відпалу. Частина 3. Розрахунок та побудова графіка залежності об'ємної частки фази, що закристалізувалася від часу ізотермічного відпалу (за допомогою рівнянь теорії гомогенної кристалізації бінарних сплавів). Порівняння результатів теоретичних розрахунків та експерименту. Аналіз отриманих результатів.			
15	Тема 15. Методи вирощування монокристалів. Механізми росту монокристалів. Евтектичні колонії. Двофазна кристалізація бінарних сплавів. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. . Зонна плавка, зонна очистка. Підготовка до модульної контрольної роботи. Захист лабораторної робота № 4. Визначення об'ємної частки кристалічної фази в аморфному бінарному сплаві системи Fe-B після низькотемпературного ізотермічного відпалу.	2	2	8
	<i>Підсумкова модульна контрольна робота</i>			
	ВСЬОГО	30	30	120

Примітка: слід зазначити теми, винесені на самостійне вивчення

Загальний обсяг 180 год.⁴, в тому числі:

Лекцій – **30** год.

Семінари – **0** год.

Практичні заняття - **0** год.

Лабораторні заняття - **30** год.

Тренінги - **0** год.

Консультації - **___** год.

Самостійна робота - **120** год.

⁴ Загальна кількість годин, відведених на дану дисципліну згідно навчального плану.

9. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА⁵:

Основна: (Базова)

1. А.П. Шпак, В.І. Лисов, Ю.А. Куницький, Т.Л. Цареградська. Кристалізація і аморфізація металевих систем. Київ: Академперіодика, 2002 – 208 с.
2. Аморфные металлические сплавы / Под ред.Ф.Е. Любарского. М., 1987. 582 с.
3. В.А. Лихачев, В.Е. Шудегов. Принципы организации аморфных структур. Издательство С.-Петербургского унив-та, 1999. – 228 с.
4. Металлические стекла. Вып. 1: Ионная структура, электронный перенос и кристаллизация / Под ред. Г. Гюнтеродта, Г. Бека. М., 1983. 376 с.
5. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. М., 1987. 328 с.
6. Л.А. Булавін, В.І. Лисов, С.Л. Рево, В.І. Оглобля, Т.Л. Цареградська. Фізика іонно-електронних рідин. Монографія. Київ, Вид.-поліграфічний центр „Київський університет”, 2008, 384 с.
7. М. Фольмер. Кинетика образования новой фазы. М.; Наука, 1986
8. В.Л. Скрипов, В.Л. Коверда. Спонтанная кристаллизация переохлажденных жидкостей. М.; Наука, 1984
9. И.В. Салли. Кристаллизация сплавов. Киев. Наукова думка. 1974
10. <http://www.twirpx.com/file/506476/>

Додаткова:

1. А.П. Шпак, В.І. Лисов, Ю.А. Куницький. Кластерные и наноструктурные материалы, т.2, Київ: Академперіодика, 2002 – 539с.
2. Фельц А. Аморфные и стеклообразные неорганические твердые тела. М., 1986. 558 с.
3. Дембовский С. А. Чечеткина Е. А. Стеклообразование. М., 1990. 279 с.
4. Абросимова Г.Е. Эволюция структуры аморфных сплавов. Успехи физических наук. Том 181, № 12, 2011, с.1265.
5. А.М. Глезер, Аморфные и нанокристаллические структуры: сходства, различия, взаимные переходы. Рос. хим. ж., 2002, т. XLVI, №5, с.57-63.
6. <http://gen.phys.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2013/02/thermodynamic.pdf>
7. https://docs.google.com/file/d/1DkSrmiB98ng7ALS9SsKugThO3bgtzyxzmzSNk4AXFl_V2Vwp_y_XW3TC6gT5-/edit
8. <http://www.twirpx.com/file/142514/>
9. <http://www.twirpx.com/file/33385/>
10. <http://www.twirpx.com/file/360775/>

⁵ В тому числі Інтернет ресурси