

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Хімічний факультет  
Кафедра хімії високомолекулярних сполук

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник декана  
з навчальної роботи



*Наталія Усенко*  
Наталія УСЕНКО

«30» 06 2022 року

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

**Фізика полімерів**

*для здобувачів освіти*

галузі знань	<b>10 Природничі науки</b>
спеціальність	<b>102Хімія</b>
освітній рівень	<b>магістр</b>
освітня програма	<b>Хімія</b>
вид дисципліни	<b>вибіркова</b>

Форма навчання	<b>денна</b>
Навчальний рік	<b>2022/2023</b>
Семестр	<b>3</b>
Кількість кредитів ECTS	<b>3,0</b>
Мова викладання, навчання та оцінювання	<b>українська</b>
Форма заключного контролю	<b>іспит</b>

Викладач (лектор): доцент **Студзинський Сергій Леонідович**

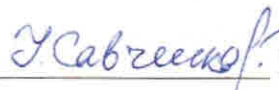
Пролонговано: на 20\_\_/20\_\_ н. р. \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_) «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.  
на 20\_\_/20\_\_ н. р. \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_) «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**КИЇВ – 2022**

Розробник: Студзинський Сергій Леонідович, доцент, д.х.н. \_\_\_\_\_

ЗАТВЕРДЖЕНО

Завідувач кафедри хімії високомолекулярних  
сполук

 Ірина САВЧЕНКО

Протокол № 17 від «1» червня 2022 р.

Схвалено науково-методичною комісією хімічного факультету

Протокол № 7 від «29» червня 2022 року

Голова науково-методичної комісії  Олександр РОЇК

« 30 » червня 2022 року

**1. Мета дисципліни** – вивчення теоретичних аспектів фізики полімерів – особливостей фізики процесів утворення полімерної форми речовини та фізичних і фізико-хімічних процесів, зокрема кристалізації в полімерних системах, а також особливостей фізики полімерних фаз речовини різного типу та їх стабільності, умов існування та взаємного перетворення, процесів утворення та практичного застосування деяких з них.

**2. Попередні вимоги до опанування навчальної дисципліни:**

1. Знати основні поняття загальної, фізичної та органічної хімії, хімії полімерів та фізичної хімії високомолекулярних сполук.
2. Володіти базовими знаннями хімії високомолекулярних сполук та фізичної і органічної хімії.
3. Знати основні поняття фізико-хімічної кінетики та теорії фазових рівноваг.

**3. Анотація навчальної дисципліни:**

Елементи флуктуаційної кінетики фізичних та хімічних процесів в конденсованих полімерних середовищах, зокрема: вплив флуктуаційного фактору на кінетику критичних явищ в авто-каталітичних процесах утворення та деструкції, а також окиснення полімерів; флуктуаційний підхід при описі та аналізі процесів кристалізації та споріднених фізико-хімічних процесів в макромолекулярних системах. Полімерна форма існування речовини – стабільні і метастабільні полімерні фази сполук легких елементів: термодинамічна стабільність та метастабільність фаз молекулярних сполук легких елементів, зокрема, органічної речовини; фазові та незворотні кінетичні перетворення в системах на основі сполук легких елементів - рівноважні Р,Т-діаграми фаз різного елементного складу елементів перших двох періодів таблиці Менделєєва; Р,Т-область переважного існування речовини в полімерній формі, область метастабільних молекулярних форм та область щільних «атомарних» фаз сполук легких елементів. Схильність до переходу в полімерну форму низькомолекулярних сполук легких елементів при високих тисках: бароіндукована полімеризація молекулярних сполук легких елементів та причини поширеності метастабільних низькомолекулярних форм серед цих сполук. Полімерні фази високого тиску сполук легких елементів: спроможність до утворення полімерних форм сполуками елементів 2-го періоду періодичної таблиці та аналіз умов їх існування; полімерні фази високого тиску СО, СО<sub>2</sub> та азоту, кополімерні фази СО-N<sub>2</sub> – їх утворення, структура, фізичні і фізико-хімічні властивості; порівняльний аналіз перспектив отримання та термодинамічної і кінетичної стабільності полімерних фаз різного елементного складу, їх можливі застосування.

**4. Завдання (навчальні цілі):** розвиток теоретичних знань студентів з фізики полімерного стану речовини, уявлень про особливості утворення та границі термодинамічної і кінетичної стабільності полімерних форм сполук легких елементів; набуття студентами практичних навичок у визначенні можливості одержання конкретного типу полімерних фаз, їх стабільності в певних умовах та можливих областей їх використання. Надати студентам уявлення про елементи флуктуаційної кінетики фізико-хімічних процесів та висвітлити роль флуктуаційного фактору в фізичних і фізико-хімічних процесах різного типу в полімерних системах та елементарні застосування флуктуаційного підходу при аналізі процесів кристалізації та споріднених фізико-хімічних процесів в полімерах, критичних явищ в процесах утворення, деструкції та окислення, зокрема інгібованого, полімерів. Навчити студентів самостійно визначати необхідність врахування ролі флуктуаційного фактору або доцільність застосування апарату класичної кінетики для коректного опису

кінетики того чи іншого конкретного фізико-хімічного процесу в полімерних системах.

Навчальна дисципліна спрямована на досягнення наступних загальних та спеціальних (фахових) компетентностей: ЗК1, ЗК2, ЗК4, ЗК9, ЗК14 та ФК1, ФК2, ФК6, ФК8, ФК9.

#### 5. Результати навчання за дисципліною:

Код	Результат навчання	Форми викладання і навчання	Методи оцінювання	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
<b>1. Знання</b>				
1.1	Знати місце фізики полімерів в системі фізичних та хімічних наук	лекція, самостійне опрацювання рекомендованої літератури	контрольна робота; усна доповідь з презентацією; перевірка завдань самостійної роботи, оцінювання реферату, підсумковий контроль.	10
1.2	Знати та розуміти основні уявлення та роль флуктуаційної кінетики фізико-хімічних процесів в фізиці полімерних систем.	лекція, самостійне опрацювання рекомендованої літератури	контрольна робота; усна доповідь з презентацією; перевірка завдань самостійної роботи, оцінювання реферату, підсумковий контроль.	10
1.3	Знати базові теоретичні уявлення про рівноважні фазові та незворотні кінетичні перетворення в системах різного елементного складу; загальну характеристику рівноважних Р,Т-діаграм для фаз різного елементного складу на основі сполук легких елементів; термодинамічні та кінетичні границі областей переважного існування полімерної форми речовини, метастабільних молекулярних форм та щільних «атомарних» фаз для сполук легких елементів; причини поширеності метастабільних низькомолекулярних форм серед сполук легких елементів.	лекція, самостійне опрацювання рекомендованої літератури	контрольна робота; усна доповідь з презентацією; перевірка завдань самостійної роботи, оцінювання реферату, підсумковий контроль	15

1.4	Знати спроможність утворення полімерних форм сполуками елементів 2-го періоду періодичної таблиці та умови їх існування; схильність до переходу в полімерну форму низькомолекулярних сполук легких елементів при високих тисках та основні уявлення про процеси бароіндукованої полімеризації; характерні полімерні та кополімерні фази високого тиску сполук елементів другого періоду періодичної таблиці, їх фізичні і хімічні властивості та області можливих практичних застосувань.	самостійне опрацювання рекомендованої літератури	перевірка завдань самостійної роботи.	15
<b>2. Уміння</b>				
2.1	Знайти у першоджерелах інформацію про енергетичні характеристики утворення певних полімерних фаз і їх фізичні та хімічні властивості;	самостійне опрацювання рекомендованої літератури	перевірка завдань самостійної роботи.	15
2.2	Визначати можливість утворення конкретного типу полімерної фази певного елементного складу в заданих P,T-умовах та області її термодинамічної і кінетичної стабільності.	самостійне опрацювання рекомендованої літератури	перевірка завдань самостійної роботи.	15
<b>3. Комунікація</b>				
3.1	Здатність використовувати сучасні інформаційно-комунікаційні технології при спілкуванні, а також для збору, аналізу, обробки, інтерпретації інформації у галузі фізики полімерів	лекція, самостійне опрацювання рекомендованої літератури	контрольна робота; усна доповідь з презентацією; перевірка завдань самостійної роботи, оцінювання реферату, підсумковий контроль	10
3.2	Здатність виконувати передбачені навчальною програмою завдання та операції у співпраці з іншими виконавцями	самостійне опрацювання рекомендованої літератури	перевірка завдань самостійної роботи.	10

## 6. Співвідношення результатів навчання дисципліни (РНД) із програмними результатами навчання (ПРН):

ПРН	РНД (код)							
	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	3.1	3.2
Р1. Знати та розуміти наукові концепції та сучасні теорії хімії, а також фундаментальні основи суміжних наук.	+			+				
Р2. Глибоко розуміти основні факти, концепції, принципи і теорії, що стосуються предметної області, опанованої у ході магістерської програми, використовувати їх для розв'язання складних задач і проблем, а також проведення досліджень з відповідного напрямку хімії.	+			+				
Р9. Збирати, оцінювати та аналізувати дані, необхідні для розв'язання складних задач хімії, використовуючи відповідні методи та інструменти роботи з даними.	+	+	+	+				
Р13. Аналізувати наукові проблеми та пропонувати їх вирішення на абстрактному рівні шляхом декомпозиції їх на складові, які можна дослідити окремо.	+	+	+	+				
Р14. Інтерпретувати експериментально отримані дані та співвідносити їх з відповідними теоріями в хімії.	+	+	+	+	+	+	+	+

## 7. Схема формування оцінки

### Семестрове оцінювання:

Максимальна/мінімальна кількість балів, які можуть бути отримані здобувачем освіти: **60 балів /36 балів**, а саме:

1. Контрольна робота №1: РН 1.1- 1.3, РН 3.1– **15/9 балів**.
2. Контрольна робота №2: РН 1.1-1.3, РН 3.1 – **15/9 балів**.
3. Усна доповідь з презентацією РН 1.1- 1.3, РН 3.1– **10/6 балів**.
4. Реферат: РН 1.1- 1.3, РН 3.1– **10/6 балів**
5. Завдання самостійної роботи: РН 1.1-1.4, РН 2.1-2.2, РН 3.1-3.2- **10/6 балів**

### Підсумкове оцінювання (у формі іспиту):

Максимальна/мінімальна кількість балів, які можуть бути отримані здобувачем освіти: **40 балів /24 бали**.

Результати навчання які будуть оцінюватись: РН 1.1-1.4, РН 2.1-2.2, РН 3.1-3.2

Форма проведення: письмова робота.

Види завдань: чотири теоретичних питання 40 балів.

Для отримання загальної позитивної оцінки з дисципліни оцінка за іспит не може бути меншою 24 балів.

**Здобувач освіти допускається до іспиту, якщо протягом семестру він:**  
набрав не менше, ніж **36 балів** та виконав і вчасно здав всі практичні роботи.

### 7.2. Організація оцінювання:

Терміни проведення оцінювання:

Контрольна робота №1: не раніше **6 тижня** семестру;

Контрольна робота №2: не раніше **9 тижня** семестру;

Усна доповідь з презентацією та написання реферату виконується протягом семестру, але не пізніше, ніж за **2 тижні** до закінчення семестру;

Персональні завдання для написання реферату та усної доповіді з презентацією студенти отримують не пізніше, як за **8 тижнів** до закінчення семестру;

Оцінювання самостійної роботи: впродовж семестру.

### 7.3. Шкала відповідності оцінок

Оцінка (за національною шкалою) / National grade	Рівень досягнень / Marks
<b>Відмінно</b> / Excellent	90-100
<b>Добре</b> / Good	75-89
<b>Задовільно</b> / Satisfactory	60-74
<b>Незадовільно</b> / Fail	0-59

## 8. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

### ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ ТА САМОСТІЙНИХ РОБІТ

№	теми	Кількість годин	
		лекції	самостійні роботи
Флуктуаційна кінетика фізичних та хімічних процесів в полімерних системах.			
1	<b>Лекція 1</b> Елементи флуктуаційної кінетики фізико-хімічних процесів. Прояв дискретності речовини на макроскопічному рівні. Оцінка періоду індукції вибухової розгалуженої ланцюгової хімічної реакції та її аналогія з задачею про кінетику кристалізації переохолодженої рідини.	2	6
2	<b>Лекція 2</b> Критичні явища і роль флуктуацій в автокаталітичних процесах утворення та деструкції полімерів.	2	4
3	<b>Лекція 3</b> Критичні явища при окисненні полімерів та вплив флуктуаційного фактору на кінетичний характер їх протікання.	2	4
4	<b>Лекція 4</b> Застосування флуктуаційного підходу при описі процесів кристалізації та споріднених процесів в макромолекулярних системах.	2	4

Полімерна форма існування речовини – стабільні і метастабільні полімерні фази сполук легких елементів.			
5	<b>Лекція 5</b> Стабільні і метастабільні фази в хімії та фізиці. Органічні речовини та молекулярні сполуки легких елементів – царина метастабільних фаз.	2	4
6	<b>Лекція 6</b> Фазові та незворотні кінетичні перетворення в системах на основі сполук легких елементів. Рівноважна P,T-діаграма для фаз різного елементного складу елементів перших двох періодів таблиці Менделєєва.	2	4
7	<b>Лекція 7</b> P,T-Область переважного існування полімерної форми речовини. Область метастабільних молекулярних форм та область існування щільних «атомарних» фаз сполук легких елементів.	2	4
8	<b>Лекція 8</b> Схильність до переходу в полімерну форму більшості низькомолекулярних сполук легких елементів при високих тисках. Процеси бароіндукованої полімеризації молекулярних сполук легких елементів. Процеси полімеризації, зокрема фотоіндукованої, ненасичених вуглеводнів та деяких інших класів органічних сполук в умовах високих тисків. Деякі загальні термодинамічні та кінетичні аспекти утворення полімерної форми речовини.	2	4
9	<b>Лекція 9</b> Причини поширеності метастабільних низькомолекулярних форм серед сполук легких елементів.	2	3
Полімерні фази високого тиску сполук «легких» елементів.			
10	<b>Лекція 10</b> Спроможність утворення різних полімерних форм сполуками елементів 2-го періоду періодичної таблиці та аналіз умов їх існування. Полімерні форми сполук елементів вищих періодів – полімерні форми сірки та фосфору.	2	4
11	<b>Лекція 11</b> Полімерні фази високого тиску CO <sub>2</sub> . Їх утворення, особливості структури та фізичних і фізико-хімічних властивостей.	2	3
12	<b>Лекція 12</b> Полімерні фази високого тиску CO.	2	4
13	<b>Лекція 13</b> Кополімерні фази CO-N <sub>2</sub>	2	4
14	<b>Лекція 14</b> Полімерні форми азоту.	2	4



15	<b>Лекція 15</b> Порівняльний аналіз перспектив отримання та термодинамічної і кінетичної стабільності полімерних фаз різного елементного складу. Можливі їх застосування. Проблема стабілізації високоенергетичних полімерних форм високого тиску легких елементів за звичайних (близьких до нормальних) умов.	2	4
	<b>Усього</b>	<b>30</b>	<b>60</b>

Загальний обсяг **90 год.<sup>1</sup>**, в тому числі:

Лекцій – **30 год.**

Самостійні роботи – **60 год.**

---

<sup>1</sup> Загальна кількість годин, відведених на дану дисципліну згідно навчального плану.

## **9. Рекомендовані джерела**

### **Основні:**

1. Katja Lindenberg, Gleb Oshanin and Masanori Tachiya - Chemical kinetics beyond the textbook: fluctuations, many-particle effects and anomalous dynamics // *Journal of Physics: Condensed Matter*.-2006.-19.-N6.-060301(Preface).
2. Mikhailov A.S. Selected topics in fluctuational kinetics of reactions // *Physics Reports*.-1989. - Volume 184. - Issues 5-6. - P.-307-374. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(89\)90148-8](https://doi.org/10.1016/0370-1573(89)90148-8).
3. Gómez-Urbe C.A., Verghese G.C. Mass fluctuation kinetics: Capturing stochastic effects in systems of chemical reactions through coupled mean-variance computations // *The Journal of Chemical Physics*.- 126, 024109, 2007.- PP. 024109-1 - 024109-12. <https://doi.org/10.1063/1.2408422>
4. (Comprehensive Chemical Kinetics. Volume 34) Kotomin E., Kuzovkov V. Modern Aspects of Diffusion-Controlled Reactions. Cooperative Phenomena in Bimolecular Processes – Elsevier Science, 1996, P. 636.
5. Mandelkern L. Crystallization of Polymers. Volume 1. Equilibrium. Second edition. Cambridge, Cambridge University Press, 2002, 448p.; Mandelkern L. Crystallization of Polymers. Volume 2. Kinetics and mechanisms, Second edition. Cambridge, Cambridge University Press, 2004, 478p.
6. Hongge Tan, Bing Miao, and Dadong Yan - Conformation-assisted fluctuation of density and kinetics of nucleation in polymer melts // *The Journal of Chemical Physics*.- 2003.-119.- N5.-PP. 2886-2891; doi: 10.1063/1.1590309.
7. Smith P.E., Matteoli E., O'Connell J.P. Fluctuation Theory of Solutions: Applications in Chemistry, Chemical Engineering, and Biophysics. - Boca Raton, CRC Press, 2013, 400 p.
8. Oshanin G.S. and Burlatsky S.F. Fluctuation-induced kinetics of reversible coagulation // *J. Phys. A: Math. Gen.*-1989.-22.-L973-L976.-Letter to the editor.
9. Gerald Scott (eds.) - Mechanisms of Polymer Degradation and Stabilisation – Elsevier, 1991, P. 329. ISBN 1-85166-505-6.
10. Brazhkin V.V. Metastable phases and 'metastable' phase diagrams // *Journal of physics: Condensed Matter*. - 2006. - Vol. 18. - N 42. - P. - 9643-9650. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/18/42/010>
11. Brazhkin V.V. Interparticle interaction in condensed media: some elements are "more equal than others" // *Physics Uspekhi*.- 2009.-52 (4).-PP. 369-376.
12. Brazhkin V.V., Voloshin R.N., Lyapin A.G., Popova S.V. Phase equilibria in partially open systems under pressure: the decomposition of stoichiometric GeO<sub>2</sub> oxide // *Physics Uspekhi*.- 2003.-46 (12).-PP. 1283-1289.
13. Brazhkin V.V., Lyapin A.G. Metastable high-pressure phases of low-Z compounds: creation of a new chemistry or a prompt for old principles? // *Nature Mater.*- 2004.-3(issue 8).-PP.497-500.

### **Додаткові:**

1. Katja Lindenberg, Ralf Metzler, Gleb Oshanin (Eds.) - Chemical Kinetics. Beyond the Textbook - World Scientific Publishing Europe Ltd, 2019, P. 617: Chapter 1:

- Fluctuations and Correlations in Chemical Reaction Kinetics and Population Dynamics (Uwe C. Täuber).- pp. 1-34. [https://doi.org/10.1142/9781786347015\\_0001](https://doi.org/10.1142/9781786347015_0001)
2. Davydov E.Ya. Kinetic Peculiarities of Solid Phase Reactions, 1st edition – Wiley, 1998, P. 160. ISBN-13: 978-0471983743, ISBN-10: 9780471983743.
  3. Lifshic E.M., Pitaevskii L.P., Landau L.D. Course of theoretical physics, Third Edition, Volume 10. Physical Kinetics, Elsevier Science; Butterworth-Heinemann, 2012, P. 468. ISBN: 978-0750626354, 0750626356.
  4. Pitaevskii L.P., Lifshic E.M., Landau L.D. Course of theoretical physics, Third Edition, Volume 5, Part 1. Statistical physics, Elsevier Science; Butterworth-Heinemann, 2001, P. 564. ISBN: 0750633727, 9780080570464, 9780750633727.
  5. Denisov E.T., Sarkisov O.M., Likhtenshtein G.I. Chemical kinetics. Fundamentals and New Developments, Elsevier, Amsterdam, 2003, P. 547. ISBN: 0444509380,9780444509383.
  6. Journal of Physics: Condensed Matter.-2007.-19.-N6.- 060301(Preface)+Papers 065101-065150.
  7. Yuichi Togashi and Kunihiko Kaneko - Switching dynamics in reaction networks induced by molecular discreteness // Journal of Physics: Condensed Matter.-2007.-19.-N6.-065150.
  8. Ji-Hyun Kim, Dann Huh, Jinuk Lee, Sangyoub Lee, Jaeyoung Sung, Kazuhiko Seki and M. Tachiya - Subdiffusion-assisted reaction kinetics in disordered media // Journal of Physics: Condensed Matter.-2007.-19.-N6.-065116.
  9. Tiwari Bhupendra, Kishore S., Marina Ninoslav, Bellucci Stefano - Fluctuation Theory in Chemical Kinetics // *Condens. Matter.*-2018.-3(issue 4).-49 (doi:10.3390/condmat3040049).
  10. Fortov V.E. Lectures on the Physics of Extreme States of Matter - IOP Publishing, 2019, P. 235. ISBN: 978-0-7503-2126-6.
  11. Fortov V.E. Extreme states of matter on Earth and in the Cosmos - Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, P. XII, 332. eBook ISBN 978-3-642-16464-4.
  12. Lucia Ciabini, Mario Santoro, Roberto Bini, and Vincenzo Schettino - High pressure reactivity of solid benzene probed by infrared spectroscopy // Journal of Chemical Physics.-2002.-116.-N7.-PP.2928-2935.
  13. Lucia Ciabini, Mario Santoro, Roberto Bini and Vincenzo Schettino - High Pressure Photoinduced Ring Opening of Benzene // Physical Review Letters.-2002.-88.-issue 8.-PP.085505-1 - 085505-4.
  14. Evans W.J., Lipp M.J., Yoo C.-S., Cynn H., Herberg J.L., and Maxwell R.S. Pressure-Induced Polymerization of Carbon Monoxide: Disproportionation and Synthesis of an Energetic Lactonic Polymer // Chem. Mater.-2006.-18.-PP.2520–2531.
  15. Young-Jay Ryu, Minseob Kim, Jinhyuk Lim, Ranga Dias, Dennis Klug, and Choong-Shik Yoo - Dense Carbon Monoxide to 160 GPa: Stepwise Polymerization to Two-Dimensional Layered Solid // The Journal of Physical Chemistry C.-2016.-120.-48.-PP.27548-27554.
  16. Lipp M.J., Evans W.J., Baer B.J., Yoo Choong-Shik - High-energy-density extended CO solid // Nature Materials.-2005.-4.-issue 3.-PP.211-215.
  17. Bernard S., Chiarotti G., Scandolo S., Tosatti E. Decomposition and Polymerization of Solid Carbon Monoxide under Pressure // Physical Review Letters.-1998.-81.-issue 10.-PP.2092-2095.

18. Choong-Shik Yoo - Barochemistry to Multifunctional High Energy Density Solid: Extended Phases of  $N_2$ , CO, and  $N_2 + CO$  at High Pressures // *MRS Advances*.-2017.-2.-issue 48.-PP.2581-2586.
19. Choong-Shik Yoo, Minseob Kim, Jinhyuk Lim, Young-Jay Ryu, and Batyrev I.G. Copolymerization of CO and  $N_2$  to Extended  $CON_2$  Framework Solid at High Pressures // *The Journal of Physical Chemistry C*.-2018.-122.-24.-PP.13054-13060.
20. Yoo C.S., Cynn H., Gygi F., Galli G., Iota V., Nicol M., Carlson S., Hausermann D., and Mailhiot C. Crystal Structure of Carbon Dioxide at High Pressure: “Superhard” Polymeric Carbon Dioxide // *Phys. Rev. Lett.*-1999.-83.-PP.5527–5530.
21. Valentin Iota, Choong-Shik Yoo, Jae-Hyun Klepeis, Zsolt Jenei, William Evans and Hyunchoe Cynn - Six-fold coordinated carbon dioxide VI // *Nature Materials*.- 2007.-6.-PP.34–38.
22. Park J.-H., Yoo C.S., Iota V., Cynn H., Nicol M.F., and Le Bihan T. Crystal structure of bent carbon dioxide phase IV // *Physical Review B*.-2003.-68.-issue 1.-PP. 014107-1 - 014107-9.
23. Oliver Tschauner, Ho-kwang Mao, and Russell J. Hemley - New Transformations of  $CO_2$  at High Pressures and Temperatures // *Physical Review Letters*.-2001.-87(N7).-PP.075701-1 - 075701-4.
24. Choong-Shik Yoo - Physical and chemical transformations of highly compressed carbon dioxide at bond energies // *Phys. Chem. Chem. Phys.*-2013.-15.-issue 21.-PP. 7949-7966.
25. Minseob Kim, Young-Jay Ryu, Jinhyuk Lim and Choong-Shik Yoo - Transformation of Molecular  $CO_2$ -III in Low-Density Carbon to Extended  $CO_2$ -V in Porous Diamond at High Pressures and Temperatures // *J. Phys.: Cond. Matt.*-2018.-30.-314002.
26. Lipp M.J., Park Klepeis J., Baer B.J., Cynn H., Evans W.J., Iota V., and Yoo C.-S. Transformation of molecular nitrogen to nonmolecular phases at megabar pressures by direct laser heating // *Physical Review B*.-2007.- 76.-014113.-PP.014113-1 - 014113-5.
27. Choong-Shik Yoo, Dane Tomasino, Jesse Smith, and Minseob Kim - High energy density nitrogen-rich extended solids / *AIP Conference Proceedings*.- 2017.-1793.-130007.-PP.130007-1 - 130007-4;
28. Eremets M.I., Gavriluk A.G., Serebryanaya N.R., Trojan I.A., Dzivenko D.A., Boehler R., Mao H.K., and Hemley R.J. Structural transformation of molecular nitrogen to a single-bonded atomic state at high pressures // *The Journal of Chemical Physics*.-2004.-121.-No.22.-PP.11296-11300; doi: 10.1063/1.1814074.
29. Dane Tomasino, Minseob Kim, Jesse Smith, and Choong-Shik Yoo - Pressure-Induced Symmetry-Lowering Transition in Dense Nitrogen to Layered Polymeric Nitrogen (LP-N) with Colossal Raman Intensity // *Physical Review Letters*.-2014.-113.-Issue 20.-PP.205502-1 - 205502-5.
30. Eremets M.I., Gavriluk A.G., Trojan I.A., Dzivenko D.A., Boehler R. Single-bonded cubic form of nitrogen // *Nature Materials*.-2004,-3.-issue 8.-PP.558-563.
31. Bondarchuk S.V., Minaev B.F. Super high-energy density single-bonded trigonal nitrogen allotrope - a chemical twin of the cubic gauche form of nitrogen // *Physical Chemistry Chemical Physics*.-2017.-19.-issue 9.-PP.6698–6706.
32. Muratahan Aykol, Doak J.W., Wolverton C. Phosphorus allotropes: Stability of black versus red phosphorus re-examined by means of the van der Waals inclusive density functional method // *Physical Review B*.-2017.-Vol. 95, 214115. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.214115>.

**33.** Aldave S.H, Maruthi N. Yogeesh, Weinan Zhu, Joonseok Kim, Sushant S. Sonde, Avinash P. Nayak, Deji Akinwande - Characterization and sonochemical synthesis of black phosphorus from red phosphorus // 2D Mater. – 2016. – Vol. 3. – N1. - 014007. doi:10.1088/2053-1583/3/1/014007.