

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

Хімічний факультет
Кафедра хімії високомолекулярних сполук

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник декана

з навчальної роботи

 Наталія УСЕНКО

« 30 » 03 2021 року

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
Фізика полімерів

для здобувачів освіти

| | |
|------------------|----------------------------|
| галузі знань | 10 Природничі науки |
| спеціальність | 102 Хімія |
| освітній рівень | магістр |
| освітня програма | Хімія |
| вид дисципліни | вибіркова |

| | |
|--|-------------------|
| Форма навчання | денна |
| Навчальний рік | 2021/2022 |
| Семестр | 3 |
| Кількість кредитів ECTS | 3,0 |
| Мова викладання, навчання та оцінювання | українська |
| Форма заключного контролю | іспит |

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

Пролонговано: на 2022/2023 н. р.  () « » 20__ р.
на 20__/20__ н. р. () « » 20__ р.

КИЇВ – 2021

Розробник: Студзинський Сергій Леонідович, доцент, д.х.н. _____

ЗАТВЕРДЖЕНО

Завідувач кафедри хімії високомолекулярних сполук

І. Савченко Ірина САВЧЕНКО

Протокол № 12 від «1» березня 2021 р.

Схвалено науково-методичною комісією хімічного факультету

Протокол № 6 від «11» березня 2021 року

Голова науково-методичної комісії О. Ройк Олександр РОЇК

« 11 » Березня 2021 року

1. Мета дисципліни – вивчення теоретичних основ 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, 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 автокаталітичних процесах утворення та деструкції, а також окиснення полімерів; флуктуаційний підхід при 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, СО₂ та азоту, кополімерні фази СО-N₂ – 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. Навчальна дисципліна спрямована на досягнення наступних загальних та спеціальних (фахових) компетентностей: ЗК1, ЗК3, ЗК7, ЗК9, ЗК14 та ФК2, ФК4, ФК8.

5. Результати навчання за дисципліною:

| Код | Результат навчання | Форми викладання і навчання | Методи оцінювання | Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни |
|------------------|---|--|---|--|
| 1. Знання | | | | |
| 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 P,T-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, підсумковий контроль. | 15 |
| 2. Уміння | | | | |
| 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 |
| 3. Комунікація | | | | |
| 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 | 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. | + | + | + | + | | | | |
| | Р10. Планувати, організовувати та здійснювати експериментальні дослідження з хімії з використанням сучасного обладнання, грамотно обробляти їх результати та робити обґрунтовані висновки. | | + | + | | | | | |
| | 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 |
|--|--------------------------|
| Відмінно / Excellent | 90-100 |
| Добре / Good | 75-89 |
| Задовільно / Satisfactory | 60-74 |
| Незадовільно / 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 | Лекція 1 Елементи флуктуаційної кінетики фізико-хімічних процесів. | 2 | 6 |
| 2 | Лекція 2 Критичні явища і необхідність врахування ролі флуктуацій в автокаталітичних процесах утворення та деструкції полімерів. | 2 | 4 |
| 3 | Лекція 3 Критичні явища при окисненні полімерів та вплив флуктуаційного фактору на кінетичний характер їх протікання. | 2 | 4 |
| 4 | Лекція 4 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 | Лекція 5 Стабільні і метастабільні фази в хімії та фізиці. Органічні речовини та молекулярні сполуки легких елементів – царина метастабільних фаз. | 2 | 4 |
| 6 | Лекція 6 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 | Лекція 7 P,T-Область переважного існування полімерної форми речовини. Область метастабільних молекулярних форм та область існування щільних «атомарних» фаз сполук легких елементів. | 2 | 4 |
| 8 | Лекція 8 Схильність до переходу в полімерну форму більшості низькомолекулярних сполук легких елементів при високих тисках. Процеси бароіндукованої полімеризації молекулярних сполук легких елементів. | 2 | 4 |
| 9 | Лекція 9 Причини поширеності метастабільних низькомолекулярних форм серед сполук легких елементів. | 2 | 3 |
| Полімерні фази високого тиску сполук «легких» елементів. | | | |
| 10 | Лекція 10 Спроможність утворення різних полімерних форм сполуками елементів 2-го періоду періодичної таблиці та аналіз умов їх існування. | 2 | 4 |

| | | | |
|----|---|-----------|-----------|
| 11 | Лекція 11 Полімерні фази високого тиску CO ₂ . Їх утворення, особливості структури та фізичних і фізико-хімічних властивостей. | 2 | 3 |
| 12 | Лекція 12 Полімерні фази високого тиску CO. | 2 | 4 |
| 13 | Лекція 13 Кополімерні фази CO-N ₂ | 2 | 4 |
| 14 | Лекція 14 Полімерні форми азоту. | 2 | 4 |
| 15 | Лекція 15 Порівняльний аналіз перспектив отримання та термодинамічної і кінетичної стабільності полімерних фаз різного елементного складу. Можливі їх застосування. | 2 | 4 |
| | Усього | 30 | 60 |

Загальний обсяг **90 год.¹**, в тому числі:

Лекції – **30 год.**

Самостійні роботи – **60 год.**

¹ 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, 400p.
8. Gerald Scott (eds.) - Mechanisms of Polymer Degradation and Stabilisation – Elsevier, 1991, P. 329. ISBN 1-85166-505-6.
9. 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>
10. Brazhkin V.V. Interparticle interaction in condensed media: some elements are "more equal than others" // *Physics Uspekhi*.- 2009.-52 (4).-PP. 369-376.
11. Brazhkin V.V., Voloshin R.N., Lyapin A.G., Popova S.V. Phase equilibria in partially open systems under pressure: the decomposition of stoichiometric GeO₂ oxide // *Physics Uspekhi*.- 2003.-46 (12).-PP. 1283-1289.
12. 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
2. Davydov E.Ya. Kinetic Peculiarities of Solid Phase Reactions, 1st edition – Wiley,1998, P. 160. ISBN-13: 978-0471983743, ISBN-10: 9780471983743.

3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Denisov E.T., Sarkisov O.M., Likhtenshtein G.I. Chemical kinetics. Fundamentals and New Developments, Elsevier, Amsterdam, 2003, P. 547. ISBN: 0444509380,9780444509383.
7. Journal of Physics: Condensed Matter.-2007.-19.-N6.- 060301(Preface)+Papers 065101-065150.
8. Yuichi Togashi and Kunihiko Kaneko - Switching dynamics in reaction networks induced by molecular discreteness // *Journal of Physics: Condensed Matter.*-2007.-19.-N6.-065150.
9. 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.
10. Tiwari Bhupendra, Kishore S., Marina Ninoslav, Bellucci Stefano - Fluctuation Theory in Chemical Kinetics // *Condens. Matter.*-2018.-3(issue 4).-49 (doi:10.3390/condmat3040049).
11. Fortov V.E. Lectures on the Physics of Extreme States of Matter - IOP Publishing, 2019, P. 235. ISBN: 978-0-7503-2126-6.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Choong-Shik Yoo - Barochemistry to Multifunctional High Energy Density Solid: Extended Phases of N₂, CO, and N₂ + CO at High Pressures // *MRS Advances.*-2017.-2.-issue 48.-PP.2581-2586.

20. Choong-Shik Yoo, Minseob Kim, Jinhyuk Lim, Young-Jay Ryu, and Batyrev I.G. Copolymerization of CO and N₂ to Extended CON₂ Framework Solid at High Pressures // *The Journal of Physical Chemistry C*.-2018.-122.-24.-PP.13054-13060.
21. Yoo C.S., Cynn H., Gygi F., Galli G., Iota V., Nicol M., Carlson S., Hausermann D., and Mailhot C. Crystal Structure of Carbon Dioxide at High Pressure: “Superhard” Polymeric Carbon Dioxide // *Phys. Rev. Lett.*-1999.-83.-PP.5527–5530.
22. 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.
23. 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.
24. Oliver Tschauner, Ho-kwang Mao, and Russell J. Hemley - New Transformations of CO₂ at High Pressures and Temperatures // *Physical Review Letters*.-2001.-87(N7).-PP.075701-1 - 075701-4.
25. 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.
26. Minseob Kim, Young-Jay Ryu, Jinhyuk Lim and Choong-Shik Yoo - Transformation of Molecular CO₂-III in Low-Density Carbon to Extended CO₂-V in Porous Diamond at High Pressures and Temperatures // *J. Phys.: Cond. Matt.*-2018.-30.-314002.
27. 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.
28. 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;
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.