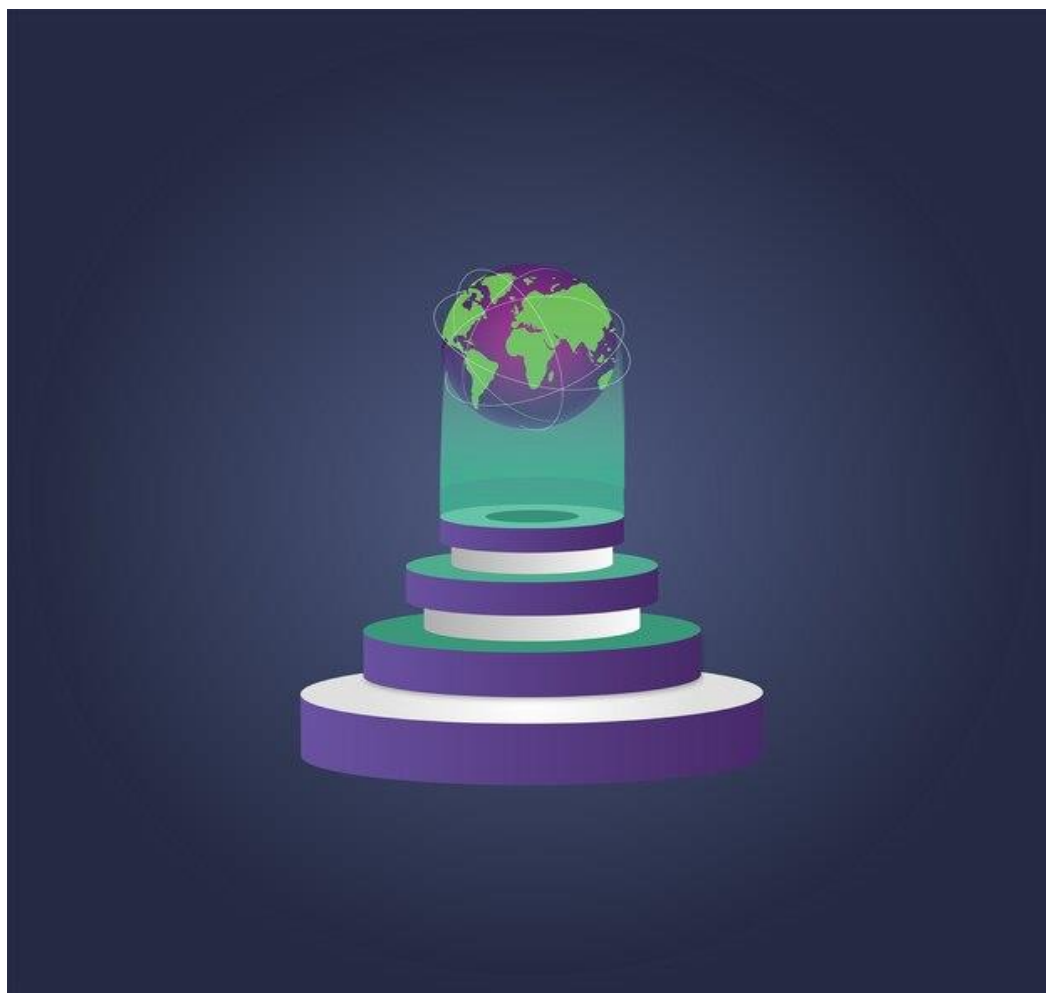


**О.І. Герасимов, М.М. Худинцев, О.А.Клименков**

**НОВІТНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ  
В ЗАДАЧАХ ЗАХИСТУ СИСТЕМ  
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**



**Монографія**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**О.І. Герасимов**

**М.М. Худинцев**

**О.А. Клименков**

**НОВІТНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ  
В ЗАДАЧАХ ЗАХИСТУ СИСТЕМ  
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Монографія

Одеса  
Одеський державний екологічний університет  
2021

УДК 556.166  
Г32

**Герасимов О.І., Худинцев М.М., Клименков О.А.**

Г32 Новітні матеріали і технології в задачах захисту систем навколишнього середовища: монографія. Одеса : Одеський державний екологічний університет, 2021. 78 с.  
ISBN 978-966-186-192-2

Монографія присвячена висвітленню новітніх алгоритмів до технологічного убезпечення систем та елементів довкілля від шкідливого впливу зовнішніх факторів (у т.ч. віброприскорювань та електромагнітних полів). Запропоновані теоретичні моделі відібраних технологічних процесів радіаційного захисту на основі мікро-механічних модулів, маніпуляційних технологій захисних конструкцій, тонкої пилоочистки в неоднорідному електричному полі шляхом стимулювання та гібридизації левітаційного та електрофоретичного ефектів, застосування екологічних методів захисту штучних інформаційних систем).

Матеріали, які увійшли до монографії, можуть бути використані в наукових дослідженнях, які проводяться у напрямку технологій захисту навколишнього середовища та штучних інформаційних систем, а також для розбудови новітніх напрямів (наприклад, екологічного матеріалознавства) та у навчальному процесі в вищих навчальних закладах.

**Gerasymov O.I., Khudyntsev M.M., Klymenkov O.A.**

Novel materials and technologies for environmental safety: monograph. Odesa: Odessa State Environment University, 2021. 78 p.

The monograph is devoted to the coverage of the latest algorithms for technological protection of systems and elements of the environment from the harmful effects of external factors (including vibration accelerations and electromagnetic fields). Theoretical models of selected technological processes of radiation protection on the basis of micro-mechanical modules, manipulation technologies of protective structures, fine dust cleaning in inhomogeneous electric field by stimulation and hybridization of levitation and electrophoretic effects, application of ecological methods of protection of artificial information systems are offered).

The materials included in the monograph can be used in research conducted in the field of environmental technologies and artificial information systems, as well as for the development of new areas (eg, environmental materials science) and in the educational process in higher education.

**УДК 556.166**

**Рецензенти:**

д.ф.-м.н., проф. **Ковальчук В.В.**; д.ф.-м.н., проф. **Калінчак В.В.**;  
директор підприємства **Жовтобрюх Б.В.**

*Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Одеського державного екологічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №6 від 30.06.2021 р.)*

ISBN 978-966-186-192-2

© Герасимов О.І., Худинцев М.М., Клименков О.А. 2021  
© Одеський державний екологічний університет, 2022

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
Література.....	6
РОЗДІЛ 1 ЗАХІСНІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ОСНОВІ МАНІПУЛЮЄМИХ БІ-ДИСПЕРСНИХ ГРАНУЛОВАНИХ СУМІШЕЙ.....	8
Література.....	19
РОЗДІЛ 2 КВАЗІГІДРОСТАТИКА ГРАНУЛЬОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ: МОДЕЛІ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЯХ МАНІПУЛЯЦІЙ МІКРО-МЕХАНІЧНИМИ МАТЕРІАЛАМИ .....	23
2.1 Загальні відомості .....	23
2.2 Гідростатичний тиск в гранульованих системах .....	24
2.3 Впорядкування гранульованих матеріалів .....	27
2.4 Ентропійний аналіз ґраткового газу у гравітаційному полі .....	28
2.5 Гідростатичний тиск в системах з Фермі-профілем густини .....	30
2.6 Висновки .....	31
Література.....	31
РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЇ ДЕЗАКТИВАЦІЇ РАДІАЦІЙНИХ ЗАБРУДНЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ НОВІТНІХ МАТЕРІАЛІВ: СОРБЦІЯ У ГРАФЕНОВИХ МАТРИЦЯХ.....	32
Література.....	40
РОЗДІЛ 4 ТЕХНОЛОГІЇ ТОНКОЇ ПИЛООЧИСТКИ ЗА ДОПОМОГОЮ МАНІПУЛЮЄМОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	41
4.1 Загальні відомості.....	43
4.2 Генерація процесу в лабораторних умовах.....	44
4.3 Гібридна левітаційно-електрофоретична модель.....	47
4.4 Висновки.....	51
Література.....	51
РОЗДІЛ 5 ШТУЧНІ СИСТЕМИ, ЯК ОБ'ЄКТ ДОВКІЛЛЯ ТА ЇХ ЗАХИСТ.....	53
5.1 Загальні відомості.....	53
5.2 Штучні системи, як екосистеми.....	54
5.3 Штучні інформаційні системи.....	59
5.4 Кіберпростір .....	61
5.5 Захист та захищеність штучних систем.....	67
5.6 Інформаційні технології захисту навколишнього середовища.....	69
5.7 Введення в екологію кібербезпеки.....	73
Література.....	76

## ВСТУП

Сучасні технології захисту навколишнього середовища оперують апробованими інженерними заходами в основі яких лежать як матеріали так і алгоритми маніпуляціями ними. Різноманітність джерел і шляхів забруднень навколишнього середовища, їх багато-масштабний, різноякісний характер є викликом людству з боку природи, яка перебуває під інтенсивним зростаючим впливом антропогенного походження. Розвиток сучасних технологій, спрямованих на забезпечення побутових, соціальних та інших потреб людства супроводжується зростаючим навантаженням на навколишнє середовище у вигляді зміни його збалансованих параметрів та спровокованих відгуків у вигляді створення умов загрозливих для здоров'я та навіть життя людини. Часто вплив таких технологій на навколишнє середовище і на найголовніший його елемент-людину досі взагалі виявляється нез'ясованим. Крім того, сучасні технології у більшості використовують штучні матеріали, які у свою чергу, як самі по собі, так і на етапі створення (синтезування) складають додаткове навантаження на довкілля. Зважаючи на актуальність створення умов безпечного існування та життєдіяльності людини, які складають парадигму сталого розвитку, пошук новітніх, бажано природних, екологічно безпечних матеріалів, так і новітніх підходів до параметризації сучасних технологічних процесів з метою убезпечення довкілля є актуальною задачею сучасності, для вирішення якої створюються міждисциплінарні кластери.

На цьому шляху ми зосередимося на двох головних темах. По-перше, це опис можливостей використання дискретних мікро-механічних конгломерацій (гранульованих) матеріалів [1-3] для вирішення окремих задач убезпечення довкілля від впливу іонізуючих випромінювань та механічних (пилових) забруднень за допомогою зовнішніх полів (віброприскорювань та електромагнітного), які припускають маніпулювання ними. І, по-друге, це опис новітніх телекомунікаційних технологій зв'язку з порівняльним аналізом їх технологічних привілей та можливих екологічних ризиків використання. Актуальність навіть попередніх оцінок в цій галузі важко переоцінити, зважаючи на стрімке просування сучасних інституцій до кібер-фізичного рівня управління.

Починаючи з початку 2000-х років на кафедрі загальної і теоретичної фізики Одеського державного екологічного університету (в минулому – Гідрометеорологічному інституті) проводяться системні дослідження з новітнього напрямку фізики конденсованого стану – фізики м'якої матерії [4,5]. Фокус досліджень зроблено на вивченні та теоретичному опису і чисельному моделюванні структури і властивостей великих конгломератів мікро-механічних систем і гранульованих матеріалів. Існує достатньо підстав для того, щоб вважати, що існування локальної структури з певними прикметами кристалічного впорядкування є, мабуть, загальною рисою, яка відрізняє конденсовану матерію. Така точка зору набула свого розвитку шляхом побудови напів-феноменологічного підходу до опису структури та її перетворень за допомогою параметра кристалічного впорядкування. На цьому шляху було побудовано теорію фазових перетворень, які характеризуються зміною орієнтаційної симетрії (при незмінній локальній структурі) [6,7].

Зосередження в останні роки фізичних досліджень на вивченні гранульованих матеріалів дозволило встановити, що в них можуть існувати квазі-рівноважні конкуруючі типи локальної структури, відповідні “фази” (різні за ступенем впакування та симетрією), а також переходи проміж ними [8].

Таким чином, набуває актуальності задача кількісного опису локальної структури та динаміки фазових перетворень у системах із розвиненою морфологією у мезо- і макро-масштабах (на відміну від систем, структура яких є розвиненою у мікро-масштабі (це рідини та гази, а також тверді тіла).

Треба зауважити, що виявлення локальної мікроструктури класичних агрегатних станів конденсованої речовини, тобто газів, рідин, твердих тіл, плазми виявляється досить складною задачею і оперує в значній мірі методами непрямого аналізу.

У цьому сенсі гранульовані матеріали (на відміну від інших агрегатних станів конденсованої речовини, структурованих у мікро-масштабах, таких, наприклад, як колоїдні кристали та розчини), де локальні структури контролюються із достатньою точністю (навіть, у ряді випадків, неозброєним оком), є ідеальною лабораторією для вивчення локальної структури та її перетворень.

Детальні дослідження властивостей мікро-механічних систем були покладені в основу розробок алгоритмів їх застосувань в технологіях,

спрямованих на захист елементів навколишнього середовища від шкідливих впливів з боку зовнішніх факторів .

Так на цьому шляху була запропонована та розроблена модель захисного екрану на основі мікро-механічних матеріалів з властивостями, що припускають зовнішнє маніпулювання, яка є теоретичною базою інноваційної технології захисту від шкідливих (зокрема іонізуючих) випромінювань. За допомогою запропонованої теорії були встановлені шляхи оптимізації технологічних етапів застосування гранульованих систем в задачах захисту, зокрема досягнення максимальної степені та швидкості впакування за рахунок мульти-дисперсності, вплив власної морфології гранул, зовнішніх параметрів (інтенсивності впливу, вологості та ін.)[9].

Дослідження ефектів впакування дозволило запропонувати інноваційні засоби вдосконалення технологій оптимізації радіаційного моніторингу в зонах спостереження, а також дезактивації забруднених (скажімо, радіаційними радіонуклідами чи важкими металами) систем і об'єктів шляхом адсорбції на полімер-стабілізованих топологічних фракціях (пінах) оксиду графену [10].

Застосування модельних підходів до опису складного за характером розподілу густини в анізотропних системах дозволило встановити аналоги гідростатичних законів і надати рекомендації щодо вдосконалення технічного обладнання, спрямованого на маніпуляції (скажімо, наповнення чи випорожнення ємностей зберігання) з гранульованими системами.

Виявлення впливу зовнішніх полів на структуру та динаміку гранульованих матеріалів дозволило запропонувати ефективно вдосконалення технології тонкої пило-очистки шляхом створення умов для прояви левітаційно-електрофоретичних ефектів (зменшення робочих напруг в умовах малої гравітації) [11,12].

## **Література**

- 1 . Jaeger H. M., Nagel S. R., Behringer R. P. Granular solids, liquids and gases. *Review of Modern Physics*. 1996. 68. Pp. 1259-1276.
2. Duran J. Sands, powders and grains. New York: Springer-Verlag, 2000. 214p.

3. Kadanoff L. Built upon sand: Theoretical ideas inspired by granular flows. *Review of Modern Physics*. 1999. 71(1). Pp. 435-450.
3. De Gennes P. G. Granular matter describes large collections of small grains, under conditions. *Review of Modern Physics*. 1999. 71. Pp. 374-387.
4. Герасимов О.І. Фізика гранульованих матеріалів. Одеса. ТЕС, 2015. 264 с.
5. Герасимов О.І., Співак А.Я. Окремі задачі фізики м'якої матерії . Одеса: Гельветика, 2020. 200 с.
6. Герасимов О.І. Структура та динаміка гранульованих матеріалів. *Доповіді Національної Академії Наук України*. 2010. 11. С.59-70.
7. Gerasymov O.I. Structure and dynamics of granular materials perturbed by external fields. *Ukrainian Journal of Physics*. 2010. 55(5). Pp.560-570.
8. Lumay J., Dorbolo S., Gerasymov O., Vandewalle N. Experimental study of a vertical column of grains submitted to a series of impulses . *European Physical Journal*. E.2013. 36(16). Pp.32-42.
9. Гранульовані матеріали в технологіях утилізації радіаційно шкідливих речовин / Герасимов О.І. та ін. *Проблеми та перспективи формування стратегії поводження з небезпечними відходами в Україні. Збірка матеріалів Національного форуму «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології», 22-23 листопада. Київ: Центр екологічної освіти та інформації, 2016. С. 40-42.*
10. Micro-mechanical (granular) mixtures for environmental safety technologies / Gerasymov O., Spivak A., Andrianova I. et al. *E3S Web of Conferences*. 2021. 234. Pp. 00075-00081. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123400075>
11. Universal micro-particle dynamics in non-uniform electric fields (from liquid to granular jet) / Gerasymov O.I. et al. *Abstract book. International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2018), dedicated to the 100th Anniversary of the National Academy of Sciences of Ukraine, 27-30 August. Kyiv. Pp. 514.*
12. Electrophoretic Effects for Environmental Safety Technologies: Evacuation of Micro-Particle Conglomerations from the Surfaces / Gerasymov O., Kuryatnikov V., Spivak A. et al. *E3S Web of Conferences*. 2021. 319. Pp. 01076-01083. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131901076>



## РОЗДІЛ 1 ЗАХІСНІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ОСНОВІ МАНІПУЛЮЄМИХ БІ-ДИСПЕРСНИХ ГРАНУЛОВАНИХ СУМІШЕЙ

Використання матеріалів, які знаходяться у гранульованих (мікро-механічних) станах є притаманним багатьом галузям виробництва та технологій. Наприклад, саме гранульовані матеріали складають переважний відсоток продукції, яка виробляється, споживається, чи використовується в окремих стадіях будівельної, легкої та харчової, гірничо-видобувної, хіміко-фармацевтичної, металургійної та деяких інших видах промисловості. Різноманітність та різноплановість застосувань таких матеріалів потребує вміння надійно параметризувати їхні макроскопічні властивості із урахуванням зовнішніх впливів, які виникають при маніпулюванні ними. Суттєву роль відіграє також зв'язок між макроскопічними властивостями гранульованого матеріалу (наприклад, впорядкуванням у вигляді кристалізації) та макроскопічними його параметрами, які суто визначають його здатність підтримувати штатні режими та забезпечувати необхідне маніпулювання ними (скажімо, затримувати, чи пропускати випромінювання різної природи, утримувати навантаження завдяки арочному ефекту, чи уникати агрегації при перемішуванні). Один із прикладів, в якому суттєво відбувається необхідність існування алгоритмів спрямованого маніпулювання макроскопічними параметрами за допомогою зовнішнього впливу є конструкції, в яких використовуються захисні модулі, що містять гранульовану речовину. Такі «гранульовані екрани» потенційно можуть достатньо надійно виконувати свої штатні функції і при цьому володіють очевидним, у порівнянні із монолітними системами перевагами. Так, зокрема, вони: уникають радіаційного охрупчування (embrittlement); прості в маніпулюванні; припускають ущільнення та розпушення; легкі у заміні та транспортуванні; економічні (у сенсі отримання та експлуатації).

Взагалі, задачі про суміші займають помітне місце в інженерних моделях прогнозування стану навколишнього середовища. Так, наприклад, робота [1] присвячена прогнозуванню переносу осадів та морфологічної динаміки річок (що є складним завданням у річках із гравійним руслом, де осадові суміші мають різний розмір частинок). Автори показують що проблема бінарної упаковки має важливе значення для коректного розрахунку пористості гравійного шару. На практиці, вона

може поєднуватися з розрахунками динамічних моделей транспортування осадів для прогнозування морфологічної динаміки в річках із гравійним руслом.

Теоретичні моделі гранульованих матеріалів, які дозволяли б описувати та прогнозувати їхні властивості розроблені досить ретельно для випадків конкретних умов їх створення та використання, зокрема розмірності, щільності впакування, характеру зовнішнього впливу. Нажаль, досі не існує універсальної теорії гранульованих матеріалів, яка враховує всі властивості що спостерігаються. Але в багатьох конкретних випадках вдається запропонувати більш менш адекватні моделі опису їх властивостей, що спостерігаються.

Матеріали, які застосовуються, наприклад, в атомних реакторах, відчувають вплив інтенсивних потоків іонізуючого випромінювання, головним чином, швидких нейтронів, що є продуктами поділу ядерного палива. Нейтрони, що взаємодіють з речовиною, передають свою енергію атомам за допомогою пружних зіткнень, а також служать джерелом утворення швидких заряджених частинок (електронів, протонів,  $\alpha$ -часток). Кінцевий підсумок цих процесів зводиться до руйнування впорядкованого розташування атомів у кристалічній ґратці металу й утворенню сторонніх атомів, наприклад, гелію й водню. Сукупність внесених опроміненням змін структури матеріалу прийнято називати радіаційним ушкодженням [2].

Характерним явищем, яке може супроводжувати радіаційне ушкодження матеріалу є зсув атомів з вузлів кристалічної решітки й утворення точкових дефектів – вакансій і між-вузлових атомів. Типовою рисою опромінення швидкими нейтронами є виникнення в опромінюваному матеріалі, каскадів атомних зіткнень, що призводять до утворення мікроскопічних областей структурного ушкодження з високою концентрацією точкових дефектів. Під впливом температури початковий стан ушкодження змінюється в результаті термічно активованої міграції точкових дефектів, що супроводжується їхньою взаємною рекомбінацією, анігіляцією на стоках, утворенням або дисоціацією скупчень.

В радіаційній галузі відомо, що крихке руйнування металів на практиці має місце за умов досягнення критерію міцності 500-600 МПа. З'ясовано [2], що опромінений метал містить концентратори напружень у вигляді крихких тріщин, причиною яких може виступати також і пластична деформація.

Зрозуміло, що такого роду процеси протікають за абсолютно іншими сценаріями у гранульованій речовині, будь-якого ступеню впакування. Така речовина, так би мовити, вже є повністю охрупченою. Тому використання мікро-механічних систем в якості захисних модулів, які знаходяться у безпосередньому контакті із радіаційним опроміненням виглядає привабливою інноваційною ідеєю [3]. Безумовно, що найбільш ефективним буде такий матеріал, в якому разом із розупорядкуванням вдається відносно простим способом досягнути і максимального ущільнення (компактизації).

В роботі, що пропонується, ми зосередимося на розгляді питання про засоби досягнення максимального ущільнення у бі-компонентній гранульованій системі, як за абсолютною величиною, так і за швидкістю досягнення такого стану.

Дослідження фізичних властивостей простих бі-компонентних сумішей за допомогою методів статистичної механіки є однією із традиційно актуальних і водночас складних задач статистичної фізики розчинів. Загально відомим теоретичним підходом у цій області, що має статистичне обґрунтування, є підхід Кірквуда–Баффа (КБ) [4], який дозволяє записати основні термодинамічні величини в термінах кореляційних інтегралів.

Як відомо, гранульовані суміші (наприклад, двох-компонентні) показують різні за ступенем впакування стани в залежності від асиметрії (співвідношення мольних фракцій та розмірів їх компонент). Хоча граничну фракцію впакування можна параметризувати за допомогою лише геометричних побудов (Вороного-Делоне), динаміка гранул у конгломераціях, що знаходяться під впливом зовнішніх невеликих струсів, залишається достатньо складним для опису, багато-параметричним процесом. Метод геометричних побудов Вороного, завдяки своїй суто геометричній природі, дозволяє описувати структуру досить широкого класу систем. Для їх побудови для даного набору точок необхідно навколо кожної точки системи виділити простір, в якому знаходяться усі точки, які є найближчими до неї, з трансляцією цієї умови на решту точок системи. Таким чином кожна точка (координата якої визначається положенням центру мас частинки-гранули) асоціюється із власним характерним об'ємом (або площею). Більше того, об'єми фігур є адитивними і повністю покривають об'єм системи. Це є важливою рисою саме для застосування підходу у випадку гранульованих суміші. Важливо зауважити, що

характер взаємодії проміж частинками безпосередньо не впливає на процедуру розбиття [5]. Експериментальні дослідження гранульованих сумішей дозволяють отримати інформацію про розподіл центрів частинок у певний момент часу  $i$ , таким чином, параметризувати структуру за допомогою методу Вороного. Дослідження структури за допомогою геометричних побудов Вороного базується на аналітичному аналізі розподілів площ усіх частинок системи. Очевидно, такий підхід дозволяє отримати інформацію не лише про порядок (симетрію), чи розупорядкування системи, але й про розподіл вільного об'єму та його зміни, які відбуваються завдяки зовнішнім збуренням. Вільний об'єм виступає головним параметром, який контролює поведінку гранульованих сумішей. Експериментально спостерігалось, що характерний час ущільнення може розходитися за умов наближення співвідношення розмірів частинок-компонентів до деякого критичного значення. При цьому рухливість гранул в упаковці є найнижчою у околі порога просочення (коли дрібні частинки ще можуть проходити через порожнечі, залишені проміж великими). Також з'явилися повідомлення про пришвидшення динаміки ущільнення, при достатньо великих значеннях відношення розмірів компонентів [6].

Питання про те, яка максимальна кількість твердих однакових сферичних частинок (гранул) може заповнити завданий об'єм (завданої форми), – належить до однієї із традиційних математичних проблем [7–11]. Характерним параметром, який характеризує ступінь впакування  $\eta$ , виступає, як правило, об'єм усіх частинок, поділений на об'єм, що спостерігається. Прийнято вважати, що його максимальне значення відповідає гране-центрованої симетрії ( $fcc$ ),  $\eta_{fcc} = \pi/\sqrt{18} = 0,74$ . При цьому, характерними масштабами впакування додатково виступають ще й так зване розупорядковане (заморожене) впакування ( $rcp$ ), якому відповідає  $\eta_{rcp} = 0,64$ , а також, розупорядковане пухке впакування ( $rlp$ ), що характеризує механічно стійку конфігурацію у гравітаційному полі Землі  $\eta_{rlp} = 0,60$  [12–14]. В умовах зменшеної гравітації (мікро-гравітації), за деякими даними [8,14,15]  $\eta$  може знижуватися до  $\eta_{rlp} = 0,55$ . Треба зауважити, що зв'язок між  $\eta$  та характером (симетрією) розташування гранул у впакованій структурі ще й досі залишається недостатньо вивченим [8,14].

За умови, коли ступінь впакування перевищує  $\eta_{кр}$ , спостерігаються ефекти впорядкування (симетризації) системи. Зокрема, в [16–18] повідомляється, про спостереження (при додержанні певних умов) явища кристалізації у впакуванні твердих сфер. У двовимірних системах твердих дисків кристалізацію спостерігали на шляху ущільнення, тобто за умов м'якого струшування системи [16]. Кристалізація в низці робіт визнається фактично рушієм для процесів гранульованого ущільнення, а закони зростання кристалічної фази цілком задовільно описують закономірності ущільнення, які спостерігаються. Тривимірна задача є звичайно більш складною і водночас більш наближеною до практичних застосувань. В окремих роботах припускається сценарій, в якому фігурують тетраедричні структури в якості ядер росту щільних областей [18]. Також слід згадати, що, кристалізація може бути отримана за допомогою занурення системи до зовнішнього поля вібро-прискорювань [19,20], або за допомогою збурень типу циклічного зсуву [21].

Зважаючи на дані, що свідчать про те що гранульовані суміші впаковуються помітно щільніше за монодисперсні (які складаються з однакових, у найпростішому випадку – сферичних гранул) питання про залежність параметрів таких процесів від складу, а також від розміру частинок постає вельми актуальним. На цьому шляху ведуться, як безпосередні фізичні [22], так і чисельні [23-25] дослідження. Так, у [26] чисельно вивчається гранульована суміш що складається із зерен різних розмірів. Автори дійшли до висновку про те, що співвідношення розмірів та молярних концентрацій компонентів суміші є основними параметрами, що визначають формування поточної та граничної (максимально досяжної) фракції впакування. Більше того, зважаючи на те, що вібрація груп частинок, є властивістю, надійно доступною до параметризації лише у чисельних моделюваннях, вона виступає фактором, який фактично перешкоджає спостереженню змін параметрів суміші. Інколи (див. [27]) такого роду складнощі не є предметом обговорення авторів публікацій і це фактично залишає нез'ясованим роль вищезгаданого фактору.

Як запропоновано в роботі [28], можна розглядати два граничні випадки для бінарних сумішей, виготовлених з маленьких та великих кульок. У першому випадку частка великих (за розмірами) частинок висока, так що вони утворюють систему, де менші частинки займають відповідні порожнечі, залишені великими. Коли співвідношення розмірів

частинок достатньо велике, менші частинки можуть просочуватися скрізь порожнечі, навколо великих. Навпаки, коли частка малих частинок збільшується, великі частинки опиняються ізольованими в оточенні малих. У першому випадку систему можна умовно кваліфікувати як “гравій”, тоді, як у другому, як “пудинг”. Зрозуміло, що обидва крайні випадки призводять до різних значень впакування. Однак теоретичний опис таких граничних випадків зазвичай проводиться відокремлено один від одного. Єдиного підходу, який би містив обидва вищезазначені граничні випадки досі не існувало. Саме розбудові такого підходу і буде присвячена наша робота. На цьому шляху, ми пропонуємо використовувати співвідношення статистичної фізики, незважаючи на природно дисипативний характер досліджуваних систем. Практично всі вони володіють низкою квазістаціонарних станів в яких їх можна розглядати такими, що приблизно задовольняють критеріям застосування апарату статистичної механіки для визначення їх макроскопічних властивостей [29,30].

Класична формула Кірквуда–Баффа для бі-компонентної суміші має вигляд [31]:

$$\beta_T^{(12)} = \frac{1}{k_B T} \cdot \frac{1 + n_1 G_{11} + n_2 G_{22} + n_1 n_2 (G_{11} G_{22} - G_{12}^2)}{n_1 + n_2 + n_1 n_2 (G_{11} + G_{22} - 2G_{12})}, \quad (1.1)$$

де  $\beta_T^{(12)}$  - ізотермічна стисливість суміші, компоненти якої нумеруються, як 1 та 2;  $n_1 = \frac{N_1}{V}$  та  $n_2 = \frac{N_2}{V}$  - парціальні щільності кількості частинок, відповідно;  $G_{11}$ ,  $G_{22}$  та  $G_{12}$  - так звані кореляційні інтеграли;  $k_B T$  - масштаб енергії.

Кореляційні інтеграли  $G_{\alpha\beta}$  пов’язані із парціальними структурними факторами  $S_{\alpha\beta}(0)$  наступним співвідношенням:

$$S_{\alpha\beta}(0) = x_\alpha \delta_{\alpha\beta} + x_\alpha x_\beta n_{12} G_{\alpha\beta}, \quad (1.2)$$

де  $x_\alpha$ ,  $x_\beta$  - мольні частки компонент суміші;  $\delta_{\alpha\beta}$  - дельта символ Кронекера;  $n_{12} = \frac{N}{V} = \frac{N_1 + N_2}{V} = n_1 + n_2$  - щільність кількості частинок для суміші.

Користуючись формулою (2) легко отримати :

$$S_{11}(0) = (1 - x) + (1 - x)^2 n_{12} G_{11}, \quad (1.3)$$

$$S_{22}(0) = x + x^2 n_{12} G_{22}, \quad (1.4)$$

$$S_{12}(0) = x(1-x)n_{12}G_{12}, \quad (1.5)$$

де  $x$  – мольна частка 2-ї компоненти суміші.

Підставляючи співвідношення (1.3)-(1.5) до формули Кірквуда–Баффа (1.1), знаходимо зв'язок проміж ізотермічною стисливістю бікомпонентної суміші та парціальними структурними факторами у наступному вигляді:

$$\beta_T^{(12)} = \frac{1}{n_{12}k_B T} \cdot \frac{S_{11}(0)S_{22}(0) - S_{12}^2(0)}{x^2 S_{11}(0) - 2x(1-x)S_{12}(0) + (1-x)^2 S_{22}(0)}. \quad (1.6)$$

Зважаючи на те що структурний фактор монодисперсної системи визначається як:

$$S(0) = 1 + nG = nk_B T \beta_T, \quad (1.7)$$

та враховуючи (1.3) та (1.4), знаходимо, вирази для парціальних структурних факторів монодисперсних фаз  $S_{11}(0)$  та  $S_{22}(0)$  із парціальними ізотермічними стисливістями  $\beta_T^{(1)}$  та  $\beta_T^{(2)}$ :

$$S_{11}(0) = (1-x) \cdot n_1 k_B T \beta_T^{(1)}, \quad (1.8)$$

$$S_{22}(0) = x \cdot n_2 k_B T \beta_T^{(2)}. \quad (1.9)$$

Парціальні ізотермічні стисливості  $\beta_T^{(1)}$  та  $\beta_T^{(2)}$  можуть бути визначені, із використанням модельних рівнянь стану. Наприклад, користуючись рівнянням стану Карнахана-Старлінга може бути знайдений наступний вираз для стисливості [32]:

$$\beta_T^{(i)} = \frac{1}{n_i k_B T} \cdot \frac{(1-\eta_i)^4}{1 + 4\eta_i + 4\eta_i^2 - 4\eta_i^3 + \eta_i^4}, \quad i = 1; 2, \quad (1.10)$$

де  $\eta_i = \frac{1}{6} \pi \sigma_i^3 n_i$  – парціальний параметр, який характеризує ступінь компактизації  $i$ -ї компоненти суміші.

Використовуючи дані про ізотермічну стисливість суміші  $\beta_T^{(12)}$ , отримані із альтернативних джерел, наприклад, з експерименту, або шляхом чисельного моделювання, розв'язуючи (1.6) відносно структурного фактору  $S_{12}(0)$  отримуємо:

$$S_{12}(0) = x(1-x)f_{12} \pm \sqrt{x^2(1-x)^2 f_{12}^2 + S_{11}S_{22} - f_{12} \{x^2 S_{11} + (1-x)^2 S_{22}\}}, \quad (1.11)$$

де  $f_{12} = n_{12} k_B T \beta_T^{(12)}$  – величина, яка у свою чергу, може бути визначена за допомогою рівняння стану бінарної суміші сферичних частинок [33], за формулою:

$$\beta_T^{(12)} = \frac{1}{n_{12} k_B T} \cdot \frac{(1-\eta)^4}{1+a\eta+b\eta^2+c\eta^3+d\eta^4}, \quad (1.12)$$

де  $a, b, c, d$  - залежать (відомим чином) від  $x$  (або  $f = \eta_2 / \eta$ ), та від  $\alpha = \sigma_1 / \sigma_2$  (де  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$  - діаметри 1-ї та 2-ї компонент суміші, відповідно). Наведемо також корисні співвідношення:

$$f = \frac{x}{\alpha^3 - (\alpha^3 - 1) \cdot x}, \quad x = \frac{\alpha^3 \cdot f}{1 + (\alpha^3 - 1) \cdot f}. \quad (1.13)$$

В роботі [6] отримані експериментальні данні для компактизації бінарної суміші сферичних частинок із різним ступенем розбіжності у розмірах  $\alpha = 2 \div 35$ . Параметризація отриманих даних проводиться фактично у двох характерних границях (станах) суміші в одному з яких переважає вміст більших за розмірами частинок (гравій), а в другому – менших за розмірами (пудинг). В роботі [34] робиться спроба опису отриманих експериментальних даних у всіх проміжних станах із використанням вагових функцій які відіграють роль підгоночних параметрів і, строго кажучи, спрямованих фактично до тих самих граничних станів. Таким чином, незважаючи на попередні результати, теоретичний опис макроскопічних властивостей (зокрема компактизації) бінарної суміші в рамках єдиної теорії досі залишається актуальним завданням.

В роботі, що пропонується, розвинуто саме єдиний підхід до опису компактизації суміші із використанням елементів статистичної теорії сумішей та модельних рівнянь стану. Отримані результати порівнюються із даними безпосередніх експериментальних вимірювань, які виконані в [6].

А саме, із урахуванням формул (1.3)-(1.4), (1.8)-(1.10), та (1.12), знайдемо спочатку  $S_{12}(0)$  (формула (11)). На Рис.1.1 наведені результати відповідних чисельних розрахунків величини  $S_{12}(0)$  проведених із використанням експериментальних даних отриманих в [6].



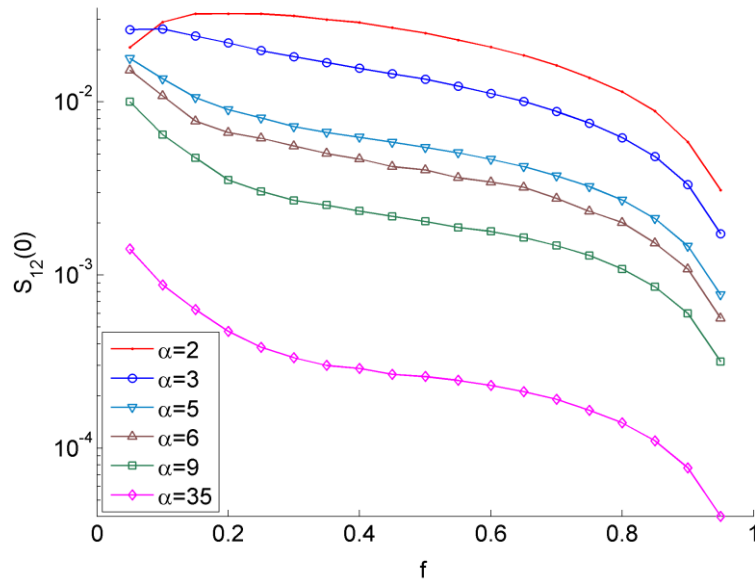


Рисунок 1.1 – Структурний фактор бінарної суміші для різних значень параметра асиметрії компонентів

Оскільки якісний склад локальної структури у випадку суміші встановити практично неможливо [28], покладемо величину  $S_{12}(0)$  параметром, який визначається шляхом порівняння отриманого теоретично виразу із експериментальними спостереженнями. На цьому шляху, користуючись формулою Кірквуда-Баффа (1.1), з урахуванням отриманих на базі рівнянь стану Карнахана-Старлінга формул (1.10) та (1.12), можна отримати алгебраїчне рівняння 12-ї степені відносно параметра впакування ( $\eta$ ). На рис.1.2 представлені дані чисельних розв'язків такого рівняння у порівнянні із відповідними експериментальними даними.

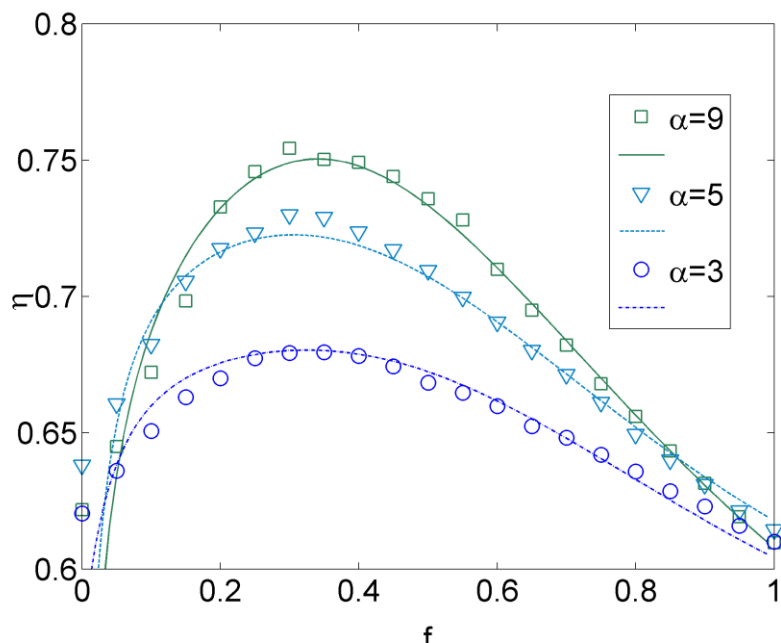


Рисунок 1.2 – Компактизація бінарної суміші для станів із різною асиметрією компонентів

Як випливає з рис.1.2, ми отримали гарне узгодження теоретичного підходу із даними експериментальних спостережень у всьому інтервалі можливих значень об'ємної фракції. Зауважимо, що задіяні теоретичні моделі, на відміну від попередніх підходів, не містять обмежень по відношенню до об'ємної фракції компонентів.

Ще одне зауваження треба зробити по відношенню до швидкості впакування бі-компонентної мікро-механічної суміші для якої в [6], встановлена можливість аномального зростання. Враховуючи, що впакування гранульованої речовини описується відомим логарифмічним законом, отриманим в [19], начебто, ця обставина знаходиться у відповідності до оцінок для характерного часу впакування  $\tau \sim \exp\left\{\frac{\eta\eta_{\infty}}{\eta_{\infty} - \eta}\right\}$

(де  $\eta_{\infty}$  – відповідає асимптотичному впакуванню), які впливають із моделі вільного об'єму [29] за умов  $\eta \rightarrow \eta_{\infty}$ . Однак, треба звернути увагу на те що формула для оцінки  $\tau$  встановлена для монодисперсної системи, і строго кажучи, її застосування для гранульованої суміші потребує більш змістовного обґрунтування, яке на теперішній час поки що відсутнє.

Задіяні моделі використовують уявлення про частинки-гранули у формі твердих сфер, нехай із різними діаметрами, що для реальних систем є, безумовно, ідеалізацією. Вплив морфології частинок на їх структурну

агломерацію вивчався у [35]. Де зокрема, було з'ясовано, що морфологія гранул суттєво впливає на динаміку ущільнення. Анізотропні зерна призводять до двох різних режимів ущільнення, розділених “сплеском” фракції впакування. Присутність тертя, також змінює порядок розміщення зерен у купі. Ці спостереження підтверджується чисельним моделюванням. Можлива поява когезійних сил між частинками може призводити до стримування ущільнення і зниження значень фракції впакування.

Розвинений підхід може бути використаний на випадок деяких найпростіших рідких сумішей, для яких ефекти впакування (компактизації) відіграють помітну роль [36, 4]. Так, наприклад, використовуючи модель Карнахана-Старлінга та дані експериментів, виконаних в [36], можна показати, що залежність надлишкових факторів компактизації та стисливості від мольної (чи об'ємної) фракції одного із компонентів описуються немонотонними законами, і показують наявність екстремумів (див. рис.1.3).

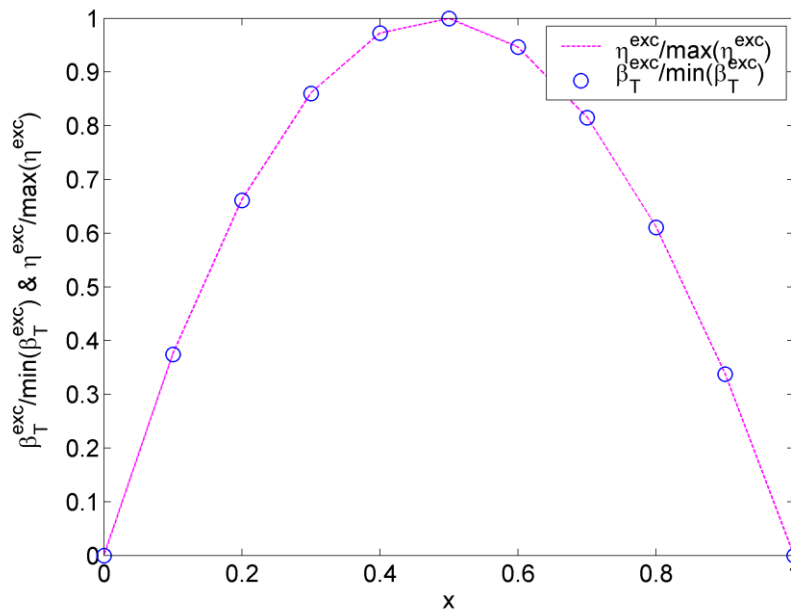


Рисунок 1.3 – Стисливість бінарної гранульованої суміші в залежності від мольної фракції одного із компонентів(колами позначені результати експериментальних вимірювань, суцільною-теоретичних розрахунків за отриманими співвідношеннями

Встановлені закономірності відкривають можливість застосувань запропонованого підходу до принципово різних за фізичними властивостями систем, як мікромеханічних, так і рідин (із принципово різним характером міжчастинкових взаємодій) з метою формування їх прогнозованих властивостей у відповідності до потреб та умов їх експлуатації в технологічних процесах.

Таким чином, на підставі аналізу експериментальних даних з вивчення динаміки бінарних гранульованих систем, які полягають у вимірах їх ущільнення і компактизації та впливу на ці процеси співвідношення розмірів компонентів та парціальних параметрів, зроблені висновки про принципову можливість підвищення ступеня та швидкості їх впакування, що є важливим елементом їх практичного використання. З метою теоретичного опису та обґрунтування емпіричних даних у повному інтервалі значень об'ємної (чи молярної) фракції використовується апарат теорії Кірквуда-Баффа у поєднанні з моделями типу твердих сфер Карнахана-Старлінга, а також відповідними феноменологічними даними. Теоретичні результати гарно збігаються із експериментальними. Отримані дані можуть бути використані для урахування впливу мультидисперсності і побудови інноваційних підходів до оптимізації маніпуляційної динаміки ущільнення (компактизації) дискретних мікромеханічних матеріалів, тобто на керування можливістю гранульованої суміші змінювати локальну структуру, ступінь та швидкість впакування, а також деякі інші параметри, що є суттєвим для їх практичного використання у відповідних технологіях захисту.

## Література

1. Journal of Hydraulic Engineering / Uchida T. et al. 2020. 146.10, 04020071. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001783.
2. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения. Москва: Металлургия, 1978. 256 с.
3. Гранульовані матеріали в технологіях утилізації радіаційно шкідливих речовин / Герасимов О.І. та ін. *Проблеми та перспективи формування стратегії поводження з небезпечними відходами в Україні. Збірка матеріалів Національного форуму «Поводження з відходами в Україні:*

законодавство, економіка, технології», 22-23 листопада. Київ: Центр екологічної освіти та інформації, 2016. С. 40-42.

4. Герасимов О.І., Сомов М.М. Статистичний опис надлишкових властивостей бікомпонентних систем. *Український фізичний журнал*. 2015. 60. 4. С. 326-330.

5. Герасимов О.І., Загородній А.Г., Сомов М.М. Щодо аналізу структури гранульованих матеріалів. *Український фізичний журнал*. 2013. 58. 1. С. 32-39.

6. Scientific Reports / Pillitteri S. et al. 2019. 9. 1, 7281. doi: 10.1038/s41598-019-43519-6.

7. Jaeger H.M., Nagel S.R. Physics of the granular state. *Science*. 1992. 255. 5051. Pp. 1523-1531. doi: 10.1126/science.255.5051.1523.

8. Aste T., Weaire D. The Pursuit of Perfect Packing. Bristol: IOP, 2000. 136 p. doi: 10.1887/0750306483.

9. Weitz D. A. Packing in the spheres. *Science*. 2004. 303(5660). Pp. 968-969. doi: 10.1126/science.1094581.

10. Torquato S. Perspective: Basic understanding of condensed phases of matter via packing models. *The Journal of Chemical Physics*. 2018. 149(2). 020901. doi: 10.1063/1.5036657.

11. Torquato S., Stillinger F.H. Jammed hard-particle packings: From Kepler to Bernal and beyond. *Reviews of Modern Physics*. 2010. 82(3). Pp.2633-2672. doi: 10.1103/RevModPhys.82.2633.

12. Berryman J. G. Random close packing of hard spheres and disks. *Physical Review A*. 1983. 27(2). Pp. 1053-1061. doi: 10.1103/PhysRevA.27.1053.

13. Onoda G. Y., Liniger E. G. Random loose packings of uniform spheres and the dilatancy onset. *Physical Review Letters*. 1990. 64(22). Pp. 2727-2730. doi: 10.1103/PhysRevLett.64.2727.

14. Song C., Wang P., Makse H. A. A phase diagram for jammed matter. *Nature*. 2008. 453(7195). Pp. 629-632. doi: 10.1038/nature06981.

15. Cluster growth in driven granular gases / Noirhomme M et al. *Physical Review E*. 2017. 95(2). Pp. 022905-22920. doi:10.1103/PhysRevE.95.022905.

16. Lumay G., Vandewalle N. Experimental study of granular compaction dynamics at different scales: grain mobility, hexagonal domains, and packing fraction. *Physical Review Letters*. 2005. 95(2). Pp.028002-02818. doi: 10.1103/PhysRevLett.95.028002.

17. Carvente O., Ruiz-Suarez J. Crystallization of confined non-brownian spheres by vibrational annealing. *Physical Review Letters*. 2005. 95(1). Pp.018001-018014. doi: 10.1103/PhysRevLett.95.018001.
18. Panaitescu A., Reddy K.A., Kudrolli A. Nucleation and crystal growth in sheared granular sphere packings. *Physical Review Letters*. 2012. 108(10). Pp.108001-108020. doi: 10.1103/PhysRevLett.108.108001.
19. Density relaxation in a vibrated granular material / Knight J.B. et al. *Physical Review E*. 1995. 51. 5. Pp. 3957-3963. doi:10.1103/PhysRevE.51.3957.
20. Vibration-induced compaction of granular suspensions / de Richter S.K., et al. *The European Physical Journal E*. 2015. 38. 7, Pp.74-86. doi: 10.1140/epje/i2015-15074-7.
21. Nicolas M., Duru P., Pouliquen O. Compaction of a granular material under cyclic shear. *The European Physical Journal E*. 2000. 3. 4. Pp. 309-314. doi:10.1007/s101890070001.
22. Roquier G. The 4-parameter compressible packing model (cpm) including a new theory about wall effect and loosening effect for spheres. *Powder Technology*. 2016. 302. Pp. 247-253. doi: 10.1016/j.powtec.2016.08.031.
23. Farr R.S., Groot R.D. Close packing density of polydisperse hard spheres. *The Journal of Chemical Physics*. 2009. 131, 24. Pp. 244104-244118. doi: 10.1063/1.3276799.
24. Danisch M., Jin Y., Makse H.A. Model of random packings of different size balls. *Physical Review E*. 2010. 81.5. Pp.051303-51318. doi:10.1103/PhysRevE.81.051303.
25. Chen D., Torquato S. Confined disordered strictly jammed binary sphere packings. *Physical Review E*. 2015. 92. 6. Pp.062207-062226. doi:10.1103/PhysRevE.92.062207.
26. Phase diagram and structural diversity of the densest binary sphere packings / Hopkins A.B. et al. *Physical Review Letters*. 2011. 107. 12. Pp.125501-125516. doi:10.1103/PhysRevLett.107.125501.
27. Behringer R.P., Chakraborty B. The physics of jamming for granular materials: a review. *Reports on Progress in Physics*. 2018. 82. 1. Pp.012601-012612. doi: 10.1088/1361-6633/aadc3c.
28. Boutreux T., de Gennes P.G. Compaction of granular mixtures: a free volume model. *Physica A*. 1997. 244. 1-4. Pp. 59-67. doi: 10.1016/S0378-4371(97)00236-7.

29. The kinetics of processes occurring in granular materials in the field of vibroaccelerations / Gerasymov O.I. et al. *Український фізичний журнал*. 2005. 50. 6. С. 624-632.
30. Стаціонарні стани у 1D системі непружних частинок / Герасимов О.І., Ванделвалле Н., Співак А. Я., Худинцев М.М. та ін. *Український фізичний журнал*. 2008. 53. 11. С. 1129-1137.
31. Kirkwood J.G., Buff F.P. The statistical mechanical theory of solutions. I. *The Journal of Chemical Physics*. 1951. 19, 6. Pp. 774-777. doi:10.1063/1.1748352.
32. Carnahan N.F., Starling K.E. Equation of state for nonattracting rigid spheres. *The Journal of Chemical Physics*. 1969. 51. 2. Pp. 635-636. doi:10.1063/1.1672048.
33. Equilibrium Thermodynamic Properties of the Mixture of Hard Spheres / Mansoori G.A., Carnahan N.F., Starling K.E. et al. *The Journal of Chemical Physics*. 1971. 54. 4. Pp. 1523-1525. doi:10.1063/1.1675048.
34. How size ratio and segregation affect the packing of binary granular mixtures / Pillitteri S. et al. *Soft Matter*. 2020. 16. 39. Pp. 9094-9100. doi: 10.1039/D0SM00939C.
35. The influence of grain shape, friction and cohesion on granular compaction dynamics / Vandewalle N. et al. *The European Physical Journal E*. 2007. 22.3. Pp. 241-248. doi:10.1140/epje/e2007-00031-0.
36. Excess compressibility in binary liquid mixtures / Aliotta F. et al. *The Journal of Chemical Physics*. 2007. 22. Pp.224508-224520. doi:10.1063/1.2745292.

## **РОЗДІЛ 2 КВАЗІГІДРОСТАТИКА ГРАНУЛЬОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ: МОДЕЛІ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЯХ МАНІПУЛЯЦІЙ МІКРО-МЕХАНІЧНИМИ МАТЕРІАЛАМИ**

В даному розділі для вивчення тиску у багато-частинковій мікро-механічній системі розглянута модель ґраткового газу у гравітаційному полі. Аналіз визначення вільної енергії та ентропії дозволив встановити відповідний рівноважний профіль густини, який описується функцією типа Фермі. Знайдений результат у вигляді Фермі-профілю поля густини було використано для знаходження вертикально гідростатичного тиску для якого отримано аналітичний вираз. Гідростатичний тиск виявився відмінним від відомих співвідношень, як з теорії рідин, так і з теорії сипучих систем. Отримані результати підтверджуються експериментальними спостереженнями, які свідчать про складний суттєво відмінний від відомих з теорії конденсованих і сипучих систем розподіл тиску в великих конгломераціях дискретних мікро-механічних систем і таким чином є підставою для корегування відповідних інженерних конструкцій в технологіях, пов'язаних з маніпуляціями мікро-механічними(гранульованими)системами(наприклад в технологіях наповнення та вивільнення ємностей зберігання та транспортування).

### **2.1 Загальні відомості**

Як вже вказувалося у вступному розділі, гранульовані матеріали (ГМ) використовуються в побуті, в промисловості, в технологіях майже в тих самих масштабах, що й рідини. Прикладом таких матеріалів є звичайний пісок з його різноманітним практичним застосуванням. Вражає, що незважаючи на масштабне прикладне значення, властивості (фізичні, механічні, структурні) гранульованих матеріалів до недавнього часу системно практично не вивчалися. Але, вже приблизно років 20-30 тому, фізики "раптом" усвідомили, що звичайний пісок є абсолютно вражаючим, з точки зору його незвичайних властивостей, матеріалом. А саме, за деяких умов він може поводитися і як тверде тіло і як рідина і як газ. Причому кожна "фаза" має унікальні властивості, що відрізняють гранульовані матеріали від відомих агрегатних станів конденсованої речовини. Уявимо собі ємність з піском, який збуджується зовнішнім полем віброприскорювань незначної амплітуди. Енергія цього руху



передається через границі контейнеру окремим частинкам-гранулам. В результаті при досягненні певного критерію настає вся маса гранульованого матеріалу приходить до стану руху і починає розвивати власну динаміку. Якщо гранульований матеріал розмістити на похилій площі, при деякому куті нахилу речовина починає текти демонструючи, так би мовити, властивості рідини. При цьому взаємодії гранул проміж собою мають абсолютно відмінну від рідини природу між гранулами взагалі не діють сили тяжіння, а сили відштовхування, які спрацьовують лише при контактах частинок, в загальному випадку є непружними (дисипативними і нелінійними за природою, як, наприклад, сила тертя).

Щодо практичних застосувань ГМ можна вказати, наприклад, технологію конічних бункерів зберігання та дозування (навантаження та, розвантаження), так звані сило, які широко використовуються в технічних галузях. При конструюванні різного виду таких пристроїв необхідно знати розподіл тиску, як по їхніх стінках(горизонтальний тиск), так і величину тиску на рівні випускного відтвору (вертикальний тиск). Для розробки відповідних технічних засобів маніпулювання та технологій важливо мати поряд із чисельними розв'язками задачі її аналітичне рішення.

Проблема полягає в тому, досі не існує послідовна теорія ГМ, яка дозволяє провести відповідні розрахунки і здійснити оцінки поведінки гранульованих (сипучих) середовищ. Тому розгляд аналітичних моделей формування тиску в таких системах є актуальною задачею.

На теперішній час, базовою моделлю розподілу тиску у сипучих середовищах прийнято вважати відому модель Янсена [1]. Детальний аналіз цього підходу, який базується на феноменологічному визначення вертикального і горизонтального тиску та їх постульованої пропорційності наведено в [2]. В нашій роботі ми зосередимося на визначенні вертикально тиску в системах з невольцманівським профілем поля густини. З цією метою буде використана модель ґраткового газу у гравітаційному полі.

## **2.2 Гідростатичний тиск в гранульованих системах**

У даній роботі під гранульованим матеріалом будемо розуміти систему, яка містить велику конгломерацію частинок різних розмірів і форми, що взаємодіють проміж собою і стінами ємності включення за допомогою виключно електромагнітних сил, сил сухого і в'язкого тертя. Якщо електромагнітні сили, сили в'язкого тертя відсутні, а проявляються

лише сили сухого тертя, такий стан речовини будемо називати ідеальним гранульованим матеріалом.

Розглянемо насип ідеального гранульованого матеріалу, деякою висоти  $H$ , що знаходиться в циліндричній ємності (рис.2.1).

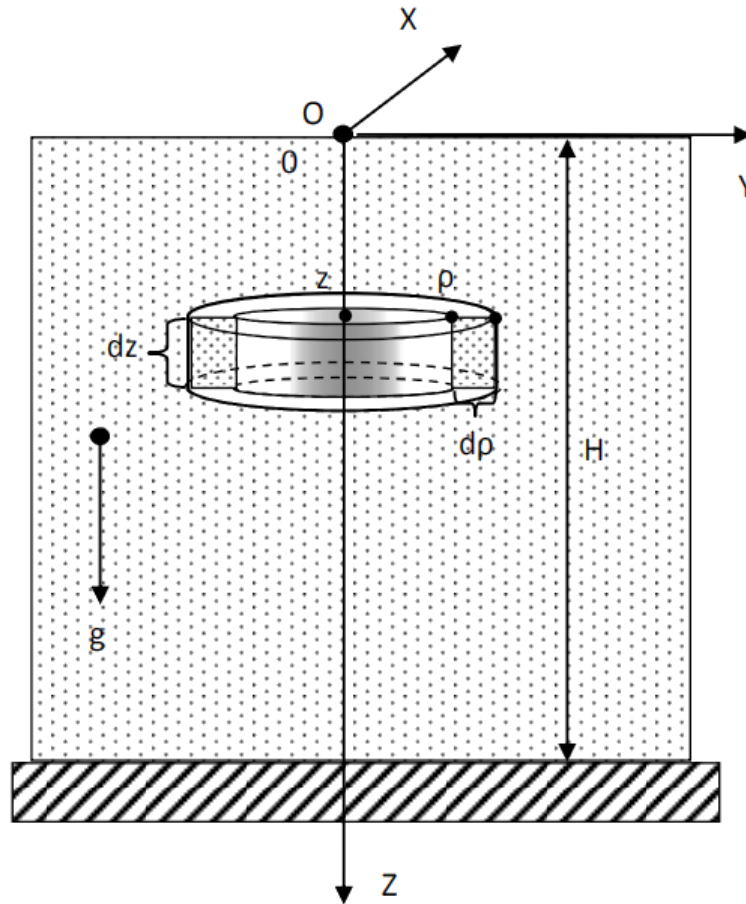


Рисунок 2.1– Скетч схема визначення параметрів задачі

В цьому випадку можна виділити два умовних характерних напрямки: вертикальний, що збігається з напрямком дії сили тяжіння, і горизонтальний, перпендикулярний дії сили тяжіння. Для опису стану ідеального сипучого матеріалу, доцільно скористатися циліндричною системою координат. У масі сипучого матеріалу виділимо елементарне кільце (рис.2. 1), об'єм якого в цій системі буде дорівнювати

$$2 \pi \rho dr dz. \tag{2.1}$$

Обертальний рух ми не розглядаємо, тому другий закон Ньютона для виділеного елемента матиме вигляд

$$\frac{d(m \cdot \vec{V})}{dt} = \sum \vec{F}, \quad (2.2)$$

де  $m$  – маса елементарного кільця  $V$  – швидкість його руху,  $F$  – сили, що діють на це елементарне кільце,  $\rho$  – густина.

Під рівноважним станом гранульованого матеріалу будемо розуміти такий, в якому всі його частини знаходяться в рівновазі і спокої (імпульс будь-якого виділеного елемента дорівнює нулю). Під стаціонарним станом будемо розуміти такий стан, при якому всі його частини рухаються з постійною швидкістю, залишаючись при цьому в рівновазі із оточенням (імпульс будь-якого виділеного елемента не залежить від часу).

Згідно із конструкцією задачі, в масі гранульованого матеріалу існує розподіл тиску на вертикальну і горизонтальну компоненти  $P_z$  і  $P_\rho$ , які у випадку гранульованого матеріалу априорі не дорівнюють один одному, як у випадку ідеальної рідини (закон Паскаля). Ми фокусуємося нижче на розгляді компонент тиску, які залежать від координат  $z$  і, не залежать від координати  $\rho$ .

У проекції на вертикальну вісь  $OZ$  (рис. 2.1), рівняння (2.2) матиме вигляд:

$$0 = \gamma \cdot 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot d\rho \cdot dz \cdot g - 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot d\rho \cdot \frac{\partial P_z}{\partial z} \cdot dz - \mu_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot dz \cdot \frac{\partial P_\rho}{\partial \rho} \cdot d\rho, \quad (2.3)$$

У цьому рівнянні перший доданок – сила тяжіння елементарного кільця, спрямована вниз, уздовж позитивного напрямку осі  $OZ$ ; другий – сила опору руху на горизонтальних поверхнях елементарного кільця, яка виникає за рахунок градієнта вертикальної компоненти тиску  $P_z$  спрямованого вгору, вздовж негативного напрямку осі  $OZ$ ; третій – сила внутрішнього, сухого тертя на бічних поверхнях кільця за рахунок градієнта радіальної компоненти тиску по радіусу, яка також спрямована вгору. Ця сила виникає саме за рахунок градієнта радіальної компоненти тиску, спрямованого уздовж радіусу. Якби він був відсутній, то всі елементарні кільця різного діаметру рухалися б по вертикалі однаково, як, скажімо, в моделі Янсена [1].

Покладемо, що вертикальна компонента тиску  $P_z$  і, відповідно, градієнт цієї компоненти у вздовж осі  $OZ$  залежать від радіуса. Отже, на

сусідні елементарні кільця по вертикалі будуть діяти різні сили. Це призведе до того, що, наприклад, сусіднє до визначеного зовнішнє елементарне кільце, буде зміщуватися вниз, а сусіднє внутрішнє кільце буде зміщуватися (щодо розглянутого елементарного кільця) вгору.

Тому сили сухого тертя, що діють на внутрішню і зовнішню бічну поверхню розглянутого елементарного кільця, будуть спрямовані в різні боки і результуюча сила буде визначатися градієнтом компоненти тиску  $P$ . На підставі вищенаведених якісних міркувань можна зробити висновок, що в сипучих(гранульованих) матеріалах, зокрема, не виконується закон Паскаля, типовий для рідини.

### 2.3 Впорядкування гранульованих матеріалів

Збурення гранульованих систем веде до ущільнення, тобто до зменшення об'єму, який займає система, а також до можливого формування симетрії в розподілі частинок (дивись рис.2.1 та рис.2.2, з [2]).

На рис.2.2 представлені побудови Вороного для мікро-механічних систем (двовимірних дисків) (отримані в [3]). Алгоритм Вороного дозволяє оцінити як ступінь ущільнення так і наявність симетрії у розподілі частинок(див. рис.2.3).

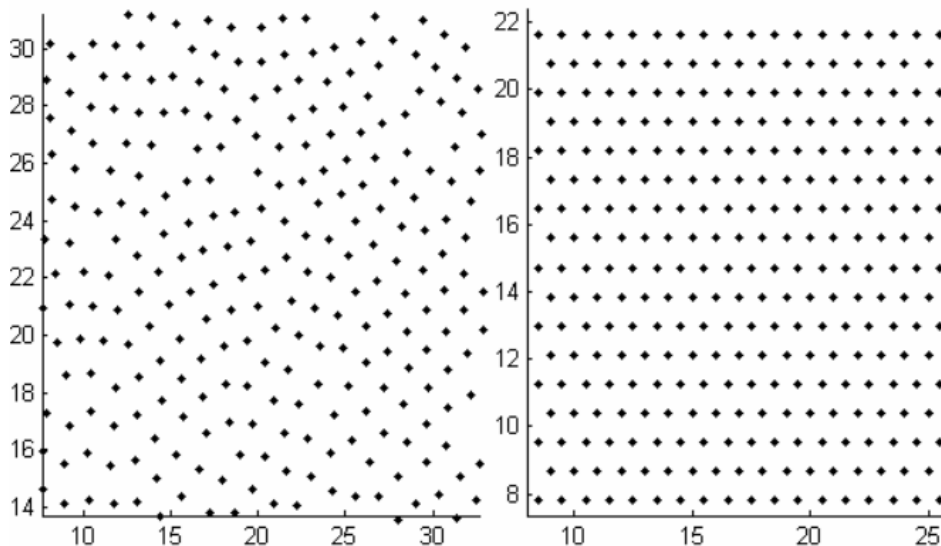


Рисунок 2.2 – Зображення впорядкованих і невпорядкованих станів в системі у двовимірних твердих дисків, які створюються під впливом зовнішніх збурень (точки зображують геометричні центри дисків)

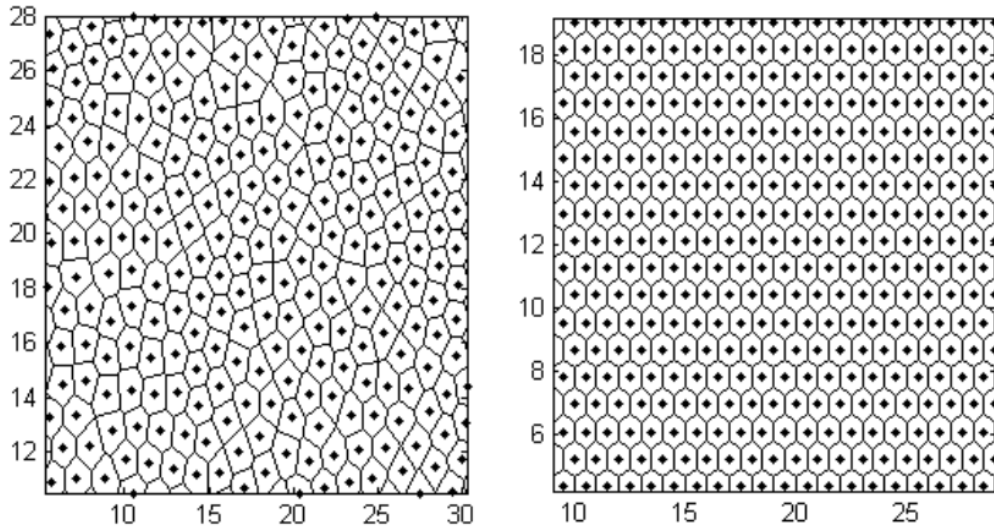


Рисунок 2.3 – Побудови Вороного для структур, які спостерігаються у гранульованих системах під впливом зовнішніх збурень. Ліворуч зображений невпорядкований, а праворуч – впорядкований стани

Отримані дані свідчать про можливість використання ґраткових моделей для вивчення, зокрема, поля густини(тиску) у гранульованих матеріалах. Теоретичний аналіз таких моделей та визначення шляхів їх застосування до параметризації феноменологічних даних про розподіл статичного тиску в природно анізотропних мікро-механічних матеріалах складає актуальну задачу.

#### 2.4 Ентропійний аналіз ґраткового газу у гравітаційному полі

В рамках квазістатистичного підходу запишемо загальний вираз для вільної енергії нашої системи у вигляді функціоналу ([3])

$$F(\rho) = E(\rho) - \beta^{-1}S(\rho), \quad (2.4)$$

де енергія системи в гравітаційному полі  $E(\rho)$  дається виразом

$$E(\rho) = mg \int_{(V)} z\rho(\vec{r})d\vec{r}, \quad (2.5)$$

де  $z$  – вертикальна координата,  $\beta^{-1}$  – зворотній масштаб енергії,  $\rho$  – густина системи,  $S$  – ентропія системи. В якості виразу для  $S(\rho)$  скористаємося відомим співвідношенням для ентропії ґраткового газу ([4])

$$S(\rho) = - \int_{(V)} d\vec{r} \left\{ \frac{\rho}{\rho_0} \ln \frac{\rho}{\rho_0} + \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) \ln \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) \right\}, \quad (2.6)$$

Тут  $\rho_0$  – максимальна густина системи.

Розрахунок варіаційної похідної  $\frac{\delta F(\rho)}{\delta \rho}$  породжує рівноважний профіль густини у формі розподілу, подібного до функції Фермі

$$\rho(\vec{r}) = \frac{\rho_0}{1 + ce^{\Gamma z}}, \Gamma = mg\rho_0\beta \quad (2.7)$$

Більше століття тому була запропонована елегантна модель для опису розподілу тиску у вертикальному контейнері, заповненому гранульованим матеріалом, який знаходиться у стані спокою. Скорочено опишемо модель, запропоновану в [1]. Знову уявимо вертикальний циліндр радіусом  $R$ , заповнений частинками-гранулами у стані спокою (рис.2.1). Метою було визначення тиску всередині матеріалу, який індукований дією сили тяжіння, в залежності від глибини  $x$  (де вісь  $x$  – вісь циліндра, орієнтована вертикально донизу). Зауважимо, що визначення «тиску» у гранульованому середовищі є саме по собі складною задачею (див., наприклад, [2]). Рефракційна техніка подвійного заломлення дозволяє здійснювати спостереження за розподілом сил в об'ємі стиснутого гранульованого матеріалу. За допомогою такого інструментарію встановлено, що розподіл тиску є вельми складним і суттєво неоднорідним. В [1] було запропоновано ввести модель, яка оперує двома характерними тисками, які діють у вертикальному та у горизонтальному напрямках (між двома горизонтальними та вертикальними площами, відповідно). Спрощуючи задачу, було зроблено припущення, що ці два тиски пропорційні один одному. Зосередимося на визначенні тиску, який діє між двома горизонтальними площами. Для цього можна розглянути баланс сил, які діють на тонкий шматочок речовини товщиною  $dx$  і на глибині  $x$ , який перебуває у стані спокою. При визначенні таких сил, зазвичай щільність системи покладається постійною. Між іншим, у випадку гранульованого середовища ця умова, як вже згадувалося вище, вочевидь порушується.

Нижче, буде розглянутий підхід до розгляду питання про визначення вертикального тиску, який здійснює вертикальний стовпчик гранульованої

речовини густина якої не тільки не залишається постійною, але й змінюється за незвичним для конденсованої речовини законом (рівняння (7)), який витікає із ентропійного аналізу моделі ґраткового газу у гравітаційному полі.

## 2.5 Гідростатичний тиск в системах з Фермі-профілем густини

Розрахуємо вертикальний тиск в системі з фермі-профілем густини, який описується рівнянням

$$\rho_0 mg = \varphi, \quad (2.8)$$

$$\varphi \int_0^z \frac{z dz}{1 + e^{\gamma z}} = P,$$

Виконуючи інтегрування в (2.8), отримуємо

$$P = \rho_0 mg \left\{ c + \frac{1}{\gamma^2} \text{Li}_2(e^{-\gamma z}) - \frac{z}{\gamma} \ln(1 + e^{-\gamma z}) \right\} \quad (2.9)$$

де  $\text{Li}_2(e^{-\gamma z})$  – бі-логарифм,  $C$  – стала інтегрування, яка визначається за допомогою відповідних граничних умов.

$$P = \rho_0 mg \left\{ \frac{1}{\gamma^2} e^{-\gamma z} - \frac{z}{\gamma} \ln(1 + e^{-\gamma z}) \right\} \quad (2.10)$$

У випадку, коли  $e^{-\gamma z} < 1$ , з (2.9) отримуємо

$$P = \varphi \left\{ \frac{1}{(\varphi/K\delta T)^2} e^{-\gamma z} - \frac{z}{\varphi/K\delta T^2} \ln(1 + e^{-\gamma z}) \right\} \quad (2.11)$$

Отримане за допомогою ентропійного аналізу моделі ґраткового газу в гравітаційному полі співвідношення для вертикального тиску в системах з фермі-профілем густини (2.10) наочно демонструє відхилення від типових аналогів, відомих як з теорії рідин, так і з альтернативних підходів, спрямованих на вивчення тиску в гранульованих системах [1,2].

Визначення тиску в гранульованих матеріалах, за висновками експериментальних досліджень [3,4], показує помітні відхилення від результатів, отриманих у [1,2], які водночас є вельми наближеними до отриманих нами. Тому розроблена модель є підґрунтям для подальшого

поглибленого вивчення питання про розподіл тиску і встановлення аналогів гідростатичних законів в гранульованих середовищах.

## 2.6 Висновки

В рамках ентропійного аналізу моделі граткового газу у гравітаційному полі, яка наближено моделює найпростішу мікро-механічну систему знайдений фермі-профіль поля густини, який є відмінним від больцманівського.

Використовуючи знайдений вираз для поля густини розрахований вертикальний гідростатичний тиск, який містить відмінності, як від класичного закон Паскаля в фізиці конденсованого стану, так і від знайденого в [1] в постульованій моделі сипучого матеріалу.

Отримані результати дозволяють враховувати описаний вище ефект в конфігураціях ємностей збереження та дозування сипучих матеріалів, а також в технологіях геоморологічного моніторингу мікро-механічних (гранульованих) середовищ [3,4,5].

## Література

1. Janssen H. A. Versuch über Getreidedruck in Silozellen. *Zeitschrift des vereins Deutscher Ingenieure*. 1895. 39(35). Pp. 37-50.
2. Boutreux E. Raphaël, de Gennes P. G. Propagation of a pressure step in a granular material. The role of wall friction. *Physical Review E*. 1997. 55(5). Pp. 5759- 5772.
3. Герасимов О. І. Фізика гранульованих матеріалів. 2015. Одеса: ТЕС, 260 с.
4. Герасимов О.І., Спивак А.Я. Окремі задачі фізики м'якої матерії. 2020. Одеса: Гельветика. 200 с.
5. Gerasymov O.I., Spivak A. Ya. Parameterization of the local structure of micro-mechanical systems (granular materials). *The Bogolyubov Kyiv Conference "Problems of theoretical and mathematical physics"*. 2019. Kyiv, September 24-26. P.73



## РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЇ ДЕЗАКТИВАЦІЇ РАДІАЦІЙНИХ ЗАБРУДНЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ НОВІТНІХ МАТЕРІАЛІВ: СОРБЦІЯ У ГРАФЕНОВИХ МАТРИЦЯХ

В цьому розділі ми зупинимося на одному з новітніх матеріалів, який показує унікальні властивості, що відкриває перспективи його ефективного застосування у сучасних інноваційних технологіях дезактивації і захисту елементів навколишнього середовища від шкідливих зовнішніх впливів у вигляді домішок та випромінювань. Мова піде про графен.

Графен – це атоми вуглецю, зібрані в плоску ґратку зі зчленованих шестикутників ( див. рис.3.1) . Принципово (і водночас – унікально), що графен має одноатомну товщину.

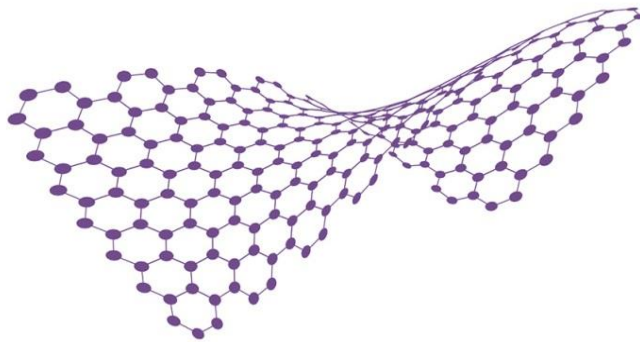


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення графену

Двовимірна модифікація вуглецю (див. рис.3.1), утворена моноатомним шаром (діаметр атома вуглецю  $\approx 0,07$  нм), в  $sp^2$ -стані гібридизації, з'єднаних в двовимірну кристалічну ґратку із гексагональною симетрією . Стала ґратки становить  $0,246$  нм.

Унікальні властивості графену були передбачені фізиками-теоретиками ще в середині 20-го сторіччя, але отримати зразки графену на практиці вдалося відносно недавно. Отримання графену в стабільному стані спочатку розглядалося скоріше як науковий експеримент, аніж як технологія промислового виробництва.

Класичний спосіб отримання графену полягає у механічному розділі плоско-паралельних шарів графіту [1]. На цьому шляху вдалося отримати зразки з інтенсифікованою динамікою електронів. Це відкрило шляхи його

використання в якості перспективного матеріалу для потреб сучасної наноелектроніки.

Розшарування графіту на окремі графенові плоскі сегменти здійснюється із використанням поверхнево-активних органічних рідин [2]. В такому підході, сегментної структуризації графену, ініціюється проникнення атомів або молекул різної природи в міжфазний простір і знижується енергія їх взаємодії. В результаті створюється можливість розшарування графіту при механічному впливі на нього.

Показав свою ефективність також підхід, заснований на використанні хімічних окислювачів [3], в якому графітові зразки поміщуються в окислюючу атмосферу, яка складається з кисню та(або) галогенів. В результаті відбувається окислення внутрішніх шарів графіту. Цей процес, також супроводжується зменшенням енергії взаємодії проміж шарами. За допомогою такого підходу отримують графенові зразки з розмірами у сотні нм.

Під оксидами графену розуміють частинки графену з приєднаними по краях або всередині вуглецевої сітки кисневмісними функціональними групами і / або молекулами. Номенклатура цих груп доволі обширна: гідроксильні, фенольні, карбонільні, карбоксильні, арильні, ефірні, містять фосфор. Різновидом є оксиди графена, модифіковані полімерами, такими, як поліетиленгліколь, поліефіри, полівініл, поліакрили і т.п. Ще одну групу оксидів графену складають доповані сполуки [4].

Зокрема, відомі оксиди графену, що містять у своїй структурі один або кілька атомів бору, азоту, алюмінію, фосфору, кремнію, сірки або ж групи на їх основі, наприклад меламін, фосфін, силан, полісілоксан, сульфіді і т.п. Найвразливіші оксиди графена виходять при інкорпорації молекулами краун-ефірів [5] (див. рис.3.2).

Розмір і форма порожнини, сформованої молекулою краун-ефіру, залежать від його складу. Тому новий матеріал може сорбувати іони строго виділеного діаметру. Сильні електростатичні зв'язки молекул ефіру, інкорпорованих в графенову матрицю, відкривають привабливі перспективи в біотехнологіях, для хімічної сепарації, екстракції металів, очищення від радіонуклідів (дезактивації), рециклінгу рідкоземельних металів і зберігання даних.

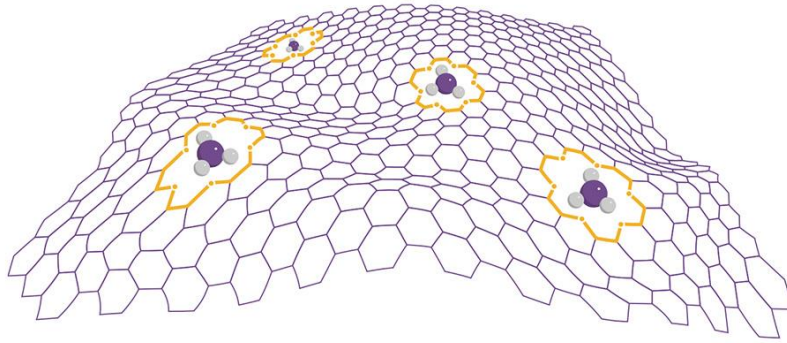


Рисунок 3.2 – Схематичне зображення матриці графену декорованої молекулами краун-ефіра

Розмір і форма порожнини, сформованої молекулою краун-ефіру, залежать від його складу. Тому новий матеріал може відсорбовувати іони строго виділеного діаметру. Сильні електростатичні зв'язки молекул ефіру, інкорпорованих в графенову матрицю, відкривають привабливі перспективи в біотехнологіях, для хімічної сепарації, екстракції металів, очищення від радіонуклідів (дезактивації), рециклінгу рідкоземельних металів і зберігання даних.

Оксиди графену за сорбційною ємністю значно перевершують іонообмінні смоли на полімерній основі і інші традиційні сорбенти. Це і становить суть інтересу до оксидів графену в якості новітніх матеріалів для створення нових технологій на основі супер-сорбентів нового покоління.

Сорбційні рекорди оксидів графену можуть реалізовуватися кількома шляхами, наприклад, абсорбцією; адсорбцією; іонним обміном; фізичною адсорбцією; хемосорбцією; з встановленням ковалентних або ж нековалентних зв'язків; з встановленням водневих зв'язків; внаслідок ван-дер-ваальсової взаємодії. В результаті сорбції можуть утворюватися колоїди, відбуватися коагуляція речовини і подальше утворення випадінь.

Відомі п'ять основних різновидів оксидів графену за формою частинок, а саме: плівки на інертних підкладках; нано-порошки з розміром плоских частинок (лусочок) порядку 905 нм; пластівці з розміром частинок 1-5 мкм; стрічки (з відношенням довжини до ширини завбільшки десяти одиниць); помпони з розміром сферо-подібних частинок діаметром 3-6 мкм [6].

З них самі незвичайні, є мабуть помпони, тобто зростки пелюсток графену в формі помпона [7].

Сьогоднішня цінова доступність оксидів графену (на рівні \$50/г), безсумнівно, підвищує їх привабливість для промислового застосування в інноваційних секторах.

Всі з чотирьох основних методів отримання оксиду графену використовують окислення шматочків графіту в водному середовищі сильних кислот (наприклад, концентрованої сірчаної кислоти) в присутності високоактивних окиснювачів. Існує велика кількість їх різновидів. Винахідники прагнуть отримати стабільну якість, мінімізацію відбраковування і здешевлення виробництва [8].

Так в 2014 році було запропоновано двохстадійний метод отримання оксиду графену без використання сильних окиснювачів - шляхом анодного окиснення графіту в сірчаної кислоти з мікрохвильовою активацією процесу [9].

Для екзотичних форм, наприклад помпонів, розробляються окремі технології.

Сировина для оксидів графену відносно дешева. Промислові апарати з корозійно-стійких сплавів хоча й коштовні, але не астрономічно. Інфраструктура виробництва очевидна, вона створюється на базі сучасних хімічних заводів. Інтелектуальна власність вносить близько 90% в ринкову вартість сучасних товарів на основі оксидів графену і якщо така маржа зникне вартість оксидів графену наблизиться до вартості пінопласту та гіпсокартону.

Основними драйверами тут є: швидке збільшення числа виробників графена і його похідних; зростаюче використання графенових продуктів різними областями народного господарства; все більше зосереджене фокусування відповідних галузей промисловості в галузь використання сорбентів на основі оксидів графену.

Тут зауважимо, що оксид графену – це перший двовимірний матеріал, який досяг стадії промислово-комерційного застосування. А на порозі вже інші двовимірні матеріали, наприклад фосфорен (гратка фосфору), сіліцен (гратка кремнію), сілікaten (гратка діоксиду кремнію), германен (гратка германію), арсінен (сітка миш'яку), а також двовимірні полімери [10].

Оксиди графену, а також композити на їх основі - перспективні матеріали для контролю навколишнього середовища (в першу чергу це стосується промислових відходів). Їх можна розглядати в якості новітнього

унікального матеріалу для екстреного знезараження повітря і рідких відходів.

Функціональні групи на краях і в площині оксидів графену здатні до формування , як ковалентних, так і не-ковалентних зв'язків з різними молекулами.

Більше того, значна за величиною питома поверхня оксидів графену дозволяє поглинати істотні кількості іонів важких металів, радіонуклідів і органічних сполук. Завдяки особливостям хімії при поверхневих процесів і різних типів архітектури конгломератів на основі оксидів графену, існують численні можливості для стимуляції селективних каталітичних процесів, наприклад, розкладання шкідливих газів на безпечні похідні.

Здатність графену адсорбувати з високою швидкістю радіоактивні матеріали з водних розчинів можна використовувати при дезактивації водойм, забруднених радіацією, а також для удосконалення технологій з видобутку сланцевих вуглеводів та рідкоземельних елементів [11]. Виявилося, що мікроскопічні сегменти оксиду графену моно-атомної товщини швидко зв'язують радіонукліди різного походження на ядрах адсорбції.

Сегменти оксиду графену легко розчиняються у воді і, витягнувши з неї радіоактивні речовини, збираються в кластери, які швидко осідають на дно. В подальшому такі донні відкладення можна вилучити із водойми та утилізувати. .

Вже здійснені випробування дезактиваційних властивостей оксиду графену на кислотних розчинах ( $\text{pH} < 2$ ), які перешкоджають абсорбції, та містять уран, плутоній, америцій тощо ( Am(III), Th(IV), Pu(IV), Np(V), U(VI)) а також типові продукти радіоактивного розпаду стронцій, європей та технецій (Sr(II), Eu(III) та Tc(VII)).

Виявилося, що оксид графену є набагато ефективнішим, ніж сорбенти, що зазвичай застосовуються для радіоактивного очищення (бентонітові глини і гранульоване активоване вугілля, див.рис.3.3) [12].

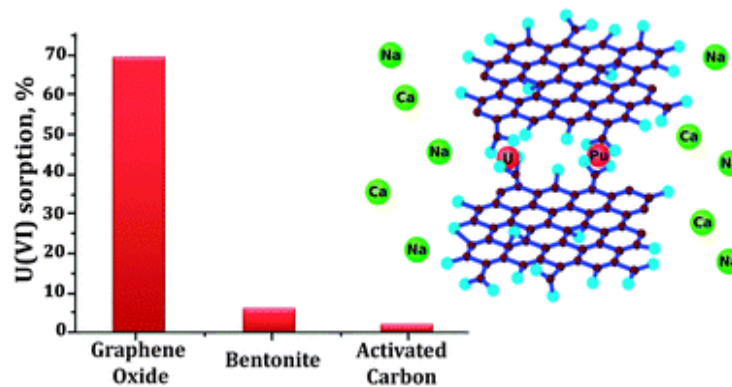


Рисунок 3.3 – Діаграми сорбції урану оксидом графену, бентонітом та активованим вугіллям [12]

При проведенні експерименту також виявилася феноменальна швидкість та ефективність очищення забрудненого радіоактивними речовинами водного розчину при застосуванні оксиду графену.

Це є справжнім проривом в технологіях очищення водою, забруднених радіоактивними матеріалами.

Було встановлено, що адсорбційна ємність оксиду графену для Cd (II) Co (II) при жорсткості води рН 6.0 та температури 300 К досягає 0,95 або 1,16 мМоль/грам. Для Eu (III), відповідно, 0,76 і 0,12 мМоль/грам, при рН 5.0.

Адсорбційні властивості можуть бути істотно покращені шляхом взаємодії оксиду графену з органічними сполуками або полімерами, наприклад, із застосуванням полі-аніліну (див.рис.3.4).

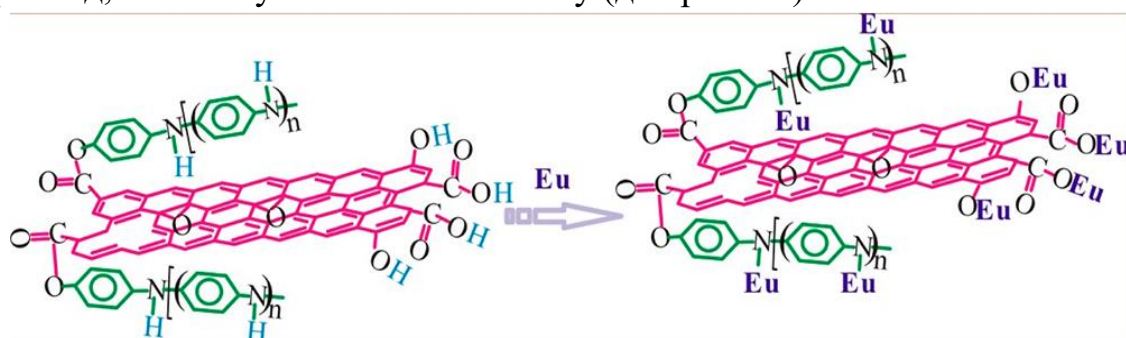


Рисунок 3.4 – Схематичне зображення комплексів полі-амід-оксид графену [12]

Водночас полі-анілін має високу стійкість до впливу важких металів завдяки наявності великої кількості аміно-функціональних груп.

Було доведено, що поліанілін може бути прищеплений на поверхню нано-сегментів оксиду графену за допомогою хімічного методу.

Такі композити демонструють універсальне та високоефективне поглинання радіонуклідів .

Сорбція радіонуклідів на композитах полі-анілін-оксид графену відбувається шляхом утворення комплексів з функціональними групами, що містять азот і кисень, а хімічна спорідненість радіонуклідів для функціональних груп, які зв'язують азот сильніше, ніж функціональні групи, які містять кисень. Матеріали, які містять оксид-графену та його окремі сполуки, є перспективними матеріалами для концентрації та видалення радіонуклідів при очищенні навколишнього середовища та утилізації ядерних відходів, особливо при низьких значеннях рН у водних розчинах.

Дезактивація складається із низки заходів, спрямованих на знезараження, об'єктів від радіоактивних речовин. Вона може здійснюватися механічним і фізико-хімічним способами, які можуть доповнювати один одного. Механічний спосіб використовує для видалення радіоактивних речовин різноманітні вібро-впливи. У комплексі до неї для обробки та очистки поверхонь можуть застосовуватися поверхнево-активні речовини. Механічний спосіб, як правило, застосовується при дезактивації протягом короткого часу після зараження об'єкту.

Внаслідок безпосереднього контакту радіоактивних забруднюючих речовин з поверхнею об'єктів із можливістю їх занурення всередину поверхневого шару, механічний спосіб дезактивації, очевидно, має обмежену ефективність. Тому, на практиці використовують також фізико-хімічний спосіб, який передбачає застосування розчинів препаратів, які підвищують ефективність видалення радіоактивних речовин з поверхні. Так скажімо, з цією ціллю може використовуватися пінна, чи інша топологічна фракція дезактиватора.

Існують також інші методи дезактивації, наприклад, електрохімічна (в якій використовується розчин електроліту), лазерна, а також дезактивація з використанням ультразвукового опромінення. При дезактивації в залежності залежно від характеру дезактивації використовуються адаптовані підходи. При дезактивації твердого покриття застосовується змив забруднюючих радіоактивних речовин, мікрочастинок під потужним тиском, який створюється за допомогою відповідного

технічного озброєння. У випадку м'якого, чи аморфного покриття дезактивація може проводитися шляхом евакуації верхнього шару, заміни його на чисті компоненти, засіву полів культурами, які добре акумулюють радіонукліди, і т. п. На атомних електричних станціях згідно штатного протоколу і, як правило, за допомогою хімічних методів.

Дезактивація забруднених земель в наслідок аварії на Фукусімі здійснювалася за допомогою піни і відповідних реагентів. 11 квітня 2018 року в японській префектурі Фукусіма проведено демонстраційне випробування нової технології дезактивації ґрунту. Один з основних фізико-хімічних процесів, розроблених в рамках проекту, полягає у використанні піни для видалення твердих радіоактивних частинок. Забруднений ґрунт змішується з водою, далі подається стиснуте повітря, в результаті чого утворюються піна. Бульбашки піни захоплюють частинки ґрунту, забруднені радіоактивним цезієм, в той час як незабруднені частки опускаються на дно колони. Така технологія була вперше протестована в 2016 році. В ході цих випробувань були зібрані експериментальні дані про деталі перебігу процесу. За підсумками використання цієї технології радіоактивність забрудненого ґрунту була знижена до 33-50% від початкового рівня. Проте, залишається не до кінця вирішеною проблема утилізація забрудненої піни, яка містить велику кількість радіоактивних частинок.

На нашу думку, з урахуванням висвітленого вище, перспективним буде дослідження дезактивації відпрацьованої піни шляхом додавання водного розчину композиту поліамід-оксид графену. Така технологія дозволить вивести з відпрацьованої піни радіоактивні забруднювачі, які випадуть в осад, сконцентрувати їх і, в подальшому, переробити, чи утилізувати.



## Література

1. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / Novoselov K.S. et al. *Science* . 2004. 306. Pp.666-669.
2. Two-Dimensional Atomic Crystals. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America / Novoselov K.S. et al. 2005. 102. Pp. 10451-10453.
3. Superconductivity in the intercalated graphite compounds C<sub>6</sub>Yb and C<sub>6</sub>Ca / Weller T.E. et al. *Nature Physics*. 2005. 1. Pp.39–41.
4. Epitaxial grapheme / de Heeret W.A. al. *Solid State Communications*. 2007. 143. Pp. 92-100.
5. Scanning tunneling spectroscopy of inhomogeneous electronic structure in monolayer and bilayer graphene on SiC / Brar V.W. et al. *Applied Physics Letters*. 2007. 91. Pp. 122102-122114.
6. Landau-Level Degeneracy and Quantum Hall Effect in a Graphite Bilayer / McCann E., Fal'ko V.I. *Physical Review Letters*. 2006. 96. Pp. 086805-086811.
7. Brey L., Fertig H.A. Electronic states of graphene nanoribbons studied with the Dirac equation. *Physical Review*. 2006. B 73.Pp. 235411-235424.
8. Geim A.K., Novoselov K.S. The rise of grapheme. *Nature Materials* . 2007. Pp.183-191.
9. The electronic properties of grapheme / Castro Neto A.H. et al. *Review Modern Physics*. 2009. 81. Pp. 109-124.
10. Matthew J. Allen et al. *Chem. Rev.* 2010. 110. 1. Pp. 132–145.
11. High surface area crystalline titanium dioxide: potential and limits in electrochemical energy storage and catalysis / Froschl T. et al. *Chemical Society Reviews*. 2012. 15. Pp.132-134.
12. Castro Neto A.H. The carbon new age. *Materials Today*. 2010. 13(3). Pp. 12-17.

## **РОЗДІЛ 4 ТЕХНОЛОГІЇ ТОНКОЇ ПИЛООЧИСТКИ ЗА ДОПОМОГОЮ МАНІПУЛЮЄМОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ**

Проблема виведення пилу (пиловловлення та пилоочищення) з розвитком сучасних технологій та їх впливу на навколишнє середовище набула широкого масштабу та наразі є актуальною і потребує розробки та впровадження принципово нових технологічних рішень. На цьому шляху розробка технологічних засобів видалення дрібнодисперсних мікромеханічних часток пилу з простору приміщень промислового/побутового/санітарного та космічного походження є актуальною задачею відповідної галузі технологій захисту навколишнього середовища. Саме цей вид пилу є досить небезпечним для життєдіяльності людини, через дуже високу проникливість до організму людини, а також до різноманітних приладів, які супроводжують діяльність людини.

Дослідження в цьому напрямку, як правило, спрямовані на системи, що перебувають у спеціальних умовах (скажімо, малої гравітації [1-4], які спрощують їх маніпулювання за допомогою сконфігурованих зовнішніх електричних полів різної напруги [1-4]. Розглянемо можливості теоретичного моделювання процесу поєднання електрофоретичного та левітуючого явищ у двоетапний процес з метою маніпулювання дрібнодисперсним пилом.

На цей час, наприклад, NASA (National Aeronautics and Space Administration) розробила активну програму по зниженню викидів пилу, і на цей час вивчає різноманітні можливі технології по маніпулюванню пилом та зменшенню його обсягу. Лабораторія електростатики та фізики поверхні у Космічному центрі ім. Кеннеді (в співпраці з декількома університетами на протязі в останніх років свої зусилля спрямувала на розробку Dust Shield – технології видалення пилу, яка використовує електростатичні і діелектрофоретичні сили для видалення пилу, який вже перебуває на поверхні, і запобігання накопиченню пилових часток, що осідають на ці поверхні.

Порівняльний аналіз різних існуючих технологічних методів видалення пилу [1-4] надає можливості визначити переваги та недоліки їх використання для ефективного очищення від нього.

Так, зокрема, існуючі поширені механічні методи пилоуловлення мають суттєві обмеження, зокрема, тому, що механічна фільтрація та

виведення пилу не дають можливості щодо повної евакуації дрібного пилу, особливо з елементів із складної морфологією. Тому виникає завдання задіяти електричне поле, яке має велику проникаючу здібність і, зокрема, може, завдяки маніпулюванню, сформуванню рух мікро-механічних часток (у неоднорідному електричному полі), згрупувати частинки пилу у кластери левітуючого шару та створити подальші умови задля, наприклад, електрофоретичного руху з цього шару для евакуації (видалення) пилових конгломерації. Розглянемо теоретичну модель, яка може бути покладена в основу вищеописаної технології і дозволяє змодельовати та наочно собі уявити кінетичні стадії всього процесу.

Ми запропонуємо з вище визначеною метою комбіновану левітаційно-електрофоретичну модель, яка описує маніпуляції монодисперсними мікро-механічними (пиловими) конгломератами у цілях створення концептуальної основи технологій захисту об'єктів навколишнього середовища від пилових забруднень.

До високотехнологічних заходів тонкої пило-очистки від дрібнодисперсного пилу, можуть бути віднесені ті, що діють за рахунок прикладеного зовнішнього електричного поля (під дією електричних сил), а саме – електричні пиловловлювачі та електрофільтри. Використання таких технологій, як правило, вимагає значних електричних затрат. Тому визначення шляхів зниження робочих енергетичних напруг, які супроводжують запропоновану левітаційно-електрофоретичну технологію є суттєвим елементом (такі умови вірогідно можуть бути створені завдяки природним умовам космічного середовища, де тонка пило-очистка є суттєвою технологічною проблемою, що вимагає свого ефективного вирішення).

Розглянемо теоретичну концепцію і модель технологічних процесів, які мають створюватися водночас, та припускати самоузгоджену спільну спрямовану маніпуляцію.

Напруги, за умов яких створюється рух мікро-механічних частинок пилу в зовнішніх гравітаційному та електричному полях складають декілька кіло-вольт. Таким чином, удосконалення відповідних технологій перше за все вимагає пошук шляхів(або умов)зменшення напруг потрібних для генерації електрофоретичного руху. Можливими напрямками пошуку є маніпулювання параметрами системи (зокрема топологією частинок, а також геометрією електродів), зовнішніми, тиском, вологістю, зниження гравітації, та деякі інші.

## 4.1 Загальні відомості

Структура та склад пилу залежить від особливостей процесу його виникнення і властивостей речовин, з яких він складається. Однією з важливих характеристик пилу, яка впливає на можливості маніпулювання їм, є його дисперсний склад. Визначаються типові дисперсні характеристики, які характеризуються відповідними інтервалами дисперсності. За інтервалами дисперсності пил поділяється на крупно-дисперсний, який потрапляє в інтервал до 10 мкм; середньо-дисперсний в інтервалі від 0.25 до 10 мкм. та дрібнодисперсний в інтервалі завбільшки 0.25 мкм.

В залежності від типу дисперсності обирається метод видалення пилу. Необхідність видалення пилу обумовлена його шкідливим впливом на здоров'я людини чи технологічні процеси.

Для видалення дрібнодисперсного пилу не ефективно використовувати механічні засоби очищення. Цей випадок потребує тонких методів очищення. Складність відповідної технології полягає в тому, що на частинки такого пилу діє комплекс різних за природою сил. Дрібно-дисперсність до того ж обумовлює особливі форми поведінки пилу в умовах діючих сил, затримуючих пил на складних ділянках забрудненої поверхні із специфічною морфологією (тобто досить нерегулярною, скажімо, фрактальною). Відповідно, дрібно-дисперсний пил проникає та затримується у важкодоступних місцях поверхні. Процес вилучення частинок пилу, в напрямку, протилежному напрямку дії комплексу утримуючих пил сил, та створення зависаючого шару з них, називається левітуючим рухом.

Використання електромагнітного поля, у технології очищення приміщень від дрібнодисперсного пилу містить технологічне поєднання ефектів левітації і електрофорезу [ 5-8 ]. Для цього відповідна модель має містити параметри, які визначають критерії левітаційного та електрофоретичного режимів руху пилових частинок .

Мова йде про критерій левітаційного руху- тобто умови початку вилучення пилу з поверхні та формуванням квазі-стаціонарної пилової конгломерації, яка парує над поверхнею будь якої складної морфології у вигляді шару із флуктуючими параметрами, а також про створення умов електрофоретичного руху ,який передбачає стадію поляризації у випадку

діелектричних матеріалів, чи стимульований полем рух перманентно заряджених частинок.

Вищеописані процеси потребують теоретичної концепції такої гібридної левітаційно-електрофоретичної технології, яка базується на використанні зовнішнього неоднорідного електричного поля.

Фокус такої технології це використання єдиного джерела, а саме неоднорідного електричного поля ,яке за рахунок ієрархічного маніпулювання його власними параметрами здібне стимулювати як левітаційний так і електрофоретичний ефекти.

Як вже загадувалося, в залежності від дисперсності ми обираємо відповідну адекватну технологію його вилучення. Гібридна технологія, яка поєднує умови створення левітуючого шару та спрямованого електрофоретичного руху використовує єдине джерело енергії - зовнішнє неоднорідне електричне поле із можливістю плавної маніпуляції величини напруги, достатньої для послідовного стимулювання левітаційного та форетичного процесів.

На першому етапі до поверхні, яка підлягає очищенню, прикладається зовнішнє неоднорідне електричне поле. Завдяки впливу поля дрібнодисперсний пил (чи через стадію поляризації ,чи безпосередньо руху вже початково заряджених частинок) у полі зовнішніх сил (гравітаційного, скажімо, походження) створює квазі-стаціонарну конфігурацію у вигляді левітуючого шару із флуктуючими параметрами(розмірами). На другому етапі, шляхом змін конфігураційних та енергетичних параметрів поля , пилова конгломерація переводиться до стану спрямованого (електрофоретичного) руху.

## **4.2. Генерація процесу в лабораторних умовах**

Модель використання ефекту левітації для тонкого пилоочищення ґрунтується на експериментальних спостереженнях виведення пилових конгломерацій з горизонтальної поверхні у вигляді формування вертикального струму мікрочастинок (окремих гранул чи кластерів з них), збудженого зовнішнім електричним полем.

У відповідних експериментах [1] спостерігалася специфічна мультифазна динаміка струмів (див.рис.4.1 і 4.2), яка характеризувалася суттєво неоднорідним характером сформованого макроструму, тобто

спостерігалися складові мікроструми, що склалися , як з окремих гранул, так і з гранульованих кластерів з декількох гранул( кластеризація). Описані експерименти демонструють складний неоднорідний характер потоку частинок, який скеровується зовнішнім (неоднорідним) електричним полем. Зважаючи на вищезгадане, відповідна технологія має враховувати ,що можуть домінувати як електричний(заряджені частинки) так і діелектрофоретичний (незаряджені гранули) сценарій формування електрофоретичного струму



Рисунок 4.1 –Фотофрагмент експерименту із спостереження руху гранульованих частинок стимульованого зовнішнім електричним полем

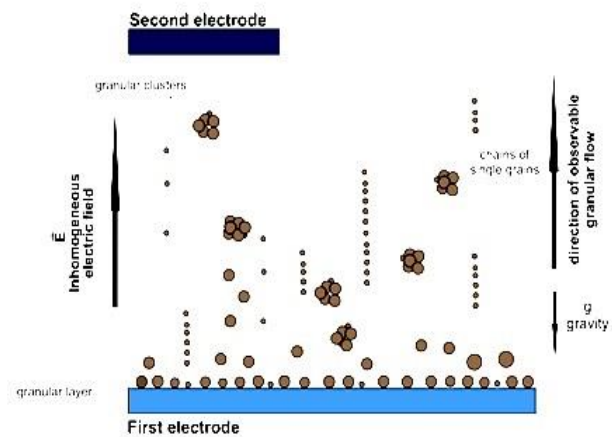


Рисунок 4.2 – Умовне зображення левітаційно-електрофоретичного струму , представленому на фото 4.1

Перевагами такого засобу тонкого пилеочищення є створення можливостей видалення дрібнодисперсних часток з поверхонь будь-якої морфології, включаючи морфологічно важкодоступні місця. Недоліком є необхідність використання силового поля великої напруженості (у десять і більше кіловольт).

Як вже згадувалося ,вищеописана левітаційно-електрофоретична технологія видалення дрібно-дисперсного пилу вимагає значних енергетичних ресурсів (напруг). Одним із шляхів подолання цієї проблеми є використання такої технології в умовах космічного простору, де завдяки зникаючої гравітації ефект може бути стимульований значно меншими за напругами полями. У вищевизначеному напрямі в роботі [9] описується

застосування концепції електричної завіси, яка здібна піднімати та транспортувати заряджені та незаряджені частинки за допомогою електростатичних та ді-електрофоретичних сил в програмі космічних досліджень на Місяці. Пиловий щит, який використовувався створювався зі сконфігурованого ряду паралельних електродів, підключених до джерела змінного струму, які генерували хвилю, що рухалася, виконуючи роль безконтактного конвеєра .

Відповідно, пилові частинки відштовхувалися електродами, які використовуються для створення поля, і рухаються вздовж або проти напрямку хвилі, в залежності від їх полярності. Електроди конструкції можуть збуджуватися однофазною або багатофазною напругою. У випадку однофазної напруги паралельні циліндричні електроди, підключені до джерела змінного струму, генерують електричне поле, напрямок якого змінюється із зміною полярності електродів. У цьому випадку створюється стояча хвиля, яка створює силу ,яка буде діяти на будь-яку заряджену частинку, що знаходиться в області поля. Гратка електродів покривається тонким ізолюючим шаром для збільшення відстані параметрів робочих режимів від величини напруги пробою. Незаряджені частинки, розташовані на поверхні після включення поля, заряджаються переходять в стадію формування електрофоретичного струму. Багатофазна електрична завіса створює біжучу хвилю, оскільки потенціал на кожному електроді змінюється з кроком внаслідок фазового зсуву. Заряджена частинка у змінному полі(яке створюється багатофазною напругою) рухатиметься з хвилею або проти неї, в залежності від її полярності.

Сила відштовхування частинок, які левітують над поверхнею, може бути записана у вигляді комбінації електродинамічної сили, в'язкої сили та сили тяжіння:

$$M \frac{d^2 r}{dt^2} = qE \cos \omega t - 6\pi\eta \frac{dr}{dt} - mg \quad (4.1)$$

де  $m$  – маса частинок,  $r$  – положення частинки,  $\eta$  – в'язкість рідини, в якій рухаються частинки,  $q$  – заряд частинки,  $g$  – прискорення, обумовлене силою тяжіння.

Треба зауважити, що через складний характер взаємодії частинок із полем, коли рух частинок є суттєво нелінійний , відповідне рівняння руху,

яке враховує таку взаємодію, в загальному випадку не може бути розв'язане аналітично. Тому модель (4.1) дає лише якісні уявлення про явища, які спостерігаються.

Було запропоновано декілька підходів(див.[9,10] до розв'язків модельних рівнянь руху з урахуванням певних визначених рис протікаємих явищ (скажімо, у лінійному наближенні, що передбачає врахування малих коливань частинок). За допомогою чисельних розв'язків були змодельовані траєкторії руху частинок, які досить добре відповідали фактичним вимірам.

З метою спостереження ефектів, які прогноуються в лабораторних умовах, були проведені випробування на прозорих пилозахисних екранах в умовах високого вакууму. Ефективність очищення визначали якісно, використовуючи методи візуальної оцінки. Спостереження показали, що видалення пилу швидко здійснюється і фактично перестає відбуватися за короткий час після активації. Як тільки макроскопічне переміщення пилу вже закінчується, система вимикається і проводиться оцінка ефективності очистки. Пил, що осідає на або над краєм спірального малюнка, не враховується при визначенні ефективності. Хоча цей метод визначення ефективності достатньо приблизним, (в межах  $\pm 5\%$ ), його переваги полягають в тому, що він добре служить для порівняння результатів кількох експериментальних вимірів і значно скорочує час тестування. Описану технологію можна використовувати в космічних технологіях очистки сонячних батарей, що особливо важливо, так як частинки пилу розмірами порядку 1 мкм суттєво зменшують їх ефективність. До того ж ті самі частинки створюють перешкоду дії оптичних систем. В умовах космічного простору, електрофоретична технологія є не тільки адекватною, але й єдино-можливою до застосування.

### **4.3. Гібридна левітаційно-електрофоретична модель**

Таким чином, відповідна технологія полягає у створенні умов левітаційно-електрофоретичної тонкої пило-очистки із використанням зовнішнього поля, із забезпеченням умов формування левітаційних розподілів і індукованих електрофоретичних потоків. Однією з вимог до левітаційно-електрофоретичної моделі є суперпозиція тяжіння та електричного поля. Суттєву роль в розглянутій технології відіграє етап



створення левітуючого шару, тобто утворення левітуючих конгломерацій видаляємого дрібнодисперсного пилу з ціллю створення умов його подальшого комплексного видалення з поверхонь із складною морфологією.

Доведено, що поляризовані частинки можуть формувати діелектрофоретичну динаміку [10]. Оскільки нейтральні частинки містять майже рівну кількість позитивних і негативних зарядів електричне поле індуктує в них дипольний момент. Взаємодія визначеного моменту з електричним полем призводить до появи відповідної сили. Аналогічно, частинки з власними електричними дипольними моментами, також будуть відчувати дію сили у зовнішньому полі.

Умови левітації полягають в тому, що частинки мають мати діелектричну сталу, відмінну від її значення у навколишньому середовищі. Усереднена за часом сила, яка діє на наведений чи перманентний електричний диполь електричному полі задовольняє рівнянню (4.1).

Дія сили, яка визначається (4.1) обумовлює можливість ефективно маніпулювати параметрами відповідного руху мікрочастинок, змінюючи параметри впливу(електромагнітні поля).

Такі процеси відіграють важливу роль в конструкціях фільтрів, які виконують розділення складної системи на складові компоненти. Саме для потреб цієї інженерії широко використовується метод електрофорезу(наприклад в мікробіології, для маніпуляціями бактеріями та клітинами). При застосуванні механічних методів існують суттєві обмеження якості, пов'язані із полідисперсним характером системи. Технологія фільтрування, яка базується на використанні електричних ступенів свободи і поле, яке маніпулюється зовні, не мають цих обмежень, і можуть бути ефективно застосовані, шляхом зміни параметрів, які контролюються, для розділу на складові компоненти складних полідисперсних систем.

Як вже згадувалося вище, технологія, яка пропонується для тонкої пилоочистки, базується на використанні маніпулюємого зовнішнього неоднорідного електричного поля, яке впливає на частинки пилу і викликає по перше-спливання пилу над поверхнею, на якій він початково розподілений, а потім формування струму, який формується під впливом сил електрофоретичного походження. Ієрархічне розділення цих динамічних стадій може бути здійснене, оскільки критерії їхнього

виникнення не співпадають. Переваги такої технології полягають в можливості створення умов формування левітаційного шару над поверхнею із будь-якою топологічною складністю. Метод також не має обмежень з точки зору наявності полідисперсного характеру коєдри із мікро-механічних частинок, оскільки суто явище левітації виникає внаслідок перш за все балансу зовнішніх сил, які формують динаміку системи. Суттєво, що обидві стадії динаміки пило виведення регулюються одним і тим же фактором, а саме зовнішнім електричним полем, яке діє як на заряджені частинки(електрофорез, так і на діелектричні, які поляризуються і отримують наведений дипольний момент.

Формально, теоретичний базис технології, яка пропонується, базується на уявленні про конгломерацію дискретних диполів (перманентних, чи наведених), на які впливає зовнішнє неоднорідне електричне поле. На систему при цьому діє сила ,яку можна визначити за формулою [16-18]:

$$F = QE + \delta qE(r+) - \delta qE(r-) = QE + (m\nabla)E, \quad (4.2)$$

Q-заряд,  $\nabla$  - градієнт,  $m$ – дипольний момент .

Якщо зовнішнє змінне поле високочастотне (тобто його частота  $\omega$  перевищує 1 кГц), електрофоретичні ефекти обумовлюються головним чином завдяки його градієнту. Окрім цього, на величину сили і параметри руху впливають розмір, вага, провідність та морфологія частинок. Ця сила викликає рух частинки в напрямку градієнта або проти нього в залежності, чи є частинка більш поляризованою, ніж середовище, в якій вона знаходиться.

Типовим способом створення неоднорідного поля ,яке стимулює явище діелектрофорезу є використання системи електродів із різною геометрією. Сучасна мікроелектронна схемотехніка дозволяє створити будь-яку геометрію контактів в потрібному масштабі.

Існують різноманітні конструкції системи електродів для створення неоднорідного електричного поля, серед яких можна вказати, наприклад, систему комбінацій плоских і гострих електродів. Проміж ними створюється поле, градієнт якого може бути запрограмовано змінений у відповідності до потреб технології.

Картина виглядає так, як схематично зображено на рис.4.1(з [1]). Дані, наведені на рис.4.1 відповідають умові, коли діелектрофоретична сила, яка виникає внаслідок взаємодії наведеного дипольного моменту частинки із зовнішнім полем виявляється достатньою для створення умов спрямованого руху поляризованих частинок.

Рівняння руху заряджених частинок пилу(електрофорез) може бути записано у наступному вигляді :

$$m\ddot{\vec{r}} = m\vec{g} + q \cdot \vec{E} + \chi \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (4.3)$$

Сила з якою поле впливає на заряджені частинки пропорційна градієнту квадрата напруженості. Відповідне рівняння руху в такому випадку набуває виду(діелектрофорез) :

$$m\ddot{\vec{r}} = m\vec{g} + \gamma \cdot \vec{\nabla}(\vec{E}^2) + \chi \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (4.4)$$

Знайдемо формальний розв'язок рівняння (4.4), для чого, записуючи рівняння (4.4) для вертикальної координати z (що відповідає умові вертикального руху) перепишемо його у наступному вигляді:

$$m\ddot{z}_t = mg - |\chi|z_t + \gamma \frac{d}{dz}(E^2) \quad (4.5)$$

Будемо вважати, що зовнішнє поле змінюється із часом за гармонічним законом

$$\ddot{z}_t + |\chi|z_t = g + F(z)e^{i\omega t}, \quad (4.6)$$

де  $F(z)$  - характеристична функція, яка описує розподіл напруг у неоднорідному полі.

Загальний розв'язок (4.6) є сумою аналітичного розв'язку однорідного рівняння і часного розв'язку

$$z = z_0 + z_1 \quad (4.7)$$

Користуючись відомими алгоритмами пошуку рішень для рівнянь типу (4.6), отримуємо

$$z(t) = C_2 \frac{g}{|\chi|} + C_1 e^{-|\chi|t} - C_2 F(z) \frac{\cos(\arctg \frac{w}{|\chi|} + wt)}{|\chi|^2 + w^2} \quad (4.8)$$

Отриманий розв'язок відповідає умовам формування левітуючого стану заряджених мікрочастинок у зовнішньому електричному полі. Амплітудна  $F(z)$  та фазова функція визначають параметри просторової конфігурації левітуючого шару .

#### 4.4 Висновки

Таким чином наочно продемонстрована та детально обговорена гібридна технологія тонкої пило-очистки, яка базується на сумісній генерації левітаційного та електрофоретичних станів зовнішнім неоднорідним електричним полем. Визначені параметри, як внутрішні, так і зовнішні, які впливають на умови та критерії відповідних динамічних процесів. Проаналізовані шляхи оптимізації (зменшення штатних напруг) параметрів левітаційно-електрофоретичних технологій та запропоновані їх застосування для тонкої пило-очистки в умовах зменшеної гравітації. Також проведений порівняльний аналіз ефективності запропонованої технології у порівняльні із традиційними електрофільтрами.

#### Література

1. Aliotta F., Gerasymov O., Calandra P. Electrospray Jet Emission: An Alternative Interpretation Invoking Dielectrophoretic Forces. Ch.3, pp.51-90. *Intelligent Nanomaterials*, 2nd ed. Wiley, USA. 2017. 581p.
2. Gerasymov O.I., Chernilevska I.A. Levitation and jet-stream of micromechanical conglomerations in electric field. VIII *Conference of Young Scientists Problems of Theoretical Physics (12 - 14 December)*. 2017. ВІТР, Kyiv, Ukraine. P.17.
3. Liquid and granular streams, manipulated by external inhomogeneous electric field / Gerasymov O. Et al. *Abstracts of 8<sup>th</sup> International Conference*

- “*Physics of Liquid Matter: Modern Problems*” (PLMMP-2018), 18-22 May 2018, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine. P. 103.
4. Universal micro-particle dynamics in non-uniform electric fields (from liquid to granular jet) / Gerasymov O.I., Aliotta F., Vasi C., Chernilevska I.A. *6th International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2018)*, 27-30 August 2018, Institute of Physics, Kyiv, Ukraine. P.34.
  5. Jones T. *Electromechanics of Particles*. Cambridge University Press, Cambridge. 1995. 345 p.
  6. Jones T., Washizu M. Multipolar dielectrophoretic and electrorotation theory, *Journal Electrostatics*. 1996. 37. Pp.121–134 .
  7. Jones T. Basic theory of dielectrophoresis and electrorotation, *IEEE Eng. Medical Biologic Magazine*. 2003. 22. Pp.33–42 .
  8. Pohl H.A. *Dielectrophoresis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1978. 720 p.
  9. Calle Carlos I., Arthur Cheng-Hsui Chen, Steve Trigwell. Dust Particle Removal by Electrostatic and Dielectrophoretic Forces with Applications to NASA Exploration Missions. *Conference: Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics*. 2008. 1 . Pp.37-48.
  10. Masuda S., Washizu M., Kawabata I. Movement of Blood Cells in Liquid by Nonuniform Traveling Field. *IEEE Transactions on Industrial Applications*. 1988 .24. 2. Pp. 217-222.

## РОЗДІЛ 5 ШТУЧНІ СИСТЕМИ, ЯК ОБ'ЄКТ ДОВКІЛЛЯ ТА ЇХ ЗАХИСТ

### 5.1 Загальні відомості

Штучні системи або системи, що створені людиною, як правило, розглядаються окремо від природних або фізичних систем. Використання специфічних інструментів для опису штучних систем досліджується низкою наук і дисциплін – від системного аналізу, системної інженерії, теорії стандартизації, матеріалознавства, головних технічних наук (металургії, машинознавства, електротехніки, теплотехніки, радіотехніки, будівництва та ін.) до спеціальних технічних дисциплін в різних галузях економіки та сферах життєдіяльності.

Штучні системи поділяються на:

- технічні системи;
- індустріальні системи;
- біологічні, біо-технічні, агротехнічні (агроекологічні), системи;
- соціальні системи.

Технічна система – штучно створена сукупність елементів і відношень (зв'язків) між ними, які утворюють цілісну структуру об'єкта, що має властивості, які не зводяться до властивостей елементів і призначена для виконання корисних функцій<sup>1</sup>.

Методи дослідження технічних систем:

- параметричний – опис властивостей, ознак, відношень (зв'язків) сукупності елементів (об'єктів), що складають систему, на основі емпіричних спостережень;
- морфологічний – визначення по-елементного складу, опис елементів, взаємовідносин параметрів, відношень (зв'язків) між ними та системи в цілому;
- функціональний – визначення функціональної залежності між параметрами системи (функціонально-параметричний опис), між елементами системи (функціонально-морфологічний опис), а також між параметрами та структурою системи;

---

<sup>1</sup> Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В., Основи творення машин: Харків, Вид-во «НТМТ», 2017. 448 с.

- фізичний – виявлення цілісної картини «життя» (життєвого циклу) системи і механізмів, які забезпечують зміну «режимів» роботи системи.

Дослідження ієрархії технічних систем (від машин, апаратів, приладів до глобалізованих галузей економіки та сфер життєдіяльності) дає визначення індустріальної системи, як складної багаторівневої технічної системи з суспільно значущою корисною функцією.

Штучна екологічна система складається переважно з елементів природного походження. Тому для дослідження штучних екологічних систем маю застосовуватися, як правило, екологічні методи дослідження.

Соціальні системи створюються людьми, але зв'язки (відносини) між елементами таких систем носять об'єктивний характер та не залежать від окремих елементів (суб'єктів), що складають соціальні системи.

Будемо використовувати для будь-яких систем, що розглядатимуться нижче, загальносистемний підхід<sup>2</sup>, визначивши їх основні складові:

- контент – елементи системи з визначеним класом властивостей;
- концепт – клас відносин між елементами системи, що задовольняє властивостям, вираженим цим концептом;
- субстрат – клас властивостей елементів системи;
- структура – системоутворюючі відносини між елементами системи.

Контент є атрибутивним системним параметром (характеризує елементи системи та їхні властивості). Інші складові є реляційними системними параметрами (характеризують не елементи системи, а відносини між елементами та властивості цих відносин).

## 5.2 Штучні системи, як екосистеми

Екологічна система (екосистема) у традиційному сенсі може бути природною або штучною. Природні екосистеми складають природне довкілля (навколишнє природне середовище), індустріальні системи – техногенне довкілля (навколишнє штучне середовище), штучні екосистеми повністю або частково можуть належати до природного та техногенного довкілля. Різноманіття соціальних систем утворює людство, яке разом з техногенним довкіллям, у свою чергу, складає антропогенне довкілля.

Дослідження техногенного та антропогенного довкілля дозволяє спостерігати риси їх певної схожості з природним довкіллям.

---

<sup>2</sup> Уемов А. И., Системный подход и общая теория систем: М., «Мысль», 1978. 272 с.  
[http://www.philosof.onu.edu.ua/elb/uemov/system\\_general\\_theory.pdf](http://www.philosof.onu.edu.ua/elb/uemov/system_general_theory.pdf)

У червні 1993 року у науково-популярному журналі *Harvard Business Review* вийшла стаття Джеймса Мура під назвою «Хижак і жертва: нова екологія конкуренції» (англ. *Predators and Prey: A New Ecology of Competition*)<sup>3</sup>, в якій він запропонував розглядати економічну діяльність, як екосистему, де покупці і виробники грають взаємодоповнюючі ролі та спільно еволюціонують в напрямку, що визначається компаніями, які знаходяться в центрі екосистеми. Стаття отримала премію *McKinsey*. Книгу «Смерть Конкуренції» (англ. *The Death of Competition*) того самого автора<sup>4</sup> було відзначено експертами, а ім'я Джеймса Мура було включено до складеного американським діловим журналом *Business Week* короткого списку «найоригінальніших нових стратегів» за 1996 рік.

Мур визначив «бізнес-екосистему» як економічне співтовариство, що складається з сукупності взаємопов'язаних організацій і фізичних осіб. Економічне співтовариство виробляє товари і послуги, які мають цінність для споживача та також є частиною екосистеми. До складу екосистеми будь-якого підприємства також входять постачальники, провідні виробники, конкуренти та інші зацікавлені сторони. Згодом вони коеволюціонують<sup>5</sup> свої можливості і ролі і прагнуть відповідати напрямам, визначеним однією або декількома компаніями-лідерами. Компанії, що займають керівні ролі, можуть змінюватися з плином часу, але функція лідера екосистеми цінується усіма суб'єктами (елементами) екосистеми. Функція лідера полягає, насамперед, у формуванні корисного загального бачення щодо процесів планування, розвитку, інвестицій, взаємної підтримки.

Мур використовував для бізнес-систем кілька екологічних метафор, у тому числі «екологічна ніша», «територіальні претензії», «новоприбулі види», «симбіотичні відносини» з клієнтами, постачальниками і навіть конкурентами.

Поширюється використання екологічних термінів для опису структури бізнесу, у т.ч. в сфері інформаційних технологій. Бредфорд Делонг, професор економіки Каліфорнійського університету в Берклі, вважає, що «бізнес-екосистеми» описують «схему запуску нових технологій, що

---

<sup>3</sup> Moore, James F., *Predators and Prey: A New Ecology of Competition*, Harvard Business Review, 1993 .71. Pe <https://hbr.org/1993/05/predators-and-prey-a-new-ecology-of-competition>

<sup>4</sup> Moore, James F. *The Death of Competition: Leadership & Strategy in the Age of Business Ecosystems* . New York: HarperBusiness, 1996.

<sup>5</sup> вплив близькоспоріднених видів один на одного в ході еволюції



з'явилися в Силіконовій долині»<sup>6</sup>. Він визначає екологію бізнесу, як «більш продуктивний набір процесів для розробки і комерціалізації нових технологій», для якого характерні «швидке створення прототипів, короткі цикли розробки продукту, ранній тестовий маркетинг, компенсація на основі опціонів, венчурне фінансування, рання корпоративна незалежність».

На думку Вінода Дара, керуючого директора DAR&Co<sup>7</sup>, еволюція в мережі Інтернет не відрізняється від природної еволюції, але характеризується доволі стиснутими життєвими циклами та швидкими генетичними мутаціями<sup>8</sup>.

Комплексне дослідження Анжело Коралло, Жозефіни Пас'янте та Андреа Пренсіп «Цифрова бізнес екосистема» (англ. *The Digital Business Ecosystem*) дає визначення екосистеми (цифрової екосистеми, цифрової бізнес-екосистеми), як інфраструктури, що сприяє економіці інформаційно-комунікаційних технологічних об'єктів, заснованої на мінливих, аморфних та перехідних структурах, альянсах, партнерстві та співпраці з участю малого та середнього бізнесу, а також підтримує співпрацю, обмін знаннями та побудову спільноти, здійснює обмін практиками, знаннями та власними елементами<sup>9</sup>.

«Біла книга» Державного центру кіберзахисту містить визначення для штучної (бізнес-) екосистеми, як сукупності (композиції, лінійної схеми) споріднених сил (ресурсів) або засобів окремо без деталізації властивостей складових, компонент (елементів) такої сукупності та зв'язків між ними<sup>10</sup>.

Порівняльний аналіз природних і штучних, а також біологічних, технічних і індустріальних екосистем дозволяє з певними застереженнями

---

<sup>6</sup> DeLong, J. Bradford .Why the Valley Way is Here to Stay.2000.<https://web.archive.org/web/20010910003440/http://www.business2.com/articles/mag/0%2C1640%2C7823%2CFF.html>

<sup>7</sup> міжнародна консалтингова компанія з штаб-офісом у Бейруті (Ліван), яка спеціалізується за напрямками: стратегічне планування, архітектура і дизайн, техніка і технології, екологія, економіка, управління проектами та будівництвом

<sup>8</sup> Vinod K. Dar, Power Executive .1999.

<https://web.archive.org/web/20020820091727/http://www.energycomm.com/bsneco.html>

<sup>9</sup> Corallo A. *The Digital Business Ecosystem* / Ed. A. Corallo, G. Passiante, A. Prencipe. Cheltenham, UK – Northampton, USA: Edward Elgar Publishing Limited, 2007. 239 p.

<sup>10</sup> Діяльність Державного центру кіберзахисту Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України (Загальний звіт), в 2-х томах, т.1. Відкрита інформація («Біла книга» Державного центру кіберзахисту) : науково-практична монографія / М. М. Худинцев (заг.ред.), Р. М. Боярчук, А. В. Давидюк: Міжнародний університет кібербезпеки, Державна служба спеціального зв'язку та захисту інформації України, Державний центр кіберзахисту. К. 2020. 206 с.

та обмеженнями сформулювати *принцип параметричної схожості природних та штучних екосистем*: у складних штучних системах проявляються окремі властивості природних екосистем; у складних природних системах проявляються окремі властивості штучних екосистем.

До прикладів термінів та властивостей природних екосистем, які притаманні складним штучним системам (насамперед, соціально-економічним або бізнес-системам), належать:

- еволюція<sup>11</sup>;
- популяції<sup>12</sup>;
- симбіоз<sup>13</sup>;
- екосистемне різноманіття;
- біотичні і симбіотичні відносини;
- дуальна пара «хижак-жертва»<sup>14</sup>;
- екологічна ніша<sup>15</sup>;
- територіальні претензії;
- адаптація;
- продуценти, редуценти і консументи<sup>16</sup>;
- метаболізм<sup>17</sup>;
- віруси та інфекції;
- життєвий цикл;
- мімікрія<sup>18</sup>;

---

<sup>11</sup> Н.А.Ясинська, Генетика еволюційної економіки: погляд фінансиста, *Ефективна економіка* .5, 2016. – <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4943>

<sup>12</sup> Е.Н. Вишнева, Национальные экономики и национальные промышленные системы в современном мире: введение в проблему, *Економіка промисловості*. – 2014. 3 (67). с.5-12. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/77219>

<sup>13</sup> П.Лукша, Экосистемный переход: будущее (инновационнообразовательных) систем GEF / GVA / СКОЛКОВО 9 октября 2018 .: <http://vcht.center/wp-content/uploads/2019/06/Luksha-Ekosistemnyj-podhod.pdf>

<sup>14</sup> Moore, James F. *The Death of Competition: Leadership & Strategy in the Age of Business Ecosystems* (англ.). New York: HarperBusiness, 1996.

<sup>15</sup> <https://ecommerce-platforms.com/ru/glossary/niche>

<sup>16</sup> Райзберг Б.А., Лозовский Л.Ш., Стародубцева Е.Б. *Современный экономический словарь*. – 2-е изд., испр.1999. М.: ИНФРА.М. 479 с. .

<sup>17</sup> А. В. Букалов, О. Б. Карпенко, Уровни соционического знания и понимания законов информационного метаболизма. – Соционика, ментология и психология личности, Международный институт соционики. 2002.5. с. 5-8. <https://core.ac.uk/download/pdf/268380646.pdf>

<sup>18</sup> А.М. Бобрук, Політична мімікрія: визначення сутності в сучасному науковому дискурсі. – *Державо і право, Юридичні і політичні науки*, 2013.61. с.526-531. [http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/dip\\_2013\\_61\\_86.pdf](http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/dip_2013_61_86.pdf)

- інвазія<sup>19</sup>;
- «зелені» технології.

До прикладів термінів та властивостей штучних систем, які притаманні складним природним системам, належать:

- протокол;
- мережа<sup>20</sup>;
- синхронізація<sup>21</sup>
- кореляція<sup>22</sup>;
- індекс<sup>23</sup>;
- домінанта;
- модель загроз<sup>24</sup>;
- модель порушника.

Схожість окремих параметрів природних та штучних систем частіше має метафоричний характер, але іноді стає вражаючою. Варто припустити наявність об'єктивних причин (а можливо, і закономірностей) для такої схожості. В термінах загальної теорії систем це означає, що різні за контентом та субстратом системи параметрично співпадають за структурою та/або концептом.

Якщо штучна система є складною (тобто складність є реляційним системним параметром для такої системи), це автоматично не означає, що вона є екосистемою.

Штучна екосистема має певний набір реляційних параметрів, до яких, зокрема, належать:

- існування класів об'єктних та суб'єктних елементів;
- соціальний характер зв'язків у класі суб'єктних елементів;

<sup>19</sup> В.Лернатович, Інформаційна інвазія, *Вісник Львівського ун-ту*, 2011. 35. с.245-249.

<http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/journalism/article/viewFile/4641/4674>

<sup>20</sup> <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1864-15#Text>

<sup>21</sup> Кашулин П.А. Слабые экологические связи и синхронизация природных процессов в Субарктике .М.: Наука. 2006. 143 с.

<sup>22</sup> <https://eco-cosm.com/slovar/terminyi-na-bukvu-z/zakon-ekologicheskoy-korreljaczii>

<sup>23</sup> Environmental Performance Index 2020 Global metrics for the environment: Ranking country performance on sustainability issues, Yale Center for Environmental Law & Policy, Yale University, Center for International Earth Science Information Network, Columbia University. 2020 .

<https://epi.yale.edu/downloads/epi2020report20210112.pdf>

<sup>24</sup> Дудатъев А.В., Войтович О.П., Миронюк В.В., Модель загроз соціотехнічної системи: соціальний аспект – Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 30 (69) .1 .3. 2019. с.97-101.

[http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3\\_2019/part\\_1/19.pdf](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2019/3_2019/part_1/19.pdf)

- ієрархічність структури;
- спільні для всієї системи та об'єктивні критерії цінності;
- розподіл ролей, рольова спеціалізація (взаємодоповненість) та конкуренція;
- циклічність процесів;
- метаболізм та життєві цикли процесів;
- еволюційний характер розвитку системи та її елементів.

У подальшому будемо дотримуватися використання для природних (біологічних) екосистем терміну «екологічна система», а для штучних (бізнес- або соціальних) екосистем – терміну «екосистема».

### 5.3 Штучні інформаційні системи

Серед різноманіття штучних систем розглянемо штучні інформаційні системи. Усталена (у т.ч. нормативна) практика, з урахуванням термінології, прийнятої в Україні, дає перелік типів таких систем, а саме:

- кіберфізичні системи;
- інформаційні системи (ресурси);
- комунікаційні системи;
- телекомунікаційні системи;
- інформаційно-комунікаційні системи;
- інформаційно-телекомунікаційні системи;
- мережі (мережеві системи).

Кіберфізичні системи (англ. *Cyber Physical Systems*) – це розумні (англ. *smart*) системи, які включають спроектовані взаємодіючі мережі фізичних та обчислювальних компонентів. Кіберфізичні і суміжні системи включають Інтернет речей (англ. *Internet of Things*) і індустріальний Інтернет (англ. *Industry Internet*) та мають великий потенціал для впровадження інноваційних застосунків та впливу на різні галузі світової економіки<sup>25</sup>.

Телекомунікаційна система (англ. *Telecommunication System*) – сукупність технічних і програмних засобів, призначених для обміну інформацією шляхом передавання (випромінювання) або приймання

---

<sup>25</sup> National Institute of Standards and Technology Special Publication 1500-201 Natl. Inst. Stand. Technol. Spec. Publ. 2017.1. Pp.79 p.

87. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1500-201.pdf>

сигналів, знаків, звуків, рухомих чи нерухомих зображень або іншим способом<sup>26</sup>.

Інформаційна (автоматизована) система (англ. *Information System*) – організаційно-технічна система, в якій реалізується технологія обробки інформації з використанням технічних і програмних засобів<sup>27</sup>.

Інформаційно-телекомунікаційна система – сукупність інформаційних та телекомунікаційних систем, які у процесі обробки інформації діють як єдине ціле<sup>28</sup>.

Комунікаційна система (англ. *Communication System*) – більш загальне поняття. К. Шенноном у 1949 році сформульовано математичну модель комунікацій з процесом передавання інформації від джерела до отримувача<sup>29</sup>. За *принципом технічної комунікації* джерело інформації створює повідомлення, яке потім надходить у передавач, де набуває форми сигналу, адаптованого для передавання каналом зв'язку, що з'єднаний із приймачем, де повідомлення відновлюється з отриманого сигналу та досягає адресата. Н. Вінер, розглядаючи комунікацію як кібернетичну систему, вважав, що «будь-яка система працює ефективно, коли вона отримує інформацію про стан цієї системи<sup>30</sup>. Зазначається, що складниками комунікаційної системи є комунікативні системи (відправник та одержувач інформації), поєднані соціальними та технічними комунікаціями. Таким чином, соціальна комунікація є концептом для комунікаційної, а технічна комунікація – для телекомунікаційної системи. Оскільки функціонування засобів телекомунікацій засноване на використанні електромагнітної взаємодії, поняття «телекомунікації» та

---

<sup>26</sup> Постанова КМУ «Про затвердження Порядку взаємодії органів виконавчої влади з питань захисту державних інформаційних ресурсів в інформаційних та телекомунікаційних системах» від 16.11.2002 № 1772. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1772-2002-%D0%BF#Text>

<sup>27</sup> Закон України «Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах» 80/94-ВР, Відомості Верховної Ради України, 1994, № 31, ст.286. – <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80/94-%D0%B2%D1%80#Text>

<sup>28</sup> те саме

<sup>29</sup> Shannon C. E. *The Mathematical Theory of Communication* / Claude E. Shannon, Warren Weaver. Urbana: The University of Illinois Press, 1949. 117 p.

<sup>30</sup> Винер Н. *Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине* / Винер Н.; [пер. с англ. И.В.Соловьева, Г.Н. Поварова; под ред. Г. Н. Поварова]. 2-е изд. М. : Наука, 1983. 160 с.

«електронні комунікації» по суті співпадають. Для комунікаційних систем використовують також терміни «інформаційно-комунікаційна система» та «електронна комунікаційна система» (коли увага акцентується, відповідно, на інформаційній та електронній комунікаційних складових комунікаційної системи).

Традиційними формами інформаційно-комунікаційних (інформаційно-телекомунікаційних) систем є<sup>31</sup>:

- одномашинний однокористувачевий комплекс (автономна персональна електронно-обчислювальна машина / АС класу 1);
- локалізований багатомашинний багатокористувачевий комплекс (локальна обчислювальна мережа / АС класу 2);
- розподілений багатомашинний багатокористувачевий комплекс (АС класу 1 або класу 2, під'єднана до глобальної мережі, наприклад, мережі Інтернет або власне глобальна мережа / АС класу 3).

Інформація є контентом усіх розглянутих інформаційних систем, а також бізнес- (соціальних) екосистем. Таким чином, за контентом інформаційні системи і штучні екосистеми співпадають та разом відрізняються від природних екологічних систем.

## 5.4 Кіберпростір

Глобальним узагальненням ієрархічної структури штучних інформаційних систем є кіберпростір.

У відповідності до результатів аналізу у роботі «Cyberpower and National Security: Policy Recommendations for a Strategic Framework»<sup>32</sup> існує не менше 28 визначень терміну «кіберпростір». Наведемо деякі з них.

- Кіберпростір – це глобальний та динамічний домен (передбачає постійне змінювання), який характеризується комбінованим використанням електронних та електромагнітних ресурсів (пристроїв та систем), метою якого є створення, зберігання, модифікація, обмін,

---

<sup>31</sup> Класифікація автоматизованих систем і стандартні функціональні профілі захищеності оброблюваної інформації від несанкціонованого доступу НД ТЗІ 2.5-005 -99: <https://tzi.ua/assets/files/%D0%9D%D0%94-%D0%A2%D0%97%D0%86-2.5-005--99.pdf>

<sup>32</sup> «Cyberpower and National Security: Policy Recommendations for a Strategic Framework» in Cyberpower and National Security, FD Kramer, S. Starr, L.K. Wentz (ed.), National Defense University Press, Washington (DC) 2009; see also Mayer, M., Chiarugi, I., De Scalzi, N. – [https://www.academia.edu/14336129/International\\_Politics\\_in\\_the\\_Digital\\_Age](https://www.academia.edu/14336129/International_Politics_in_the_Digital_Age)

видобуток, використання, знищення інформації. Кіберпростір включає: а) фізичну інфраструктуру та телекомунікаційні пристрої, які дозволяють підключати технологічні та комунікаційні мережі, зрозумілі в широкому розумінні (пристрої SCADA, смартфони/планшети, комп'ютери, сервери тощо); б) комп'ютерні системи (див. пункт а) та відповідне (іноді вбудоване) програмне забезпечення, яке гарантує основне функціонування домену та підключення; в) мережі між комп'ютерними системами; г) мережі мереж, що з'єднують комп'ютерні системи (відмінність між мережами та мережами мереж є переважно організаційними); д) вузли доступу користувачів та посередників маршрутизації; е) складові дані (або резидентні дані). Часто загальною (а іноді й комерційною) мовою мережі мереж називають «інтернет» (з малим і), тоді як мережі між комп'ютерами називають «інтранет». Інтернет (з великої літери) можна вважати частиною системи а). Відмітною та конститутивною особливістю кіберпростору є те, що жоден центральний орган не здійснює контроль над усіма мережами, що складають цей новий домен<sup>33</sup>.

- Кіберпростір – середовище (віртуальний простір), яке надає можливості для здійснення комунікацій та/або реалізації суспільних відносин, утворене в результаті функціонування сумісних (з'єднаних) комунікаційних систем та забезпечення електронних комунікацій з використанням мережі Інтернет та/або інших глобальних мереж передачі даних<sup>34</sup>.

- Кіберпростір – складне середовище, спричинене взаємодією людей, програмного забезпечення та послуг в мережі Інтернет, засобами технологічних пристроїв та підключених до них мереж, які існують у будь-якій фізичній формі<sup>35</sup>.

- Кіберпростір (в широкому сенсі) – це об'єктивна реальність, яка визначається створенням, обробкою та передаванням дискретної інформації (даних) в матеріально-об'єктних системах за участю систем, що

---

<sup>33</sup> те саме

<sup>34</sup> стаття 1 Закону України «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України» – <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text>

<sup>35</sup> ETSI TR 103306 V1.2.1 (2017). – [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/103300\\_103399/103306/01.02.01\\_60/tr\\_103306v010201p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103300_103399/103306/01.02.01_60/tr_103306v010201p.pdf)

складаються з суб'єктів. Загально прийнятним класом матеріально-об'єктних систем в кіберпросторі є телекомунікаційні системи<sup>36</sup>.

- Кіберпростір – це система, утворена інформаційною, матеріально-об'єктною та суб'єктною складовими. Інформаційна складова кіберпростору – дискретна інформація (дані), матеріально-об'єктна – клас телекомунікаційних систем, суб'єктна – клас систем, що складаються з суб'єктів, які формують (створюють) інформаційну складову та/або будь-яким чином впливають на матеріально-об'єктну складову кіберпростору<sup>37</sup>.

Очевидно, що контенти та субстрати інформаційної та неінформаційної складових кіберпростору не співпадають. Тому пропонуємо розглядати ці складові у взаємозв'язку, але як окремі системи, називаючи їх інформаційним та матеріально-об'єктним кіберпростором або *i*- (від англ. *information*) та *o*-кіберпростором (від англ. *object*). Дослідження проблеми визначення єдиного контенту для різних складових кіберпростору знаходиться поза межами цієї роботи.

Контентом *i*-кіберпростору є інформація (дані) (лат. *notitia*, англ. *information, data*) у дискретному вигляді. Дискретність інформації (даних) в *i*-кіберпросторі реалізується передусім бітовою, символною та пакетною структурою даних. В моделі OSI<sup>38</sup> (англ. *Open Systems Interconnection Model*) використовують такі протокольні одиниці даних (англ. *Protocol Data Units*): біт або символ (*bit* або *symbol*), кадр (*frame*), пакет (*packet*), сегмент або датаграма (*segment* або *datagram*), дані у файлі (*data in file*). Усі протокольні одиниці мають дискретну структуру.

Контентом в звичайному сенсі є внутрішній зміст пакету<sup>39</sup>. Такий контент у подальшому будемо поділяти на контент, створений суб'єктами (англ. *subject*), або *s*-контент, та контент, створений об'єктами (англ.

---

<sup>36</sup> посилання <sup>10</sup>

<sup>37</sup> те саме

<sup>38</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/OSI\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/OSI_model)

<sup>39</sup> будемо розуміти під *контентом* предмет *контентного аналізу* (текст, зображення, аудіо та відео у різних форматах) – див. Qualitative content analysis: theoretical foundation, basic procedures and software solution. Mayring, Philipp. – Klagenfurt, 2014.  
[https://www.psychopen.eu/fileadmin/user\\_upload/books/mayring/ssoar-2014-mayring-Qualitative\\_content\\_analysis\\_theoretical\\_foundation.pdf](https://www.psychopen.eu/fileadmin/user_upload/books/mayring/ssoar-2014-mayring-Qualitative_content_analysis_theoretical_foundation.pdf)



*object*), або *o*-контент. З певними застереженнями *s*- і *o*-контенту відповідають терміни «дані» і «метадані»<sup>40</sup>.

Контентом *o*-кіберпростору в системному сенсі є телекомунікаційні (інформаційно-телекомунікаційні) системи, з яких складається кіберпростір. Опис узагальнених телекомунікаційних систем можливий за допомогою телекомунікаційних графів. Графом<sup>41</sup> називається пара  $(V, E)$ , де  $V$  – непуста скінченна множина вершин,  $E$  – скінченне сімейство дуг (впорядкованих пар елементів) множини  $V$ . Телекомунікаційним графом називається граф, для якого вершини зіставлені з ідентифікаторами (наприклад, адресами) вузлів телекомунікаційної мережі, а дуги – з ідентифікаторами маршрутів (каналів зв'язку) між цими вузлами.

Очевидно, що створення *s*-контенту відбувається в межах інших систем, які складаються з суб'єктів та знаходяться поза межами «класичного» (матеріально-об'єктного) кіберпростору. Тому будемо розглядати ще одну складову кіберпростору, а саме – сукупність систем, що складаються з суб'єктів, які формують (створюють) *s*-контент та/або будь-яким чином впливають на *o*-кіберпростір, та називати її *s*-кіберпростір.

Таким чином, в рамках запропонованої моделі кіберпростір – це система (суперпозиція систем), що складається з *i*-, *o*- та *s*-кіберпростору, зв'язків та відношень між ними.

Створення (формування) *o*-контенту здійснюється в межах матеріально-об'єктних систем *o*-кіберпростору без безпосередньої участі суб'єктів. Техніко-технологічний вплив *s*-контенту на реляційні системні параметри *i*-кіберпростору та кіберпростору (наприклад, в мережі Інтернет) в цілому постійно зменшується, у той же час інформаційний вплив *s*-контенту на кіберпростір лишається визначальним. Зменшення долі *s*-контенту і відповідне збільшення долі *o*-контенту в кіберпросторі є прямим наслідком автоматизації та цифровізації процесів, а також застосування алгоритмів машинного навчання та технології штучного інтелекту.

---

<sup>40</sup> Understanding Metadata: What is metadata, and what is it for?: NISO, 2017. – [https://web.archive.org/web/20170201234427/http://www.niso.org/apps/group\\_public/download.php/17446/Understanding%20Metadata](https://web.archive.org/web/20170201234427/http://www.niso.org/apps/group_public/download.php/17446/Understanding%20Metadata)

<sup>41</sup> R.Diestel Graph Theory: Springer-Verlag, Heidelberg Graduate Texts in Mathematics.173, 5th Edit. 2016 .447 p. <http://diestel-graph-theory.com/index.html>

Наведемо окремо визначення для *i*-кіберпростору:

*i*-Кіберпростір – це об’єктивна реальність (сутність), яка існує незалежно від людської свідомості та характеризується наступними властивостями:

- кіберпростір існує для передавання інформації (даних) у дискретній формі;
- передавання інформації (даних) на фізичному рівні безпосередньо відбувається за допомогою електромагнітної взаємодії;
- передавання інформації (даних) на усіх рівнях відбувається за правилами (протоколами);
- передавання інформації (даних) на базовому логічному рівні відбувається за допомогою послідовних дій, заснованих на виборі типу «істина-брехня» (алгоритмів);
- передавання інформації (даних) на прикладному рівні відбувається за допомогою побудови довірчих з’єднань.

Узагальнені відомості щодо запропонованих реляційних системних параметрів для кіберпростору зведені в табл. 5.1.

Зазначимо, що структура реляційних системних параметрів, наведена у табл. 5.1, відповідає 11-рівневій структурі моделі OSI (загально прийнята структура моделі OSI має 7 рівнів).

Таблиця 5.1 -- Реляційні системні параметри кіберпростору

Вид	Кіберпростір		
	інформаційний	матеріально-об’єктний	суб’єктний
Контент	Інформація (дані) у дискретному вигляді	Телекомунікаційні системи	Суб’єкти інформації (даних) та телекомунікаційних систем
Концепт	Принципи з’єднань та передавання даних	Електромагнітна взаємодія	Прагнення до довірених з’єднань та взаємодії

Продовження табл. 5.1

Вид	Кіберпростір		
	інформаційний	матеріально-об'єктний	суб'єктний
Субстрат	Логічні алгоритми Правила (протоколи) передавання даних <sup>42</sup>	Правила (протоколи) взаємодії <sup>43</sup>	Правила (протоколи) ідентифікації та довіри <sup>44</sup>
Рівні моделі OSI	Фізичний, канальний	Мережевий, транспортний, сеансовий, представлення, прикладний	Особи, організації, нормативно-правовий <sup>45</sup> ,  глобальний (міжнародно-правовий, світовий)

До Глобальної екосистеми кібербезпеки за версією Європейського інституту стандартизації<sup>46</sup> віднесені:

- екосистемні світові та міжнародні форуми та заходи;
- форуми, що розробляють технічні стандарти та кодекси усталеної практики;
- форуми розробників ІТ-рішень, що впливають на безпеку у кіберпросторі;
- платформи, системи та служби постійного обміну безпековою інформацією в режимі реального часу;
- центри компетенцій, підвищення кваліфікації то обміну досвідом;
- національні та міжнародні екосистеми кібербезпеки<sup>47</sup>;

<sup>42</sup> під логічними алгоритмами та правилами (протоколами) переадавання даних ми розуміємо алгоритми та правила (протоколи) фізичного та каналного рівня

<sup>43</sup> під правилами (протоколами) взаємодії ми розуміємо правила (протоколи) мережевого, транспортного, сесійного рівня, рівня представлень та прикладного рівня

<sup>44</sup> під правилами (протоколами) ідентифікації та довіри ми розуміємо правила (протоколи) рівня особи, організації, нормативно-правового та глобального рівня

<sup>45</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Layer\\_8](https://en.wikipedia.org/wiki/Layer_8) та *in* <https://web.archive.org/web/20130524214239/http://blogs.rsa.com/engineering-security-solutions-at-layer-8-and-above/> [http://ru6.cti.gr/bouras-old/WP\\_Simoneau\\_OSIModel.pdf](http://ru6.cti.gr/bouras-old/WP_Simoneau_OSIModel.pdf)

<sup>46</sup> посилання <sup>35</sup>

<sup>47</sup> до таких систем відноситься, зокрема, національна система кібербезпеки України, передбачена Стратегією кібербезпеки України та Законом України «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України»

- довідкові бібліотеки, конференції та публікації;
- об'єкти спадщини та історичні колекції;
- веб-сайти та облікові записи в соціальних мережах стейкхолдерів у сфері інформаційної безпеки та кібербезпеки.

## **5.5 Захист та захищеність штучних систем**

Методи дослідження довкілля, екологічні методи дослідження, у т.ч. з використанням технологій захисту навколишнього середовища, для дослідження штучного середовища і штучних систем практично не використовуються.

Але, очевидно, принцип параметричної схожості природних та штучних екосистем може бути застосований для доповнення та розширення переліку методів дослідження штучних систем, зокрема, для оптимізації методів захисту штучних систем.

Об'єктом захисту в штучних системах (екосистемах) є контент цих систем. Захист інформації в інформаційних системах – діяльність, спрямована на запобігання несанкціонованим діям щодо інформації в системі. Технічний захист інформації – вид захисту інформації, спрямований на забезпечення за допомогою інженерно-технічних заходів та/або програмних і технічних засобів унеможливлення витоку, знищення та блокування інформації, порушення цілісності та режиму доступу до інформації. Криптографічний захист інформації – вид захисту інформації, що реалізується шляхом перетворення інформації з використанням спеціальних (ключових) даних з метою приховування/відновлення змісту інформації, підтвердження її справжності, цілісності, авторства тощо<sup>48</sup>.

Захищеність контенту інформаційної системи характеризує інформаційна безпека – стан захищеності інформаційної системи (системи обробки та зберігання даних), при якому забезпечено конфіденційність, доступність і цілісність інформації, використання й розвиток в інтересах громадян або комплекс заходів, спрямованих на забезпечення захищеності інформації особи, суспільства і держави від несанкціонованого доступу,

---

<sup>48</sup> Закон України Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах, Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1994, № 31, ст.286. – <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80/94-%D0%B2%D1%80#Text>

використання, оприлюднення, руйнування, внесення змін, ознайомлення, перевірки запису чи знищення<sup>49</sup>.

Кіберзахист – сукупність організаційних, правових, інженерно-технічних заходів, а також заходів криптографічного та технічного захисту інформації, спрямованих на запобігання кіберінцидентам, виявлення та захист від кібератак, ліквідацію їх наслідків, відновлення сталості і надійності функціонування комунікаційних, технологічних систем<sup>50</sup>. У більш широкому сенсі кіберзахистом є захист контенту та субстрату інформаційних (кіберфізичних) систем.

Завдання екології, які можуть бути використані для дослідження штучних екосистем:

- встановлення закономірностей взаємозв'язків між елементами штучних екосистем, їх угрупованнями та умовами техногенного середовища;
- дослідження структури і функціонування угруповань елементів (підсистем) штучних екосистем;
- розробка методів визначення стану штучних екосистем;
- спостереження за змінами в окремих екосистемах та техногенному середовищі в цілому, прогнозування наслідків цих змін;
- створення наукової основи раціональної експлуатації ресурсів штучних екосистем.

Охорона (захист) навколишнього середовища має враховувати як природну, так і штучну компоненти середовища, причому штучна компонента має розглядатися не лише як частина природного середовища, а ще як окрема суто штучна екосистема. Зокрема, методи (технології) охорони (захисту) навколишнього інформаційного середовища мають узагальнити методи (технології) захисту інформації, враховуючи не лише аспекти технічного та криптографічного захисту інформації, інформаційної та інформаційної державної безпеки, а також екосистемний характер інформаційного середовища, та включати спеціалізовані екологічні методи досліджень.

---

<sup>49</sup> Коваленко Ю.О. Забезпечення інформаційної безпеки на підприємстві / Ю.О.Коваленко, *Економіка промисловості*. 2010. 3. с.123-129. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/econpr\\_2010\\_3\\_20](http://nbuv.gov.ua/UJRN/econpr_2010_3_20)

<sup>50</sup> посилання <sup>34</sup>

## 5.6 Інформаційні технології захисту навколишнього середовища

Методи, що використовуються в технологіях захисту навколишнього середовища:

- механічні;
- фізичні;
- хімічні;
- фізико-хімічні;
- біологічні;
- математичні;
- кібернетичні.

Приклади використання нових технологій в екології та природознавстві зведені у табл. 5.2. Переважна більшість наведених технологій, технологічних і технічних рішень може використовуватися в задачах охорони навколишнього середовища та захисту екосистем (їх контенту і субстрату).

Таблиця 5.2 – Приклади використання нових технологій в екології та природознавстві<sup>51</sup>

Технологія	Опис
<i>Минулі</i>	
Гідролокатор	Сонар вперше використовував місцезнаходження та запис ясел риб
Автоматизовані датчики	Автоматизовані датчики використовувалися для вимірювання та реєстрації змінних параметрів природного середовища
Фотопастки	Фотопастки реалізовані для фіксації присутності та поведінки тварин у дикій природі
Гідролокатор бокового сканування	Ехолот Sidescan використано для ефективного створення зображення великих площ морського дна
Комп'ютерні обчислення	Комп'ютери використані для проведення екологічного статистичного аналізу великих наборів даних
УКХ відстеження	Радіоспостереження дозволило дистанційно стежити за дикими тваринами
Зображення Landsat	Отримані дані космічного дистанційного зондування
Послідовність Сангера	Перший метод секвентування ДНК, заснований на селективному включенні ланцюгової припинення дідеоксинуклеотидів ДНК-полімеразою під час ДНК-реплікації <i>in vitro</i>

<sup>51</sup> Futurecasting Ecological Research: The Rise of Technoecology B.M.ALLAN at al., Ecosphere. Emerging Technologies. 2018. 9(5). Pp.02163-02176.

<https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ecs2.2163>

Продовження табл. 5.2

Технологія	Опис
LiDAR	Використані дистанційні датчики, які вимірюють відстань, підсвічуючи ціль лазером і аналізуючи заломлене світло
Багатоспектральний Landsat	Аналіз супутникових знімків дозволив визначати типи поверхні (вода, рел'єф, рослинність)
Теплові біоресстратори	Хірургічні імплантовані прилади використані для вимірювання температури тіла тварин
GPS відстеження	Супутникове відстеження тварин у дикій природі з вищою частотою запису, більшою точністю та меншим втручанням дослідника у порівнянні з УКХ
Тематичний Landsat	Whisk broom-сканер працює на семи довжинах хвиль і здатний вимірювати глобальне потепління та зміну клімату
Пастки інфрачервоної камери	Здатні відчувати рух тварин у темряві та робити знімки без видимого спалаху
Багатопроменевий ехолот	Передача широких звукових імпульсів у формі вентилятора для встановлення повного профілю водяного стовпа
Відеопастки	Отримані відео замість нерухомих зображень, здатних проводити ідентифікацію тварин та досліджувати їх поведінку
<i>Сучасні</i>	
Акселерометри	Вимірює рух (прискорення) тварин, який не залежить від прийому з супутника (географічне положення)
3D LiDAR	Точне вимірювання тривимірної структури екосистеми
Автономні транспортні засоби	Безпілотні сенсорні платформи для автоматичного та віддаленого збору екологічних даних, в тому числі на місцевості, до якої важко та / або небезпечно отримати доступ людині
3D відстеження	Використання інерційних пристроїв вимірювання у поєднанні з даними GPS для відстеження руху тварин у режимі реального часу
IKARUS	Ініціатива Міжнародного співробітництва для досліджень тварин з використанням космосу (ICARUS) полягає у спостереженні за глобальним міграційним рухом дрібних тварин за допомогою супутникових систем
Генне секвентування нового покоління	Мільйони фрагментів ДНК з одного зразка можна дослідити одночасно
Телеметрія великої дальності та малої потужності	Низьковольтна передача даних на низькому струмі через декілька кілометрів
<i>Майбутні</i>	
Інтернет речей	Мережа пристроїв, які можуть взаємодіяти між собою, передаючи оброблені дані
Комп'ютери малої потужності	Невеликі комп'ютери з можливістю підключення масиву датчиків і, в деяких випадках, запуску алгоритмів (у т.ч. статистичної обробки даних)

Продовження табл. 5.2

Технологія	Опис
Теорія рою	Автономне, але скоординоване використання декількох безпілотних сенсорних платформ для проведення екологічних досліджень без участі людини
3D-друк	Побудова спеціального обладнання та побудова тваринних аналогів для дослідження поведінки
Картування молекулярного руху	Камери, які можуть відображати зображення на рівні субклітин без необхідності використання електронних мікроскопів
Біотичні ігри	Люди-гравці контролюють парамедії (інфузорії-туфельки) за допомогою процесів, схожих на відеогру, що може допомогти в розумінні поведінки мікроорганізмів
Біо-акумулятори	Електробіохімічні пристрої можуть працювати на таких сполуках, як крохмаль, дозволяючи датчикам та пристроям житися протягом тривалого періоду у віддалених місцях, де більше традиційні джерела енергії, такі як сонячна енергія, можуть бути ненадійними (наприклад, тропічні ліси)
Кінетичні батареї	Батареї, що заряджаються рухом, які здатні жити мікрокомп'ютери

Приклади напрямів використання інформаційних технологій в екології наведені у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 -- Напрями використання інформаційних технологій в екології

Технологія	Опис
<i>Сучасні та майбутні</i>	
Технології мережі Інтернет (Інтернет-технології)	Технології створення і підтримки інформаційних ресурсів в мережі Інтернет (сайтів, блогів, форумів, чатів, електронних бібліотек та енциклопедій), в основі яких лежать гіпертексти і сайти, що розміщуються в глобальній мережі Інтернет або в локальних мережах електронно-обчислювальних машин, а також інтернет-протоколи передачі даних TCP/IP (англ. Transmission Control Protocol/Internet Protocol)
Геоінформаційні технології	Технологічна основа створення географічних інформаційних систем, що дозволяють реалізувати їхні функціональні можливості та поєднати модельне зображення території (електронне відображення карт, схем, космо-, аерозображень земної поверхні) з інформацією табличного типу (статистичні дані, списки, економічні показники тощо), використовуючи географічно координовану інформацію



Продовження табл. 5.3

Технологія	Опис
Інтернет речей IoT	Концепція мережі, що складається із взаємозв'язаних фізичних пристроїв, які мають вбудовані датчики, а також програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати передачу і обмін даними між фізичним світом і комп'ютерними системами в автоматичному режимі, за допомогою використання стандартних протоколів зв'язку
Промисловий Інтернет речей IIoT (Індустрія 4.0)	Система об'єднаних комп'ютерних мереж і підключених до них промислових (виробничих) об'єктів з вбудованими датчиками і програмним забезпеченням для збору та обміну даними, з можливістю віддаленого контролю і управління в автоматизованому режимі без участі людини
Smart- і Grid-технології	До функцій розумних Smart-систем належать зондування, спрацьовування та управління з метою опису та аналізу ситуації та прийняття рішень на основі наявних даних у передбачуваний або адаптивній формі, з автономною роботою, заснованою на контролі замкнутого циклу, енергоефективності та можливостях роботи в мережі. Datagrid – географічно розподілена інфраструктура, яка надає колективний розподілений режим доступу до ресурсів та пов'язаних з ними послуг з будь-якої точки, незалежно від місця розміщення, в рамках глобально-розподілених організацій, які спільно використовують глобальні ресурси, бази даних, спеціалізоване програмне забезпечення
SCADA-технології	SCADA (англ. Supervisory Control And Data Acquisition) – програмний пакет, програмний або програмно-апаратний комплекс, призначений для розробки або забезпечення роботи в реальному часі систем збору, обробки, відображення та архівування інформації про об'єкт моніторингу або управління. SCADA може бути частиною автоматизованої системи керування технологічними процесами, автоматизованої системи комерційного обліку електричної енергії, системи екологічного моніторингу, наукового експерименту, автоматизації будівлі, тощо
Хмарні (Cloud-) технології	Технології розподіленої обробки цифрових даних, за допомогою яких комп'ютерні ресурси надаються інтернет-користувачеві, як онлайн-сервіс (програми запускаються і видають результати роботи в вікні web-браузера на локальному персональному комп'ютері)

Продовження табл. 5.3

Технологія	Опис
Великі дані (Big Data, Data Science)	Набори даних (структурованих або неструктурованих) великих розмірів, для яких традиційні способи та підходи до зберігання та обробки (засновані на рішеннях класу бізнес-аналітики та системах управління базами даних) не можуть бути застосовані. Наука про дані (англ. Data Science) – міждисциплінарна галузь про наукові методи, процеси і системи, які стосуються добування знань із структурованих та неструктурованих даних (іноді розглядається, як «четверта парадигма» науки, поруч з емпіричною, теоретичною та обчислювальною)
Машинне навчання та штучний інтелект	Машинне навчання (англ. Machine Learning) – підгалузь інформатики, сукупність методів в області штучного інтелекту, яка застосовує статистичні методи та прийоми, а також циклічні алгоритми для надання комп'ютерам здатності «навчатися» (ітераційно покращувати продуктивність у конкретних задачах), без застосування процедури безпосереднього програмування. Штучний інтелект (англ. Artificial intelligence) – розділ комп'ютерної лінгвістики та інформатики, предметом якого є формалізація проблем та завдань, які подібні до дій, що виконує людина, а також системи, що створені людиною і діють у фізичному або цифровому світі для виконання складної мети, які обирають найкращі дії на основі сприйняття свого середовища, інтерпретації зібраних структурованих або неструктурованих даних та обґрунтування знань, отриманих з цих даних

### 5.7 Введення в екологію кібербезпеки

Термін «Екологія кібербезпеки» вперше запропонований у роботі «До систематичного погляду на екологію кібербезпеки» у 2016 році<sup>52</sup>

Сучасні системи мережевої безпеки поступово демонструють їх обмеження. За оцінками виявляється лише близько 45% нових загроз . Тому життєво важливо знайти новий напрямок дослідження для підвищення ефективності протидії новим типам мережевих загроз та кіберзагроз. Наступні покоління систем кібербезпеки мають шукати шляхи вдосконалення в природі. Цей підхід застосовувався раніше (і був

<sup>52</sup> Towards a Systematic View on Cybersecurity Ecology, W.Mazurczyk, S.Drobniak, S.Moore, Springer International Publishing. Switzerland 2016 B. Akhgar and B. Brewster (eds.), Combatting Cybercrime and Cyberterrorism, Advanced Sciences and Technologies for Security Applications, DOI 10.1007/978-3-319-38930-1 2. <https://staff.elka.pw.edu.pl/~wmazurc1/art/Cybersecurity-Ecology.pdf>

пов'язаний, передусім, з використанням термінології), але втратив свою ефективність. Нові підходи мають спиратися на пошук системних закономірностей у природних та кіберфізичних системах та використання перехресних підходів у формуванні технологій безпеки і захисту.

Наявні комерційні антивірусні продукти здатні виявити лише до 45% нових загроз, з якими користувачі Інтернету стикаються щодня. Більше того, кількість та функціональність шкідливого програмного забезпечення, що використовується кіберзлочинцями, а також його вишуканість і складність постійно зростає. Як результат, середній проміжок часу між початковим ін'єкцією загрози (а точніше шкідливого програмного коду) в мережу і її відкриттям зростає з кожним роком і зараз вимірюється у місяцях та роках. До того ж сучасні системи кіберзахисту та кібероборони в основному є статичними і недостатньо пристосовані, щоб впоратися зі зміною засобів та тактики нападників.

Неможливість надання надійних безпечних комунікаційних послуг має величезний соціально-економічний вплив на світові ринки. Оскільки доступні та поширені засоби кіберзахисту еволюційно демонструють свої обмеження, необхідний пошук концептуально нових напрямків для подальших досліджень та розробок в галузі кібербезпеки. В якості такого концептуального напрямку пропонується використання екологічних підходів до систем кібербезпеки, виходячи з практичної можливості використання принципу параметричної схожості природних екологічних систем та штучних кіберекосистем.

У відповідності до такого підходу необхідно поточні та майбутні рішення з кібербезпеки проектувати, розробляти та застосовувати в спосіб, який повністю використовуватиме досвід, навчання та знання від розуміння шляхів та закономірностей біологічної еволюції. І навпаки, суспільство повинно використовувати моделі дослідження загроз в ході дослідження штучних інформаційних систем для підвищення рівня безпеки та захищеності людства від природних катаклізмів та загроз.

При детальному огляді виявляється, що процеси, характерні для найбільш відомих Інтернет-атак та використання захисних механізмів від шкідливого впливу, мають аналогічні сутності в природі. Наприклад, поширення деяких бур'янів у природних екосистемах значною мірою нагадує DDoS-атаки (розподілені відмови в обслуговуванні та отримання телекомунікаційних сервісів) на мережі зв'язку. Або ще однією потужною аналогією є «гонка озброєнь» (форма коеволюції, що передбачає існування

та еволюцію агресора, який розвиває свої наступальні механізми, та жертви – організатора контрзаходів вторгнення у вигляді оборонних бар'єрів). Сценарії алгоритмів систем захисту від шкідливого програмного забезпечення передбачають наявність постійних суперечок, протидії наступальним, та організацію захисних заходів для досягнення домінування на «супротивником». Імунна реакція організму в цілому відповідає реагуванню на проникнення шкідливого програмного забезпечення (комп'ютерного вірусу) до телекомунікаційної мережі або кінцевого пристрою.

Біоінспірована кібербезпека – не нова ідея. Перші покоління антивірусних систем вже використовували методи, засновані на аналізі сигнатур, а також методи обробки поліморфних фізичних загроз. Відтоді, однак, загрози набули значного розвитку та вдосконалення з урахуванням створеного «кіберімунітету» для систем першого покоління. Таким чином, й засоби кібербезпеки і кіберзахисту приречені до еволюції у відповідь на виклики, що витікають з еволюціонування засобів нападу.

Відповідні дослідження існуючих аналогій та закономірностей, розробку технологій забезпечення безпеки та захисту мають бути покладені в основу створення нового міждисциплінарного напрямку – екологія кібербезпеки (англ. *Ecology of Cybersecurity*). Розвиток цього напрямку дасть змогу та можливість проведення ретельного аналізу існуючих взаємозв'язків між суб'єктами в природних та кіберфізичних системах, а також порівняти закономірності взаємодії біологічних організмів з урахуванням досягнень у дослідженні цифрового та віртуального світу.

Однак використання принципу параметричної схожості має певні обмеження, у т.ч. за наступних причин:

- механізмів взаємодії і взаємозв'язки у природі дуже складні і поки що не зрозуміли достатньо, щоб правильно відобразити їх у віртуальному світі;
- у природі окремі організми, що знаходяться в межах виду, є одноразовими, і гинуть, що є критичним рушієм еволюційної адаптації, а для багатьох критично важливих для безпеки системи (критичних інфраструктур) будь-які втрати є неприйнятними;
- головною метою будь-якого організму є виживання та розмноження, тоді як головна мета технічної системи – виконання корисної функції в інтересах інших суб'єктів.

З урахуванням чисельних наробок(див., наприклад,[ 1-24 ]), право на існування отримує думка про те, що навіть використання спільної для сфер біологічних наук та ІКТ термінології може мати величезний вплив на спосіб мислення, зокрема, з метою вирішення проблем кібербезпеки.

## Література

1. Ярдон Д. Symantec розробляє нову атаку на кіберзлом. Уолл-стріт Дж.2014.<http://www.wsj.com/articles/SB1000142405270230341710457954214023.c.5850578>
2. Мазурчик В., Жешутко Е. Безпека - вічна війна: уроки з природи. *IEEE IT Проф.* 2015. 17 (1). С.16–22
3. Хофмайр С.А. Імунологічна модель розподіленого виявлення та її застосування до комп'ютерної безпеки. Доктор філософії дисертація, Університет Нью-Мексико . 1999. 540 с.
4. Форд Р., Буш М., Булатов А. Хижацтво та вартість тиражування: нові підходи до попередження зловмисного програмного забезпечення обчислення. *Security.* 2006. 25 (4). С. 257–264
5. Екологія шкідливе програмне забезпечення / Крандалл Дж. Р., Ландау Дж., Енсафі Р. та ін. *Матеріали семінару з нових парадигм безпеки (NSPW).* 2008, Озеро Тахо, Каліфорнія, США. С. 99–106
6. Пошук фокусу в розмитості прийому рухомої цілі / Охрві Х. та ін. *IEEE Secur. Прив.* 2014. 12 (2). С.16–26
7. де Кастро Л.Н., Фон Зубен Ф.Дж. Клональний алгоритм відбору з інженерною діяльністю додатків. *Конференція з генетичних та еволюційних обчислень (GECCO),* Лас-Вегас, США, 2000. С. 36–37
8. Грінсміт Дж. Алгоритм дендритних клітин. Д-р філософії дис... / Університет Нотінгашинка, Великобританія. 2007.
9. Харт Е., Тімміс Дж. Области застосування АІС: минуле, сьогодення та майбутнє. *Soft Computing.* 2008. 8. С.191–201
- 10.Захист на ходу: мураха на основі кіберзахисту / Фінк Джорджія та ін. *IEEE Security.* Прив.2014. 12 (2). С. 36–43
11. Хижак-здобич плотва до мережевої структури кіберпростору / Горман С.П. та ін. *У збірниках зимових національний симпозіум з інформаційних та комунікаційних технологій (WISICT 2004),* 2004. С. 1–6.

12. Kerphart J., White S. Вимірювання та моделювання поширеності комп'ютерних вірусів. *Матеріали симпозиуму комп'ютерного суспільства IEEE 1993 року з досліджень у Rity and Privacy*, Окленд, Каліфорнія, 24-25 травня, 1993. С. 2–14
13. Пастор-Саторрас Р., Веспіньяні А. Епідемія поширюється в безмасштабних мережах. 2001. 86. 320 с.
14. SkureMorph: протокол затуманення для мостів Tor. *Матеріали конференції ACM 2012 року з питань Computer and Communications Security (CCS 2012)*. 2012. С. 97–108
15. Рукстон Джорджія, Шеррат Тенесі. Швидкість, депутат: Уникнення нападу: Еволюційний Екологія крипсису, попереджувальні сигнали та мімікрія. Oxford University Press, Оксфорд. 2004. 350 р.
16. Зелінська Є., Мазурчик В. Щипйорський К. Тенденції в стеганографії. *Комун. ACM*. 2014. 57 (2). С.86–95 .
17. Stenseth N.C. Smith J.M. Коеволюція в екосистемах: еволюція червоної королеви або застій? *Еволюція*. 1984. 38 (4).с. 870–880 .
18. Молекулярна імітація людини гени шляху відповіді цитокінів та цитокінів за допомогою KSHV / Moore P.S. та ін. *Наука*. 1996. 274 (5293). С. 1739–1744
19. Zanker J.M. Камуфляж руху, викликаний смугами зебри. *Зоологія* . 2014. 117 (3). Рр.163–170.
20. *Essential Immunology* / Delves P.J. et al. *Wiley-Блеквелл*. 2011. р.34-47.
21. Руні Н., Мак-Кенн К.С. Інтеграція різноманітності, структури та стабільності харчової мережі. *Тенденції Ecol. Евол.* 2012. 27 (10). Рр. 40–46
22. Огляд: екологічні мережі - поза харчовими мережами / Ings T.C. та ін. *J. Anim. Екол.* 2009. 78 .1. С.253–269 .
23. Аксельрод Р., Гамільтон Вісконсин. Еволюція співпраці. *Наука*. 1981. 211 (4489). С.1390–1396 .
24. Ріоло Р.Л., Аксельрод Р. Еволюція співпраці без рецидиву вродливості. *Nature*. 2001. 414. С.441–443

Наукове електронне видання

**ГЕРАСИМОВ Олег Іванович**

**ХУДИНЦЕВ Микола Миколайович**

**КЛИМЕНКОВ Олег Анатолійович**

**НОВІТНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ  
В ЗАДАЧАХ ЗАХИСТУ  
СИСТЕМ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Монографія

**Видавець і виготовлювач**

Одеський державний екологічний університет

вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016

тел./факс: (0482) 32-67-35

E-mail: [info@odeku.edu.ua](mailto:info@odeku.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 5242 від 08.11.2016