

Відгук  
офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Андрія Ярославовича Співака  
*Структуризація та динамічні процеси в багаточастинкових  
мікро-механічних системах під впливом зовнішніх збурень,*  
подану на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук  
за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

В дисертації теоретично досліджені властивості і поведінка деяких гранульованих систем. Штучні і природні гранульовані матеріали присутні у доквіллі і побуті, використовуються в різних галузях виробництва від будівельних матеріалів та металургії до харчових продуктів. На сьогодні накопичено великий обсяг емпіричних даних про такі матеріали, проте опис їх здебільше носить феноменологічний характер. Гранульовані матеріали є тією областю, де фундаментальні проблеми тісно перетинаються з практичними застосуваннями. Тому розробка теоретичного опису на рівні, близькому до такого, який існує у фізичних науках, є актуальним завданням.

Гранульовані матеріали є механічними системами багатьох частинок з *контактною взаємодією*, яка зазвичай супроводжується нагріванням окремих гранул – специфічним каналом *дисипації енергії*. Ці особливості відрізняють їх від молекулярних систем і вимагають нових підходів для їхнього опису.

Для вивчення поведінки таких систем в роботі використовуються відносно прості моделі. Вони дозволяють отримати аналітичні розв'язки, і, таким чином, виявити характерні особливості тієї чи іншої гранульованої системи. До того ж вони дають можливість контролювати залежність розрахованих властивостей від параметрів взаємодії між частинками, тим самим спростивши порівняння передбачень з експериментальними даними. Те, що гранульовані матеріали із заданими параметрами відносно легко створюються, а їхня поведінка може вивчатися в лабораторіях візуальними методами, є додатковою мотивацією теоретичного дослідження таких систем.

Важливою особливістю дисертації є те, що в ній послідовно в центрі уваги опиняються різні характеристики гранульованих матеріалів, а саме геометричні, кінематичні, статистичні та динамічні. Вони вдало доповнюють одна одну і сприяють глибшому розумінню поведінки цих складних систем.

Оригінальна частина роботи починається з розгляду *геометричних* властивостей гранульованих систем. Показано, що випадкове розташування дисків в серіях експериментів, може описуватись певним *універсальним розподілом*. Параметри цього розподілу, а відповідно і його форма, визначаються щільністю пакування. *Універсальність* спостерігається і в поведінці розглянутих автором трансляційного та орієнтаційного параметрів впорядкування. Було показано подібність поведінки цих характеристик, розрахованих для доволі різних двовимірних систем, таких як тверді диски і порошинки у плазмі.

В наступному розділі розглянута *кінематика* гранул з непружними зіткненнями. Запропоновано дві одновимірні моделі: в одній частинки рухаються вертикально в полі тяжіння, в іншій - горизонтально. Непружні зіткнення призводять до дисипації енергії. Тому, якщо цікавитись незмінними типами рухів частинок, які можуть існувати в системі – в дисертації вони іменуються квазістаціонарними станами, – треба припустити, що частинки отримують енергію, наприклад, при зіткненні з стінкою. Проте, як з'ясував автор, для існування квазістаціонарних станів поповнення енергії не є достатньою умовою.

Він показав, що в моделі з вертикальним рухом в полі тяжіння три частинки можуть перебувати в квазістаціонарному стані якщо дисипація при непружних зіткненнях

не перевищує критичного значення. Послідовно розглянувши спочатку рух двох, потім трьох частинок автор переходить до задачі з багатьма частинками. Узагальнивши розрахунки він знайшов аналітичну залежність періоду рухів частинок від довільної їх кількості та коефіцієнта непружних втрат, а також описав інші характеристики системи. Його розрахунки узгоджуються з даними, отриманими в експериментальних спостереженнях за допомогою швидкісної камери. Не менш цікавим є результати вивчення горизонтальних рухів. Було знайдено за яких значень коефіцієнта непружних втрат виникає нестійкий режим, існують хаотичні та квазіперіодичні рухи. Аналітичні розрахунки в роботі доповнюються оцінками, зробленими за допомогою числових методів, а також прямим моделюванням. В цьому розділі отримано чимало корисних співвідношень, які можуть бути використані при експериментальних дослідженнях таких систем.

Попередній розділ, цікавий сам собою, також є вступом до *кінетичного* опису гранульованих систем. В третьому розділі сформульовано рівняння для еволюції параметра компактизації (ущільнення) гранульованого матеріалу. Компактизація означає зменшення сукупного об'єму, що його займають гранули, під впливом механічних збуджень.

На початку третього розділу сформульовано модель еволюції для системи однакових гранул. Потім її узагальнено для опису полідисперсних та багатокомпонентних систем, а також суміші доменів з різним ущільненням. Показано, що процес компактизації протікає неоднорідно, темп ущільнення змінюється, іноді раптово. Тому повна еволюція представлена зшивкою декількох розв'язків.

Цікавою є залежність параметра компактизації бінарної суміші від об'ємної частки дрібної компоненти, знайдена за допомогою підходу Кірквуда-Баффа. Вона показує, що ущільнення буде найбільшим при певному співвідношенні частки малих та великих гранул. Розрахована для різних розмірів частинок бінарної суміші ця залежність добре узгоджується з даними експериментів.

В четвертому розділі автор досліджує *динамічні* властивості неоднорідного ланцюжка Герца, а саме поширення в ньому збуджень. Ланцюжок утворено з кульок, між якими існує лише пружне відштовхування. При стисненні кульок виникає сила, яка нелінійно залежить від зміщення. Якщо кульки розташовані вертикально в гравітаційному полі, система крім того є неоднорідною. В лінеаризованій моделі збудження отримані у вигляді суперпозиції циліндричних хвиль. В континуальній границі знайдено розривні розв'язки у вигляді пакетів циліндричних хвиль. Справедливість аналітичних розрахунків автор підтвердив числовим моделюванням.

Для ланцюжка Герца знайдено також частковий розв'язок нелінійного рівняння, подібний до солітону Нестеренка, досліджено його властивості. Якщо одна з частинок ланцюжка буде помітно важчою за інші, то солітон відбиватиметься від неї. Розраховано амплітуду відбиття солітону від важкої частинки, отримані значення добре узгоджуються з існуючими експериментальними даними.

Таким чином, автор дисертації виконав комплексні дослідження гранульованих систем і отримав низку *нових і вагомих* результатів. Водночас до роботи є такі зауваження:


1. Не показано як в кінетичних моделях компактизації можна врахувати зовнішнє збудження системи.
2. Доцільно було би уточнити, що саме автор розуміє під температурою, яка фігурує в різних розділах дисертації.
3. Цікаво було би на якісному рівні мати обговорення впливу форми частинок на розглянуті властивості гранульованих матеріалів.
4. Формулювання умов, за яких можна нехтувати впливом дисипації на рух солітона в герцівських ланцюжках, було би корисним доповненням до відповідного розділу.

Зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи. Дисертація є закінченою роботою, виконаною самостійно на належному науковому рівні. Представлені результати є достовірними, вони отримані за допомогою апробованих методів, висновки та наукові положення чітко сформульовані та достатньо обґрунтовані. Зазначимо, що здобуті результати мають не тільки фундаментальну складову, але також можуть бути корисними для широкого кола технологічних застосувань.

Результати дисертації повністю опубліковані у 5 статтях у фахових наукових виданнях, одній монографії, а також матеріалах конференцій. Автореферат дисертації достатньо повно відображає її зміст, основні результати та висновки, ступінь їх наукової новизни.

Вважаю, що дисертація «Структуризація та динамічні процеси в багаточастинкових мікро-механічних системах під впливом зовнішніх збурень» задовольняє усі вимоги МОН України щодо кандидатських дисертацій, а її автор Андрій Ярославович Співак заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент



Засенко Володимир Іванович  
доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
заступник директора з наукової роботи  
Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України

12 квітня 2021 р.

*Підпис Засенка В.І. засвідчую*

Вчений секретар  
Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України



С.М. Перепелиця