

УДК 539.2

О.І.Герасимов

д.ф.-м.н.

ГРАНУЛЬОВАНА МАТЕРІЯ: СКЛАДНЕ В ПРОСТОМУ

Зроблено стислий огляд актуального напрямку сучасної фізики: теорії динамічних дисипативних систем у застосуванні до гранульованої матерії – стану речовини, який проявляє проміжні (у значенні типових ознак відомих агрегатних станів) властивості по відношенню до газів, рідин і твердих тіл. Описані основні напрями досліджень структури і динаміки гранульованих матеріалів в різних зовнішніх умовах, орієнтовані у напрямі розвитку загальної теорії і методів фізичного і чисельного моделювання таких складних фізичних систем. Обговорюються перспективи досліджень у фізиці гранульованої матерії у напрямі отримання матеріальних співвідношень, які дозволяють розвивати відповідні прикладні напрями на адекватній фізичній основі.

Ключові слова: *гранульована матерія, динамічні дисипативні системи, нерівноважність, складні системи.*



« ... О простий смертний, Твоїм вищим досягненням у відповідь на виклик, який своїми таємницями кидає тобі Природа буде скромна увага її Величі ... »

Людвіг Больцман.

Рис.1. Найскладніше знаходячись в центрі пустелі, це знайти пісок ...

Сьогодні дослідження гранульованих матеріалів (ГМ) складають вельми значну частину зусиль фізиків, як теоретиків, так і експериментаторів [1,2]. Серед причин, що привели до такого положення справ зазвичай вказується прояв ГМ незвичайних для типових агрегатних станів речовини властивостей. Наприклад, такі явища як обсіпання насипів, флюїдизація сухих ГМ під дією зовнішніх полів, насичення тиску, ефекти "арки" і "бразильського горіха" (спливання важких домішок при віброобробці), сегрегація (розділення сухих сумішей), і деякі інші виявляються тільки в ГМ і лише за спеціальних умов. Інша група причин стимулюючих інтерес до вивчення ГМ, широко представлених як в навколишньому середовищі так і в промисловому виробництві (пудра, пісок, цемент, графіт, вугілля, зерно, сипкі порошки і суміші в харчовій, будівельній і хімічній промисловості, металургії, ґрунт і багато інших, див. Рис.2), це виняткова важливість порозуміння їх фізичних властивостей для підвищення ефективності сучасного

промислового виробництва і можливість створення на їх основі принципово нових науковомних технологій. За деякими оцінками, більше 60% всього світового виробництва має справу з ГМ різної дисперсності: від мікропудр з розмірами гранул порядку декількох мікрон до геологічних структур з розмірами окремих кам'яних монолітів в декілька метрів і більш. Нарешті Всесвіт, з деякими припущеннями, також може бути віднесений до одного з прикладів розріджених гранульованих систем (газова фаза ГМ).

Абсолютна більшість унікальних властивостей гранульованої матерії спостерігалася достатньо давно. Тут можна згадати спостереження Фарадеєм нелінійних хвиль на поверхні піщаного шару, поміщеного в поле віброприскорювань, здійснене їм близько 160 років тому. Слідуює також вказати на знання римськими будівниками дивовижної міцності арокних конструкцій з каменя, а транспортувальниками - сипких і інших вантажів ефектів зменшення об'єму ГМ після струсів, спливання важких домішок і сегрегації (розділення) в сухих сумішах при віброструсах.

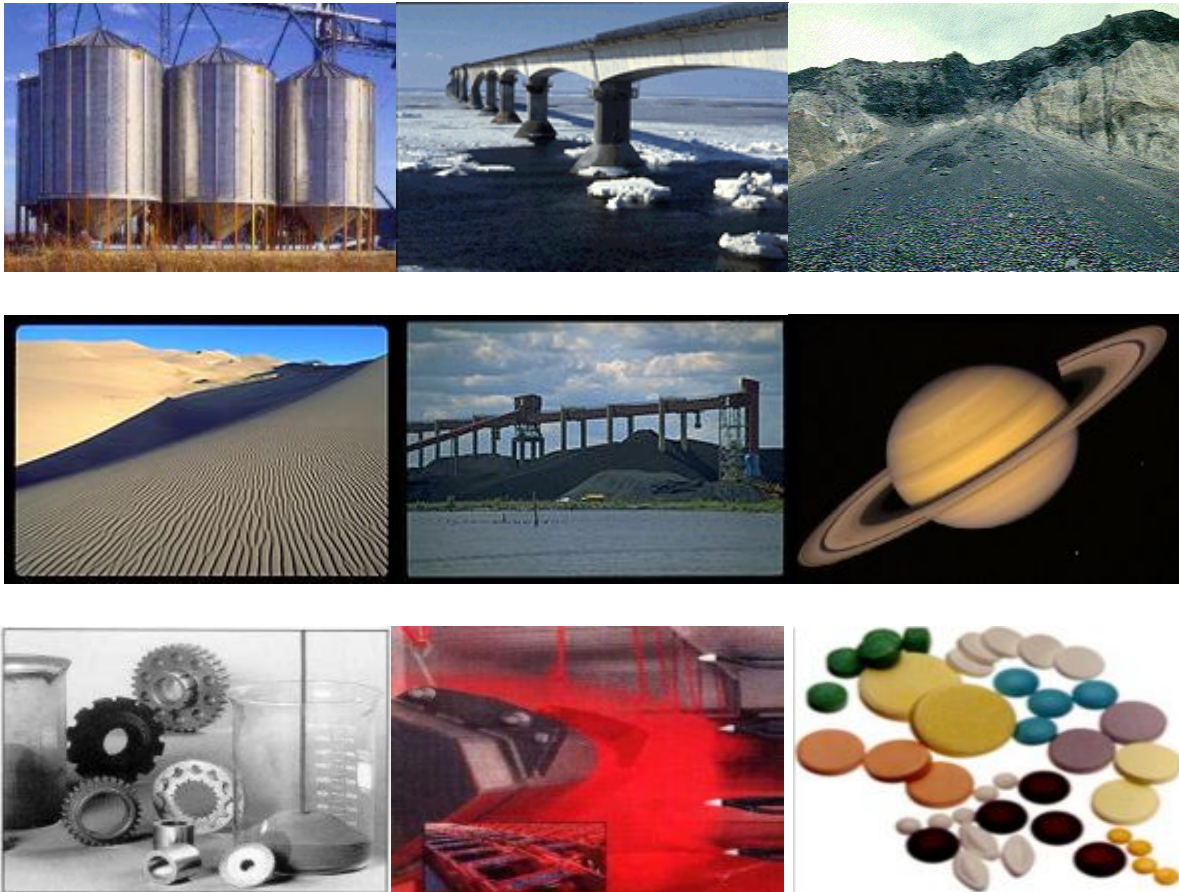


Рис.2. Приклади ГМ в навколишньому середовищі і промисловості.

Не дивлячись на наявність окремих досліджень, до сьогоднішніх днів існувало дуже слабе порозуміння фізичних законів, які лежать в основі спостережуваних в ГМ ефектів і явищ. Не існує також і загально визнаного теоретичного підходу до опису фізичних властивостей ГМ. Проте, відомий прогрес в їх вивченні досягнутий на шляху чисельного

моделювання окремих властивостей на основі фізичних моделей, залучених із статистичної фізики, фізики твердого тіла і інших розділів сучасної фізики [2].

Перед тим, як звернути увагу на дослідження, які робляться на шляху вивчення фізичних властивостей гранульованої матерії на кафедрі загальної і теоретичної фізики ОДЕКУ, доречно стисло нагадати їх окремі зовнішні ознаки. Гранульовані системи є детермінованими розподілами великого числа дискретних макроскопічних частинок, що взаємодіють лише за допомогою сил відштовхування. Таким чином зовнішня форма ГМ повністю задається завданням граничних умов (наприклад, формою об'єму включення) і дією гравітаційних сил. Істотним є також те, що діючі між гранулами в точці контакту сили відштовхування є за своєю природою дисипативними (навіть в стані спокою, діють сили герцевського статичного тертя). Матеріал таким чином є нерівноважною, нелінійною, дисипативною системою, динаміка якої, вимагає спеціального визначення і відноситься до числа актуальних і виключно складних задач сучасної фізики [3,4].

Внаслідок своєї фізичної складності, гранульовані матеріали, не дивлячись на уявну зовнішню простоту (ну що, насправді може бути простіше за пісок, який ми звично відчуваємо ступаючи по пляжу, або ложки розчинної кави і цукру до нього?), в цілому поведуться відмінно від газів, рідин і твердих тіл, хоча за деяких зовнішніх умов і можуть проявляти відомі ознаки вище перелічених типових агрегатних станів.

На Рис.3, наприклад, зображене "кипіння" гранульованого матеріалу, металевих сфер, які розташовані на горизонтальній віброуючій по вертикалі підкладці. Для того, щоб підтримувати такий стан, доводиться постійно підводити в систему енергію від зовнішнього джерела, наприклад шляхом струсу, здійснюваного шляхом подачі сигналу низької звукової частоти на підкладку.



Рис.3. «Кипіння» гранульованої системи у полі віброприскорення.

Необхідно пам'ятати, що будь-яка поведінка гранульованого матеріалу зовні схожа на поведінку рідини, тобто це насправді динамічне явище. Воно існує тільки вище за деякий граничний рівень інтенсивності надходження енергії в систему. Унаслідок непружності зіткнень, між гранулами, ГМ практично відразу переходить в стан спокою після того, як припиняється надходження енергії ззовні. Наприклад, окрема частинка, що впала на підкладку, підскакує на ній протягом якогось часу, тоді як такі ж гранули насипані в мішок, впавши разом з ним на підкладку практично відразу зупиняються. Приведений приклад, контрастної відмінності колективної поведінки великого числа гранул від індивідуальної (однієї гранули), демонструє роль непружних зіткнень між гранулами (дисипативних ефектів).

Прогнозування властивостей, що проявляються ГМ за різних зовнішніх умов може ґрунтуватися на моделюванні їх поведінки за допомогою теоретичних моделей і чисельних розрахунків з подальшою екстраполяцією одержаних результатів на реальні системи. Складність полягає у тому, що достатньо непросто здійснити послідовний розрахунок взаємодії навіть двох частинок, що мають складну форму і дисперсію. Спрощуючи цю задачу, приймають, що частинки мають форму сфер і на них діють лише сили тяжіння, статичного або динамічного тертя, в'язкопружності, пластичної деформації. Для розрахунку сил, які пов'язані із розсіянням енергії, необхідно знати параметри які характеризують матеріал гранул (такі, наприклад, як модуль Юнга). Відзначимо також, що більш менш реалістичне моделювання гранульованих систем зв'язане з урахуванням багатократних зіткнень великого числа частинок, і таким чином, відповідний чисельний експеримент вимагає значних ресурсів машинного часу.

Внаслідок дисипації енергії в гранульованій системі за рахунок герцевського тертя, вона знаходиться в нерівноважному стані навіть в умовах відсутності макроскопічного руху. Тому стандартні методи механіки або статистичної фізики не можуть бути безпосередньо застосовані для опису процесів які відбуваються в ГМ. Моделі засновані на уявленнях про суцільне середовище, також виглядають, в загальному випадку, неадекватними в застосуванні до ГМ, оскільки останні є істотно дискретними. Відзначимо тут можливість застосування гідродинамічного підходу до опису флюїдизованої поведінки гранульованих систем, яка спостерігається за спеціальних умов [4].

Вищевідзначені обставини перетворюють задачу загального теоретичного опису гранульованих матеріалів, одночасно в складну і інтригуючу проблему сучасної фізики, а також суміжних до неї і прикладних дисциплін. Взагалі кажучи, розв'язання цієї задачі повинне сприяти розширенню концептуальної бази фізики.

Нагадаємо, для порівняння, що у випадку скажемо теорії рідин, яка одержала закінчене формулювання завдяки роботам Боголюбова, Борна, Кірквуда, Гріна, Івона (ББКГІ), і багатьох інших дослідників, ми стикаємося з принципово іншою проблемою: яка полягає в пошуку адекватних математичних методів інтеграції спочатку коректно сформульованої задачі, у вигляді нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь ББКГІ, що зачіпляються (ланцюжки рівнянь). Відсутність загальної теорії динамічних дисипативних систем в гранульованих фазах робить актуальним застосування простих наочних моделей і чисельних методів для вивчення, інтерпретації і фізичного порозуміння процесів, які відбуваються в них за різних внутрішніх і зовнішніх умов.

Одним з підходів, альтернативним теоретичному моделюванню, є метод молекулярної динаміки (або дискретної комп'ютерної механіки, як його ще називають). Цей метод полягає в розрахунку руху кожної окремої частинки на основі формалізму механіки Ньютона. Сучасний чисельний експеримент включає також вельми ефективні методи Монте Карло і клітинних автоматів.

Дослідження різних фізичних моделей гранульованих систем, що знаходяться в полі тяжіння і віброприскорювань, методами чисельного моделювання, дозволяють відтворювати дані про динаміку їх поведінки.

Значну увагу привертають до себе дослідження процесів кластеризації в ГМ. Особливо інтригуючим виглядає виявлений в ході чисельного моделювання специфічний тип кластеризації, який одержав назву непружного колапсу [3], що полягає в тому що непружні втрати енергії в гранульованих матеріалах можуть приводити до режиму з нескінченним числом зіткнень за кінцевий проміжок часу. Сценарії поведінки гранульованого матеріалу в стані колапсу виявляються вельми багатими: від простого до

неоднорідного. Колапс в дисипативних системах приводить до появи спостережуваних, як безпосередньо в експериментах з ГМ, так при їх чисельному моделюванні, довгих, ниткоподібних, ущільнених розподілів частинок (а не до кластерів з сферичною симетрією в розподілі маси, як це можна було б чекати з погляду представлень теорії середнього поля (див. Рис.4)). Відзначимо, що симетрія спостережуваних ниткоподібних кластерів нагадує розподіл галактик у видимій частині Всесвіту.

Можливим застосуванням цього явища у промисловості представляється розробка технології сухого синтезу компонентів з прогнозованими фізико-механічними властивостями.

До ефектів суміжних в значенні важливості для практичних додатків відноситься і явище сегрегації (розділення) сухих бікомпонентних сумішей що відбувається під дією віброструсів.

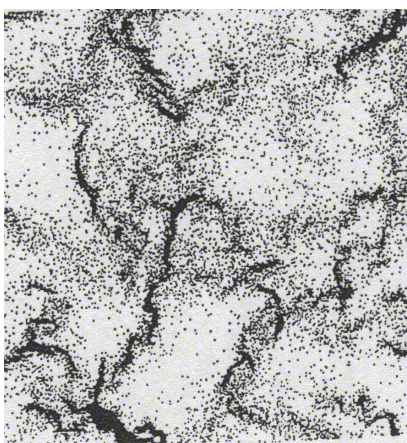


Рис.4. Кластеризація у двохвимірній гранульованій системі у полі виброприскорювань (чисельний експеримент [2])

Вивчення гранульованих матеріалів охоплює широкий перелік явищ, що відбуваються в масштабах від лабораторного до астрономічного, пояснення яких часто здається, кидає виклик канонічній мудрості фізики.

Зокрема, такі питання як: чи є явище непружного колапсу чимось великим, ніж красива теоретична концепція, або ж це математичний артефакт, чи має дане явище реальні експериментальні підтвердження, чи можливо встановити експериментально відмінність між непружним колапсом і непружною кластеризацією в загальному вигляді, і багато інших ще чекають свого прояснення.

Урахування приведених вище специфічних властивостей у динаміці гранульованої матерії може привести, зокрема, і до катастрофічних наслідків. Так вищеописане явище непружного колапсу, типове для гранульованої матерії, може бути причиною руйнування місткостей для зберігання ГМ наприклад - цементу і зерна, у вертикальних сховищах розташованих поблизу залізничних колій, що є джерелами низькочастотної вібрації (див. Рис.5).

Прогрес, що очікується найближчим часом у створенні адекватних методів опису властивостей гранульованих матеріалів має привести не тільки до підвищення ефективності їх застосування в технологічних процесах, але також і до поглиблення нашого розуміння багатьох ізоморфних явищ, які виявляються як в мікро- так і в макро-масштабі.



Рис.5. Непружний колапс у ємності зберігання цементу поблизу маневрової залізничної магістралі.

Деякі ідеї і методи, які розвиваються при дослідженні гранульованих матеріалів також можуть застосовуватися при вивченні широкого класу складних статистичних систем в яких істотну роль відіграють метастабільні стани. Це хімічно реагуючі системи, колоїдні розчини, і багато інших.

Серед першочергових задач, окрім концептуальних і гносеологічного характеру, направлених на порозуміння загальних фізичних принципів які лежать в основі спостережуваних явищ, є також розвиток фізичних моделей адекватних окремим властивостям, гранульованих матеріалів за різних внутрішніх і зовнішніх умов.

На шляху побудови таких простих, наочних моделей, що допускають чисельне, а у ряді випадків і аналітичне рішення, адекватних тим або іншим рисам, спостережуваних в гранульованих матеріалах ефектів на кафедрі запропоновані і розвиваються: моделі, що описують динамічні явища типу компактзації і сегрегації в гранульованих матеріалах, концептуальні підходи до вивчення нелінійної кінетики динамічних дисипативних систем, розробляються чисельні алгоритми які моделюють явища, що вивчаються, в ГМ.

На цьому шляху детально досліджені:

- неоднорідна кластеризація в одновимірних моделях частинок, що непружно стикаються; квазістаціонарні стани і нерівноважні переходи між ними; динамічна природа непружної кластеризації (колапсу) [5];

- повільні критичні моди в релаксації поля густини (компактзації) в кінетичному сценарії компактзації (сегрегації), заснованому на підході Ландау-Гинзбурга (Канна-Хильярда) до опису релаксації адекватно визначеного поблизу квазістаціонарних станів поля параметра порядку; порівняльна роль ефектів виключеного об'єму і непружних втрат[6,7,8,9];

- запропоновані низькорозмірні моделі для дослідження термалізації і динамічних фазових переходів в динамічних системах (узагальнені моделі Тоди, Фермі-Пасті-Улама і Дайсона).

Як би ні були важливі і цікаві загальні питання теорії нерівноважних дисипативних систем – ГМ, на шляху застосування положень теорії на практиці, у випадку реальних ГМ нас чекають проблеми, пов'язані з необхідністю обліку впливу параметрів, що характеризують геометрію об'єму, який включає ГМ, розмірність простору, адекватну умовам, в яких розглядається дана гранульована система і численні інші, що кінець кінцем

і визначає можливі шляхи їх прикладного використання. Фізичні моделі, що розвиваються, повинні таким чином враховувати специфічні внутрішні, початкові і зовнішні умови в яких розвивається динаміка і реалізується структура ГМ. У цьому напрямі і буде орієнтована подальша програма наших досліджень.

Література

1. *Jaeger H.M., Nagel S.R., Behringer R.P.* The physics of granular materials. //Rev.Mod.Phys.-1996.-68.- P.1259-1272.
2. *Duran J.* Sands, powders and grains.-New York: Springer-Verlag, 2000.-200p.
3. *Kadanoff L.* Built upon sand: theoretical ideas inspired by granular flows. // Rev.Mod.Phys.-1999.-71.-P.435-447.
4. *De Gennes P.G.* Granular matter: a tentative view. // Rev.Mod.Phys.-1999.-71,S.- P.374-385.
5. *Gerasimov O.I., Schram P.P.J.M.* Differential equation of state of a model system with a singular measure: application to granular materials in steady states. //Physica A.-2002.-312.- P.172-180.
6. *Gerasimov O.I., Schram P.P.J.M, Kitahara K.* Kinetics of granular segregation. //Ukr.Journ.Phys.-2003.-48, N8.-P.885-896.
7. *Gerasymov O.I., Khudyntsev N.N., Klymenkov O.A., Spivak A.Ya.* The kinetics of processes occurring in granular materials in the field of vibroaccelerations. //Ukr.Journ.Phys. -2005.-**50**, №6. -P.624-632.
8. *Gerasymov O.I., Khudyntsev N.N., Klymenkov O.A., Spivak A.Ya.* Kinetics of driven granular materials. //Bogolyubov Kyiv Conference: Modern Problems of Mathematics and Theoretical Physics (13-17 September 2004, Kyiv, Ukraine).
9. *Герасимов О.І., Клименков О.А., Снівак А.Я.* Кінетика гранульованих матеріалів у полі віброприскорювань. //Всеукраїнський з'їзд "Фізика в Україні". Тези доповідей. Україна, Одеса, 3-6 жовтня 2005р.-Одеса: Астропринт, 2005.- С.90

GRANULAR MATTER: COMPLEX IN SIMPLE

Gerasymov O.I.

We study the structure and dynamics of nonequilibrium, dissipative, nonlinear systems - granular materials which has a wide applications in science and industry. By means of physical modeling superimposed with the numerical simulations and in some cases with the direct physical experiments the phenomena of compaction, segregation, inelastic collapse and dynamic phase transitions are investigated. The influence of inelasticity of the intergrain collisions, as well as initial and boundary effects are outlined. The prospective research program for getting of a relevant material relations and for the description of dissipative kinetics for granular materials either being at rest or subjected into external agitation has been discussed.

Key words: granular matter, dynamic dissipative systems, nonequilibrium, complex systems.

ГРАНУЛИРОВАННАЯ МАТЕРИЯ: СЛОЖНОЕ В ПРОСТОМ

Герасимов О.И.

Проделан краткий обзор актуального направления современной физики: теории динамических диссипативных систем применительно к гранулированной материи – состоянию вещества, которое проявляет промежуточные свойства по сравнению с газами, жидкостями и твердыми телами. Описаны основные направления исследований структуры и динамики гранулированных материалов, ориентированных на развитие общей теории и методов физического и численного моделирования таких сложных систем. Обсуждаются перспективы исследований в физике гранулированной материи в направлении получения материальных соотношений, которые позволяют развивать соответствующие прикладные направления на адекватной физической основе.

Ключевые слова: гранулированная материя, динамические диссипативные системы, неравновесность, сложные системы.