

Володимир Білецький

*доктор технічних наук, професор,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»*

ПРОБЛЕМА ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ ГРАНУЛЯРНОГО ГАЗУ ДО СИПКИХ СЕРЕДОВИЩ

Volodymyr Biletskyi

*doctor of technical sciences, professor,
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*

THE PROBLEM OF APPLICATION OF THE GRANULAR GAS MODEL TO FLUID MEDIA

Вступ. Поштовхом до розвитку концепцій «гранулярного газу», «гранулярної рідини», «гранулярної температури» було порівняння Альберта Айнштейна молекули у розчині і твердої часточки суспензії: «...молекула у розчині відрізняється від твердої часточки у суспензії лише своїми розмірами» [1]. Розроблений рядом авторів математичний апарат опису сипких середовищ як «гранулярного газу» чи «гранулярної рідини» досить часто застосовується успішно [2]. Але чіткого і загальноприйнятого механізму ідентифікації, вибору сипких середовищ, які найбільш надаються до опису на основі «гранулярного газу», «гранулярної рідини» до сьогодні немає. Огляд і аналіз численних робіт з опису сипких середовищ на основі вказаних моделей справляє враження, що вони застосовуються умовно або «за прецедентом» до будь-яких сипучих об'єктів [3-8].

Мета цієї статті — привернення уваги наукового загалу до проблеми формулювання необхідних умов застосування моделей гранулярного газу та гранулярної рідини до сипких середовищ.

Ключові слова: сипке середовище, «гранулярний газ», «гранулярна рідина», «гранулярна температура».

Виклад основного матеріалу. У [9] виділяють наступні властивості гранулярних газів:

- (1) Середня довжина вільного пробігу зерен у потоці може бути макроскопічною і порівнянною з розмірами системи.
- (2) Типові грануляційні потоки є надзвуковими.
- (3) Швидкості зсуву зазвичай «великі».

(4) Поля напружень залежать від масштабу і величини деформуючих сил.

(5) Гранульовані гази є метастабільними (стан фази, з якого можна перейти в інший стан, подолавши енергетичний бар'єр) або нестационарними (властивість системи змінювати свої характеристики з часом) системами для існування яких у зваженому стані, як правило, необхідна «підкачка» енергії ззовні. Це забезпечує компенсацію втрат енергії при взаємодії частинок, гравітаційну взаємодію тощо.

Вибір і обґрунтування сипких середовищ, які найбільш надаються до опису на основі концепції «гранулярного газу» пропонується здійснювати поетапно.

Етап I. За вказаними вище властивостями (1)-(5) гранулярних газів *попередньо* обираються і аналізуються об'єкти, які можуть бути «гранулярними газами». Наприклад:

- псевдозріджений шар зернистого матеріалу, що отримується продуванням газу через несучу перфоровану поверхню, ежектування,
- пневмотранспорт і вдування вугільного пилу крупністю 0-100 мкм при його спалюванні на ТЕС у факелі,
- ежектування і транспортування сипучого матеріалу (звичай рудоносного піску) у струминних млинах,
- зернисте середовище планетарних кілець (система плоских концентричних утворень з пилу і льоду, що обертається навколо планети в екваторіальній площині. Кільця виявлені у всіх газових гігантів Сонячної системи).

Якщо за властивостями (1)-(5) об'єкт, що аналізується, схожий на гранулярний газ і його тверда фаза не є занадто крихкою чи пухкою (що спричинить швидку якісну зміну такого гранулярного об'єкта в процесі застосування) переходять до Етапу II.

Етап II. Застосування Теорії подібності для підтвердження подібності об'єктів «*натуральний газ – «передбачуваний гранулярний газ, обраний на етапі I».*

Як відомо, в основі теорії подібності лежать три теореми, які формулюються таким чином [10, 11]:

I теорема. Якщо фізичні процеси подібні один одному, однойменні критерії подібності цих процесів мають однакову величину.

II теорема. Рівняння, які описують фізичні процеси, можуть бути представлені у вигляді функціонального зв'язку між критеріями подібності.

III теорема. Для того щоб фізичні процеси були подібні один одному, необхідно і достатньо, щоб ці процеси були якісно однакові, а їхні однойменні визначальні критерії – чисельно однакові.

Основна проблема на цьому етапі – правильний вибір критерію подібності. При цьому можлива і модифікація відомого критерію, а також розробка нового критерію подібності, який може бути застосований до гранулярних середовищ.

У першому наближенні оберемо критерій Струхала або Число Струхала (Sh або St) — характеристичне число та критерій подібності нестационарних течій рідин та газів². Число Струхала є безрозмірною величиною і характеризує подібність перебігу гідродинамічних явищ у часі в нестационарних течіях [12].

Критерій Струхала $Sh = u\tau/\ell$ (або критерій гомохронності $Ho = u\tau/\ell$) може розглядатися за наявності ритмічної зміни процесу з періодом τ , як відношення цього періоду до відрізка часу, протягом якого елемент середовища, що рухається зі швидкістю u , пройде відстань, що дорівнює характерному розміру ℓ . У нашому випадку приймемо: ℓ – середня довжина вільного пробігу об'єктів (зерен у гранулярному газі, молекул у натуральному газі), τ – період між зіткненнями об'єктів.

Якщо Число Струхала для реального газу і досліджуваного об'єкту (передбачуваного в Етапі I гранулярного газу) чисельно однакове, вважаємо гіпотезу їх подібності підтвердженою.

Після підтвердження подібності натурального газу і гранулярного сипкого середовища можна обґрунтовано вивчати його властивості як «гранулярного газу», застосовувати напрацьований математичний апарат, зокрема, для визначення «гранулярної температури» для побудови кінетичних та гідродинамічних теорій даного зернистого середовища, його моделювання.

²Strouhal, V. (1878) "Ueber eine besondere Art der Tonerregung" (On an unusual sort of sound excitation), *Annalen der Physik und Chemie*, 3rd series, **5** (10) : 216–251.

Отже, аналіз досліджуваних сипких об'єктів і реального газу на основі *Теорії подібності*, дозволяє науково обґрунтувати можливість/неможливість їх вивчення із застосуванням концепції «гранулярного газу».

ЛІТЕРАТУРА

1. Einstein, Albert (1905). "Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen" URL: http://myweb.rz.uni-augsburg.de/~eckern/adp/history/einstein-papers/1905_17_549-560.pdf
2. Isaac Goldhirsch. Introduction to granular temperature. // Powder Technology Volume 182, Issue 2, 22 February 2008, Pages 130-136. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591007006109>
3. Povall, T. M., Govender, I., McBride, A. T. (2021). Dense granular flows in rotating drums: a computational investigation of constitutive equations. Powder Technology, 393, 238-249. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.051>
4. Jaeger, H. M., Nagel, S. R., Behringer, R. P. (1996). Granular solids, liquids, and gases. Reviews of modern physics, 68(4), 1259. doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.68.1259>
5. Forterre, Y., Pouliquen, O. (2008). Flows of dense granular media. Annu. Rev. Fluid Mech., 40, 1-24. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102142>
6. Jiang, Y., Liu, M. (2009). Granular solid hydrodynamics. Granular Matter, 11, 139-156. doi: <https://doi.org/10.1007/s10035-009-0137-3>
7. Campbell, C. S. (1990). Rapid granular flows. Annual Review of Fluid Mechanics, 22(1), 57-90. doi: <https://10.1146/annurev.fluid.22.1.57>
8. Campbell, C. S. (2006). Granular material flows – An overview. Powder Technology, 162(3), 208-229. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.12.008>
9. Isaac Goldhirsch. Granular Gases: Probing the Boundaries of Hydrodynamics // Part of the book series: Lecture Notes in Physics (LNP, volume 564). https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-44506-4_4
10. Emori, Richard I.; Schuring, Dieterich J. (2016). Scale models in engineering : fundamentals and applications (2nd ed.). Elsevier.
11. Білецький В.С., Смирнов В.О., Сергєєв П.В. Моделювання процесів переробки корисних копалин: Посібник / НТУ «Харківський політехнічний інститут», Львів: «Новий Світ- 2000», 2020. – 399 с.
12. White, Frank M. (1999). Fluid Mechanics (4th ed.). McGraw Hill. ISBN 978-0-07-116848-9.