

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОКИПІННЯ ДИСПЕРСНИХ СЕРЕДОВИЩ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ CFD СИСТЕМ

В роботі проведено оцінку можливостей використання сучасних CFD систем для розв'язання задач віброкипіння на прикладі системи ANSYS Fluent та співставлення результатів з результатами, отриманими в системі «Виброслой». Показано можливість використання CFD систем, що підтримують гідродинаміку двофазних потоків, для моделювання деяких задач віброкипіння. Проведено порівняльний аналіз результатів моделювання.

Ключові слова: віброкипіння, «Виброслой», CFD системи, гідродинаміка двофазних потоків.

S.A. RUSANOV, A.V. BILICHENKO, K.V. LUNYAKA  
Kherson National Technical University

### RESEARCH OF VIBRO BOILING PROCESS OF DISPERSE MATERIALS BY MODERN CFD SYSTEMS

*Abstract – The estimation of possibilities of use of modern CFD systems for vibro boiling problem solving on an example of system ANSYS Fluent and comparison of results received in system "Vibrosloy" has been made in the article. Possibility of use CFD of the systems bolstering hydrodynamics of two-phase flows for simulation of some problems of vibro boiling was displayed. The comparative assaying of results of simulation was carried out. We analyzed the quality of the solutions on typical test problems. One of such problems is the problem of a single toss of a layer of granular material. The results are presented as graphs of pressure changes, gas velocity and solids. Comparative analysis of the simulation results has been done in the article. Thus, the modelling of vibro boiling process is, on the one hand, possible through means of CFD systems that support the hydrodynamics of two-phase flows. But, on the other hand, it requires considerable efforts to adapt the standard models, which are incorporated in the system to the peculiarities of the vibro boiling process and test tasks with a detailed comparison with the existing results of researches.*

*Keywords: vibro boiling, "Vibrosloy", CFD systems, hydrodynamics of two-phase flows.*

#### Вступ

Введення вібраційних дій в технологічний процес як додатковий інтенсифікуючий чинник, або ж як самостійну частину технологічного процесу найчастіше має низку переваг. Вібраційні спонукання часто дозволяють зменшити кількість розхідних матеріалів, об'єднати декілька технологічних операцій, зменшити час технологічних операцій за рахунок збільшення коефіцієнтів тепло- і масообміну тощо. Вібраційні машини знайшли широке застосування в процесах грохочення, просіювання, транспортування, тонкого подрібнення та ін. Крім того, вібраційні машини та механізми використовують для зниження внутрішнього тертя в системі, що дозволяє проводити забивку паль і шпунтів, рівномірно випускати сипкий матеріал з бункерів і проводити автоматичне його дозування, перемішувати високов'язкі системи, а також збільшувати щільність упаковки дисперсних матеріалів у виробках [1].

Стан, що виникає при амплітудних значеннях прискорення вібрації, більших за прискорення вільного падіння, та характеризується розпушенням сипкого середовища і посиленою циркуляцією частинок, має назву віброкипіння [1]. Достатньо точної математичної моделі, яка описує структуру і поведінку віброкиплячого шару сипкого середовища у різних умовах, до цього часу не отримано. Серед існуючих моделей можна виділити такі: модель у вигляді матеріальної частинки, модель у вигляді матеріальної частинки з приведеними параметрами, моделі типу системи твердих тіл, двомасова інерційна модель, модель плоских шарів, модель суцільного середовища, віброреологічна модель сипкого середовища, спеціальні моделі сипкого середовища та ін. [2, 3]. Усі перераховані моделі мають досить вузький діапазон застосування, вихідні передумови, що закладаються до моделей, мають завідомо спрощений характер, що впливає на точність розрахунків.

#### Постановка завдання

Однією з останніх моделей віброкипіння є модель, що закладена в систему автоматизованого моделювання віброкиплячих шарів «Виброслой» [4], яка описує структуру та поведінку віброкиплячого шару як суцільного середовища з особливою реологією, в якому, за рахунок підведеної зовнішньої вібрації, поширюються нелінійні хвилі деформації з періодичними змінами щільного та розпушеного стану. Вказана модель та система «Виброслой» досить якісно моделюють гідродинаміку віброкипіння для задач течії у відкритих та закритих лотках з наявною або відсутньою продувкою шару матеріалу, та враховує адгезійні та когезійні явища, внутрішнє тертя та особливості взаємодії з лотком [5]. Однак система «Виброслой» поточної версії не надає можливості провести розрахунок задач обтікання сипким середовищем тіл різної конфігурації. Представляє окремий інтерес можливість моделювання процесу віброкипіння засобами відомих CFD систем, що підтримують гідродинаміку двофазних потоків. До таких систем відносяться продукти комплексу ANSYS, наприклад ANSYS Fluent, ANSYS CFX, крім того, такі продукти як Flow3D, Comsol Multiphysics, Autodesk Simulation CFD та ін.

#### Виклад основного матеріалу

В [6] проводиться аналіз якості рішень задач віброкипіння системою «Виброслой». Аналіз проводився на характерних тестових задачах. Однією з таких задач є задача одиничного підкидання шару сипкого матеріалу з урахуванням фільтрації газу через шар. Результати в [6] були представлені у вигляді графіків змін тисків, швидкостей газу і твердих частинок, порізаності і т. ін.

Користуючись комплексом компонентів ANSYS Fluent, змодельовано аналогічну задачу

поодинокого підкидання шару сипкого матеріалу. Математична модель, що використовується в ANSYS Fluent стосовно опису міжфазної взаємодії, близька до моделі, що закладена в програму «Виброслой» [6], насамперед, використання модифікованого рівняння Ергана для опису нелінійного фільтрування крізь шар матеріалу (в ANSYS Fluent встановлюється моделлю Gidasrow), при цьому в програмі «Виброслой» є пряма можливість завдання іншої моделі в загальному вигляді користувачем. Принципова різниця полягає в описанні рівнянь руху (ейлерова постановка для Fluent та лагранжева – для «Виброслой»). Формулювання рівнянь для внутрішніх напруг в твердій фазі також розрізняються. Fluent розраховує напружений стан сипкого матеріалу за кінетичними теоріями – розраховуються «тиск» твердої фази  $p_s$  та зсувна та об’ємна «в’язкості»  $\mu_{s,kin}$ , що залежать від параметру псевдотемператури  $\theta_s$  (granular temperature, [7, 8]) гранульованого середовища, яка пропорційна кінетичній енергії частинок:

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2 \rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s;$$

$$\mu_{s,kin} = \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96 \alpha_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[ 1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \alpha_s (1 + e_{ss}) \right]^2 \alpha_s;$$

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2},$$

де  $e_{ss}$  – коефіцієнт, що враховує пружність при зіткненнях частинок,  $g_{0,ss}$  – функція радіального розподілення функції контакту [8],  $\rho_s$  – об’ємна маса матеріалу частинок,  $kg/m^3$ ,  $d_s$  – діаметр частинок матеріалу.

Для програми «Виброслой» контактні напруги розраховуються з розривом (різно модульна пружність [9]) з кінетичними поправками при розпушеному стані, при цьому система рівнянь адаптована до характерних особливостей процесу віброкипіння [6].

Геометрична модель була розроблена засобами ANSYS Gambit. Зазначимо, що в геометричній моделі змодельована сітка, яка включала в себе дві області: зайняту газом (повітря) і сипким матеріалом (пісок) в початковий момент часу (рис. 1).

Для більш точних розрахунків на границі поділу фаз проводилося згущення сітки. Граничні умови задавали відсутність прослизання для газової фази і непроницність стінки для твердої складової. При вирішенні використовувалася багатозфазна модель Ейлера, взаємодію фаз було встановлено у відповідності з рівнянням Gidasrow [7]. Одиначне підкидання моделювалось завданням початкової швидкості руху частинок. Враховувалась стискальність газу, як рівняння стану використовувалось рівняння ідеального газу – розрахунки як для середовища, що не стискається.

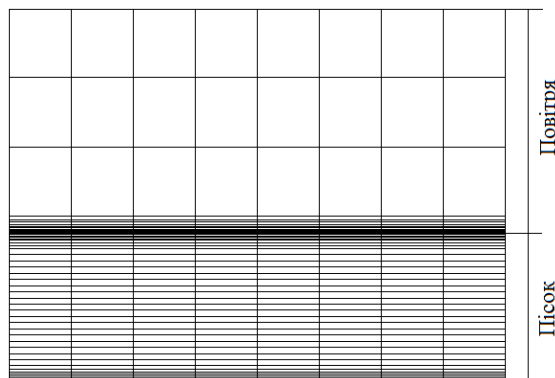


Рис. 1. Розрахункова сітка моделі

Отримані результати представлено на рис. 2–4.

Результати розрахунків цілком відповідають результатам, що отримані в програмі «Виброслой» [6]. Розбіжність в діапазоні часу до падіння матеріалу на несучу поверхню ніде не становить більш, ніж 15%. Вказані розбіжності в основному є наслідком програмного згладжування рішення на границі поділу фаз, що характерно для моделей з ейлеревим підходом до моделювання двофазних середовищ. Розрахунки для більш пролонгованого періоду часу виявляють деяку розбіжність для моменту після зіткнення матеріалу з несучою поверхнею (рис. 3, 4), що зв’язано, насамперед, з особливостями моделювання тензору внутрішніх напруг для твердої фази ANSYS Fluent.

**Висновки**

Таким чином, моделювання процесу віброкипіння засобами CFD систем, що підтримують гідродинаміку двофазних потоків  $\epsilon$ , з одного боку, можливим, але, з іншого боку, потребує значних зусиль для адаптування стандартних моделей, що закладені в системи до особливостей процесу віброкипіння та проведення тестових задач з детальним зіставленням з наявними результатами натурних досліджень.

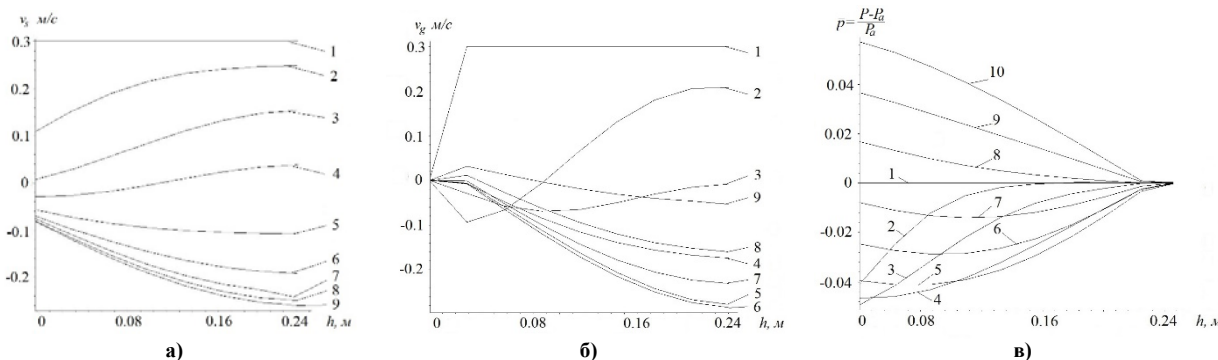


Рис. 2. Розподіл швидкостей твердих частинок по висоті шару (а), швидкостей газу по висоті шару (б) та тисків (в): 1 –  $t=0$  с; 2 –  $t=0,5 \cdot 10^{-2}$  с; 3 –  $t=1 \cdot 10^{-2}$  с; 4 –  $t=1,4 \cdot 10^{-2}$  с; 5 –  $t=1,9 \cdot 10^{-2}$  с; 6 –  $t=2,3 \cdot 10^{-2}$  с; 7 –  $t=2,8 \cdot 10^{-2}$  с; 8 –  $t=3,2 \cdot 10^{-2}$  с; 9 –  $t=3,7 \cdot 10^{-2}$  с

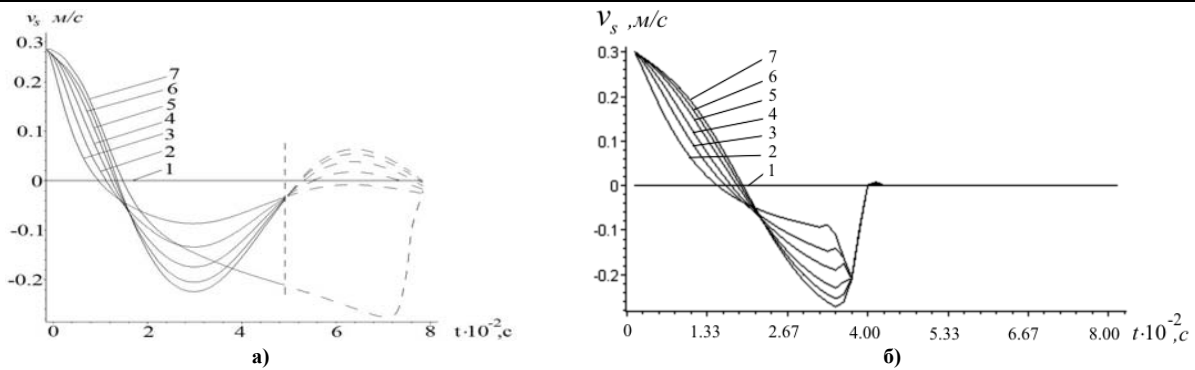


Рис. 3. Швидкість твердих частинок по висоті шару ANSYS Fluent (а), «Виброслой» (б):  
1 – 0 м; 2 – 0,04 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,12 м; 5 – 0,16 м; 6 – 0,20 м; 7 – 0,24 м

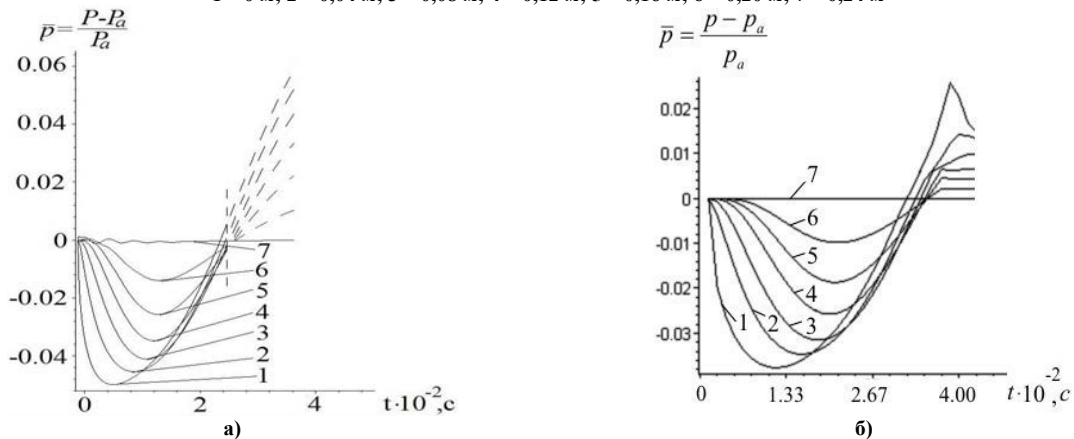


Рис. 4. Розподіл тиску по висоті шару ANSYS Fluent (а), «Виброслой» (б):  
1 – 0 м; 2 – 0,04 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,12 м; 5 – 0,16 м; 6 – 0,20 м; 7 – 0,24 м

Література

1. Членов В.А. Виброкипящий слой / В.А. Членов, Н.В. Михайлов. – М. : Наука, 1972. – 343 с.
2. Гончаревич И.Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И.Ф. Гончаревич, К.В. Фролов. – М. : Наука, 1981. – 320 с.
3. Блехман И.И. Вибрационная механика / Блехман И.И. – М. : Физматлит, 1994. – 400 с.
4. А. с. № 25051. Система автоматизованого моделювання гідродинаміки віброкиплячих шарів «Виброслой 1.0» / С.А.Русанов. – № 24961 ; заявл. 14.04.2008 ; опубл. 24.07.2008.
5. Русанов С.А. Математичне моделювання робочого процесу в апаратах з віброкиплячим шаром та розробка систем автоматизованого моделювання гідродинаміки киплячих шарів / С.А. Русанов, К.В. Луняка, О.І. Ключев, Г.М. Глухов // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2009. – № 1 (23). – С. 15–24.
6. Русанов С.А. Дослідження процесу віброкипіння дисперсних середовищ / С.А. Русанов, К.В. Луняка, П.В. Смагин // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – № 1. – С. 132–141.
7. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions. Boston: Academic Press Inc., 1994. 211 p.
8. ANSYS Fluent 12.0: Theory Guide, 2009, 816 p.
9. Протождяконов И.О. Гидромеханика псевдооживленного слоя / И.О. Протождяконов, Ю.Г. Чесноков. – Л. : Химия, 1982. – 264 с.

References

1. Chlenov V.A., Mihaylov N.V. Vibrokipyaschiy sloy. – M.: Nauka, 1972 – 343 s.
2. Goncharevich I.F., Frolov K.V. Teoriya vibratsionnoy tehniky i tehnologii. – M.:Nauka, 1981. – 320 s.
3. Blehman I.I. Vibratsionnaya mehanika. – M.: Fizmatlit, 1994. – 400 s.
4. Sistema avtomatizovanogo modelyuvannya gidrodinamiki vibrokipylyachih shariv “Vibrosloy 1.0”. Svidotstvo pro reestratsiyu avtorskogo prava na tvir №25051. /S.A.Rusanov. №24961: Zayavl. 14.04.2008; Opubl. 24.07.2008.
5. Rusanov S.A., Lunyaka K.V., KlyuEv O.I., Gluhov G.M. Matematichne modelyuvannya robochogo protsesu v aparatah z vibrokipylyachim sharom ta rozrobka sistem avtomatizovanogo modelyuvannya gidrodinamiki kipylyachih shariv. // Avtomatika. Avtomatizatsiya. Elektrotehnicheskie kompleksi i sistemi. – 2009. - № 1 (23).- S. 15-24.
6. Rusanov S.A., Lunyaka K.V., Smagin P.V. Dosildzhennya protsesu vibrokipinnya dispersnih seredovisch // Visnik Hmel'nitskogo natsionalnogo universitetu. – 2007. - №1. - S.132-141.
7. Gidaspow, D. Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions. - Boston: Academic Press Inc., – 1994. – 211 r.
8. ANSYS Fluent 12.0: Theory Guide, 2009, 816 r.
9. Protodyakonov I.O., Chesnokov Yu.G. Gidromehanika psevdoozhizhennogo sloya. – L.: Himiya, 1982. – 264 s.

Рецензія/Peer review : 24.11.2014 р.

Надрукована/Printed :29.11.2014 р.  
Рецензент: к. т. н., доц. О.І. Ключев