

УДК 621.21

Корнієнко Ярослав Микитович

*доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри
машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Корниенко Ярослав Никитич

*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
машин и аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

Kornienko Yaroslav

*PhD, Professor, Head of Department of
Machines and Apparatus of Chemical and Petroleum Industries
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*

Сачок Роман Володимирович

*кандидат технічних наук, старший викладач кафедри
машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Сачок Роман Владимирович

*кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры
машин и аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

Sachok Roman

*PhD, Senior Lecturer of Department of
Machines and Apparatus of Chemical and Petroleum Industries
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*

Гайдай Сергій Сергійович

*кандидат технічних наук, асистент кафедри
машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Гайдай Сергей Сергеевич

*кандидат технических наук, ассистент кафедры
машин и аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

Haidai Sergiy

*PhD, Assistant of Department of
Machines and Apparatus of Chemical and Petroleum Industries
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*

**МОДЕЛЮВАННЯ НЕОДНОРІДНОГО ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ В
АВТОКОЛИВАЛЬНОМУ РЕЖИМІ
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОГО ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ В
АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ
MODELING OF INHOMOGENEOUS FLUIDIZING IN THE AUTO-
OSCILLATING MODE**

Анотація. Проведено моделювання неоднорідного псевдозрідження мінерально-гумінових композитів в автоколивальному режимі.

Ключові слова: псевдозрідження, автоколивальний режим, добрива, кінетика.

Аннотация. Проведено моделирование неоднородного псевдооживления минерально-гуминовых композитов в автоколебательном режиме.

Ключевые слова: псевдооживление, автоколебательный режим, удобрения, кинетика.

Summary. The simulation of heterogeneous fluidization of mineral-humic composites in auto-oscillating mode is carried out.

Key words: fluidization, auto-oscillating mode, fertilizers, kinetics.

Авторами [1] було розроблено спосіб виготовлення мінерально-гумінових добрив шляхом зневоднення та гранулювання складних гетерогенних систем у псевдозрідженому шарі зі змінним співвідношенням мінеральних, поживних та розкислюючих компонентів, яке визначається агроекологічними умовами регіону їх застосування.

Стійка кінетика процесу гранулоутворення визначається взаємодією газового теплоносія – зріджувального агенту із шаром зернистого матеріалу [5; 7], при введенні рідкої фази всередину псевдозрідженого шару.

До основних вимог гідродинаміки при проведенні таких процесів слід віднести активне об’ємне переміщення зернистого матеріалу, що супроводжується повним залученням всієї поверхні зернистого матеріалу до процесів перенесення, який знаходиться в апараті. В останні роки з метою підвищення ефективності тепло-масообмінних процесів [8-11]

почали застосовувати механічні пульсатори при обробці терmostійких матеріалів, що сприяє інтенсифікації процесу.

Метою статті є математичне моделювання неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі.

Рівняння збереження імпульсу для неоднорідного псевдозрідженого шару без врахування його стиснення може бути записане у вигляді [1]:

$$\frac{d^2 H(\tau_1)}{d\tau_1^2} = \frac{\Delta P(\tau)}{\rho(1-\varepsilon(\tau))H(\tau)} - g \quad (1)$$

де H – загальна висота шару, $\Delta P(\tau)$ – загальний перепад тиску.

Відповідно до фізичної моделі, експериментально було визначено динаміку зміни порозності, яка апроксимується виразом [14]:

$$\varepsilon(\tau_i) = \varepsilon_{\min} + A + A \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot \tau_i\right), \quad (2)$$

де $A = (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})/2$, дає збіжність з дослідними даними [14] із середньою похибкою 1%.

Авторами [14] з урахуванням положень [15] запропоновано визначення $\Delta P(\tau)$ за виразами:

$$\Delta P_{\text{загальний}}(\tau_i) = \Delta P_{\text{імпульсу}}(\tau_i) + \Delta P_{\text{тертя}}(\tau_i) + \Delta P_{\text{гідростатичний}}(\tau_i), \quad (3)$$

$$\Delta P_{\text{імпульсу}}(\tau_i) = \frac{1}{2} \left[\rho_{\text{т}} \cdot \varepsilon_{\text{т(II;III)}}(\tau_i) \cdot w_{\text{т}}(\tau_i)^2 + \rho_{\text{г}} \cdot \varepsilon_{\text{г(II;III)}}(\tau_i) \cdot w_{\text{г}}(\tau_i)^2 \right], \quad (4)$$

де $\varepsilon_{\text{т(II;III)}}$, $\varepsilon_{\text{г(II;III)}}$ – середня порозність твердої та газової фаз; $w_{\text{т}}$, $w_{\text{г}}$ – миттєві значення швидкості твердих частинок та газу відповідно, м/с.

Миттєве значення приведеної швидкості газової фази визначалось з урахуванням порозності шару в висхідній зоні камери гранулятора [16]:

$$\text{Re}(\tau_i) = \frac{\text{Ar} \cdot \varepsilon_{\text{г(III)}}(\tau_i)^{4,75}}{18 \cdot 0,61 \sqrt{\text{Ar} \cdot \varepsilon_{\text{г(III)}}(\tau_i)^{4,75}}} \quad (5)$$

$$w_{\text{г}}(\tau_i) = \frac{\text{Re}(\tau_i) \cdot \nu}{d_e} \quad (6)$$

Усереднена миттєва швидкість твердих частинок у перших двох стадіях циклу, м/с:

$$w_T(\tau_i) = \frac{\Delta \varepsilon_{\Gamma(II;III)}(\tau_i)}{\Delta \tau} = \frac{\varepsilon_{\Gamma(II;III)}(\tau_{i-t}) - \varepsilon_{\Gamma(II;III)}(\tau_i)}{\tau_i - \tau_{i-t}} \quad (7)$$

Гідравлічний опір на подолання сил тертя між твердими частинками і тертя при русі газу розраховується за запропонованим авторами [15; 17-23] виразом:

$$\sum \Delta P_{\text{тертя}}(\tau_i) = \Delta P_{\text{тертя газу}}(\tau_i) + \Delta P_{\text{тертя тв.част.}}(\tau_i) \quad (8)$$

$$\Delta P_{\text{тертя газу}}(\tau_i) = 2 \cdot f_{\Gamma} \cdot \varepsilon_{\Gamma(II;III)}(\tau_i) \cdot \rho_{\Gamma} \cdot w_{\Gamma}^2(\tau_i) \cdot H_0 \cdot \frac{1}{D_{a(\text{пр})}} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_T(\tau_i) = \\ = 5,7 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{D_{a(\text{пр})}} \cdot \varepsilon_{\Gamma(II;III)}(\tau_i) \cdot \rho_{\Gamma} \cdot w_{\Gamma}(\tau_i) \cdot \theta(\tau_i) \cdot H_0 \cdot \sqrt{g \cdot D_{a(\text{пр})}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\theta(\tau_i) = \frac{\varepsilon_{T(II;III)}(\tau_i) \cdot \rho_T \cdot w_T(\tau_i)}{\varepsilon_{\Gamma(II;III)}(\tau_i) \cdot \rho_{\Gamma} \cdot w_{\Gamma}(\tau_i)} \quad (11)$$

$$\Delta P_{\text{гідростатичний}}(\tau_i) = \frac{M_{\text{зал}}(\tau_i) \cdot g}{A \cdot B \cdot K_a} \quad (12)$$

$$M_{\text{зал}}(\tau_i) = V_{\text{ш0}} \cdot (1 - \varepsilon_{\Gamma(\text{сер})}(\tau_i)) \cdot \rho_T \quad (13)$$

де $M_{\text{зал}}$ – залишкова маса шару, кг; $K_a=0,85$ – коефіцієнт, пов'язаний із розширенням камери; $D_{a(\text{пр})}=4AB/(2(A+B))$ – приведений діаметр апарата.

Гідростатичний тиск визначається з урахуванням положень фізичної моделі:

$$\Delta P_{\text{max}} = \Delta P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{бульб.}} = \rho_T \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot g \cdot (H_0 + d_{b(\text{max})}) K_a \quad (14)$$

де $\Delta P_{\text{ном}}=H_0 \cdot (1-\varepsilon_0) \cdot \rho_{\Gamma} \cdot g \cdot K_a$ – номінальне значення перепаду тиску в шарі, де K_a – коефіцієнт, що враховує форму камери гранулятора; d_{max} – максимально можливий розмір газової бульбашки у момент відриву від газових факелів, який розраховується за виразом [14], причому швидкість росту газової бульбашки також визначається динамікою зміни порозності шару в II та III зонах камери гранулятора:

$$w_{\sigma}(\tau_i) = \frac{\Delta \varepsilon_{r(II;III)}}{\Delta \tau} = \frac{\varepsilon_{r(II;III)}(\tau_{i-t}) - \varepsilon_{r(II;III)}(\tau_i)}{\tau_i - \tau_{i-t}} \quad (15)$$

Цілком очевидним є те, що утворення газової бульбашки на межі II і III зон призводить до адекватного витіснення шару зернистого матеріалу за межі початкового об'єму нерухомого шару. Індекс перемішування:

$$j_{\Delta P} = \frac{\Delta P_{\max} - \Delta P_{\text{ном}}}{\Delta P_{\text{ном}}} = \frac{\Delta P_{\text{бульб.}}}{\Delta P_{\text{ном}}} = \frac{d_{\sigma(\max)}}{H_0}$$

У відповідності з вищевикладеним, для крайніх меж реалізації раціонального гідродинамічного режиму роботи ($K_w=1,25$ та $K_w=1,43$) було розраховано значення порозності та гідравлічного опору шару за формулами (3-15), після чого методом Ейлера рівняння (2) було розв'язано числовими методами з інтервалом часу $\Delta \tau=0,04$ с.

Для розв'язку рівняння (2) було створено програму у середовищі Delphi.

Експериментально визначену динаміку зміни середньої порозності шару, відповідно до фізичної моделі для різних значень K_w наведено на рисунку 1. Проведені апроксимації залежностей $\varepsilon_{r(\text{сер})}=f(\tau)$, $\varepsilon_{II}=f(\tau)$ та $\varepsilon_{III}=f(\tau)$ з точністю $\sigma>0,9$ описують експериментальні дані, при цьому значення порозності шару в зоні I становило $\varepsilon_I=0,4$, що підтверджує положення фізичної моделі.

Таким чином, на початку раціонального гідродинамічного режиму псевдозрідження (при $K_w=1,25$) значення порозності шару по зонах камери гранулятора змінюється у межах: $\varepsilon_{II}=1,15\varepsilon_0 \div 1,75\varepsilon_0$ та $\varepsilon_{III}=1,23\varepsilon_0 \div 1,95\varepsilon_0$. Раціональний гідродинамічний режим псевдозрідження завершується при $K_w=1,43$, при цьому значення порозності змінюється у межах: $\varepsilon_{II}=1,18\varepsilon_0 \div 1,86\varepsilon_0$ та $\varepsilon_{III}=1,38\varepsilon_0 \div 2,02\varepsilon_0$.

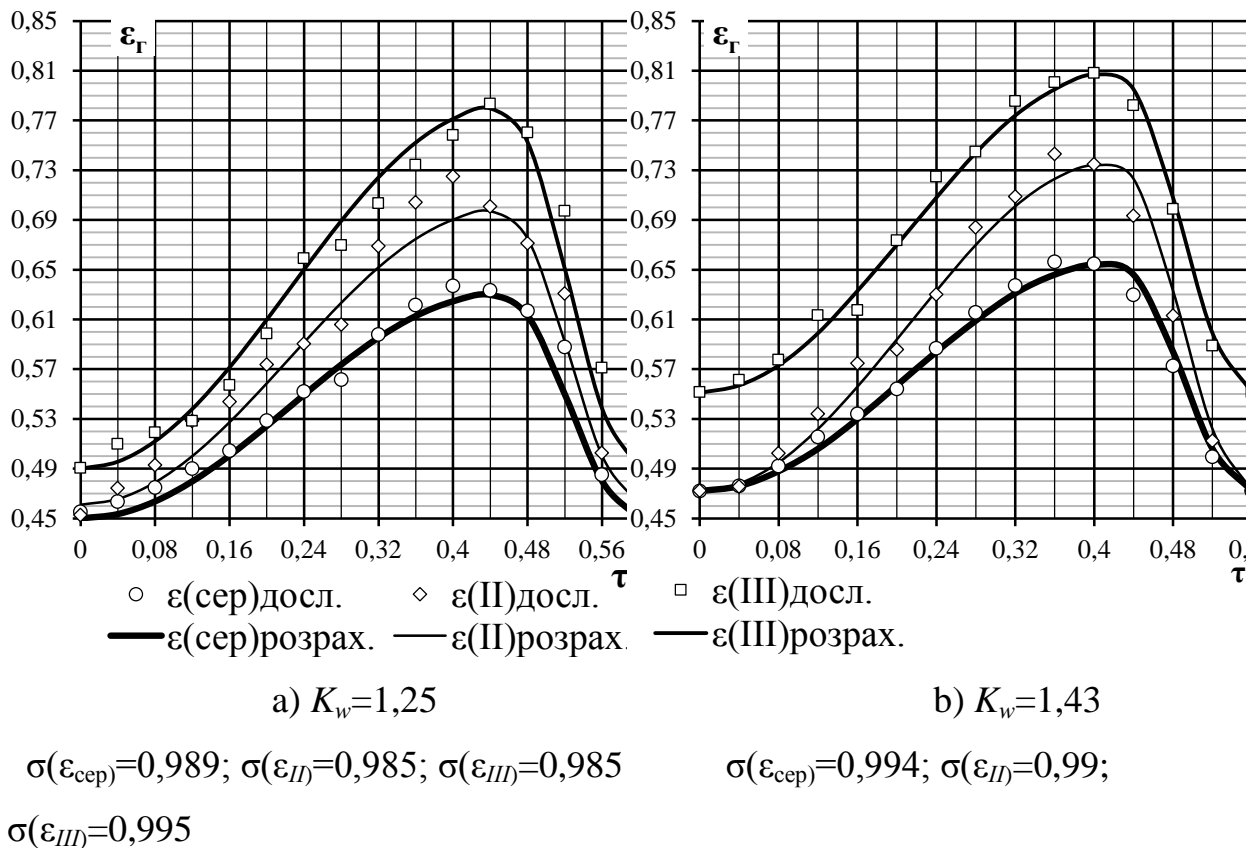


Рис. 1. Динаміка зміни порозності шару – $\varepsilon_r=f(\tau)$

Таким чином, майже двократне збільшення потенційної енергії, у порівнянні зі станом рівноваги, спричинює інтенсивне повернення системи до початкового стану.

Аналіз результатів експериментальних досліджень показує, що зі збільшенням числа псевдозрідження загальна тривалість циклу зменшується від $\tau_{ц}=0,6$ с (при $K_w=1,25$) до $\tau_{ц}=0,56$ с (при $K_w=1,43$) із адекватним збільшенням частоти пульсацій f від 1,67 до 1,79 Гц.

Таким чином, неоднорідне псевдозрідження об'єму шару зернистого матеріалу при даній конфігурації камери апарата переходить у автоколивальний режим при значенні індексу перемішування $0,65 \geq j_{\Delta P} \geq 0,43$.

Висновки. Запропонована математична модель неоднорідного псевдозрідження адекватно описує струменево-пульсаційний режим

псевдозрідження та дає змогу визначити умови переходу в автоколивальний режим.

Література

1. Korniyenko Y., Hayday S., Semenenko D., Martynyuk O. (2013), Hranul'ovani azotno-kal'tsiyevo-huminovi tverdi kompozyty, modyfikovani bentonitom. Protses oderzhannya, Khimichna promyslovist' Ukrayiny, 5. Pp. 46-51.
2. Kornienko Y., Gaidai S., Martyniuk O. (2014), Improved process to obtain granular humic fertilizers. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/11943>
3. Kornienko Y., Sememenko D., Martyniuk O. Gaidai S., (2015) The process of composite liquid systems dehydration in a fluidized bed using mechanical dispersant. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/11944>
4. Kornienko Y., Sachok R. (2008), Complex assessment of the efficiency of granulation process in dispersed systems, Chemistry & chemical technology. 2 (№3). Pp. 217–220.
5. Kornienko Y., Sachok R., Rayda V., Tsepka O. (2009), Mathematical Modeling of Continuous Formation Of Multilayer Humic-Mineral Solid Composites, Chemistry & chemical technology. 3 (№4). Pp. 335–338.
6. Kornienko Y., Haidai S., Liubeka A., Martynyuk O. (2016), Kinetic laws of the process of obtaining complex humic-organic-mineral fertilizers in the fluidized bed granulator, Ukrainian Food Journal. V. 5 (№1). Pp. 144–154.
7. Kornienko Y., Haidai S., Liubeka A., Martynyuk O. (2016), Modelling of pulsating mode of fluidization when obtaining organic-mineral fertilizers, Ukrainian Food Journal. V.5 (№4). Pp. 781–794.
8. Tuponogov V., Rizhkov A., Baskakov A., Obozhin O. (2008), Relaxation auto-oscillations in a fluidized bed, Thermophysics and Aeromechanics. V.15 (№4). Pp. 603–616.

9. Stroh A., Alobaid F., Hasenzahl M.T., Hilz J., Ströhle J., Epple B. (2015), Comparison of three different CFD methods for dense fluidized beds and validation by a cold flow experiment, *Particuology*. 862. Pp. 245-259.
10. Tianyu Wang, Tianqi Tang, Yurong He, Hongliang Yi (2016), Analysis of particle behaviors using a region-dependent method in a jetting fluidized bed, *Chemical Engineering Journal*. 283. Pp. 127-140.
11. Sasic S., Leener B., Johnsson F. (2005), Fluctuation and waves in fluidized bed systems: the influence of the air-supply system, *Powder Technology*. 153. Pp.176-195.
12. Buevich J., Minaev G. (1984), *Jet fluidization*, Chemistry, Moscow.
13. Kornienko Y., Haidai S., Semenenko D., Martynyuk O. (2013), Hranul'ovani azotno-kal'tsiyevu-huminovi tverdi kompozyty, modyfikovani bentonitom. *Protses oderzhannya, Khimichna promyslovist' Ukrayiny*. 5. Pp. 46–51.
14. Kornienko Y., Haidai S. (2017), Non-uniform fluidization in auto-oscillating mode, *Ukrainian Food Journal*. V.6 (№3). Pp. 562–576.
15. Gidaspow D. (1994), *Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions with applications*, United Kingdom Edition, London.
16. Todes O., Tsitovich O. (1981) *Apparati s kipiashchim zernistim sloem*. Chemistry. P. 296.
17. Gidaspow D., Lin C., Seo Y. C. (1983). Fluidization in two-dimensional beds with a jet. Experimental porosity distributions, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 22. Pp. 187-193.
18. Gidaspow D., Arastoopour H., Abbasi E. (2017) *Computational Transport Phenomena of Fluid-Particle Systems*, Springer International Publishing. P. 192.
19. Gidaspow D., Chalermsoonsuwan B., Piumsomboon P. (2014) In-depth system parameters of transition flow pattern between turbulent and fast

- fluidization regimes in high solid particle density circulating fluidized bed reactor, Powder Technology. V. 253. Pp. 522-536.
20. Taghipour F., Ellis N., Wong C. (2005) Experimental and computational study of gas–solid fluidized bed hydrodynamics. Chemical Engineering Science. 60. Pp. 6857-6867.
21. Min J., Drake J., Heindel T., Fox R. (2010) Experimental Validation of CFD Simulations of a Lab-Scale Fluidized-Bed Reactor with and Without Side-Gas Injection, AIChE Journal “Particle Technology and Fluidization”. V. 56 (№6). Pp. 1434-1446.
22. Wang Q., Zhang K., Gu H. (2011) CFD simulation of pressure fluctuation characteristics in the gas-solid fluidized bed: Comparisons with experiments, Petroleum Science. V. 8 (№2). Pp. 211-218.
23. Inder R., Brink A., Hupa M. (2013) CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification, Applied Thermal Engineering. V. 52 (№2). Pp. 585-614.