

УДК 697.325

Дослідження псевдозрідження полідисперсних бінарних систем у топках киплячого шару

О. Ф. Редько¹, Ю. О. Півненко²

¹д.т.н., проф. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, redko.af@gmail.com, ORCID 0000-0002-9375-1262

²інженер, ООО «ПРОМОЛЮКС СЕРВІС», м. Вишневе, Україна, pivnenko.yura@gmail.com, ORCID 0000-0002-6675-2649

Анотація. У даній роботі проаналізовані особливості псевдозрідження бінарних систем – деревні відходи – інертний матеріал. Проведені експериментальні й теоретичні дослідження гідродинаміки полідисперсних матеріалів. Виявлений вплив вмісту деревних відходів у шарі. У результаті обробки експериментальних даних отримано рівняння регресії для швидкості початку псевдозрідження за різного вмісту деревних відходів у киплячому шарі. Дослідження виявили, що збільшення вмісту відходів деревини в киплячому шарі погіршує якість шару. Це призводить до значного збільшення швидкості початку псевдозрідження. При малій швидкості можливе поступове осідання великих часток. Для усунення проблеми слід збільшити швидкість зріджуваного агента. Визначено вміст деревного палива в киплячому шарі для стабілізації роботи топкового пристрою. Цей вміст має бути в межах 20...30 %.

Ключові слова: псевдозрідження, деревне паливо, топка, бінарна система, полідисперсність, швидкість початку псевдозрідження, інертний матеріал.

Вступ. Топки з киплячим шаром характеризуються своєю універсальністю щодо параметрів палива. Вони виявляються найбільш придатними для спалювання палива різної вологості та фракційного складу [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Зазвичай у топках киплячого шару псевдозрідження твердого палива відбувається в шарі інертного матеріалу, що утворює киплячий шар. При цьому більшу частину шару складає саме інертний матеріал. Збільшення витрати палива призводить до зміни гідравлічної структури киплячого шару, оскільки вміст часток палива в киплячому шарі також зростає.

Актуальність дослідження. Зменшення споживання природного газу шляхом його заміщення іншими видами палива є актуальною проблемою в Україні. Водночас, достовірні дані щодо гідравлічних режимів псевдозрідження деревного палива відсутні, що у свою чергу ускладнює впровадження високотехнологічного методу спалювання твердого палива в псевдозрідженому шарі.

Останні дослідження та публікації. Основні дослідження гідродинаміки псевдозріджених систем проводилися у 60-х – 80-х роках минулого століття [1, 2, 3, 4]. Сучасні публікації доповнюють дані дослідження. Так, наприклад, у [7] приведені результати зрідження вугільного палива. У [8] досліджувались гідравлічні режими зрідження паливних гранул. У [9] показано вплив розміру часток на ефективність теплообміну. Однак, в топках киплячого шару найчастіше зустрічається система інертний матеріал –

паливо. Досягнення стабільного зрідження подібних систем набагато складніше за однорідні системи сипучого матеріалу.

У [10] наведені результати впровадження енергоблоку електричною потужністю 210 МВт, що оснащений котлоагрегатом з киплячим шаром, що циркулює, продуктивністю 670 т пари/год. Як основне паливо використовувався антрацит. Дані, наведені в роботі, свідчать про ефективність застосування технології киплячого шару в енергетиці. Проте, гідродинамічні режими псевдозрідження антрацитів і деревного палива суттєво відрізняються. Деревина легкий матеріал, тому вибір оптимальних гідравлічних режимів суттєво впливає на ефективність спалювання палива.

Формування цілей статті. Експериментально і теоретично дослідити вплив вмісту деревного палива в шарі інертного матеріалу на гідродинамічні параметри киплячого шару.

Основна частина. Дослідження гідродинаміки киплячого шару деревних відходів проводилися на експериментальній установці (рис. 1), яка складається з камери розмірами 200×300 мм заввишки 1000 мм зі встановленою в її нижній частині повітророзподільною решіткою.

На фронтальній частині камери передбачене оглядове скло, призначене для спостереження процесу псевдозрідження. Перепад тиску в шарі вимірювався за допомогою рідинного U-подібного манометра. Перша точка заміру тиску знаходиться над повітророзподільною реші-

ткою, друга – над киплячим шаром.

Повітря до експериментальної установки подавалося за допомогою вентилятора ВВД-5. Регулювання витрати здійснювалося за допомогою шиберної засувки, яка встановлена на всмоктувальному патрубку вентилятора. Швидкість повітря на виході з установки вимірювала-ся крильчатим анемометром АСО-3.

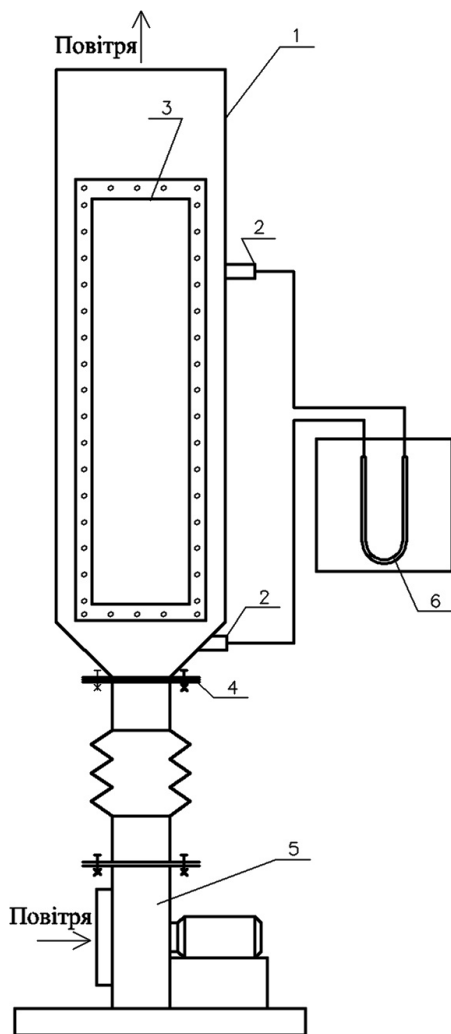


Рис. 1. Схема експериментальної установки з киплячим шаром

1 – корпус; 2 – штуцери; 3 – оглядове скло; 4 – повітророзподільна решітка; 5 – вентилятор; 6 – U-подібний манометр

Даний анемометр призначений для вимірювання швидкості повітря до 5 м/с. Для кожного положення шиберної засувки заміри проводилися не менше ніж п'ять разів.

Нижче приведені основні характеристики зріджуваних матеріалів (табл. 1). Кожен вид деревного палива досліджувався в експериментальній установці в шарі піску у наступних пропорціях (деревні відходи/пісок) – 50/50, 30/70, 20/80.

Нижче наведені результати експериментів з

псевдозрідження різних видів деревних відходів в шарі інертного матеріалу (рис. 2).

Псевдозрідження починається коли швидкість зріджуваного агенту досягає критичного значення, а вага шару врівноважується з перепадом тиску. У стані псевдозрідження перепад тиску не залежить швидкості повітря.

Таблиця 1

Характеристики матеріалів

Тип матеріалу	Насипна густина, кг/м ³	Еквівалентний діаметр часток, мм
Пісок	1500	0,3
Тирса	200	3
Щепа	320	4,7
Гранули	640	5,51

Експериментальні дані порівнювались з розрахунками.

Розрахунок перепаду тиску проводиться за формулою:

$$\Delta P = \rho_n g H, \text{ Па} \quad (1)$$

де H – висота шару, м; ρ_n – насипна густина матеріалу, кг/м³.

Тодес застосував рівняння, одержане Ерганом для турбулентного і ламінарного режимів:

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \frac{(1-\varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} \frac{\mu_z w}{d^2} + 1,75 \frac{1-\varepsilon_0}{\varepsilon_0^3} \frac{\rho_z w^2}{d}, \text{ Па/м}, \quad (2)$$

де ε_0 – порозність шару; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с; w – швидкість повітря, м/с; d – діаметр часток, м; ρ_z – густина повітря, кг/м.

З цього рівняння можна отримати безрозмірне рівняння розрахунку швидкості початку псевдозрідження [4]:

$$Re = \frac{Ar}{150 \frac{1-\varepsilon_0}{\varepsilon_0^3} + \left(\frac{1,75}{\varepsilon_0^3} Ar \right)^{0,5}}, \quad (3)$$

де Re – критерій Рейнольдса; Ar – критерій Архімеда.

Нижче наведені графіки порівняння експериментальних і розрахункових значень перепаду тиску і швидкості початку псевдозрідження (рис. 3, 4).

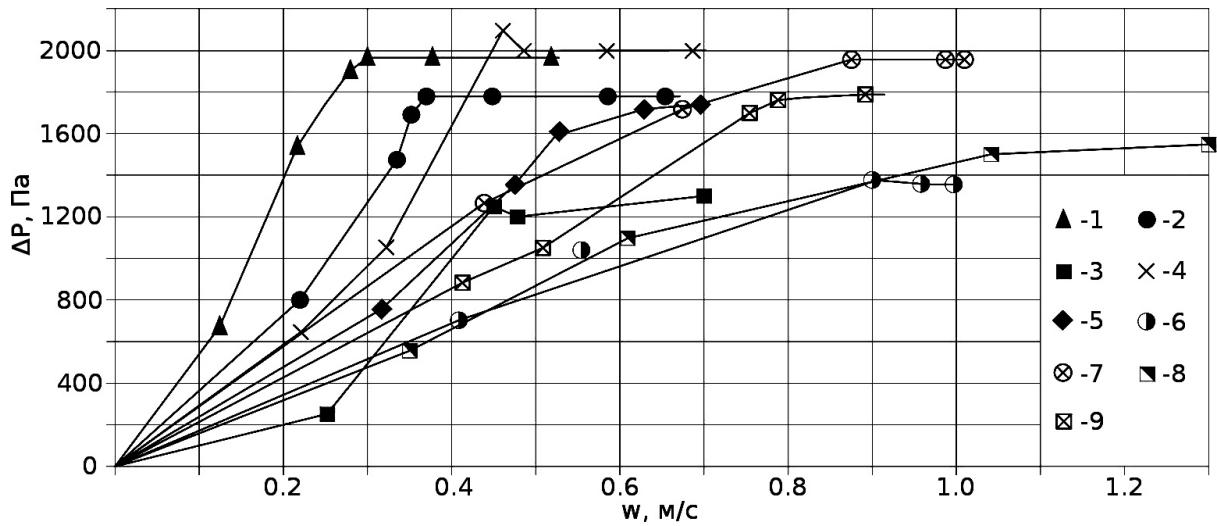


Рис. 2. Залежність перепаду тиску від швидкості повітря в системі деревні відходи/пісок.
1,2, 3 – вміст тирси в шарі піску 20, 30, 50 % відповідно; 4, 5, 6 – вміст щепи в шарі піску 20, 30, 50 % відповідно;
7, 8, 9 – вміст деревних гранул в шарі піску 20, 30, 50 % відповідно.

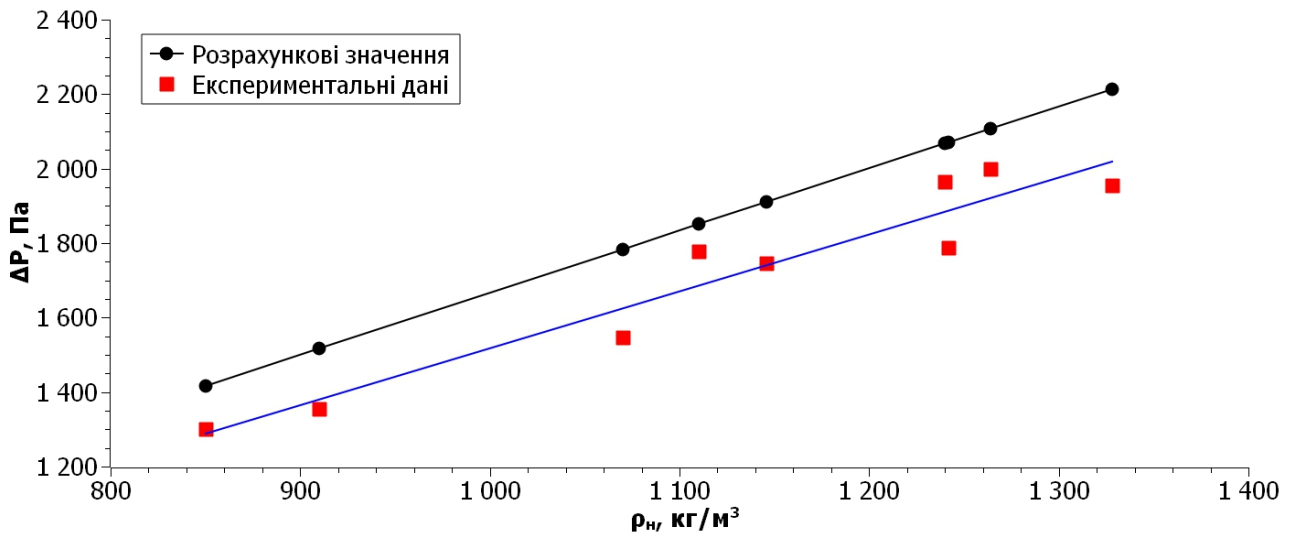


Рис. 3. Залежність перепаду тиску в киплячому шарі від насипної густини бінарної системи

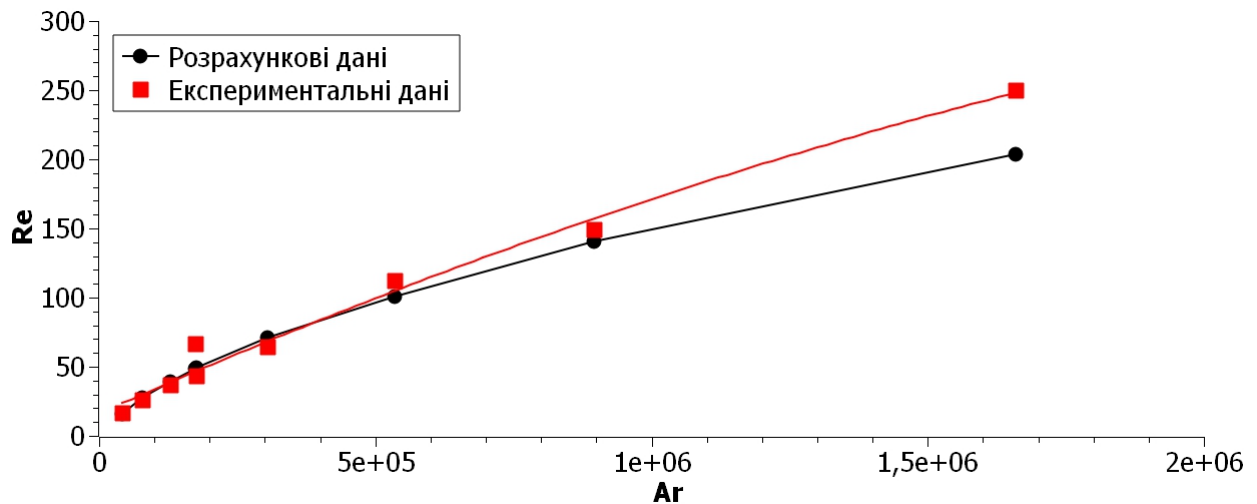


Рис. 4. Залежність швидкості початку псевдозрідження від числа Архімеда

Теоретичний перепад тиску дещо більший за експериментальний. Однак, на практиці, як правило перепад тиску на 10...15 % менший за розрахунковий [3], особливо якщо це – полідисперсні системи [5, 6]. У даному випадку розбіжність експериментальних і розрахункових значень не перевищує 15 %. Зі збільшенням числа Архімеда спостерігається відхилення експериментальних даних від теоретичних. Це пояснюється тим, що збільшення вмісту крупних часток у шарі негативно позначається на однорідності псевдозрідження. Для повного псевдозрідження крупних часток необхідно було збільшувати швидкість зріджуваного агенту. Для топок це має критичне значення, оскільки не можна допускати тих випадків, коли паливо не знаходиться в стані псевдозрідження, оскільки така ситуація може призвести до шлакування топки.

Проводилося математичне планування повного факторного експерименту [11]. Як

параметр оптимізації була обрана швидкість повітря, яка відповідає початку псевдозрідження бінарної системи.

Як фактори обрані вміст деревного палива в киплячому шарі піску (n , %) і безрозмірна величина відношення числа Архімеда деревного палива до числа Архімеда піску $Ar' = Ar_d / Ar_n$.

У результаті обробки експериментальних даних отримане рівняння регресії:

$$w = 0,153 + 0,0004 Ar' + 0,0032 n - 8,75340 \cdot 10^{-8} + 3,6287 \cdot 10^{-6} Ar' n + 3,8889 \cdot 10^{-5} n^2. \quad (4)$$

Побудовано тривимірний графік залежності (4) швидкості початку псевдозрідження від вмісту деревних відходів в шарі піску та відношення критеріїв Архімеда деревних відходів та інертного матеріалу (рис. 5).

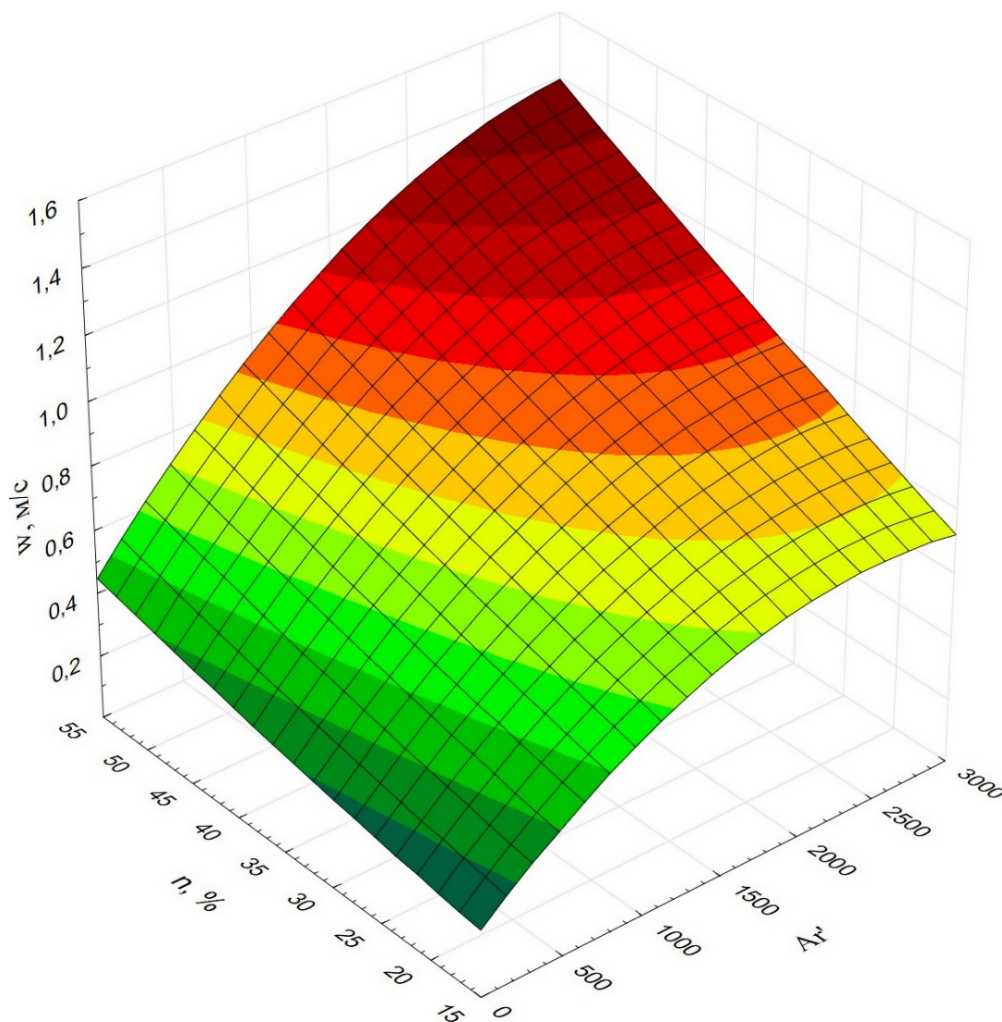


Рис. 5. Вплив вмісту деревних відходів в киплячому шарі піску на швидкість початку псевдозрідження

Висновки. У результаті проведених досліджень були проаналізовані гідравлічні режими псевдозрідження бінарних систем. Збільшення вмісту деревних відходів у киплячому шарі призводить до погіршення якості киплячого шару, значно збільшується швидкість початку псевдозрідження. При малій швидкості може спостерігатися поступове переміщення вниз крупних часток, однак збільшення швидкості зріджуваного агенту дозволяє усунути дану

проблему. Підтримання вмісту деревного палива в киплячому шарі в межах від 20 до 30 % дозволяє забезпечити стабільний стан роботи топкового пристрою.

Перспективи подальших досліджень. Дані дослідження проводилися на «холодній» моделі, експериментальні дослідження в режимі спалювання дозволять отримати результати, максимально наближені до реальних умов.

Література.

1. Баскаков А. П. Котлы и топки с кипящим слоем / А. П. Баскаков, В. В. Манцев, И. В. Располов. – Москва: Энергоатомиздат, 1996. – 352 с.
2. Баскаков А. П. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник / А. П. Баскаков. – Ленинград: Химия, 1986. – 352с.
3. Гельперин Н. И. Основы техники псевдоожижения / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша. – Москва: Химия, 1967 – 664 с.
4. Бородуля В. А. Сжигание твердого топлива в псевдоожиженном слое / В. А. Бородуля, Л. М. Виноградов. – Минск: Наука и техника, 1980. – 192 с.
5. Редько А. Экспериментальные и теоретические исследования гидродинамики кипящего слоя древесного топлива / А. Редько, Ю. Пивненко // MOTROL, 2014. – Lublin: Polish Academy of sciences – vol. 17, no 6. – pp. 27-34.
6. Дэвидсон Дж. Псевдоожижение: Пер. с англ. / Дж. Дэвидсон, Д. Харрисон. – Москва: Химия, 1974. – 725 с.
7. Семенов С. А. Модельные исследования гидродинамики аппаратов с кипящим слоем / С. А. Семенов // Системы. Методы. Технологии / Братский государственный университет. – 2009. – № 2. – с. 82-86.
8. Михалев А. В. Гидродинамика псевдоожиженного слоя и ее влияние на эффективность и экологичность процесса совместного сжигания антрацитового штыба и биогранул: дис. ... канд. техн. наук.: 05.17.08, 05.14.04: защит. 27.04.2007 / Михалев Александр Валерьевич; Тамбовский государственный технический университет - Тамбов, 2007. – 110 с.
9. Редько А. Ф. Теплообмен в топках с кипящим слоем: Учеб. Пособие / А. Ф. Редько. – Киев: УМК ВО, 1990. – 72 с.
10. Майстренко А. Ю. Опыт внедрения технологии сжигания твердого топлива в циркулирующем кипящем слое в энергетику Украины / А. Ю. Майстренко, А. И. Топал, А. В. Лаварько // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. - Днепропетровск: НППВ "Триакон". – 2012. – Вып. 3(11). – с. 84-90.
11. Возняк О. Т. Планування експерименту та оптимізація вирішень у системах теплогазопостачання та вентиляції / О. Т. Возняк. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012 – 164 с.

References

1. Baskakov A. P., Mancev V. V., Raspolov I. V. *Kotly i topki s kipiashchim sloem*. Energoatomizdat, 1996.
2. Baskakov A. P. *Raschety apparatov kipiashchego sloia*. Himiia, 1986.
3. Gelperin N. I., Ainshtein V. G., Kvasha V. B. *Osnovy tekhniki psevdoozhizheniia*. Himiia, 1967.
4. Borodulia V. A., Vinogradov L. M. *Szhiganie tverdogo topliva v psevdoozhizhennom sloe*. Nauka i tekhnika, 1980.
5. Redko A., Pivnenko Y. "Eksperimentalnye i teoreticheskie issledovaniia gidrodinamiki kipiashchego sloya drevesnogo topliva". *MOTROL*, vol. 17, no 6, 2014, pp. 27-34.
6. Davidson J., Harrison D. *Psevdoozhizhenie*. Himiia, 1974.
7. Semenov S. A. "Modelnye issledovaniia gidrodinamiki apparatov s kipyashchim sloem", *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, no. 2, 2009, pp. 82-86.
8. Mihalev A. V. *Gidrodinamika psevdoozhizhennogo sloia i ee vliianie na effektivnost i ekologichnost protsessa sovmestnogo szhiganiia antratsitovogo shtyba i biogranul*. Diss. Tambovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007.
9. Redko A. F. *Teploobmen v topkakh s kipiashchim sloem*, Kiev, UMK VO, 1990.
10. Maistrenko A. Y., Topal A. I., Lavarko A. V. "Opyt vnedreniia tekhnologii szhiganiia tverdogo topliva v tsirkuliruiushchem kipiashchem sloe v energetiku Ukrainy", *Sovremennaiia nauka: issledovaniia, idei, rezultaty, tekhnologii*, no. 3(11), 2012, pp. 84-90.
11. Vozniak O. T. *Planuvannia eksperymentu ta optymizaciia virishen u sistemakh teplogazopostachannia ta ventyliatsii*. Vidavnistvo Lvivskoi politekhniki, 2012.

УДК 697.325

Исследование псевдоожигения полидисперсных бинарных систем в топках кипящего слоя

А. Ф. Редько¹, Ю. А. Пивненко²

¹д.т.н., проф. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков, Украина, redko.af@gmail.com

²инженер, ООО «ПРОМОЛЮКС СЕРВИС», г. Вишневое, Украина, pivnenko.yura@gmail.com

Аннотация. В данной работе проанализированы особенности псевдоожигения бинарных систем – древесные отходы – инертный материал. Проведены экспериментальные и теоретические исследования гидродинамики полидисперсных материалов. В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии для скорости начала псевдоожигения при различном содержании древесных отходов в кипящем слое. Исследования выявили, что увеличение содержания отходов древесины в кипящем слое ухудшает качество слоя. Это приводит к существенному увеличению скорости начала псевдоожигения. При малой скорости возможно постепенное оседание крупных частиц. Во избежание проблем следует увеличить скорость сжижаемого агента. Определено содержание древесного топлива в кипящем слое для стабилизации работы топочного устройства. Это содержание должно быть в пределах 20...30 %.

Ключевые слова: псевдоожигение, древесное топливо, топка, бинарная система, полидисперсность, скорость начала псевдоожигения, инертный материал.

UDC 697.325

Features of Fluidization of Binary Systems in the Furnaces of a Fluidized Bed

O. Redko¹, Y. Pivnenko²

¹Sc.D, professor, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, redko.af@gmail.com,

²engineer, LTD «PROMOLUKS SERVIS», Vyshneve, Ukraine, pivnenko.yura@gmail.com

Abstract. In this paper, we analyzed the characteristics of fluidization of binary systems – wood waste-inert material. Experimental and theoretical study of the hydrodynamics of polydisperse materials. As a result of processing of experimental data, the regression equation is obtained for the speed of the beginning of fluidization with different contents of wood waste in a fluidized bed. Studies have shown that increasing the content of wood waste in the fluidized bed degrades the quality of the layer. This leads to significant increase of the velocity of fluidization start. At slow velocity, a gradual settling of large particles is possible. To avoid problems, it is necessary to increase the velocity of the liquefied agent. The content of wood fuel in the fluidized bed is determined to stabilize the operation of the combustion device. This content should be within 20... 30%.

Keywords. Fluidization, wood fuel, furnace, binary system, the polydispersity, the speed of onset of fluidization, inert material.

Надійшла до редакції / Received 26.09.2017