

## ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ БИДИСПЕРСНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

**О. Ю. Милованов<sup>1</sup>, Р. Л. Исьёмин<sup>1</sup>, Д. В. Климов<sup>1</sup>,  
В. С. Кох-Татаренко<sup>1</sup>, О. М. Ларина<sup>2</sup>, Э. К. Бучилко<sup>3</sup>**

*Управление фундаментальных и прикладных исследований; reenergy@list.ru;*

*ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), г. Тамбов, Россия;*

*ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН» (2), г. Москва, Россия;*

*ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова»*

*НАН Беларуси (3), г. Минск, Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** антрацитовый штыб; бидисперсный слой; биоуголь; влажная торрефикация; пеллеты; полидисперсность; псевдооживление.

**Аннотация:** Выполнено экспериментальное исследование псевдооживления двух типов бидисперсного слоя с выраженной бимодальностью распределения частиц по размерам. Показана возможность использования эквивалентного диаметра частиц смеси, рассчитанного по средневесовому диаметру составляющих смесь частиц.

Обозначения	
$Ar = \frac{\rho_f g d_m^3}{\mu_f^2} (\rho_s - \rho_f)$ – число Архимеда; $D$ – диаметр колонны, м; $d_m$ – эквивалентный диаметр частиц смеси, м; $d_i^{(1)}$ и $d_i^{(2)}$ – диаметры частиц $i$ -й фракции первого и второго компонентов бидисперсной смеси, м; $g$ – ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup> ; $m_f$ – динамическая вязкость газа, кг/(м·с); $N^{(1)}$ и $N^{(2)}$ – числа фракций первого и второго компонентов смеси; $\Delta P$ – перепад давления в зернистом слое, Па; $u$ , $u_{mf}$ – скорости соответственно фильтрации газа и начала псевдооживления, м/с;	$u_b$ и $u_s$ – скорости начала псевдооживления соответственно крупных и мелких частиц, м/с; $\varepsilon$ – порозность; $\rho_s$ , $\rho_f$ – плотности частиц и газа, кг/м <sup>3</sup> , соответственно; $\varphi$ – массовая доля крупных частиц бидисперсной смеси; $\eta_i$ – массовая доля $i$ -й фракции <div style="text-align: center;">Индексы</div> экс – эксперимент; b, s – соответственно крупные и мелкие частицы; e – эквивалентный; f – флюид (газ); m – смесь; mf – начало псевдооживления

## Введение

Термохимические технологии рассматриваются как перспективные для конверсии биоотходов в горючие газы, биомасла или твердые продукты, которые могут быть использованы как биотопливо, удобрение или улучшитель почвы [1, 2]. Среди термохимических технологий, большинство из которых предполагает использование сухого сырья, гидротермальная карбонизация, а также влажная торрефикация позволяют перерабатывать биоотходы высокой влажности [3 – 9] и получать биоуголь.

В последние годы влажная торрефикация стала привлекать внимание исследователей, благодаря возможности получения биоугля, который может быть использован в процессах адсорбции [8, 9] и синтеза активированного угля [10 – 12]. Влажная торрефикация биомассы позволяет получить биоуголь с более высокой концентрацией кислородных функциональных групп и низкой степенью ароматизации, что делает его более пригодным для дальнейшей химической активации [10, 13].

Обычно процесс влажной торрефикации осуществляется в течении нескольких часов в воде при температуре 180...260 °С и под таким давлением, чтобы вода находилась в жидком состоянии [3]. Однако известны варианты влажной торрефикации биомассы в среде пара, находящегося под давлением много выше атмосферного (до 4 МПа) [14, 15], или в среде перегретого водяного пара при атмосферном давлении и температуре до 350 °С [16]. Использование перегретого пара под атмосферным давлением упрощает конструкцию и снижает металлоемкость реактора для торрефикации; продолжительность процесса составляет не несколько часов, а 15 мин; резко сокращается выход отходов – грязной воды, которая также требует утилизации.

Предложено осуществлять процесс влажной торрефикации в кипящем слое в среде перегретого водяного пара при избыточном давлении не более 0,07 МПа. При реализации предлагаемого способа влажной торрефикации возникает проблема, связанная со слабой изученностью гидродинамики кипящего слоя, основную часть которого представляют частицы инертного материала (к примеру, угольной золы), в которых должны свободно «плавать» кусочки биомассы, имеющие сложную форму и существенно большие размеры, чем частицы песка.

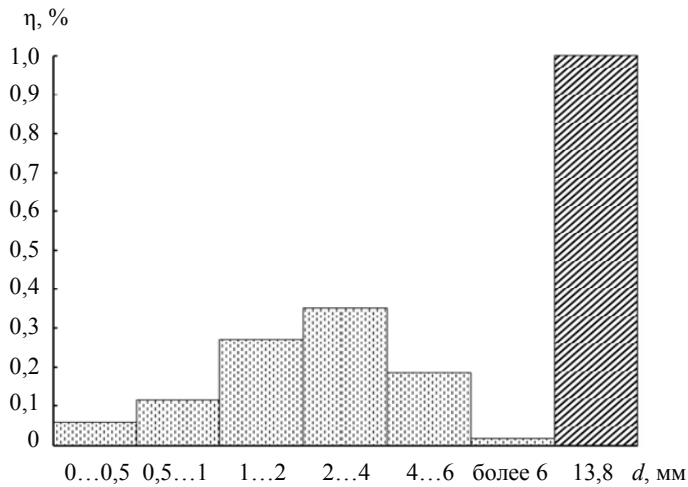
Цель работы – исследование псевдооживления бидисперсных зернистых слоев с частицами различных фракций в условиях переработки отходов.

## Экспериментальная часть

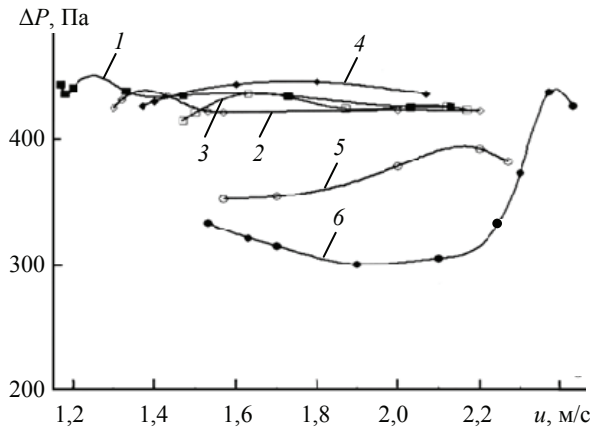
Исследовалась смесь полидисперсных мелких частиц одного сорта с достаточно крупными монодисперсными частицами другого сорта. Данную смесь можно условно назвать квазибидисперсной, поскольку каждый из двух сортов составляющих ее частиц тоже представляет собой полидисперсную смесь. Опыты по псевдооживлению указанной смеси проводились в прозрачной колонне прямоугольного поперечного сечения 485×194 мм с перфорированным газораспределителем 5%-го живого сечения.

Гистограмма распределений указанных полидисперсных материалов свидетельствуют об их выраженной бимодальности (рис. 1). Массовая доля частиц одного сорта в смеси варьировалась в диапазоне 0...1. Скорость начала псевдооживления каждого дисперсного материала при 30 °С предварительно определялась экспериментально и составляла 1,0 и 2,43 м/с соответственно для частиц угольной золы и пеллет с плотностью 1 400 и 1 300 кг/м<sup>3</sup>.

На рисунке 2 показаны экспериментальные зависимости  $\Delta P(u, \varphi)$  для исследованной квазибидисперсной системы. Скорости начала псевдооживления определялись на основе визуальных наблюдений и сравнивались с зависимостями  $\Delta P(u)$ .



**Рис. 1. Гистограммы распределения фракций смеси:**  
 ▨ – антрацитовый штыб; ▩ – пеллеты из соломы



**Рис. 2. Графики зависимости перепада давления  $\Delta P$  смеси угольной золы с пеллетами из соломы от скорости фильтрации  $u$  при  $\varphi$ :**  
 1 – 0,2; 2 – 0,4; 3 – 0,5; 4 – 0,6; 5 – 0,8; 6 – 1,0

### Анализ и обобщение полученных результатов

В литературе [17 – 24] дано описание двух основных методов расчета скорости начала псевдооживления полидисперсной смеси, которые условно можно назвать дифференциальным и интегральным. Первый метод оперирует детальным фракционным составом смеси [17 – 21], второй – только скоростями начала псевдооживления компонентов смеси [22 – 24]. В основу дифференциального метода положены понятия об эквивалентном диаметре смеси, уравнение Эргана [25] и условие взвешивания слоя при  $u = u_{mf}$ .

$$\rho_s g(1 - \varepsilon) = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu_f u_{mf}}{d_m^2} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \rho_f \frac{u_{mf}^2}{d_m}. \quad (1)$$

Одним из самых популярных приближенных решений уравнения (1) при  $\varepsilon = 0,4$  является интерполяционная формула Годеса [17]

$$u_{mf} = \frac{\mu_f}{\rho_f d_m} \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}. \quad (2)$$

Точное решение квадратного уравнения (1) при  $\varepsilon = 0,4$  имеет вид

$$u_{mf} = \frac{\mu_f}{\rho_f d_m} \left( \sqrt{661,2 + 0,0366Ar} - 25,71 \right). \quad (3)$$

Основная проблема, возникающая при использовании уравнений (2) и (3), заключается в определении для конкретной дисперсной смеси эквивалентного диаметра  $d_m$ . Такую величину можно получить, усредняя различные степени диаметра частиц отдельных фракций [26]:

$$d_m^K = \sum \eta_i d_i^K.$$

При  $K = 1$  определяется средневесовой диаметр частиц, а при  $K = -1$  – их среднеповерхностный диаметр. Применительно к исследуемым квазибидисперсным системам формула (3) принимает для средневесового и среднеповерхностного диаметров соответственно следующий вид:

$$d_m = d_1 = \varphi \left( \sum_{i=1}^{N^{(1)}} d_i^{(1)} \eta_i^{(1)} \right) + (1 - \varphi) \left( \sum_{i=1}^{N^{(2)}} d_i^{(2)} \eta_i^{(2)} \right); \quad (4)$$

$$d_m = d_2 = \frac{1}{\varphi \sum_{i=1}^{N^{(1)}} \frac{\eta_i^{(1)}}{d_i^{(1)}} + (1 - \varphi) \sum_{i=1}^{N^{(2)}} \frac{\eta_i^{(2)}}{d_i^{(2)}}}. \quad (5)$$

В уравнениях (4) и (5) плотности обоих компонентов смеси считаются равными. В обратном случае они приводятся к единой плотности на основе принципа гидродинамической эквивалентности по формуле [17]

$$\frac{d_i^{(le)}}{d_i^{(1)}} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{1400 + 5,22 \frac{\rho_1}{\rho_2} \sqrt{Ar(d_i^{(1)})}}{1400 + 5,22 \sqrt{Ar(d_i^{(1)})}}}, \quad (6)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности соответственно первого и второго компонентов бидисперсной смеси;  $d_i^{(le)}$  – эквивалентный диаметр фракции первого компонента, приведенный к плотности второго  $\rho_2$ .

Как видно из формул (4) и (5), диаметры  $d_1$  и  $d_2$  могут быть существенно разными. Например, для смеси, где много мелких фракций, при расчете по формуле (5) получаются величины  $d_2$ , существенно заниженные по сравнению с  $d_1$ , что приведет к большой разнице в скоростях начала псевдооживления (табл. 1). Для смеси угольной золы и пеллет из соломы, для которой соотношение средневесовых диаметров частиц золы и пеллет составляет 5,0, расчеты по (4) дают существенно лучшее совпадение с  $(u_{mf})_{экс}$ , чем (5). Расчеты  $u_{mf}$  по приближенному и точному решению уравнения Эргана (1) для  $d_m = d_1$  дают достаточно близкие результаты (см. табл. 1).

## Эквивалентные диаметры и скорости начала псевдооживления смесей при 30 °С

Образец	$d_1$	$d_2$	$\varphi$	$u_{mf}(d_1)$ , м/с (2)	$u_{mf}(d_2)$ , м/с (2)	$(u_{mf})_{экс}$ , м/с	$u_{mf}$ , м/с	$u_{mf}(d_1)$ , м/с (3)
Угольная зола	2,70	0,95	0	0,84	0,27	1,0	1,0	0,93
Пеллеты	13,80	13,8	1,0	2,29	2,29	2,43	2,43	2,32
Угольная зола + + пеллеты из соломы	4,90	1,17	0,2	1,29	0,36	1,33	1,20	1,36
	7,10	1,51	0,4	1,63	0,48	1,53	1,40	1,67
	9,30	2,15	0,6	1,9	0,69	2,07	1,70	1,94
	11,50	3,73	0,8	2,13	1,07	2,27	2,04	2,16

Интегральный метод определения  $u_{mf}$  оперирует только скоростями начала псевдооживления компонентов бидисперсной смеси, которые легко измерить экспериментально [17]. Одна из последних таких зависимостей получена в [23] для условий, когда размеры компонентов смеси отличаются столь значительно, что наблюдается явление суффозии, когда мелкие фракции могут фильтроваться через «скелет» крупных:

$$\frac{u_{mf}}{u_s} - 1 = \left( \frac{u_b}{u_s} - 1 \right) \varphi^{1,4}. \quad (7)$$

Расчеты по (7) также неплохо согласуются с опытными величинами  $u_{mf}$  для обеих бидисперсных систем (см. табл. 1). Отметим, что практически такие же результаты дает зависимость [24]

$$u_{mf} = \varphi u_b + (1 - \varphi) u_s. \quad (8)$$

### Заключение

Экспериментальное исследование псевдооживления двух видов бидисперсных слоев, отличающихся характером распределения составляющих их частиц по фракциям, показало, что среднеповерхностный диаметр (5) может применяться только при отношении размеров частиц  $\leq 2$ . Метод определения скорости начала псевдооживления смеси, основанный на определении скоростей начала псевдооживления ее составляющих, позволяет удовлетворительно описать опытные данные с использованием уравнений (7) и (8).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ в рамках научного проекта № 19-58-04004.*

### Список литературы

1. Poultry Litter Gasification in a Fluidized Bed Reactor: Effects of Gasifying Agent and Limestone Addition / D. S. Pandey, M. Kwapinska, A. Gómez-Barea [et al.] // *Energy & Fuels*. – 2016. – Vol. 30 (4). – P. 3085 – 3096. doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b00058
2. Updraft Gasification of Poultry Litter at Farm-Scale-A Case Study / N. Taupe, D. Lynch, R. Wnetrzak [et al.] // *Waste Management*. – 2016. – Vol. 50. – P. 324 – 333. doi: 10.1016/j.wasman.2016.02.036

3. Bach, Q.-Vu. Upgrading Biomass Fuels Via Wet Torrefaction: a Review and Comparison with Dry Torrefaction / Q.-Vu Bach, Ø. Skreiberg // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 54. – P. 665 – 677. doi: 10.1016/j.rser.2015.10.014
4. Thermal Pretreatment of Lignocellulosic Biomass / W. Yan, T. C. Acharjee, C. J. Coronella, V. R. Vásquez // *Environmental Progress & Sustainable Energy*. – 2009. – Vol. 28, Issue 3. – P. 435 – 440. doi: 10.1002/ep.10385
5. Chen, W.-H. Hydrothermal Carbonization of Sugarcane Bagasse Via Wet Torrefaction in Association with Microwave Heating / W.-H. Chen, S.-C. Ye, H.-K. Sheen // *Bioresour Technology*. – 2012. – Vol. 118. – P. 195 – 203. doi: 10.1016/j.biortech.2012.04.101
6. Mass and Energy Balances of Wet Torrefaction of Lignocellulosic Biomass / W. Yan, J. T. Hastings, T. C. Acharjee [et al.] // *Energy & Fuels*. – 2010. – Vol. 24 (9). – P. 4738 – 4742. doi: 10.1021/ef901273n
7. Runge, T. Improving Biomass Combustion Quality Using a Liquid Hot Water Treatment / T. Runge, P. Wipperfurth, C. Zhang // *Biofuels*. – 2013. – Vol. 4. – P. 73 – 83. doi: 10.4155/bfs.12.70
8. Comparative Assessment of Wet Torrefaction / Q.-Vu Bach, K.-Q. Tran, R. A. Khalil [et al.] // *Energy & Fuels*. – 2013. – Vol. 27. – P. 6743 – 6753. doi: 10.1021/ef401295w
9. Wet Torrefaction of Forest Residues / Q.-Vu Bach, K.-Q. Tran, R. A. Khalil, Ø. Skreiberg // *Energy Procedia*. – 2014. – Vol. 61. – P. 1196 – 1199. doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.1052
10. Liu, Z. Removal of Lead from Water Using Biochars Prepared from Hydrothermal Liquefaction of Biomass / Z. Liu, F. S. Zhang // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 167, Issue 1-3. – P. 933 – 939. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.01.085
11. Liu, Z. Characterization and Application of Chars Produced from Pinewood Pyrolysis and Hydrothermal Treatment / Z. Liu, F. S. Zhang, J. Wu // *Fuel*. – 2010. – Vol. 89, Issue 2. – P. 510 – 514. doi: 10.1016/j.fuel.2009.08.042
12. Sevilla, M. High Density Hydrogen Storage in Superactivated Carbons from Hydrothermally Carbonized Renewable Organic Materials / M. Sevilla, A. Fuertes, R. Mokaya // *Energy & Environmental Science*. – 2011. – Vol. 4. – P. 1400 – 1410. doi: 10.1039/C0EE00347F
13. Sevilla, M. Sustainable Porous Carbons with a Superior Performance for CO<sub>2</sub> Capture / M. Sevilla, A. B. Fuertes // *Energy & Environmental Science*. – 2011. – Vol. 4. – P. 1765 – 1771. doi: 10.1039/C0EE00784F
14. Improvement of Pelletability of Woody Biomass by Torrefaction under Pressurized Steam / S. Kudo, J. Okada, S. Ikeda [et al.] // *Energy & Fuels*. – 2019. – Vol. 33 (11). – P. 11253 – 11262. doi: 10.1021/acs.energyfuels.9b02939
15. Pressurized Steam Torrefaction of Biomass: Focus on Solid, Liquid, and Gas Phase Distributions / P. Brachi, F. Miccio, G. Ruoppolo, M. Miccio // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2017. – Vol. 56 (42). – P. 12163 – 12173. doi: 10.1021/acs.iecr.7b02845
16. Superheated Steam as Carrier Gas and the Sole Heat Source to Enhance Biomass Torrefaction / D. Zhang, X. Chen, Z. Qi [et al.] // *Bioresour Technology*. – 2021. – Vol. 331. – P. 124955. doi: 10.1016/j.biortech.2021.124955
17. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес. – Л. : Химия, 1968. – 510 с.

18. Karmar, M. K. Fluidization Behavior of Binary Mixtures Using Sand and Biomass / M. K. Karmar, S. Haldar, P. K. Chatterjee // *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.* – 2012. – Vol. 2, Issue 11. – P. 651 – 657.
19. Chok, V. S. Minimum and Complete Fluidization Velocity for Sand-Palm Shell Mixtures. Part I: Fluidization Behavior and Characteristic Velocities / V. S. Chok, A. Gorin, H. B. Chua // *American Journal of Applied Sciences.* – 2010. – No. 7(6). – P. 763 – 772.
20. Oliveira, T. J. P. Bubbling Fluidization of Biomass and Sand Binary Mixtures: Minimum Fluidization Velocity and Particle Segregation / T. J. P. Oliveira, C. R. Cardoso, C. H. Ataide // *Chemical Engineering and Processing.* – 2013. – Vol. 72. – P. 113 – 121. doi: 10.1016/j.cep.2013.06.010
21. Formisani, B. Fluidization of Mixtures of Two Solids Differing in Density or Size / B. Formisani, R. Girimonte, V. Vivacqua // *AIChE Journal.* – 2011. – Vol. 57, No. 9. – P. 2325 – 2333. doi: 10.1002/aic.12450
22. Rowe, P. N. Minimum Fluidization Velocity of Multicomponent Particle Mixtures / P. N. Rowe, A. W. Nienow // *Chemical Engineering Science.* – 1975. – Vol. 30, Issue 11. – P. 1365 – 1369. doi: 10.1016/0009-2509(75)85066-4
23. Пищуха, Е. А. Особенности псевдоожижения бидисперсных слоев в условиях суффозии / Е. А. Пищуха, Ю. С. Теплицкий, Э. К. Бучилко // *Инженерно-физический журнал.* – 2017. – Т. 90, № 6. – С. 1451 – 1456.
24. Reina, J. Redicting the Minimum Fluidization Velocity of Polydisperse Mixtures of Scrapwood Particles / J. Reina, E. Velo, L. Puigjaner // *Powder Technology.* – 2000. – Vol. 111, Issue 3. – P. 245 – 251. doi: 10.1016/S0032-5910(00)00226-6
25. Ergun, S. Fluid Flow through Packed Columns / S. Ergun // *Journal of Chemical Engineering Progress.* – 1952. – Vol. 48, No. 2. – P. 89 – 94.
26. Аэров, М. Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Годес, Д. А. Наринский. – Л. : Химия, 1979. – 176 с.
27. Теплицкий, Ю. С. Скорость полного оживания слоя полидисперсных зернистых материалов / Ю. С. Теплицкий, В. И. Ковенский // *Инженерно-физический журнал.* – 2009. – Т. 82, № 2. – С. 296 – 300.

---

## Features of Hydrodynamics of a Bedisperse Boiling Layer

O. Yu. Milovanov<sup>1</sup>, R. L. Isyemin<sup>1</sup>, D. V. Klimov<sup>1</sup>,  
V. S. Kokh-Tatarenko<sup>1</sup>, O. M. Larina<sup>2</sup>, E. K. Buchilko<sup>3</sup>

*Department of Fundamental and Applied Research,  
penery@list.ru; TSTU (1), Tambov, Russia;  
Joint Institute for High Temperatures  
of the Russian Academy of Sciences (2), Moscow, Russia;  
Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov  
of NAS of Belarus (3), Minsk, Republic of Belarus*

**Keywords:** anthracite rock; bidispersed layer; biochar; wet torrefaction; pellets; polydispersity; fluidization.

**Abstract:** An experimental study of fluidization of two types of bidispersed layer with a pronounced bimodal particle size distribution has been carried out. The possibility of using the equivalent diameter of the mixture particles, calculated from the weight average diameter of the particles constituting the mixture, is shown.

## References

1. Pandey D.S., Kwapinska M., Gómez-Barea A. [et al.] Poultry Litter Gasification in a Fluidized Bed Reactor: Effects of Gasifying Agent and Limestone Addition, *Energy & Fuels*, 2016, vol. 30 (4), pp. 3085-3096, doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b00058
2. Taupe N., Lynch D., Wnetrzak R. [et al.] Updraft Gasification of Poultry Litter at Farm-Scale-A Case Study, *Waste Management*, 2016, vol. 50, pp. 324-333, doi: 10.1016/j.wasman.2016.02.036
3. Bach Q.-Vu, Skreiberg Ø. Upgrading Biomass Fuels Via Wet Torrefaction: a Review and Comparison with Dry Torrefaction, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 54, pp. 665-677, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.014
4. Yan W., Acharjee T.C., Coronella C.J., Vásquez V.R. Thermal Pretreatment of Lignocellulosic Biomass, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2009, vol. 28, issue 3, pp. 435-440, doi: 10.1002/ep.10385
5. Chen W.-H., Ye S.-C., Sheen H.-K. Hydrothermal Carbonization of Sugarcane Bagasse Via Wet Torrefaction in Association with Microwave Heating, *Bioresour Technology*, 2012, vol. 118, pp. 195-203, doi: 10.1016/j.biortech.2012.04.101
6. Yan W., Hastings J.T., Acharjee T.C., Coronella C.J., Vásquez V.R. Mass and Energy Balances of Wet Torrefaction of Lignocellulosic Biomass, *Energy & Fuels*, 2010, vol. 24 (9), pp. 4738-4742, doi: 10.1021/ef901273n
7. Runge T., Wipperfurth P., Zhang C. Improving Biomass Combustion Quality Using a Liquid Hot Water Treatment, *Biofuels*, 2013, vol. 4, pp. 73-83, doi: 10.4155/bfs.12.70
8. Bach Q.-Vu, Tran K.-Q., Khalil R.A., Skreiberg Ø., Seisenbaeva G. Comparative Assessment of Wet Torrefaction, *Energy & Fuels*, 2013, vol. 27, pp. 6743-6753, doi: 10.1021/ef401295w
9. Bach Q.-Vu, Tran K.-Q., Khalil R.A., Skreiberg Ø. Wet Torrefaction of Forest Residues, *Energy Procedia*, 2014, vol. 61, pp. 1196-1199, doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.1052
10. Liu, Z. Removal of Lead from Water Using Biochars Prepared from Hydrothermal Liquefaction of Biomass / Z. Liu, F. S. Zhang // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 167, Issue 1-3. – P. 933 – 939. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.01.085
11. Liu Z., Zhang F.S., Wu J. Characterization and Application of Chars Produced from Pinewood Pyrolysis and Hydrothermal Treatment, *Fuel*, 2010, vol. 89, issue 2, pp. 510-514, doi: 10.1016/j.fuel.2009.08.042
12. Sevilla M., Fuertes A., Mokaya R. High Density Hydrogen Storage in Superactivated Carbons from Hydrothermally Carbonized Renewable Organic Materials, *Energy & Environmental Science*, 2011, vol. 4, pp. 1400-1410, doi: 10.1039/C0EE00347F
13. Sevilla M., Fuertes A.B. Sustainable Porous Carbons with a Superior Performance for CO<sub>2</sub> Capture, *Energy & Environmental Science*, 2011, vol. 4, pp. 1765-1771, doi: 10.1039/C0EE00784F
14. Kudo S., Okada J., Ikeda S. [et al.] Improvement of Pelletability of Woody Biomass by Torrefaction under Pressurized Steam, *Energy & Fuels*, 2019, vol. 33 (11), pp. 11253-11262, doi: 10.1021/acs.energyfuels.9b02939
15. Brachi P., Miccio F., Ruoppolo G., Miccio M. Pressurized Steam Torrefaction of Biomass: Focus on Solid, Liquid, and Gas Phase Distributions, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, vol. 56 (42), pp. 12163-12173, doi: 10.1021/acs.iecr.7b02845



16. Zhang D., Chen X., Qi Z. [et al.] Superheated Steam as Carrier Gas and the Sole Heat Source to Enhance Biomass Torrefaction, *Bioresource Technology*, 2021, vol. 331, p. 124955, doi: 10.1016/j.biortech.2021.124955
17. Aerov M.E., Todes O.M. *Gidravlicheskiye i teplovyye osnovy raboty apparatov so statsionarnym i kipyashchim zernistym sloyem* [Hydraulic and thermal foundations of the work of devices with a stationary and boiling granular layer], Leningrad: Khimiya, 1968, 510 p. (In Russ.)
18. Karmar M.K., Haldar S., Chatterjee P.K. Fluidization Behavior of Binary Mixtures Using Sand and Biomass, *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, 2012, vol. 2, issue 11, pp. 651-657.
19. Chok V.S., Gorin A., Chua H.B. Minimum and Complete Fluidization Velocity for Sand-Palm Shell Mixtures. Part 1: Fluidization Behavior and Characteristic Velocities, *American Journal of Applied Sciences*, 2010, no. 7(6), pp. 763-772.
20. Oliveira T.J.P., Cardoso C.R., Ataide C.H. Bubbling Fluidization of Biomass and Sand Binary Mixtures: Minimum Fluidization Velocity and Particle Segregation, *Chemical Engineering and Processing*, 2013, vol. 72, pp. 113-121, doi: 10.1016/j.cep.2013.06.010
21. Formisani B., Girimonte R., Vivacqua V. Fluidization of Mixtures of Two Solids Differing in Density or Size, *AIChE Journal*, 2011, vol. 57, no. 9, pp. 2325-2333, doi: 10.1002/aic.12450
22. Rowe P.N., Nienow A.W. Minimum Fluidization Velocity of Multicomponent Particle Mixtures, *Chemical Engineering Science*, 1975, vol. 30, issue 11, pp. 1365-1369, doi: 10.1016/0009-2509(75)85066-4
23. Pitsukha Ye.A., Teplitskiy Yu.S., Buchilko E.K. [Features of fluidization of bidispersed layers under suffusion conditions], *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering Physics Journal], 2017, vol. 90, no. 6, pp. 1451-1456. (In Russ., abstract in Eng.)
24. Reina J., Velo E., Puigjaner L. Redicting the Minimum Fluidization Velocity of Polydisperse Mixtures of Scrapwood Particles, *Powder Technology*, 2000, vol. 111, issue 3, pp. 245-251, doi: 10.1016/S0032-5910(00)00226-6
25. Ergun S. Fluid Flow through Packed Columns, *Journal of Chemical Engineering Progress*, 1952, vol. 48, no. 2, pp. 89-94.
26. Aerov M.E., Todes O.M., Narinskiy D.A. *Apparaty so statsionarnym zernistym sloyem* [Apparatuses with a stationary granular layer], Leningrad: Khimiya, 1979, 176 p. (In Russ.)
27. Teplitskiy Yu.S., Kovenskiy V.I. [The rate of complete fluidization of a layer of polydisperse granular materials], *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering Physics Journal], 2009, vol. 82, no. 2, pp. 296-300. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Merkmale der Hydrodynamik der bidispersen Siedeschicht**

**Zusammenfassung:** Es ist die experimentelle Untersuchung der Pseudoverflüssigung von zwei Arten der bidispersen Schicht mit einer ausgeprägten Bimodalität der Partikelgrößenverteilung durchgeführt. Gezeigt ist die Möglichkeit der Verwendung des äquivalenten Durchmessers der Mischungsteilchen, berechnet nach dem gewichtsmittleren Durchmesser der die Mischung bildenden Teilchen.

## Particularités de l'hydrodynamique bidispersé de la couche pétillante

**Résumé:** Est effectuée une étude expérimentale de la fluidisation de deux types de couches dispersées avec une bimodalité marquée de la distribution granulométrique. Est montrée la possibilité d'utiliser un diamètre équivalent des particules du mélange, calculé à partir du diamètre moyen des particules du mélange.

---

**Авторы:** *Милованов Олег Юрьевич* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Управление фундаментальных и прикладных исследований; *Исьёмин Рафаил Львович* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Управление фундаментальных и прикладных исследований; *Климов Дмитрий Владимирович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Управление фундаментальных и прикладных исследований; *Кох-Татаренко Вадим Станиславович* – инженер, Управление фундаментальных и прикладных исследований, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Ларина Ольга Михайловна* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Объединенный институт высоких температур» Российской академии наук (ОИВТ РАН), г. Москва, Россия; *Бучилко Эдуард Казимирович* – научный сотрудник, ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова» НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь.

**Рецензент:** *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и технологическая безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.