

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРЕИМУЩЕСТВ ТУРБУЛЕНТНОГО ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ СОВМЕСТНОГО СЖИГАНИЯ УГОЛЬНОГО ШЛАМА И БИОГРАНУЛ

О.Ю. Милованов, Р.Л. Исьемин, Д.М. Вирясов,  
С.Н. Кузьмин, А.В. Михалев

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов*

*Рецензент канд. техн. наук, профессор В.И. Ляшков*

**Ключевые слова и фразы:** биогранулы; кластеры; совместное сжигание; турбулентное псевдоожигание; угольный шлам.

**Аннотация:** Рассмотрены гидродинамические особенности формирования турбулентного псевдоожиганного слоя, позволяющие прогнозировать эффективное использование этой технологии для совместного сжигания биогранул и частиц угольного шлама.

Объемы добычи угля сегодня в значительной мере превысили рубежи, намеченные энергетической стратегией России на период до 2020 г., утвержденной Правительством в 2003 г. В настоящее время в эксплуатации находятся 46 обогатительных фабрик, на которых перерабатывается более 145 млн т угля в год [1]. До 15 % от этого объема переработки составляют угольные шламы – отходы мокрого обогащения угля. Угольные шламы – это тонкодисперсная масса с содержанием органики 25–40 %. Состав шламов очень нестабилен: влажность колеблется в пределах от 18 до 40 %, зольность – от 45 до 75 %, содержание класса частиц размером менее 1,0 мм – от 45 до 95 %. Невостребованные угольные шламы годами хранятся в прудах-накопителях, загрязняя окружающую среду.

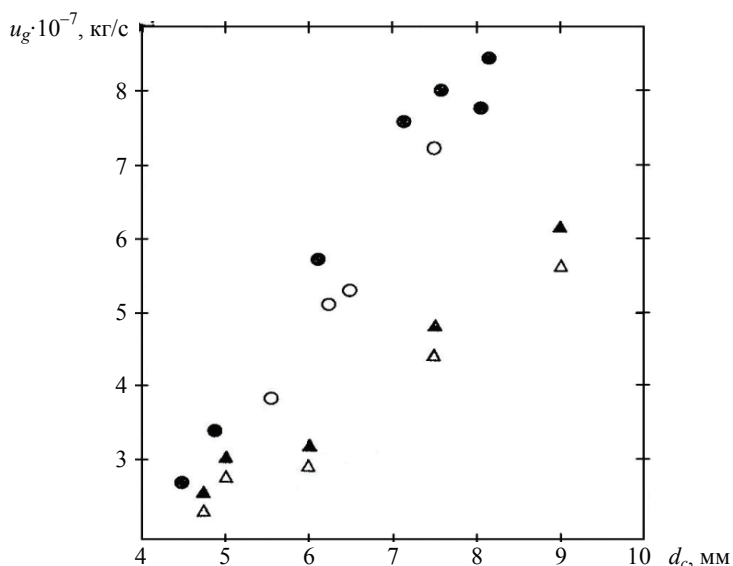
---

Милованов Олег Юрьевич – аспирант кафедры «Гидравлика и теплотехника», e-mail: admin@ido.tstu.ru; Исьемин Рафаил Львович – кандидат технических наук, директор центра биоэнергетики, Институт дистанционного образования; Вирясов Дмитрий Михайлович – аспирант кафедры «Гидравлика и теплотехника»; Кузьмин Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и теплотехника», директор Института дистанционного образования; Михалев Александр Валерьевич – кандидат технических наук, заместитель директора по производственно-техническим вопросам, Институт дистанционного образования, ТамбГТУ, г. Тамбов.

Для снижения загрязняющих окружающую среду выбросов, в том числе парниковых газов, и стабилизации процесса воспламенения и горения низкорекреационных угольных шламов нами предложено сжигать эти шламы в смеси с биогранулами в псевдооживленном слое [4, 6]. Необходимость использования биотоплива в виде гранул обусловлена тем, что из-за высокой насыпной плотности гранул затраты на доставку, хранение, подачу биотоплива в топку котла оказываются значительно меньше, чем в случае использования биотоплива в исходном виде.

Однако из-за большой разницы в размерах, массе и форме между гранулами и частицами угольного шлама может наблюдаться сепарация последних и значительный унос частиц из верхнего слоя. Эти проблемы могут быть преодолены при совместном сжигании угольного шлама и биогранул в турбулентном псевдооживленном слое. Термин «турбулентное псевдооживление» не имеет никакого отношения к общеизвестной классификации режимов движения жидкой или газовой сред. При турбулентном псевдооживлении происходит разрушение газовых пузырей и движение частиц и газа напоминает турбулентное движение масел [3]. В турбулентном псевдооживленном слое твердые частицы распределены в непрерывной газовой фазе в виде непрерывно и быстро разрушающихся и воссоздающихся кластеров и «нитей» [2]. Как показывают сравнительные эксперименты [2], скорость горения угольных частиц в турбулентном псевдооживленном слое оказывается выше, чем в обычном, пузырьковом. При этом чем больше размер частиц, тем более заметной становится разность в скоростях горения угольных частиц в этих слоях (рис. 1).

Это связано с интенсивным истиранием крупных частиц в турбулентном псевдооживленном слое и в более высоких скоростях протекания массообменных процессов на поверхности угольной частицы [2]. Высокие

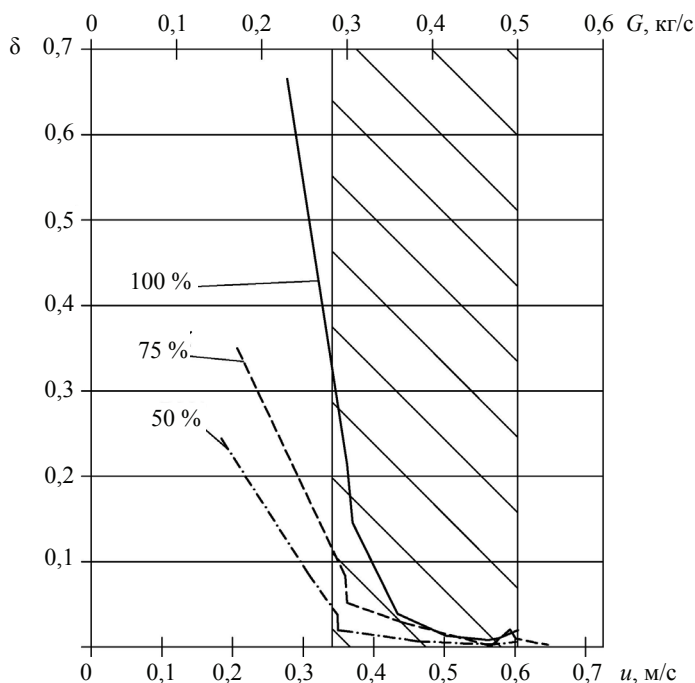


**Рис. 1. Зависимость скорости горения частиц угля в турбулентном псевдооживленном слое от их диаметра, при сжигании с концентрацией кислорода 12,5 и 13,7 % соответственно:**  
 ○, ● – частицы размером 245 мм; △, ▲ – частицы размером 327 мм

скорости протекания обменных процессов в турбулентном псевдооживленном слое связываются с очень высокими скоростями фильтрации газовой фазы в 10–80 раз превышающих минимальную скорость псевдооживления составляющих слой частиц [2].

Определить нахождение слоя в состоянии турбулентного псевдооживления можно на основе измерений пульсаций перепада давления и рассчитанных по этим измерениям величины среднеквадратичного отклонения или безразмерной пульсации перепада давления [7–9]. С увеличением скорости продуваемого через слой газа, величина среднеквадратичного отклонения или безразмерной амплитуды пульсации перепада давления в слое монотонно растет до тех пор, пока не начнется переход в состояние турбулентного псевдооживления, когда указанные величины начинают резко снижаться.

Очевидно, что режим турбулентного псевдооживления самопроизвольно возникает при совместном псевдооживлении частиц, резко отличающихся друг от друга по массе, размерам и форме. К примеру, такой режим наблюдался при реализации разработанного нами бесшлаковочного метода сжигания соломенных гранул в специальном котле [5]. Как видно из рис. 2, при сжигании соломенных гранул диаметром 6 мм и средней длиной 12 мм в слое частиц их золы и коксового остатка наблюдается режим турбулентного псевдооживления. При этом скорости газа, продуваемого через слой, оказываются в 20 раз больше минимальной скорости псевдооживления частиц золы (средний размер частиц 0,5 мм), масса которых составляет не менее 30–50 % от общей массы слоя.



**Рис. 2.** Зависимость безразмерной амплитуды пульсаций давления от расхода первичного воздуха и мощности котла при сжигании соломенных гранул в турбулентном псевдооживленном слое частиц золы и коксового остатка

Правомерен вопрос: как может существовать такой слой в определенном объеме топочного пространства и почему при таких скоростях газа все частицы не уносятся из топки? Ответ заключается в особенностях гидродинамической структуры турбулентного псевдоожигенного слоя.

В работе [11] предложена методика расчета основных гидродинамических параметров так называемого придонного кипящего слоя – области циркулирующего кипящего слоя, возникающего вблизи газораспределительной решетки. Для нашего случая эта методика интересна тем, что гидродинамические структуры турбулентного и придонного псевдоожигенного слоев подобны: в последнем также образуются и быстро разрушаются кластеры, а скорости газа сопоставимы со скоростями газа в турбулентном псевдоожигенном слое.

При построении методики расчета в работе [11] сделаны следующие допущения:

1) кластер имеет сферическую форму и концентрация частиц в нем равна  $(1 - \varepsilon_{mf})$ , где  $\varepsilon_{mf}$  – порозность кластера,  $\varepsilon_{mf} = 0,4$ ;

2) кластеры имеют одинаковый размер и распределены по объему псевдоожигения с концентрацией  $(1 - \varepsilon_c)$ , которая связана со средней концентрацией частиц в слое соотношением  $1 - \varepsilon_c = [(1 - \varepsilon_{fb}) / (1 - \varepsilon_{mf})]$ , где  $\varepsilon_c$  – порозность слоя, состоящего из кластеров, диаметром  $d_c$ ;  $\varepsilon_{fb}$  – средняя порозность турбулентного псевдоожигенного слоя;

3) кластеры движутся ускоренно вертикально вверх под действием силы трения со стороны газа, которая определяется известной формулой Эргана [10];

4) скорость газа постоянна по сечению слоя;

5) скорость кластера  $v_c$  меняется линейно по мере его подъема от 0 до  $(u - u_t)$ :  $v_c = [(u - u_t)/H_0]x$ , где  $u$  – скорость фильтрации газа через слой, м/с;  $u_t$  – скорость витания одиночной частицы, м/с;  $H_0$  – высота турбулентного псевдоожигенного слоя, м;  $x$  – продольная координата, м;

б) фильтрацией газа через кластер можно пренебречь.

В работе [10] было получено выражение для определения диаметра кластера  $d_c$

$$d_c/H = 40,4 Fr_t^* (\rho_f/\rho_s), \quad (1)$$

где  $H$  – высота топки с турбулентным слоем, м;  $Fr_t^*$  – критерий Фруда,  $Fr_t^* = [u - \varepsilon_c(u - u_t)/2]^2/gH$  и для порозности турбулентного псевдоожигенного слоя

$$1 - \varepsilon_{fb} = 1 - 0,33 (Fr_t^*)^{-0,045}. \quad (2)$$

Сразу отметим, что согласно выражению (2), порозность турбулентного псевдоожигенного слоя практически не зависит от скорости фильтрации газа и равна  $\varepsilon_{fb} \approx 0,65$ . Более того, так как  $(1 - \varepsilon_{fb}) \approx 0,35$  и  $(1 - \varepsilon_{mf}) \approx 0,6$ , то  $\varepsilon_c$  постоянна и равна  $\varepsilon_c \approx 0,42$ .

Как видно из выражения (1), диаметр кластера  $d_c$  увеличивается с ростом скорости фильтрующегося через слой газа. В соответствии с рос-

том скорости газа увеличивается и значение минимальной скорости псевдоожигения кластера. Расчетным путем было установлено, что для частиц, скорость витания которых составляет 2,8 м/с, при увеличении скорости продуваемого через слой газа с 2,8 до 6 м/с число псевдоожигения для кластеров увеличивается от 1,08 до 1,2, то есть при скоростях газа более чем в 2 раза превышающих скорость витания частиц, число псевдоожигения для слоя кластеров (для турбулентного псевдоожигенного слоя) остается близким к 1,0.

Это объясняет существование турбулентного псевдоожигенного слоя в определенном объеме топки при таких скоростях газа, когда обычный кипящий слой уже существовать не может и переходит в режим пневмотранспорта. Это означает, что рост температуры слоя, вызывающий рост  $u$ , также приводит к увеличению диаметра кластера и величины его минимальной скорости псевдоожигения.

Таким образом, в турбулентном псевдоожигенном слое создаются все условия для организации эффективного совместного сжигания крупных биогранул и мелких частиц угольного шлама, так как:

1) высокие скорости истирания крупных частиц (в данном случае, биогранул) в турбулентном кипящем слое обуславливают их высокие скорости горения;

2) унос мелких частиц из слоя подавляется образованием кластеров, диаметр которых увеличивается с ростом скорости газа, продуваемого через слой;

3) независимость минимальной скорости псевдоожигения кластеров в турбулентном псевдоожигенном слое от скорости продуваемого через слой газа и его температуры создают предпосылки для возможного регулирования производительности топки и котла в широком диапазоне без опасности снижения эффективности горения.

#### *Список литературы*

1. История угольной отрасли [Электронный ресурс] // Интернет-портал сообщества ТЭК EnergyLand.info. – Режим доступа : <http://www.energyland.info/new/news/activity/ugol>. – Загл. с экрана.
2. Basu, P. An Experimental Investigation of Burning Rate and Mass Transfer in a Turbulent Fluidized Bed / P. Basu, D. Subbaro // *Combustion and Flame*. – 1986. – No. 66. – P. 261–269.
3. Hewitt, G.F. To Churn or not to Churn / G.F. Hewitt, S. Jayanti // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1993. – Vol. 19. – P. 527–529.
4. Research of co – Combustion of Anthracite and Biopellets in the High Temperature Fluidized Bed / R.L. Isemin [and others] // *Proceedings Swedish – Finnish Flame days 2005, Boras, Sweden, 18–19.10.2005*. – Boras, 2005. – P. 143–145.
5. Development of Technology of Slagless Combustion of Agricultural Wastes (Straw) and Designing and Manufacturing of Boilers where this Technology is Applied / R.L. Isemin [and others] // *Journal of Japan Institute of Energy*. – 2011. – Vol. 90, No. 6. – P. 569–572.

6. Co-Combustion of Coal and Bio – Pellets in the High Temperature Fluidized Bed / S.N. Kuzmin [and others] // Proceedings of 19<sup>th</sup> International Conference on Fluidized Bed Combustion, Part 1, Vienna, Austria, May 21–24, 2006. – Vienna, 2006. – P. 243–247.

7. Lee, G.S. Pressure Fluctuations in Turbulent Fluidized Beds / G.S. Lee, S.D. Kim // Journal of Chemical Engineering of Japan. – 1988. – No. 21. – P. 515–521.

8. Rhodes, M. What is Turbulent Fluidization / M. Rhodes // Powder Technology. – 1996. – No. 88. – P. 3–14.

9. Yerushalmi, J. Further Studies of the Regimes of Fluidization / J. Yerushalmi, N.T. Cankurt // Powder Technology. – 1979. – No. 24. – P. 187–205.

10. Аэров, М.Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем : пер. с англ. / М.Э. Аэров, О.М. Тодес, Д.А. Наринский. – Л. : Химия, 1979. – 58 с.

11. Теплицкий, Ю.С. О кластерной структуре циркулирующего кипящего слоя / Ю.С. Теплицкий // Инженер.-физ. журн. – 2005. – Т. 78, № 2. – С. 104–110.

---

**About Some of the Assumptions of Using the Advantages of Turbulent Fluidizing to Increase the Efficiency of Co-Firing Processes of Coal Slurry and Bio-Granules**

**O.Yu. Milovanov, R.L. Isyomin, D.M. Viryasov,  
S.N. Kuzmin, A.V. Mikhalev**

*Tambov State Technical University, Tambov*

**Key words and phrases:** bio-granules; clusters; coal sludge; co-incineration; turbulent fluidization.

**Abstract:** The paper examines hydrodynamic peculiarities of the formation of a turbulent fluid layer, allowing to predict the effective use of this technology for the co-incineration of bio-granules and particles of coal sludge.

---

© О.Ю. Милованов, Р.Л. Исьемин, Д.М. Вирясов,  
С.Н. Кузьмин, А.В. Михалев, 2012