

О ДЕФЛЮИДИЗАЦИИ В ПОЛИДИСПЕРСНОМ ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

Д.М. Вирясов¹, Р.Л. Исьемин³, С.Н. Кузьмин², О.Ю. Милованов²

Кафедры: «Технологические процессы и аппараты» (1); admin@ido.tstu.ru;
«Гидравлика и теплотехника» (2), ГОУ ВПО «ТГТУ»;
Тамбовский филиал ассоциации КАРТЭК (3)

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: антрацитовый штыб; кипящий слой; минимальная скорость псевдоожигения; соломенные гранулы.

Аннотация: Изложены результаты исследования гидродинамики кипящего слоя, состоящего из частиц угольной золы и пеллет. Эксперименты проводились для слоев при разных концентрациях золы и пеллет при комнатной температуре. Описаны сегрегация частиц и дефлюидизация.

Введение

Для достижения лучшего контроля за процессом горения при одновременном снижении выбросов парниковых газов, золы и окислов серы в атмосферу все чаще применяется технология совместного сжигания угля и биомассы в кипящем слое. Среди всех видов биомассы солома может рассматриваться как один из самых крупных, ежегодно возобновляемых источников топлива. Низкая насыпная плотность соломы в исходном состоянии, необходимость ее транспортирования на большие расстояния (например, на электростанции в г. Катовице (Польша) солома поставляется из России) вынуждают перерабатывать солому в гранулы (пеллеты), насыпная плотность которых составляет 650...750 кг/м³ вместо 100...150 кг/м³ у соломы в тюках.

Сжигание топлива может осуществляться в кипящем слое мелкодисперсного угля, в который будут добавляться соломенные пеллеты. Для расчета топок с кипящим слоем требуется знание минимальной скорости псевдоожигения частиц, составляющих слой. Однако, как оказалось [1], для слоя частиц такой формы и размера, как пеллеты, невозможно использовать известный метод определения этой величины по кривой зависимости перепада давления от скорости газа, продуваемого через слой. Разработка метода экспериментальной оценки минимальной скорости псевдоожигения для слоя, состоящего из смеси частиц угля и био-гранул, является целью настоящей работы.

Методика эксперимента

Исследованию подвергались слои, состоящие из частиц угля и пеллет из соломы. Фракционный состав угля был следующим: массовая доля частиц размером: до 1 мм – 20,87 %; 1...1,2 мм – 61,79 %; 1,2...1,5 мм – 5,66 %; 1,5...1,7 мм – 2,7 %; 1,7...2,0 мм – 1,81 %; 2...2,5 мм – 1,14 %; 2,5...3,0 мм – 0,47 %; 3,0...4,0 мм – 4,07 %; более 4,0 мм – 1,49 %. Влажность частиц угля составляла в среднем 5,35 %; плотность частиц угля – 1200 кг/м³. Пеллеты из соломы имели следующие характеристики: диаметр гранул – 6 мм, отношение диаметра к средней длине гранулы – 0,59;

плотность пеллеты – 1190 кг/м³, теплота сгорания гранул из соломы – 15,5 МДж/кг.

Исследования проводились в аппарате прямоугольного поперечного сечения 194×485 мм и высотой 1500 мм, который опирался на воздухораспределительную решетку с долей «живого сечения» 5 %.

Скорость воздуха измерялась на выходе из аппарата термоанемометром Delta-ОНМ HD 2103-1. В каждом опыте проводилось не менее 100 измерений скорости воздуха. Измерение перепада давления в слое производилось с помощью дифференциального микроманометра Testo-525, который позволял производить 1200 измерений перепада давления в течение 60 с. Цифровой сигнал от микроманометра Testo-525 подавался на персональный компьютер. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

В ходе предварительных опытов было установлено, что при содержании в слое более чем 40 % частиц угля наблюдается полная сегрегация частиц по размерам, при этом пеллеты остаются неподвижными и лежат на воздухораспределительной решетке. Поэтому, пульсации перепада давления измерялись в слоях, содержащих 100, 95, 90, 85, 80, 70, 65 и 60 % пеллет и соответствующее количество угольной золы.

Полученное множество случайных значений перепада давления в слое подвергалось статистической обработке. При этом определялись:

– среднее значение перепада давления в слое за время наблюдения

$$\Delta P_m = \sum (\Delta P_i / N), \quad (1)$$

где ΔP_i – значение перепада давления для i -го измерения, Па; N – количество измерений за опыт;

– среднеквадратичное отклонение пульсации перепада давления

$$\sigma = \sqrt{\sum (\Delta P_i - \Delta P_m)^2 / (N - 1)}. \quad (2)$$

Изменение состояния слоя фиксировалось видеокамерой типа Panasonic AG-DVC30. Затем каждая секунда видеосъемки разбивалась на 50 видеок кадров, что позволяло получить последовательные изображения состояния слоя через каждые 0,04 с. Зная масштаб изображения, можно было получить значения максимальной высоты слоя через каждые 0,04 с и, рассматривая изменение высоты слоя как случайный процесс, получить среднее значение максимальной высоты

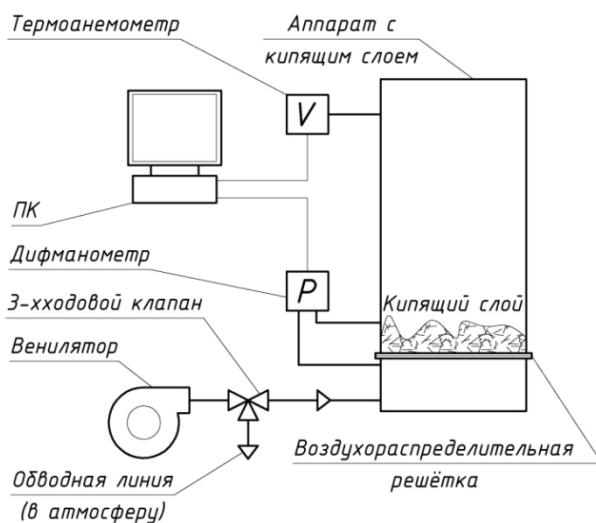


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

слоя за время наблюдения H_m (рассчитывается аналогично давлению по формуле (1)), среднее значение высоты слоя за весь эксперимент H_0 , относительную максимальную высоту слоя

$$H_{\text{отн}} = H_m / H_0. \quad (3)$$

Также по зависимостям, аналогичным представленным выше, можно определить среднеквадратичное отклонение высоты слоя σ_H и далее – относительное среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\text{отн}}$ (аналогично вычислениям для высоты слоя).

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены зависимости изменения перепада давления в слое от скорости воздуха, продуваемого через слой, для разного состава. Темной полосой на графиках отмечен диапазон значений скорости воздуха, соответствующий псевдоожигению. Кипение слоя начинается при скорости U_{mf0} , при наступлении скорости U_{mfi} слой полностью псевдоожиген. Величина минимальной скорости псевдоожигения уменьшается с ростом доли частиц угля в смеси: для слоя, на 100 % состоящего из пеллет, минимальная скорость псевдоожигения равна 2,4 м/с; для слоя, содержащего 15 % частиц угля, – 2,1 м/с, 45 % – 1,75 м/с.

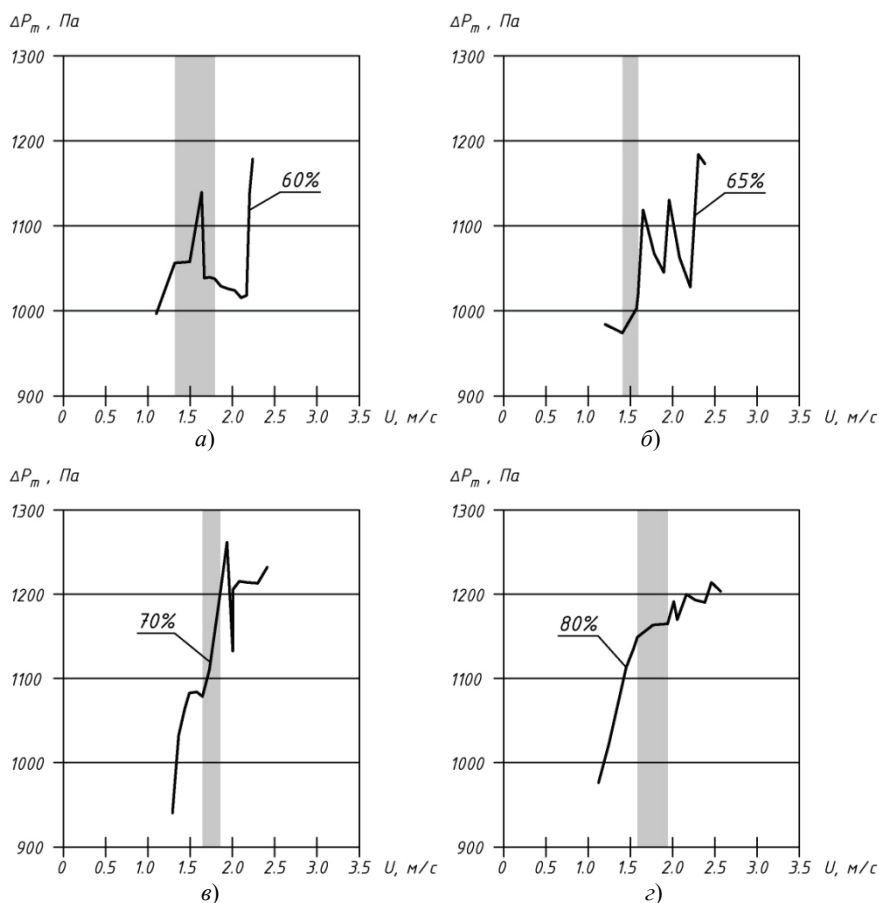


Рис. 2. Зависимость перепада давления в слое от скорости воздуха для смеси соломенных гранул и антрацитового штыба (начало):
a – 60 и 40 % соответственно; *б* – 65 и 35 %; *в* – 70 и 30 %; *з* – 80 и 20 %

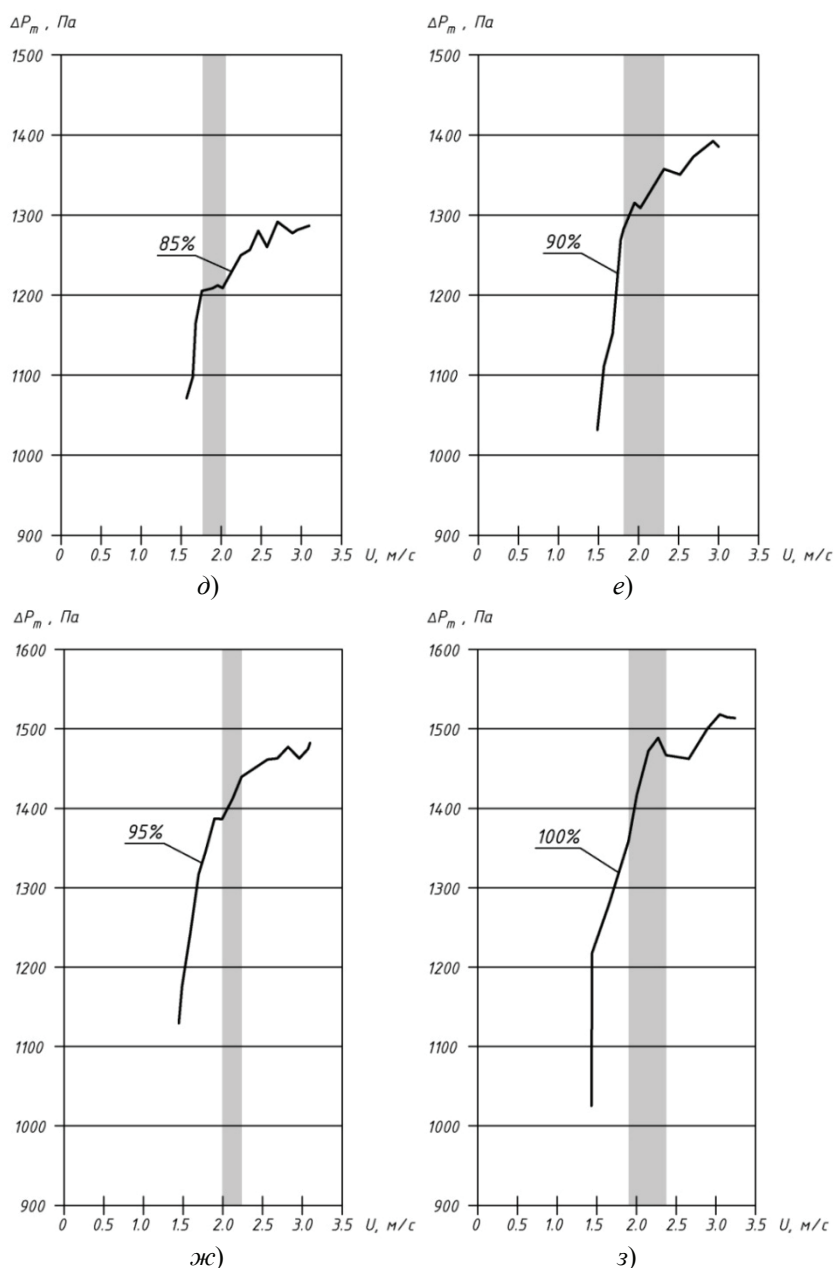


Рис. 2. Окончание:

д – 85 и 15%; е – 90 и 10 %; ж – 95 и 5% соответственно; з – для слоя соломенных гранул

Как видно из рис. 2, для смеси частиц угля и пеллет невозможно использовать график зависимости $\Delta P_m = f(U)$ для определения минимальной скорости псевдоожижения. При содержании пеллет в смеси от 80 до 100 % наблюдается постоянный рост перепада давления в слое при увеличении скорости воздуха, продуваемого через слой, а участка кривой, параллельного оси абсцисс, что обычно соответствует состоянию псевдоожижения, не наблюдается. При меньшем содержании пеллет в смеси на кривой зависимости $\Delta P_m = f(U)$ наблюдается несколько пиков, которые, очевидно, соответствуют переходу в псевдоожиженное

состояние отдельных фракций, но определить по этим кривым значение скорости воздуха, которое соответствовало бы полному псевдооживлению слоя, невозможно.

На рисунке 3 представлены зависимости $\sigma = f(U)$. Для смесей, содержащих от 80 до 100 % пеллет, график зависимости $\sigma = f(U)$ можно разбить на три участка: участок, на котором $\sigma \approx 0$; участок, на котором наблюдается слабый рост σ с увеличением U , и участок, на котором наблюдается резкий рост σ с увеличением U .

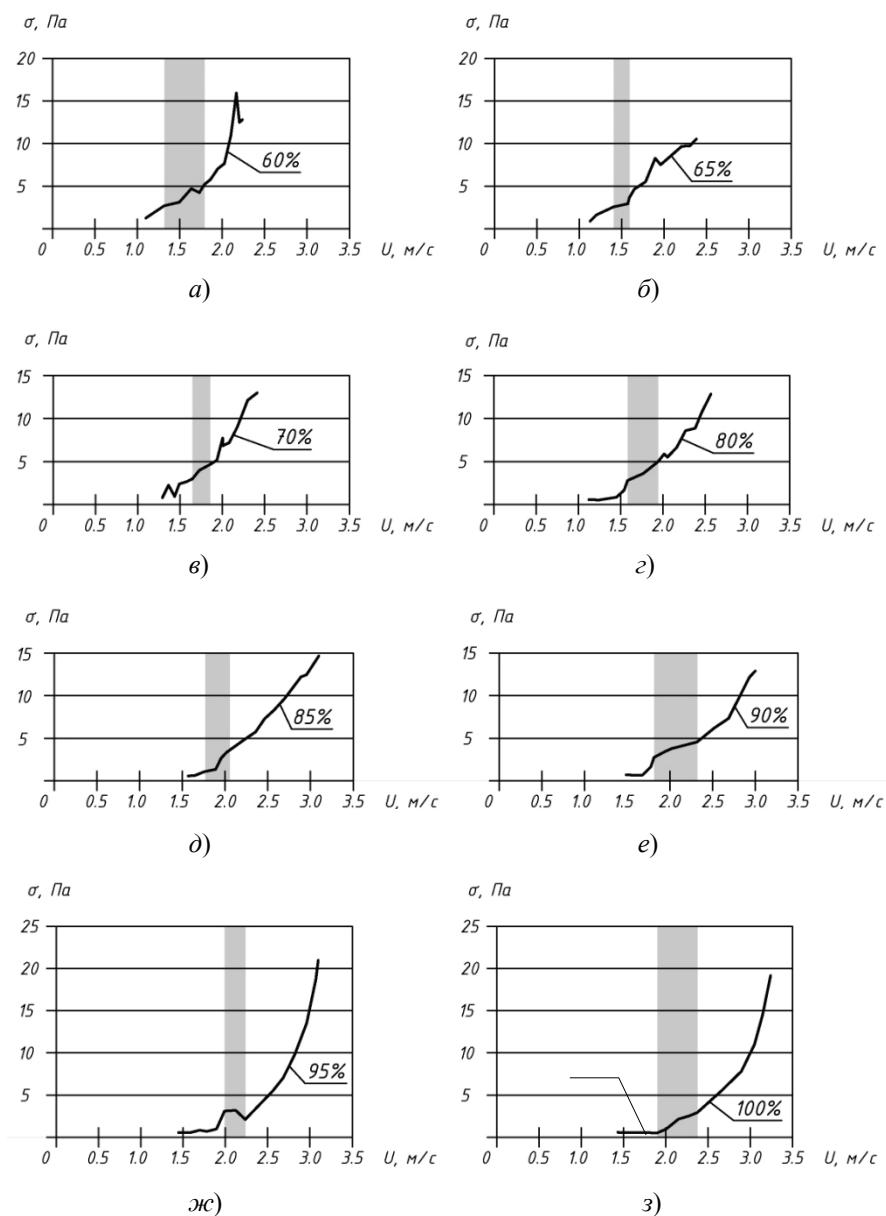


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичного отклонения σ пульсаций перепада давления от скорости воздуха для смеси соломенных гранул и антрацитового штыба: а – 60 и 40 % соответственно; б – 65 и 35 %; в – 70 и 30 %; г – 80 и 20 %; д – 85 и 15 %; е – 90 и 10 %; ж – 95 и 5 % соответственно; з – для слоя соломенных гранул

Для смесей, содержащих гранул меньше, чем 80 %, первый участок практически отсутствует, но второй и третий выделяются четко. Сопоставление рис. 3 с результатами визуальных наблюдений позволяет сделать вывод, что скорость воздуха, соответствующая переходу зависимости $\sigma = f(U)$ от первого участка ко второму, является скоростью, при которой псевдооживление только начинается. Скорость воздуха, соответствующая переходу зависимости $\sigma = f(U)$ от второго участка к третьему, является скоростью, при которой слой становится полностью

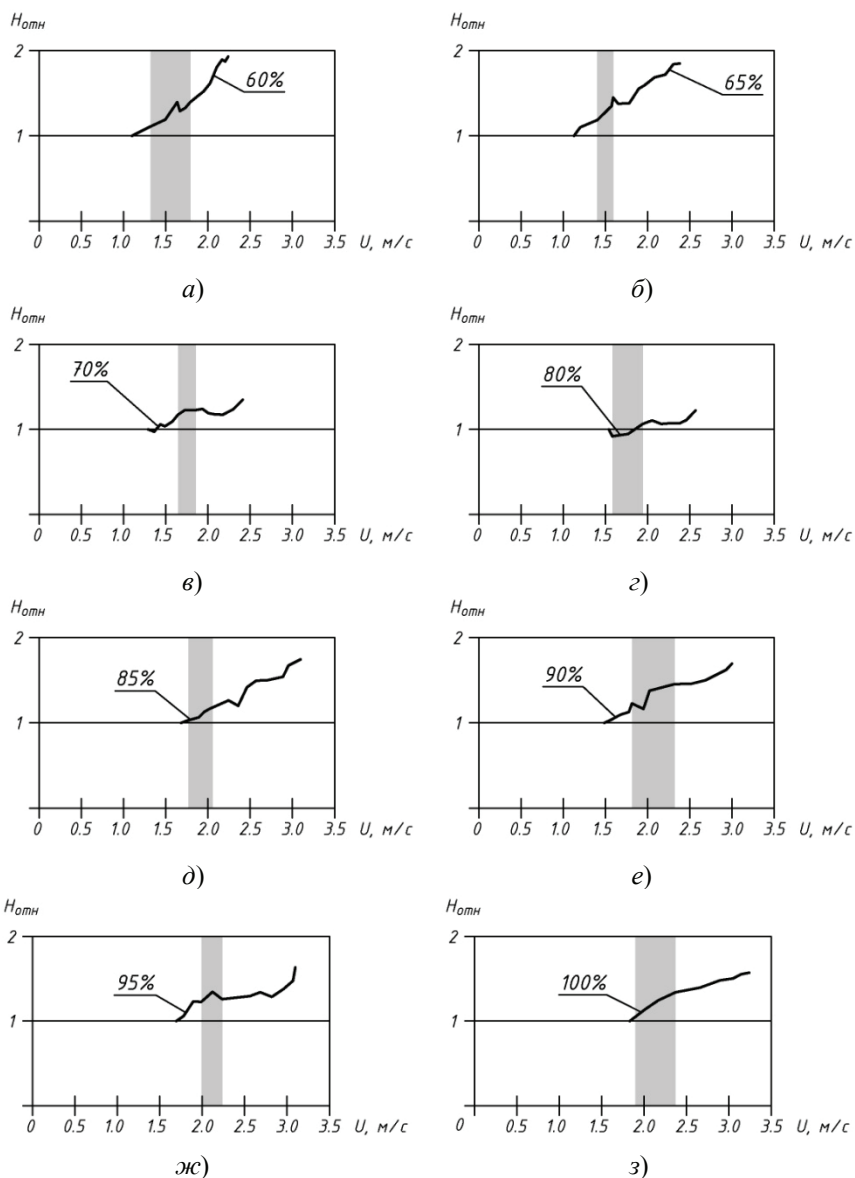


Рис. 4. Зависимость относительной высоты слоя от скорости воздуха для смеси соломенных гранул и антрацитового штыба: а – 60 и 40 % соответственно; б – 65 и 35 %; в – 70 и 30 %; г – 80 и 20 %; д – 85 и 15 %; е – 90 и 10 %; ж – 95 и 5 % соответственно; з – для слоя соломенных гранул

псевдооживленным. Следовательно, графическую зависимость $\sigma = f(U)$ можно использовать для экспериментальной оценки скорости псевдооживления U_{mf} .

Как следует из рис. 4, с увеличением доли pellets от 55 до 80 % наблюдается уменьшение относительной высоты слоя: слой, содержащий 80 % pellets, практически не расширяется, тогда как у слоя, содержащего 55 % pellets, максимальная высота кипящего слоя в 2 раза превосходит высоту неподвижного слоя. С ростом доли pellets в смеси относительная высота слоя начинает вновь увеличиваться: максимальная высота кипящего слоя pellets в 1,5 раза превышает высоту неподвижного слоя.

На рис. 5 представлено изменение относительного среднеквадратичного отклонения высоты слоя $\sigma_{отн}$ от скорости воздуха, которое, очевидно, пропорционально частоте образования и разрушения воздушных пузырей, образующихся в слое и разрушающихся при выходе на его поверхность. С ростом доли pellets

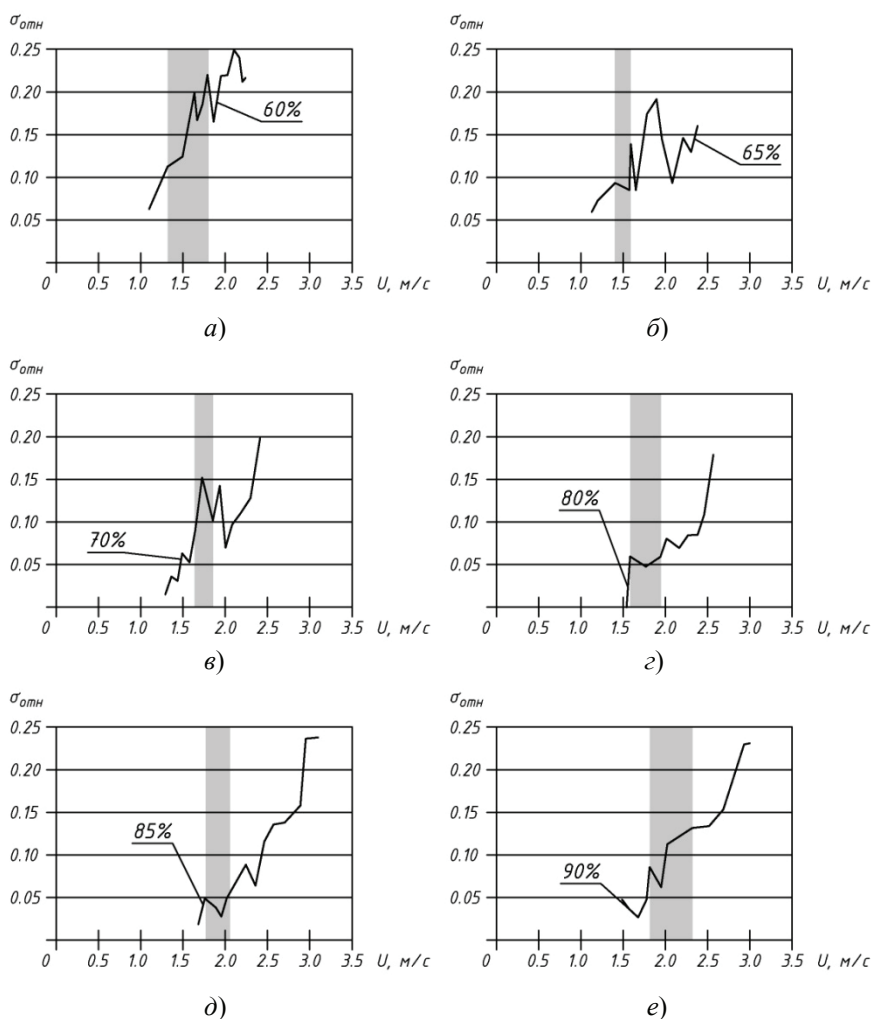


Рис. 5. Зависимость относительного среднеквадратичного отклонения высоты слоя от скорости воздуха для смеси соломенных гранул и антрацитового штыба (начало): а – 60 и 40 % соответственно; б – 65 и 35 %; в – 70 и 30 %; г – 80 и 20 %; д – 85 и 15 %; е – 90 и 10 %

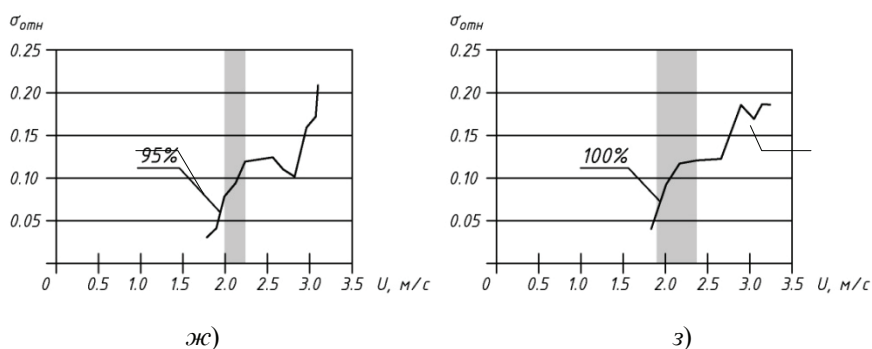


Рис. 5. Окончание: ж) – 95 и 5 % соответственно; з) – для слоя соломенных гранул

от 55 до 80 % происходит уменьшение величины $\sigma_{отн}$, то есть частота образования и размеры воздушных пузырей с ростом доли биогранул уменьшаются. При дальнейшем увеличении доли пеллет в слое начинают образовываться более крупные воздушные пузыри [1], которые при своем разрушении вызывают более резкие колебания верхней границы слоя, что вызывает рост $\sigma_{отн}$.

Уменьшение относительной высоты слоя с ростом доли пеллет означает увеличение высоты сепарационного пространства в топке котла при сохранении габаритов топки и котла, что должно привести к сокращению потерь топлива с уносом.

Выводы

В результате проведенных исследований:

- изучены гидродинамические особенности перехода в псевдооживленное состояние слоя, состоящего из мелких частиц угля и биогранул;
- показано, что увеличение доли биогранул в смеси в целом приводит к уменьшению относительной высоты слоя, снижению частоты образования и размеров воздушных пузырей, что должно снизить потери топлива от механической и химической неполноты сгорания;
- предложен метод оценки минимальной скорости псевдооживления слоя, состоящего из смеси частиц угля и биогранул по кривой изменения среднеквадратичного отклонения пульсации перепада давления в слое от скорости воздуха, продуваемого через слой.

Работа выполняется по государственному контракту с Министерством образования и науки России № П1661.

Список литературы

1. Evaluation of the Minimum Velocity of Polydisperse Bed Fluidization Compounded of Biomass Pellets and their Mixture with Fine Particles of Coal / A. Zorin [and other] // Proceeding of the Conference “Fluidization XIII – New Paradigm in Fluidization Engineering”, Gyeong-ju, Korea, May 16–21, 2010. – Gyeong-ju, 2010. – P. 209–216.

On Defluidization in Polydispersed Fluidized Bed

D.M. Viryasov¹, R.L. Isemin³, S.N. Kuzmin², O.Yu. Milovanov²

*Departments: «Production processes and devices» (1); admin@ido.tstu.ru;
«Hydraulics and Thermal Engineering» (2), TSTU;
Tambov Subsidiary of KARTEK Association (3)*

Key words and phrases: culm; fluidized bed; minimum fluidization velocity; straw pellets.

Abstract: The article presents the results of the study of hydrodynamics of fluidized bed consisting of particles of coal ash and pellets. The experiments were performed for beds with different concentrations of ash and pellets at room temperature.

Zur Defluidisation in der polydispersen Wirbelschicht

Zusammenfassung: Es sind die Resultate der Untersuchung der Hydrodynamik der Siedeschicht, die aus den Teilchen der Kohlenasche und den Pelleten besteht, dargelegt. Die Versuche wurden für die Schichten bei den verschiedenen Konzentrationen der Kohlenasche und der Pelleten bei der Raumtemperatur durchgeführt. Es sind die Segregation der Teilchen und die Defluidisation beschrieben.

Sur de défluidisation dans une couche pseudoliquifiée polydispersée

Résumé: Sont présentés les résultats de l'étude de l'hydrodynamique d'une couche bouillante composée de particules des cendres de charbon et des pellets. Les expériences ont été organisées pour les couches lors de différentes concentrations des cendres et des pellets avec la température ordinaire. Est décrite la ségrégation des paricules et la défluidisation.

Авторы: *Вирясов Дмитрий Михайлович* – аспирант кафедры «Технологические процессы и аппараты», младший научный сотрудник научно-исследовательского сектора, ГОУ ВПО «ТГТУ»; *Исьемин Рафаил Львович* – кандидат технических наук, директор Тамбовского филиала ассоциации КАРТЭК; *Кузьмин Сергей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и теплотехника»; *Милованов Олег Юрьевич* – магистрант кафедры «Гидравлика и теплотехника», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Жуков Николай Павлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидравлика и теплотехника», проректор по социально-воспитательной работе, ГОУ ВПО «ТГТУ».
