

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ СОВМЕСТНОГО СЖИГАНИЯ АНТРАЦИТОВОГО ШТЫБА И БИОГРАНУЛ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

Р.Л. Исьемин, Н.Б. Кондуков, А.В. Михалев,
С.Н. Кузьмин, В.В. Коняхин

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический
университет»

Рецензент В.Ф. Калинин

Ключевые слова и фразы: совместное псевдоожигение, штыб, биогранулы, сжигание.

Аннотация: Представлены результаты исследования псевдоожигения биомассы и угля.

Биомасса представляет собой гранулы, изготовленные из лузги подсолнечника диаметром 12,5 мм и длиной от 2 до 15 мм (плотность 1300 кг/м³). Уголь представляют частицы антрацитового штыба, который на 22 % состоит из частиц размером 0...0,63 мм, на 16,3 % – 0,63...1,0 мм, на 48 % – 1...3 мм, на 12,2 % – 3...6 мм и на 1,1 % – свыше 6 мм. Установлено, что при снижении концентрации биогранул в смеси минимальная скорость псевдоожигения смеси снижается: при доле гранул 50 % $U_{mf} = 1,87$ м/с, при доле гранул 40 % – 1,53 м/с, при доле гранул 20 % – 1,33 м/с, а при содержании биогранул в смеси свыше 60 % наблюдается процесс сегрегации частиц в слое по размерам. Однако в реальной топке с горящим слоем топлива интенсивное псевдоожигение смеси штыба и биогранул может быть получено в случае, если содержание биогранул в смеси не превышает 40 %.

Обозначения

d_1, d_2 – эквивалентный диаметр частиц антрацитового штыба и диаметр частиц биогранул соответственно, мм;	h – расстояние от воздухораспределительной решетки, м;
F – коэффициент формы для частиц антрацитового штыба;	H – высота слоя, м;
g – ускорение силы тяжести, м/с ² ;	Q_n, Q_n^1, Q_n^2 – теплота сгорания смеси штыба и биогранул, теплота сгорания штыба и биогранул соответственно, МДж/кг;

Исьемин Р.Л. – кандидат технических наук, директор учебно-информационного биоцентра при ИДО ТГТУ; Кондуков Н.Б. – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» Академии тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова, г. Москва; Михалев А.В. – аспирант кафедры «Гидравлика и теплотехника» ТГТУ; Кузьмин С.Н. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и теплотехника» ТГТУ, директор ИДО ТГТУ; Коняхин В.В. – инженер ИДО ТГТУ.

n – показатель степени;
 p – давление, Па;
 ΔP – перепад давления в слое, Па;
 S – удельная поверхность частиц;
 U_f – скорость газа, м/с;
 U_0 – минимальная скорость псевдоожижения смеси частиц, м/с;
 U_1 – минимальная скорость псевдоожижения частиц штыба, м/с;
 U_i – скорость движения газа между частицами слоя, м/с;
 V^0, V^{01}, V^{02} – теоретически необходимое количество воздуха для сжигания смеси топливной смеси, состоящей из штыба и биогранул, а также для сжигания только штыба и биогранул соответственно, $\text{нм}^3/\text{кг}$;
 x_1 – доля частиц антрацитового штыба в смеси;

x_2 – доля биогранул в смеси;
 Re – критерий Рейнольдса;
 Ag – критерий Архимеда;
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_0$ – порозность слоя штыба, биогранул и слоя, состоящего из смеси биогранул и штыба, в состоянии минимального псевдоожижения;
 $\rho_s, \rho_1, \rho_2, \rho_{1b}, \rho, \rho_b$ – плотность твердых частиц, плотность частиц антрацитового штыба и биогранул, насыпная плотность частиц антрацитового штыба, плотность слоя, состоящего из смеси частиц, насыпная плотность слоя, состоящего из смеси частиц штыба и биогранул, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 ρ_f – плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 μ_f – вязкость газа, Па·с.

Известные преимущества технологии псевдоожижения (большая поверхность взаимодействия твердых частиц с газом, малые градиенты температур в объеме слоя, высокая интенсивность теплообмена слоя с погруженными в него поверхностями и др.) являются причиной поиска способов применения данной технологии для химической, термической и механической обработки материалов, с трудом переводимых в псевдоожиженное состояние и то только при высоких скоростях псевдоожижающего газа.

Прежде всего к ним относятся крупнозернистые и гранулированные материалы, например некоторые виды сельскохозяйственной продукции или топливные биогранулы из сельскохозяйственных и древесных отходов, производство которых расширяется как в России, так и за рубежом. Эти материалы, согласно классификации, предложенной Д. Гелдарт (D. Geldart), относятся к группе D [1]. Псевдоожижение частиц, относящихся к этой группе, требует высоких скоростей газа и сопровождается образованием больших газовых пузырей, быстро поднимающихся в слое, что ухудшает условия взаимодействия между твердой и газовой фазами слоя [2]. Еще в ранних работах предлагалось псевдоожижение крупных частиц (например, в установках по замораживанию гороха, сушке лекарственных таблеток и т.п.) вести в слое мелких частиц, которые можно отнести к группам А, В или С по Гелдарту (частицы, относящиеся к группе А, имеют размеры 20...100 мкм, к группе В – 40...500 мкм, к группе С – менее 30 мкм). В этих установках подбирали размеры и плотность мелких частиц таким образом, что удавалось избежать сегрегации в псевдоожиженном слое частиц по плотности и размерам, т.е. наблюдалось совместное псевдоожижение мелких и крупных частиц [3]. Более того, крупные и тяжелые частицы свободно перемещались в объеме слоя, переходя в псевдоожиженное состояние при скорости газа на много меньшей, чем требовалась для их индивидуального псевдоожижения. В настоящее время данная технология обработки крупных частиц используется для сушки сельскохозяйственных продуктов [4] или сжигания топливных гранул [5].

Организация совместного псевдооживления мелких и крупных частиц может повысить эффективность работы аппаратов с псевдооживленным слоем: возможно снижение скорости минимального псевдооживления крупных частиц и, соответственно, снижение затрат энергии на прокачку псевдооживляющего газа, а также повышение минимальной скорости псевдооживления мелких частиц в их смеси с крупными и снижение уноса мелких частиц из слоя.

Исследование процесса совместного псевдооживления мелких и крупных частиц актуально применительно к организации процесса совместного сжигания в псевдооживленном слое низкосортного мелкозернистого угля и гранул, изготовленных из отходов биомассы. К углю добавляются биогранулы с целью снижения эмиссии двуоксида углерода и окислов серы, а также для ускорения процесса подготовки к воспламенению и стабилизации горения низкорекреационных углей. Для совместного сжигания мелкозернистого низкосортного угля и биогранул нами разработан водогрейный жаротрубно-дымогарный котел, оборудованный топкой с высокотемпературным псевдооживленным слоем [6].

Основам гидродинамики совместного псевдооживления полидисперсных смесей в литературе уделялось недостаточно внимания. Предложенные эмпирические или аналитические зависимости для определения скорости минимального псевдооживления смеси крупных и мелких частиц пригодны для использования только в случае малых (2...15 % от веса смеси) концентраций крупных частиц [7] и при псевдооживлении очень мелких частиц ($Re_{mf} = 10$) [8]. При выводе аналитических зависимостей для расчета минимальной скорости псевдооживления многокомпонентных систем частиц используются неоправданные допущения [9], либо зависимости получены по результатам обработки узкого диапазона экспериментальных данных и применимы, соответственно, только в этом диапазоне [10]. Здесь под минимальной скоростью псевдооживления понимается та скорость газа, отнесенная к поперечному сечению аппарата, при которой все частицы, составляющие полидисперсный слой, переходят в псевдооживленное состояние.

Целью настоящей работы является получение физически достоверной аналитической зависимости для расчета минимальной скорости псевдооживления смеси частиц мелкозернистого угля и биогранул, а также проверка полученной зависимости путем сопоставления результатов расчета с опытами на «холодной» модели при комнатной температуре и апробация полученных результатов при совместном сжигании указанных выше топлив в топке с псевдооживленным слоем действующего котла.

Для ясности дальнейшего изложения сразу оговоримся, что в качестве низкосортного мелкозернистого угля нами использовался антрацитовый штыб, а в качестве биогранул – гранулы, изготовленные из лузги подсолнечника (табл. 1).

По аналогии с работой [8] будем определять перепад давления при течении газа через пористую среду по формуле

$$dP/dh = k\rho_f(\mu_f/\rho_f)^{(2-n)}(U_f/\varepsilon)^n[S(1-\varepsilon)/\varepsilon]^{(2-n)}, \quad (1)$$

где S – удельная поверхность частиц (поверхность частиц слоя, приходящаяся на единицу его объема).

Таблица 1

Характеристики частиц антрацитового штыба и биогранул

Характеристика топлива	Антрацитовый штыб	Гранулы из лузги подсолнечника
Теплота сгорания, МДж/кг	20,9	18,46
Зольность, %	27,9	5,4
Влажность, %	8,5	7,7
Выход летучих веществ, %	4,0	67,9
Содержание серы, %	1,25	0,1
Плотность частиц топлива, кг/м ³	1400	1300
Характеристики фракционного состава:		
сита, мм – массовая доля, %		
0...0,5	5,9	Средний диаметр – 12 мм, средняя длина – 12,5 мм
0,5...1,0	11,4	
1,0...2,0	27,3	
2,0...4,0	35,3	
4,0...6,0	18,5	
> 6,0	1,6	

Интегрирование выражения (1) по высоте слоя H приводит к выражению

$$\Delta P/H = k\rho_f(\mu_f/\rho_f)^{(2-n)}(U_f/\varepsilon)^n[S(1-\varepsilon)/\varepsilon]^{(2-n)}. \quad (2)$$

В момент начала псевдоожижения

$$\Delta P/H = (\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon_0)g. \quad (3)$$

Это приводит к следующему выражению для минимальной скорости псевдоожижения [8]

$$U_0 = k^{-1/n}[(\rho_s - \rho_f)/\rho_f]^{1/n}(\mu_f/\rho_f)^{(1-2/n)}g^{1/n}[(\varepsilon_0)^3/(1 - \varepsilon_0)^{2-n}]^{1/n}S^{(1-3n)}. \quad (4)$$

Для частиц антрацитового штыба, которые используются в нашем исследовании в качестве мелкозернистого угля, удельная поверхность $S = 6/F_1 d_1$ [11, с. 16 – 17], причем $F_1 = 0,67$ [11, с. 80]. Для гранул цилиндрической формы, имеющих диаметр d и длину l , удельная поверхность будет равна [11, с. 15]:

$$S_2 = (6/d_2)[2/3 + (1/3)(d_2/l_2)]. \quad (5)$$

В нашем случае длина гранул равна их диаметру (см. табл. 1), поэтому удельная поверхность таких гранул будет равна $S = 6/d_2$.

В таком случае выражение для S примет вид [8]:

$$S = (6/d_1)[(x_1 + (d_1/d_2 F_1)x_2)]. \quad (6)$$

На наш взгляд, очень важно, что согласно выражению (6) не требуется определять некий эквивалентный диаметр смеси частиц штыба и гра-

нул, так как из-за того, что частицы штыба и гранул значительно отличаются по размерам, расчеты некоего эквивалентного диаметра смеси по известным зависимостям дают сильно заниженные результаты.

В работе [8] для определения минимальной скорости псевдооживления смеси частиц предложена формула для сферических частиц

$$U_0 = U_1 \{ (\varepsilon_0/\varepsilon_1)^3 [(1 - \varepsilon_1)/(1 - \varepsilon_0)]^{(2-n)} \}^{1/n} [x_1 + (d_1/d_2)x_2 + \dots]^{(1-3/n)}, \quad (7)$$

которая с учетом выражения (6) может быть для двухкомпонентной смеси частиц штыба и биогранул может быть преобразована к виду:

$$U_0 = U_1 \{ (\varepsilon_0/\varepsilon_1)^3 [(1 - \varepsilon_1)/(1 - \varepsilon_0)]^{(2-n)} \}^{1/n} [(x_1/F_1) + (d_1/d_2)x_2]^{(1-3/n)}. \quad (8)$$

Для крупных частиц, которые рассматриваются в настоящем исследовании $U_0 \sim d^{0,5}$ [13, с. 145], поэтому показатель степени у последнего члена справа в выражении (8)

$$1 - 3/n = -0,5, \quad \text{т.е.} \quad n = 2.$$

Тогда уравнение (8) примет вид

$$U_0 = U_1 \{ (\varepsilon_0/\varepsilon_1)^3 \}^{1/2} [x_1 + (d_1/d_2 F_1)x_2]^{-0,5}. \quad (9)$$

Порозность слоя, состоящего из одного антрацитового штыба, может быть легко определена [11, с. 8] в случае, если известна насыпная плотность штыба

$$\varepsilon_1 = 1 - \rho_b/\rho_1. \quad (10)$$

Порозность слоя, состоящего из смеси частиц антрацитового штыба и биогранул, может быть рассчитана следующим образом.

Пусть насыпная плотность смеси частиц ρ_b равна сумме насыпных плотностей составляющих эту смесь компонентов с учетом их весовой доли

$$\rho_b = x_1\rho_1 + x_2\rho_2, \quad (11)$$

или

$$\rho(1 - \varepsilon_0) = x_1(1 - \varepsilon_1)\rho_1 + x_2(1 - \varepsilon_2)\rho_2. \quad (12)$$

Если плотности составляющих смесь частиц равны друг другу или близки (как в случае антрацитового штыба и биогранул), то выражение (12) примет вид

$$1 - \varepsilon_0 = x_1(1 - \varepsilon_1) + x_2(1 - \varepsilon_2), \quad (13)$$

или

$$\varepsilon_0 = 1 - [x_1(1 - \varepsilon_1) + x_2(1 - \varepsilon_2)]. \quad (14)$$

Используя совместно выражения (9) и (14) можно определить минимальную скорость псевдооживления смеси частиц антрацитового штыба и биогранул. Предложенные зависимости можно использовать и для определения минимальной скорости псевдооживления смеси других крупных частиц, внося соответствующие коррективы, учитывающие изменения значения коэффициента формы частиц.

Рассчитанные по уравнениям (9) и (14) и измеренные значения порозности и минимальной скорости псевдооживления смеси в зависимости от ее состава приведены в табл. 2. Для сравнения в эту таблицу включены

результаты расчета минимальной скорости псевдооживления по зависимости, предложенной в работе [9].

Как видно из табл. 2, с увеличением концентрации биогранул минимальная скорость псевдооживления смеси частиц штыба и биогранул должна возрастать. Одновременно с этим должна возрастать и порозность слоя в момент его перехода в псевдооживленное состояние. Как известно [12, с. 52], чем выше порозность слоя, состоящего из частиц разных размеров, тем отчетливее в этом слое наблюдается сегрегация частиц по размерам. Следовательно, с повышением концентрации биогранул в смеси добиться совместного псевдооживления биогранул и штыба будет труднее. Эти выводы нашли свое экспериментальное подтверждение в ходе опытов на «холодной» модели и на действующем котле.

Процесс псевдооживления смеси штыба и биогранул был исследован на «холодной» модели при температуре 20 °С в аппарате с прозрачными стенками, который имел сечение 483 × 195 и высоту 1500 мм. Аппарат устанавливался на перфорированную воздухораспределительную решетку (доля «живого сечения» 5 %), закрытую сверху сеткой для исключения попадания мелких частиц в отверстия решетки. Перепад давления измерялся только в слое дифференциальным манометром. Скорость воздуха на выходе из аппарата измерялась в трех точках с помощью термоанемометра «Testo 405 V1». Характеристики частиц штыба и гранул, используемых в настоящем исследовании, представлены в табл. 1.

В слой последовательно загружались порции частиц, содержащих 20, 40, 50, 60 и 100 % биогранул и 80, 60, 50 и 40 % антрацитового штыба соответственно. Вес частиц, загружаемых в аппарат, был постоянен и равен 5700 г. После загрузки в аппарат порции частиц включалась воздуходувка, и слой частиц переводился в псевдооживленное состояние, постепенно увеличивая расход воздуха и измеряя при этом перепад давления в слое и высоту расширившегося слоя.

Было установлено, что слой антрацитового штыба переходит в псевдооживленное состояние при скорости воздуха, отнесенной к поперечному сечению аппарата, равной 1,0 м/с, что в 2,37 раза меньше той скорости воздуха, при которой наблюдается псевдооживление слоя биогранул. В слое, состоящем из смеси частиц штыба и биогранул, псевдооживление

Таблица 2

Сопоставление измеренных и рассчитанных значений минимальной скорости псевдооживления смеси частиц антрацитового штыба и биогранул в зависимости от концентрации последних

Источник получения данных	$x_2 = 0,2$	$x_2 = 0,4$	$x_2 = 0,5$	$x_2 = 0,6$	$x_2 = 0,8$
Расчет U_0 , м/с, по зависимостям (9) и (13)	1,17	1,49	1,65	1,85	2,39
Эксперимент, U_0 , м/с	1,33	1,53	1,87	2,07	2,27
Расчет U_0 по [9], м/с	1,23	1,4	1,52	1,64	1,95
Расчет ε_0 по зависимости (13)	0,379	0,385	0,441	0,462	0,503
Эксперимент, ε_0	0,335	0,364	0,423	0,558	0,55

штыба начинается до того, как во взвешенное состояние перейдут биогранулы. Со снижением концентрации биогранул в смеси значения минимальной скорости псевдооживления уменьшаются, приближаясь в пределе к минимальной скорости псевдооживления одного только штыба. То есть добавление к крупным гранулам мелких частиц штыба оказывает такое же влияние на поведение слоя как и добавление мелких частиц, относящихся к группе А или В.

Визуальные наблюдения за процессом псевдооживления слоя, состоящего из штыба и гранул, показали (рис. 1), что при концентрации биогранул в смеси равной 20 % и скорости воздуха 1,17...1,18 м/с в слое наблюдаются отдельные фонтаны поднимающихся частиц штыба, в то время как гранулы неподвижны. При скорости 1,2 м/с в псевдооживленное состояние переходит весь слой, но наблюдается небольшое залегание частиц у стенок аппарата и только при скорости воздуха равной 1,33 м/с слой становится полностью псевдооживленным. При 40%-ном содержании биогранул в смеси в слое наблюдаются отдельные фонтаны частиц штыба при скорости воздуха равной 1,33 м/с, при скорости воздуха равной 1,32 м/с слой «кипит» только на глубину 10...20 мм (считая от верхней границы слоя), при скорости воздуха равной 1,43 м/с слой частиц штыба и гранул находится в псевдооживленном состоянии, но имеет место залегание частиц у стенок аппарата, и лишь при скорости воздуха равной 1,53 м/с псевдооживленный слой занимает все поперечное сечение аппарата. При 50%-ном содержании биогранул в смеси при скорости воздуха 1,43 м/с имеет место

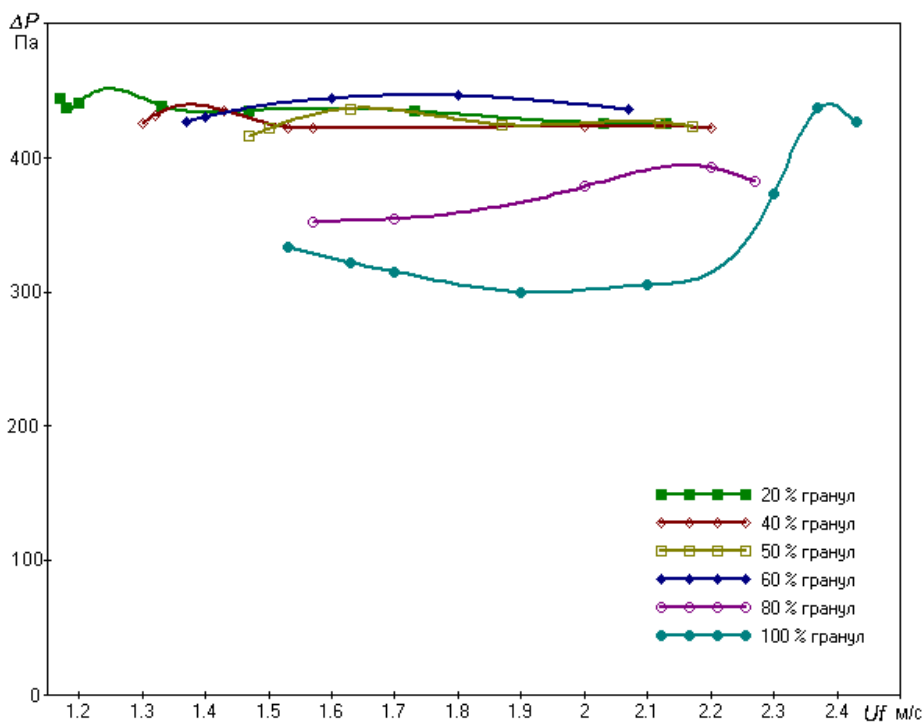


Рис. 1 Значения перепада давления в слое в зависимости от скорости воздуха и состава смеси

очаговое «кипение» штыба, при скорости воздуха равной 1,5 м/с слой штыба «кипит» по всей площади поперечного сечения аппарата, но на глубину только 15 мм, при скорости воздуха равной 1,63 м/с слой «кипящего» штыба занимает весь объем аппарата, но гранулы неподвижны и только при скорости воздуха равной 1,87 м/с в псевдооживенное состояние переходит весь слой (и штыб, и гранулы). При концентрации гранул в смеси равной 60 % полное псевдооживение слоя наступает только при скорости воздуха равной 2,07 м/с, при меньших скоростях газа наблюдается явление сегрегации частиц слоя по размерам – на воздухораспределительной решетке аппарата лежит слой неподвижных гранул (высота этого слоя 10...20 мм). При 80%-ной концентрации биогранул в смеси псевдооживение наступает при скорости воздуха равной 2,27 м/с, причем явление сегрегации частиц по размерам усиливается: движение частиц наблюдается только на глубине до 50 мм от верхней границы слоя, на воздухораспределительной решетке лежат неподвижные гранулы. И, наконец, в слое, состоящем только из биогранул, псевдооживение начинается при скорости 2,37 м/с, причем частицы движутся медленно, а слой расширяется только на 10 % при переходе в псевдооживенное состояние.

Как видно из табл. 2 расчеты минимальной скорости псевдооживения по предложенным нами зависимостям (9) и (14) хорошо согласуются с экспериментальными данными и позволяют определять значения U_0 точнее, чем это позволяет зависимость, предложенная в [9].

Результаты расчетов ε_0 по зависимости (14) также неплохо согласуются с экспериментальными данными. Порозность слоя при его переходе в псевдооживенное состояние возрастает с увеличением доли биогранул, достигает максимума при концентрации биогранул равной 60 %, а затем практически не меняется (см. табл. 2). Как уже отмечалось, чем выше порозность псевдооживенного слоя, тем более отчетливо наблюдается сегрегация частиц в этом слое по размерам. Причем существует такое минимальное значение порозности, ниже которого сегрегации частиц по размерам вообще не наблюдается [12, с. 52]. Результаты экспериментов свидетельствуют, что для слоя, состоящего из антрацитового штыба и биогранул, таким значением является $\varepsilon_0 \approx 0,55$. Это значение порозности соответствует концентрации биогранул в смеси $x = 0,6$. Следовательно, при более высокой концентрации биогранул в смеси из-за сегрегации частиц, составляющих слой, по размерам добиться совместного псевдооживения антрацитового штыба и биогранул (при температуре псевдооживающего воздуха 20 °С) невозможно.

Псевдооживение биогранул в слое антрацитового штыба происходит при значении средней скорости движения воздуха между частицами слоя $U_i = 3,97...4,13$ м/с, которая практически не зависит от концентрации биогранул в смеси и близка к значению $U_i = 4,47$ м/с, при которой переходят в псевдооживенное состояние биогранулы в случае, когда частиц штыба в слое нет. При этом значения U_i определялись как $U_i = U_f/\varepsilon$. Псевдооживение таких крупных частиц как биогранулы (в отсутствии штыба), очевидно, может происходить только за счет кинетической энергии потока воздуха, движущегося между гранулами, а не за счет вязкости этого потока

[13]. Следовательно, и в слое, состоящем из частиц штыба и гранул, псевдооживление биогранул происходит за счет кинетической энергии потока воздуха, а не за счет вязкости воздуха или вязкости суспензии «штыб – воздух». В этом случае, пренебрегая вязкостью псевдооживляющего газа, можно записать [13]

$$1,75(\text{Re}_0)^2 = \text{Ar} \quad \text{или} \quad \rho_f(U_0)^2 = \text{const.} \quad (15)$$

С ростом температуры плотность псевдооживляющего газа снижается, а минимальная скорость псевдооживления растет. Зная значение U_0 и плотность псевдооживляющего газа при комнатной температуре можно найти значение константы в уравнении (15), а зная плотность псевдооживляющего газа при интересующей нас температуре – значение U_0 при данной температуре.

Температура воспламенения антрацитового штыба в псевдооживленном слое равна 650...700 °С [14]. Для прогрева частиц штыба до указанной температуры, согласно нашим расчетам, температура псевдооживляющего газа должна быть ≈ 1000 °С.

В табл. 3 представлены результаты расчета константы в уравнении (15), значения U_0 для различного состава смеси при температуре псевдооживляющего газа 1000 °С и значения скорости газов в сечении псевдооживленного слоя в топке котла при указанной температуре.

В действующем котле, схема которого представлена на рис. 2, площадь поперечного сечения слоя равна 0,452 м². Диаметр жаровой трубы котла равен 1100 мм, длина жаровой трубы – 1200 мм, доля «живого» сечения воздухораспределительной решетки реального котла составляет 5 %.

При определении скорости газов в сечении псевдооживленного слоя предполагалось, что слой штыба и гранул псевдооживляется газом при температуре 1000 °С, причем объем этого газа равен объему воздуха, необходимого для сгорания топлива при концентрации кислорода за топкой равной 10 %. Данный уровень концентрации был выбран из тех соображений, что при периодической загрузке топлива в топку котла, как будет показано ниже, концентрация кислорода в дымовых газах меняется от 15 до 5 %, т.е. среднее значение концентрации кислорода будет равным 10 %.

Таблица 3

Расчетные характеристики слоя частиц штыба и биогранул при температуре 1000 °С

x_2	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
Значение константы в уравнении (15)	2,282	3,02	4,51	5,528	6,647	7,617
U_0 (при 1000 °С), м/с	2,67	3,07	3,75	4,15	4,56	4,87
Скорость газа в слое, м/с	3,41	3,23	3,15	3,11	3,0	2,89

Ошибка!

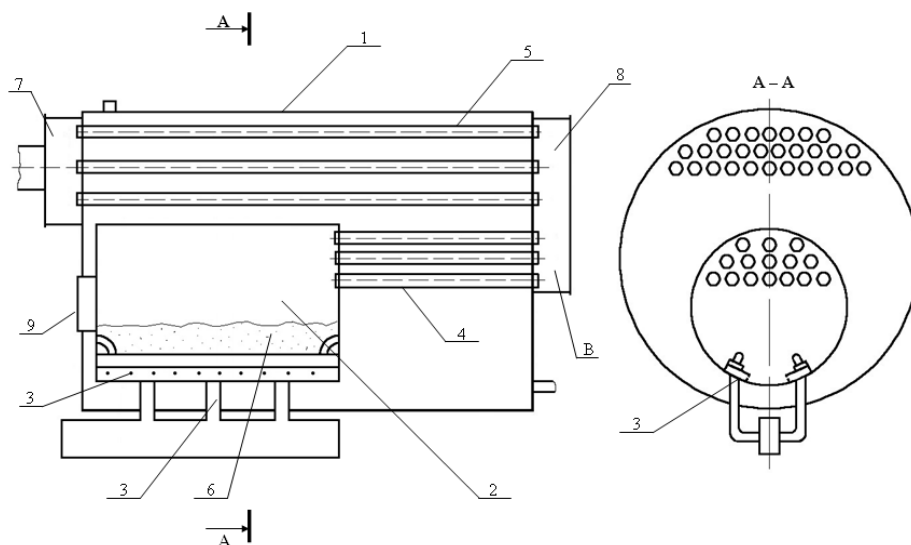


Рис. 2 Схема котла:

1 – корпус котла; 2 – жаровая труба; 3 – устройство ввода дутьевого воздуха под слой топлива; 4 – короткие дымогарные трубы; 5 – длинные дымогарные трубы; 6 – псевдоожиженный слой; 7 – передняя дымовая коробка; 8 – задняя дымовая коробка; 9 – дверка топки котла; В – место отбора проб дымовых газов

При определении теоретически необходимого объема воздуха для горения биогранул и штыба использовались известные зависимости [15, с. 22] и данные элементного состава рабочей массы штыба и гранул. Объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания штыба, получился равным $V^{01} = 6,43 \text{ нм}^3/\text{кг}$, а для сжигания биогранул $V^{02} = 4,38 \text{ нм}^3/\text{кг}$. Теоретические объемы воздуха, необходимые для сжигания смеси штыба и гранул, так же как и теплота сгорания смеси, рассчитывались по формуле $V^0 = x_1 V^{01} + x_2 V^{02}$. Теплота сгорания топливной смеси рассчитывалась по формуле $Q_n = x_1 Q_n^1 + Q_n^2$. Все расчеты велись для номинальной производительности котла 300 кВт при КПД котла равном 75 %.

Подчеркнем, что в действующей топке с высокотемпературным псевдоожиженным слоем, состоящим из биогранул и антрацитового штыба, значения минимальной скорости псевдоожижения могут быть меньше представленных в табл. 3. Фактическое уменьшение значений U_0 может произойти за счет дробления биогранул и уменьшения их удельного веса (примерно в 3 раза [16]) после выделения летучих веществ. Значения U_0 , представленные в табл. 3, есть тот предел, при достижении которого гарантируется переход слоя штыба и гранул в псевдоожиженное состояние.

Как видно из табл. 3 в топке с псевдоожиженным слоем при температуре псевдоожижающего газа 1000 °С возможно псевдоожижение слоя антрацитового штыба и биогранул только при концентрации биогранул не выше 40 %. При концентрации биогранул в смеси от 50 % и выше антрацитовый штыб будет находиться в псевдоожиженном состоянии, но гра-

нулы могут быть неподвижны. Плохое перемешивание (или отсутствие перемешивания) штыба и гранул при концентрации последних выше 50 % не обеспечит равномерный и быстрый прогрев штыба во всем объеме слоя, поэтому при высоких концентрациях гранул в смеси не следует ожидать высоких скоростей ее горения.

Данный вывод был подтвержден в ходе экспериментов на действующем котле.

Перед началом опытов готовились топливные смеси, состоящие на 100 % из угля; на 100 % из гранул; на 80 % из угля и 20 % из гранул, на 60 % из угля и на 40 % из гранул на 40 % из угля и на 60 % из гранул. Биогранулы при подготовке смесей не измельчались.

Котел работал в номинальном режиме, при этом в его топке поочередно сжигались топливные смеси указанного выше состава. Порции топлива весом 30 кг забрасывались в топку котла вручную через дверцу. Топливо забрасывалось на слой шлака и золы, оставшиеся от прогорания предыдущей порции. При переходе на сжигание топливной смеси другого состава из котла полностью удалялась зола и шлак, а котел разжигался вновь. После заброса порции топлива через каждые 60 секунд определялись температура и содержание в уходящих газах O_2 , CO_2 , CO , NO_2 , SO_2 . Определение химического состава и температуры дымовых газов проводилось в задней дымовой коробке (см. поз. 8, рис. 2) котла после прохода газов по коротким дымогарным трубам (см. поз. 5, рис. 2). Концентрации указанных компонентов измерялись с помощью газоанализатора «Газотест».

Время горения штыба или «промежуточного продукта» оценивалось, по аналогии с [17], по изменению концентрации кислорода в дымовых газах. Считалось, что горение порции топлива завершилось, если концентрация кислорода в дымовых газах достигала того значения, которое было перед началом опыта. Кривые изменения концентрации кислорода в дымовых газах представлены на рис. 3. Как видно из этого рисунка при сжигании одного антрацитового штыба после подачи свежей порции топлива в течение примерно 300 секунд концентрация кислорода в дымовых газах не меняется, оставаясь на довольно высоком уровне (14,5 %), который был после чистки топки от золы и шлака, оставшихся от сжигания предыдущей порции топлива. Очевидно, что в этот период времени протекает процесс сушки и прогрева штыба, т.е. процесс подготовки штыба к воспламенению. Затем концентрация кислорода падает, т.е. начинается процесс горения штыба. Достигнув своего минимального значения, концентрация кислорода начинает вновь расти по мере выгорания порции топлива и достигает своего исходного значения при завершении процесса горения топлива. Весь процесс горения порции антрацитового штыба в топке котла нашей конструкции занимает 650 секунд. При сжигании смеси антрацитового штыба и биогранул процессы протекают аналогично описанному выше, но значительно быстрее. При добавлении к штыбу биогранул происходит резкое снижение продолжительности горения топливной смеси в сравнении с продолжительностью горения одного штыба (с 650 до 420 с), если концентрация биогранул в смеси не превышает 40 %. В этом диапазоне концентраций слой штыба и гранул, согласно нашим расчетам, находится

в псевдооживленном состоянии, биогранулы равномерно распределяются по объему слоя, горение летучих веществ, выделяющихся из гранул, в

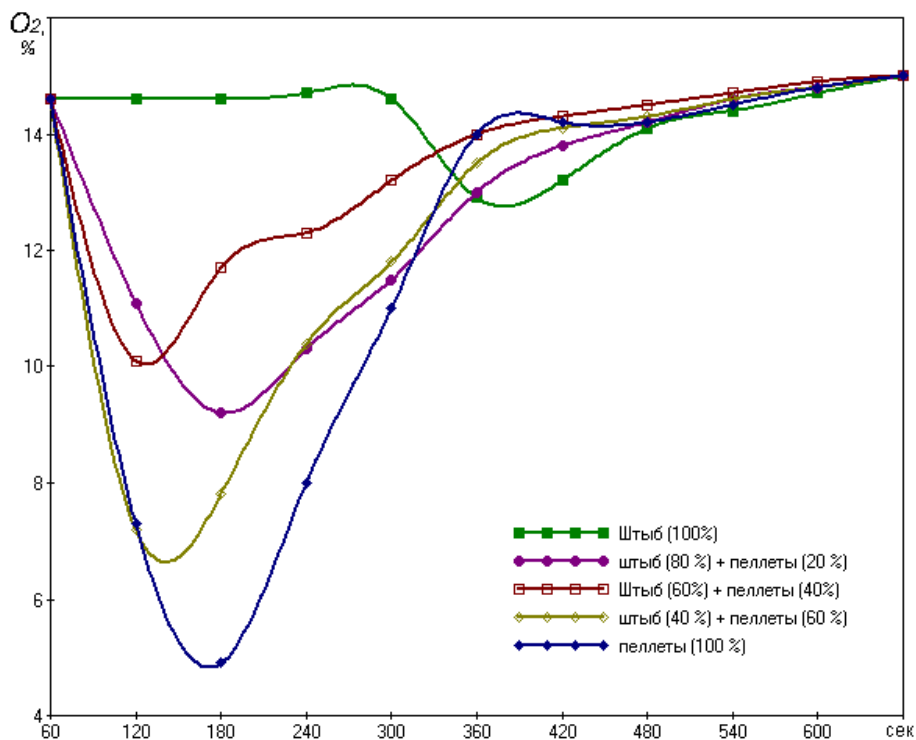


Рис. 3 Кривые изменения концентрации кислорода в дымовых газах

максимальной степени способствует прогреву штыба и ускоряет процесс его подготовки к воспламенению. При увеличении концентрации биогранул в смеси псевдооживление слоя прекращается, скорость в верхнем сечении слоя снижается, перемешивание частиц топлива ухудшается, и продолжительность горения уменьшается только на 60 секунд при росте концентрации биогранул с 40 до 100 %. Рост концентрации биогранул в смеси увеличивает эмиссию двуокиси азота в атмосферу. При сжигании антрацитового штыба без гранул эмиссия окиси углерода составляет 2370 мг/м^3 . С увеличением доли гранул в смеси со штыбом эмиссия CO возрастает и достигает своего максимального значения 3177 мг/м^3 (при сжигании одних гранул). С увеличением доли биогранул возрастает эмиссия двуокиси азота в атмосферу с $210,4 \text{ мг/м}^3$ ($x_2 = 20 \%$) до $315,2 \text{ мг/м}^3$ ($x_2 = 100 \%$).

Заключение

В результате проведенного исследования:

1 Получено аналитическое выражение для определения минимальной скорости псевдооживления смеси биогранул и антрацитового штыба, которое позволяет с высокой точностью производить расчеты и метод оценки изменения минимальной скорости псевдооживления смеси биогранул и штыба с учетом температуры. Метод подтвержден экспериментами на

действующем котле при совместном сжигании антрацитового штыба и биогранул.

2 Совместное псевдоожижение антрацитового штыба и биогранул возможно при концентрации биогранул не выше 60 % при ожигении воздухом при комнатной температуре и не выше 40 % при температуре 1000 °С.

3 За счет обеспечения возможности совместного псевдоожижения штыба и гранул достигается значительное (в 1,55 раза) уменьшение продолжительности горения смеси штыба и гранул в псевдоожиженном слое в сравнении с продолжительностью горения одного антрацитового штыба. Увеличение концентрации биогранул с топливной смеси приводит к возрастанию эмиссии двуокиси азота в атмосферу.

Список литературы

1 Geldart D. Types of Gas Fluidization // Powder Technology, 1973, 7. – Pp. 285 – 292.

2 Li Z., Kobayashi N., Hasatani M. Characteristics of Pressure Fluctuations in a Fluidized Bed of Binary Mixtures // Journal of Chemical Engineering of Japan, 2005. Vol. 38. № 12. Pp. 960 – 968.

3 Ridgway K., Sim H.K. Passage of Spheres through Tapered Fluidized Bed // Chemical and Process Engineering, 1966. Vol. 4. № 6. Pp. 281 – 286.

4 Donsi G., Ferrari G., Olivieri L. Drying of Agricultural Products in a Two – Component Fluidized Bed // Preconcentration and Drying of Food Materials, Bruin S. ed., pp. 277 – 286, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, the Netherlands, 1988.

5 Saxena S.C. Fluidized – bed Incineration of Solid Pellets: Combustion and Co – combustion // Energy Conversion and Managements, 1998. Vol. 39. № 1 – 2. Pp. 127 – 141.

6 Kuzmin S.N., Isemin R.L., Konjakhin V.V., Mikhalev A.V., Panfilova O.V., Zorin A.T. Co – combustion of Coal and Bio – Pellets in the High Temperature Fluidized Bed // Proceedings of 19th International Conference on Fluidized Bed Combustion, part 1, Vienna, Austria, May 21 – 24, 2006.

7 Rao T.R., Bheemarasetti J.V. Ram. Minimum Fluidization Velocities of Mixtures of Biomass and Sands // Energy, 2001. Vol. 26. Issue 6. – Pp. 633 – 644.

8 Rowe P.N., Nienow A.W. Minimum Fluidization Velocity of Multi – Component Particle Mixture // Chemical Engineering Science, 1975. Vol. 30. – Pp. 1365 – 1369.

9 Rincon J., Guardiola J., Romero A., Ramos G. Predicting the Minimum Fluidization Velocity of Multicomponent Systems // Journal of Chemical Engineering of Japan, 1994. Vol. 27. № 2. – Pp. 177 – 181.

10 Cheung L., Nienow A.W., Rowe P.N. Minimum fluidization velocity of a binary mixture of different sized particles // Chemical Engineering Science, 1974. Vol. 29. № 5. – Pp. 1301 – 1303.

11 Аэров, М.Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М.Э. Аэров, О.М. Тодес. – Л. : Химия, 1968. – 512 с.

12 Зенц, Ф.А. Режимы псевдооживления / Ф.А. Зенц // В кн. «Псевдооживление»; под ред. И. Девидсона и Д. Харрисона. – М. : Химия, 1974. – 728 с.

13 Pattipati Ranga R., Wen C.Y. Minimum Fluidization Velocity at High Temperature // *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1981. Vol. 20. № 4. – Pp. 795 – 797.

14 Гринь, И.Г. Повышение реакционной способности антрацитового штыба путем предварительной термической обработки / И.Г. Гринь, Н.И. Дунаевская, Я.С. Жолудов // Проблемы тепло- и массообмена в современной технологии сжигания и газификации твердого топлива: Материалы международной школы – семинара (27 мая – 3 июня 1988 г.). – Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова АН БССР, 1988. – Ч. 1. – С. 126 – 132.

15 Равич, М.Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов. Теплотехнические расчеты по обобщенным константам продуктов горения / М.Б. Равич. – М. : Наука, 1966. – С.12 – 15.

16 Palchonok G., Borodulya A., Golubeva V., Leckner B., Hansson K. – M., Tullin C. Temperature and combustion kinetics of wood pellet char in a fluidized bed // *Тепломассообмен ММФ – 2000: Труды IV Минского международного форума по тепломассообмену (22 – 26 мая 2000 г.)*. – Мн., 2000. Т. 6. – Сс. 3 – 11.

17 Hasa H., Tourunen A., Saastamoinen J., Kirkinen A. – P., Hyppanen T., Kettunen A. Combustion Characteristics of Fuel – Experiment Scale – up from Bench Scale Reactors to Commercial Scale CFB Boiler // *Proceedings of 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion*. May 22 – 25, 2005, Toronto, Ontario, Canada.

The Hydrodynamical Bases of the Organization of Co-Combustion of Anthracite Culm and Bio-Granules in High-Temperature Fluidized Bed

**R.L. Isemin, N.B. Kondukov, A.V. Mikhalev,
S.N. Kuzmin, V.V. Konaykhin**

Tambov State Technical University

Key words and phrases: co-fluidization; culm; bio-pellets; combustion.

Abstract: The present paper presents the studies on the fluidization of biomass and coal mixtures. The biomass materials consist of biopellets made of sunflower husk (diameter 12,5 and length from 2 mm up to 15 mm). The coal materials consist of anthracite culm (powder) particles, 22,0 % of those vary in the size from 0 up to 0,63 mm, 16,3 % – from 0,63 up to 1,0 mm, 48,4 % – from 1 up to 3 mm, 12,2 % – from 3 up to 6 mm and 1,1 % – more than 6 mm. It is found out, that reduction in the granules content in a mixture re-

sults in fluidization speed reduction: when granules content in a mixture equals 50 % U_{mf} is 1,87 m/s, 40 % – 1,53 m/s, 20 % – 1.33 m/s. When the biopeelts content in a mixture is more than 60 %, the process of particles segregation in the bed is observed. However, in the actual boiler the intensive fluidization of biopellets and culm mixtures can be received only if biopellets content in a mixture does not exceed 40 %.

© Р.Л. Исьемин, Н.Б. Кондуков, А.В. Михалев,
С.Н. Кузьмин, В.В. Коняхин, 2006