

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

Тамбовский государственный технический университет

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ МИНИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ СЛОЯ, СОСТОЯЩЕГО ИЗ ФРАКЦИЙ ЧАСТИЦ, РЕЗКО РАЗЛИЧАЮЩИХСЯ ПО ФОРМЕ И РАЗМЕРУ (НА ПРИМЕРЕ АНТРАЦИТОВОГО ШТЫБА И БИОГРАНУЛ)

Запропоновано метод розрахунку мінімальної швидкості псевдозрідженого шару, що являє собою суміш двох фракцій частинок, які різко відрізняються за формою та розміром, без розрахункової заміни реального шару на фіктивний монодисперсний шар сферичних часточок, що характеризуються певним еквівалентним діаметром.

Предложен метод расчета минимальной скорости псевдооживления слоя, представляющего собой смесь двух фракций частиц, которые резко отличаются друг от друга по форме и размеру, без расчетной замены реального слоя на фиктивный монодисперсный слой сферических частиц, характеризующихся неким эквивалентным диаметром.

The method of calculation of the minimal velocity of fluidization a bedr representing a mix of two fractions of particles which sharply differ from each other under the form and the size, without settlement replacement of a real bed by a fictitious monodisperse bed of the spherical particles characterized in a certain equivalent diameter is offered.

d_e, d_i – эквивалентный диаметр и диаметр частиц i -той фракции;

g_i – весовая доля частиц i -той фракции;

g_1, g_2 – весовая доля мелких и крупных частиц соответственно;

U_{mf}, U_i – минимальная скорость псевдооживления и скорость газа в слое в просветах между частицами;

U_{mf}^c – рассчитанное значение минимальной скорости псевдооживления;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_0, \varepsilon_0^c$ – порозность слоя штыба, биогранул и слоя, состоящего из смеси биогранул и штыба, в состоянии минимального псевдооживления, расчетная порозность слоя в состоянии минимального псевдооживления;

ρ_s, ρ_1, ρ_2 – плотность твердых частиц, плотность частиц антрацитового штыба и биогранул;

ρ_f – плотность газа.

При расчете минимальной (критической) скорости псевдооживления полидисперсного слоя частиц произвольной формы обычно заменяют реальный слой на фиктивный монодисперсный слой сферических частиц, характеризующийся так называемым эквивалентным диаметром, и используют расчетные зависимости, полученные для монодисперсного слоя [1]. Для расчета эквивалентного диаметра наиболее употребительна формула Крюгера – Цункера:

$$(100/d_e) = \sum (g_i/d_i). \quad (1)$$

Возможен также расчет эквивалентного диаметра и по формуле, предложенной Кондуковым Н.Б. и Сосной М.Х. [2]:

$$d_e = (1/\sum g_i/d_i^3)^{1/3}. \quad (2)$$

Здесь под диаметром i -той фракции понимается средний диаметр между проходным и непроходным диаметрами сит, с помощью которых были выделена i -тая фракция. Расчеты по зависимостям (1) и (2) дают близкие результаты, которые, однако, завышают влияние мелких час-

тиц, содержащихся в полидисперсной смеси, на конечный результат расчетов, что особенно заметно для смеси, состоящей из фракций частиц, резко отличающихся друг от друга размером и формой. Такие смеси образуются при реализации недавно появившейся технологии обработки крупных частиц (гранул, некоторых видов пищевых продуктов, например, гороха и т.п.) в псевдоожигенном слое мелких частиц, что позволяет снизить скорость псевдоожижающего газа и повысить эффективность и однородность обработки крупных частиц [3]. По такой технологии нами предложено [4] организовывать процесс совместного сжигания антрацитового штыба и биогранул, изготовленных из лужги подсолнечника, в псевдоожигенном слое. В предложенном нами варианте сжигание смеси топлива осуществляется в псевдоожигенном слое, который создают сами частицы топлива и его золы, а температура в слое превышает температуру плавления золы и составляет в среднем 1200 °С.

Частицы штыба имели плотность 1400 кг/м³, массовая доля частиц размером от 0 до 0,5 мм составляла 5,9 %, от 0,5 до 1,0 мм – 11,4 %, от 1,0 до 2,0 мм – 27,3 %, от 2,0 до 4,0 мм – 35,3 %, от 4,0 до 6,0 мм – 18,5 %, более 6 мм – 1,6 %. Биогранулы имели плотность 1300 кг/м³, гранулы были цилиндрическими со средней длиной 12,5 мм и средним диаметром 12,0 мм.

Для упрощения визуализации процесса совместного псевдоожигения частиц так резко различающихся по форме и размерам, как антрацитовый штыб и биогранулы, с одной стороны, и с учетом трудностей исследования такого процесса при температуре, наблюдающейся реально в топке, где сжигаются эти виды топлива, было решено провести исследование перехода в псевдоожигенное состояние штыба и гранул при температуре 20 °С в аппарате с прозрачными стенками, который имел сечение 483 × 195 мм и высоту 1500 мм и своей нижней частью опирался на воздухораспределительную решетку с долей «живого сечения» 5 %. Перепад давления в слое измерялся дифференциальным микроманометром ММ – 1, а скорость воздуха на выходе из аппарата измерялась в трех точках с помощью термоманометра «Testo 405 V1». В слой последовательно загружались порции частиц, содержащие 20,

40, 50, 60 % и 100 % биогранул и 80, 60, 50 и 40 % антрацитового штыба соответственно. Вес порций частиц, загружаемых в аппарат, во всех опытах был постоянен и равен 5700 г. После загрузки порции частиц в аппарат включалась воздуходувка и слой переводился в псевдоожигенное состояние за счет постепенного увеличения расхода воздуха. При этом измеряли перепад давления в слое и высоту расширившегося слоя. Порозность слоя в состоянии минимального псевдоожигения рассчитывалась через соотношение насыпной и истинной плотностей частиц по известной зависимости [5, с. 36]. Результаты измерений скорости минимального псевдоожигения смесей различного состава приведены в таблице 1. Здесь же приведены результаты расчетов эквивалентного диаметра смесей различного состава по зависимостям (1) и (2) (для слоя, содержащего 100 % биогранул, гранула со средними размерами – диаметр 12,0 мм, длина 12,5 мм – была заменена сферой эквивалентного объема с диаметром 13,9 мм) и значения порозности слоя в состоянии минимального псевдоожигения.

Проверим возможность расчета минимальной скорости псевдоожигения полидисперсной смеси частиц, резко отличающихся по форме и размерам, через эквивалентный диаметр. Для простоты расчетов воспользуемся формулой для определения U_{mf} (с точностью 34 %), приведенной в монографии [6, с. 76].

$$(U_{mf})^2 = d_e (\rho_s - \rho_f)g/24,5\rho_f. \quad (3)$$

Оказалось, что рассчитанные по (3) и по рассчитанным и приведенным в столбцах 2 и 3 таблицы 1 значениям эквивалентного диаметра для смеси штыба и биогранул величины U_{mf} колеблются в пределах от 0,58 до 1,07 м/с и меньше измеренных значений U_{mf} в 1,96...2,76 раза. Т.е. для таких слоев, как смесь гранул и штыба, нельзя вести расчет U_{mf} через эквивалентный диаметр смеси. С другой стороны, расчет по (3) для слоя гранул через эквивалентный диаметр дает значение $U_{mf} = 2,39$ м/с практически равное измеренному значению $U_{mf} = 2,37$ м/с. Это вполне объяснимо, т.к. размеры гранул можно определить прямыми измерениями и точно рассчитать среднюю длину и средний диаметр гранул, а также

Таблица 1. Сводная таблица расчетных и измеренных значений параметров, характеризующих процесс совместного псевдооживления смеси антрацитового штыба и биогранул

Концентрация штыба в смеси, %	d_e (расчет по (1), мм)	d_e (расчет по (2), мм)	U_{mp} , м/с	ε_0	d_e (обратный расчет по (3), мм)	U_i , м/с	ε_0^c	U_{mf}^c , м/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9
80	0,8	1,1	1,33	0,335	4,2	3,97	0,379	1,66
60	1,05	1,21	1,53	0,364	5,6	4,2	0,385	1,69
50	1,24	1,287	1,87	0,423	8,3	4,42	0,441	1,93
40	1,51	1,385	2,07	0,558	10,2	3,71	0,462	2,02
20	2,73	1,75	2,27	0,55	12,3	4,31	0,503	2,2
0	13,9	-	2,37	0,55	13,4	4,47	0,55	-

диаметр сферы, объем которой эквивалентен такой «средней» грануле. Также оказалось, что значения скорости газа в просветах между частицами

$$U_i = U_{mf}/\varepsilon \quad (4)$$

почти не меняются с увеличением доли гранул в смеси вплоть до 100 % (в среднем $U_i = 4,47$ м/с). Это также объяснимо, поскольку размер и плотность гранул не меняется с ростом или уменьшением их содержания в смеси со штыбом и, следовательно, для взвешивания гранулы требуется одна и та же скорость омывающего гранулу потока газа. С ростом же содержания гранул в смеси порозность слоя увеличивается, также как и минимальная скорость газа, отнесенная к поперечному сечению аппарата, при которой происходит псевдооживление всего слоя, поэтому скорость газа в просветах между частицами не меняется или меняется мало.

Отсюда вытекает метод расчета минимальной скорости псевдооживления такой смеси частиц как антрацитовый штыб и биогранул: 1) измеряют размеры гранул и находят средний диаметр и среднюю длину гранулы, 2) определяют диаметр сферы, объем которой эквивалентен объему средней гранулы, 3) рассчитывают, например, по

зависимости (3), U_{mf} для слоя гранул, 4) через соотношение между насыпной и физической плотностью биогранул по зависимости [5, с. 36] рассчитывают порозность слоя гранул в состоянии минимального псевдооживления и значение U_i , 5) по значению порозности слоя при интересующем нас содержании гранул в смеси рассчитывают значения минимальной скорости псевдооживления слоя, состоящего из штыба и биогранул.

Порозность слоя, состоящего из смеси частиц антрацитового штыба и биогранул, при интересующем содержании биогранул может быть рассчитана следующим образом. Пусть сопротивление слоя, состоящего из смеси частиц, равно сумме сопротивлений каждой группы частиц потоку оживающего газа. Тогда величина этого сопротивления, отнесенная к единице высоты слоя, может быть определена как:

$$\rho_s (1 - \varepsilon_0^c) = g_1(1 - \varepsilon_1)\rho_1 + g_2(1 - \varepsilon_2)\rho_1. \quad (5)$$

Здесь ρ_s – гипотетическая истинная плотность смеси частиц. Если плотности составляющих смесь частиц равны друг другу или близки (как в нашем случае), то :

$$1 - \varepsilon_0^c = g_1(1 - \varepsilon_1) + g_2(1 - \varepsilon_2) \quad (6)$$

или

$$\varepsilon_0^c = 1 - [g_1(1 - \varepsilon_1) + g_2(1 - \varepsilon_2)]. \quad (7)$$

Рассчитанные значения ε_0^c по зависимости (7) представлены в столбце 8 таблицы 1, а рассчитанные по предложенному методу значения U_{mf}^c в столбце 9 этой таблицы. Видно, что имеет место хорошее соответствие между рассчитанными и измеренными значениями U_{mf} , причем по мере роста концентраций биогранул в смеси погрешность расчетов по предложенной методике уменьшается (с 24,8 % до 3,0 %).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аэров М.Э., Тодес О.М.* Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – Л.: Химия, 1968, – 512 с.
2. *Сосна М.Х., Кондуков Н.Б.* Критерии и формула для расчета скорости псевдоожижения. Полидисперсный слой // Инженерно – физический журнал. – 1968. – Т. 15, № 1. – С. 73 – 78.
3. *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. – P. 960 – 968.
4. *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.
5. *Забродский С.С.* Гидродинамика и теплообмен в псевдоожиженном (кипящем) слое. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 488 с.
6. *Кунин Д., Левеншпиль О.* Промышленное псевдоожижение – М.:Химия, 1976. – 448 с.
7. *Rowe P.N., Nienow A.W.* Minimum Fluidization Velocity of Multi – Component Particle Mixture // Chemical Engineering Science. – 1975. – Vol. 30, № 5. – P. 1365 – 1369.
8. *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. – P. 177 – 181.
9. *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. – P. 1301 – 1303.