

Приборы и оборудование

УДК 66.047.59-912:66.011

Особенности расчета аппаратов псевдооживленного слоя желобного типа для термообработки дисперсных материалов

**Хвастухин Ю.И., Колесник В.В.,
Орлик В.Н., Костогорз К.П.**

Институт газа НАН Украины, Киев

Проведен анализ специфических особенностей аппарата с псевдооживленным слоем желобного типа, позволяющих интенсифицировать тепломассообменные процессы. Определены условия, при которых такой аппарат можно рассматривать как теплообменник перекрестного тока. Разработана программа расчета процесса сушки песка в аппаратах. Выполнен анализ полученных результатов, которые подтверждены промышленной эксплуатацией на линии сушки песка ООО с ИИ «Хенкель Баутехник (Украина)».

Ключевые слова: аппарат с псевдооживленным слоем, сушка песка, энергоэффективность.

Проведено аналіз специфічних особливостей апарата з псевдозрідженим шаром жолобного типу, які дозволяють інтенсифікувати тепломасообмінні процеси. Визначено умови, за яких такий апарат можна розглядати як теплообмінник перехресного току. Розроблено програму розрахунку процесу сушіння піску в апаратах. Виконано аналіз отриманих результатів, які підтверджено промисловою експлуатацією на лінії сушіння піску ТОВ з ДІ «Хенкель Баутехнік (Україна)».

Ключові слова: апарат з псевдозрідженим шаром, сушіння піску, енергоефективність.

Применение аппаратов псевдооживленного слоя (ПС) для сушки и термообработки дисперсных материалов имеет такие преимущества: эффективный межфазный и поверхностный теплообмен, простота конструктивного оформления. При этом выявлены некоторые недостатки: повышенный пылевынос, пониженное на один-два порядка горизонтальное перемешивание твердой фазы по сравнению с вертикальным, трудности в организации более эффективной схемы потоков при теплообмене нагреваемого материала газовым теплоносителем, чем идеальное смешение. Принятая обычно на практике круглая или квадратная в поперечном сечении форма рабочей камеры обеспечивает

близкое к изотермическому поле температур в объеме ПС. При этом температура уходящих газов примерно равна температуре материала на выходе из аппарата. Организация более эффективной схемы (противотока или перекрестного тока) реализуется секционированием ПС, что вызывает определенные трудности в организации потоков твердой и газовой фаз. Пропорционально количеству секций увеличивается гидравлическое сопротивление по газовой фазе, что приводит к повышению энергозатрат на тягодутьевых устройствах.

Организация более эффективного теплообмена твердой фазы с газовым теплоносителем — перекрестного тока — может быть реализована

вана в рабочей камере желобного типа, выполненной в виде вытянутого в длину прямоугольника с загрузкой и выгрузкой материала по длинной стороне. Если секционировать рабочую камеру в пределах слоя вертикальными поперечными перегородками, не доходящими вплотную до газораспределительной решетки, и выполнить надслоевое пространство расширенным или, наоборот, суженным по отношению к решетке, то можно по скорости витания частиц полидисперсного материала обеспечить вынос нужной фракции материала с последующим ее улавливанием. Тем самым реализуется идея каскадного аэродинамического классификатора с ПС. Классификация может быть совмещена с охлаждением или нагревом материала.

Реализовать схему перекрестного тока удается при достаточно интенсивном направленном перемешивании дисперсного материала от загрузки к выгрузке, которое улучшается наклоном газораспределительной решетки. Обратное перемешивание твердой фазы, обеспечивающее выравнивающую способность ПС, должно быть меньше направленного тока. Мерой этого перемешивания является эффективная теплопроводность слоя a_3 ($\text{м}^2/\text{ч}$ или $\text{см}^2/\text{с}$) [1]. Экспериментальное определение величины a_3 для различных материалов показало, что в горизонтальном направлении в диапазоне чисел псевдооживления (отношение рабочей скорости газовой фазы к скорости начала псевдооживления) 2–10 эта величина изменяется от 0,6 до 1,5 $\text{см}^2/\text{с}$ [2]. При обычно принятых в технологиях термообработки дисперсных материалов числах псевдооживления 5–8 величина $a_3 \approx 1 \text{ см}^2/\text{с}$, или 0,36 $\text{м}^2/\text{ч}$.

Для определения эффективной теплопроводности ПС в горизонтальном направлении λ_3 воспользуемся выражением [3], $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$:

$$\lambda_3 = a_3 c_m \rho_m (1 - \varepsilon), \quad (1)$$

где c_m — удельная теплоемкость материала твердой фазы, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; ρ_m — удельная плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; ε — порозность ПС.

Подставляя табличные данные c_m и ρ_m , например, для кварцевого песка и $\varepsilon \approx 0,7$, получаем $\lambda_3 = 59 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Эта величина сопоставима с теплопроводностью металлов [3].

В аппарате ПС желобного типа за счет направленного потока твердого материала создается температурный градиент по длине желоба, направленный в сторону, противоположную температурному градиенту, создаваемому эффективной теплопроводностью ПС.

Очевидно, что для создания режима перекрестного тока, то есть рассмотрения аппарата как теплообменника идеального вытеснения, не-

обходимо выполнение условия $\lambda_n \geq \lambda_3$, где λ_n — теплопроводность обеспечиваемая направленным перемещением материала, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Проанализируем, при какой величине потока твердого материала следует ожидать выполнения этого условия.

Производительность по твердому материалу аппарата идеального вытеснения можно записать в таком виде, $\text{кг}/\text{ч}$:

$$G_m = g_m (1 - \varepsilon) B H, \quad (2)$$

где g_m — удельный поток твердого материала через поперечное сечение слоя, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$; B — ширина рабочей камеры аппарата, м ; H — усредненная высота ПС, м ; L — длина ПС, м .

В свою очередь g_m можно выразить через тепловой поток с перемещающимся твердым материалом q_m ($\text{Вт}/\text{м}^2$), $(\text{кг}\cdot\text{м}^2)/\text{ч}$:

$$g_m = q_m / (c_m \Delta t), \quad (3)$$

где Δt — градиент температур по длине потока L , К .

Тепловой поток выражается через теплопроводность направленным перемещением материала в таком виде, $\text{Вт}/\text{м}^2$:

$$q_m = (\lambda_n / L) \Delta t. \quad (4)$$

Решением системы уравнений (2)–(4) получаем зависимость для определения λ_n , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$:

$$\lambda_n = G_m c_m L (1 - \varepsilon) / (b h_{\text{сл}}). \quad (5)$$

Приравнявая λ_3 и λ_n , получаем выражение для граничной производительности аппарата ($\text{кг}/\text{ч}$), при которой аппарат с ПС можно рассматривать как реактор идеального вытеснения.

$$G_m = a_3 \rho_m B H_{\text{дл}} / L. \quad (6)$$

Промышленные аппараты с ПС для термообработки дисперсных материалов за исключением аппаратов химической технологии для проведения гетерогенных реакций отличаются сравнительно небольшой высотой слоя $H = 0,1\text{--}0,5 \text{ м}$ поэтому величина граничной производительности также невелика $G_m \leq 400 \text{ кг}/\text{ч}$.

Для расчета технологического процесса сушки сыпучих материалов в аппаратах такого типа может быть применена ячеечная модель, физическая суть которой состоит в том, что реальный движущийся материальный поток представляется в виде ряда последовательно соединенных ячеек, внутри каждой из которых реализуется принцип идеального смешения, а между

Исходные параметры для расчета

S_s	– удельная поверхность материала, м ² /м ³
G_{im}	– расход влажного материала на входе, кг/с
$x_{H_2O_m}^i$	– удельное влагосодержание материала на входе, кг/кг; $x_{H_2O_m}^i = \frac{x_{H_2O_m}(0)}{x_{H_2O_m}(0)}$
$t_{im}(0)$	– температура влажного материала на входе, °С; $t_{im}(0) = t_m(0)$
G_m	– расход сухого материала через ячейку, кг/с; $G_m = G_{im}(1 - x_{H_2O_m}^i)$
$c_m(t)$	– удельная теплоемкость сухого материала, Дж/(кг·К)
$G_{H_2O_m}(0)$	– расход воды с материалом на входе, кг/с; $G_{H_2O_m}(0) = G_{im} \cdot x_{H_2O_m}^i$
G_g^i	– общий расход теплоносителя
$x_{H_2O_g}^i$	– удельное влагосодержание теплоносителя, кг/кг; $x_{H_2O_g}^i = \frac{x_{H_2O_g}(x,0)}{x_{H_2O_g}(x,0)}$
t_{ig}	– начальная температура теплоносителя, °С; $t_{ig} = t_g(x,0)$
g_g	– плотность потока сухого теплоносителя, кг/(м ² ·с); $g_g = G_g^i(1 - x_{H_2O_g}^i)/(V \cdot L)$
M_g	– молекулярная масса сухого теплоносителя, кг/кмоль
$g_{H_2O_g}(x,0)$	– начальная плотность потока водяных паров в теплоносителе, кг/(м ² ·с); $g_{H_2O_g}(x,0) = G_{H_2O_g}^i \cdot x_{H_2O_g}^i / (V \cdot L)$
$H_{H_2O_g}(x,0)$	– начальная энтальпия паров воды теплоносителя, кДж/кг
P	– общее давление, атм
R_g	– универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К); $R_g = 8,314$

Уравнения материального баланса:

– для воды материала

$$dG_{H_2O_m}(x)/dx = B(g_{H_2O_g}(x,0) - g_{H_2O_g}(x,H));$$

– для воды (паров) теплоносителя

$$\frac{\partial g_{H_2O_g}(x,y)}{\partial y} = \{S_s \beta M_{H_2O} \cdot 98,1[\pi_{H_2O}(t_m(x))/(t_m(x) + 273,15) - \chi_{H_2O}(x,y) \cdot P/(t_g(x,y) + 273,15)]/R_g\}I.$$

Здесь

β	– коэффициент массоотдачи для паров воды между твердой и газовой фазой, м/с
M_{H_2O}	– молекулярная масса воды; $M_{H_2O} = 18$ кг/кмоль
$\pi_{H_2O}(t_m(x))$	– упругость насыщенных паров воды при температуре влажного материала, атм
$\chi_{H_2O}(x,y)$	– объемная доля водяных паров в теплоносителе, м ³ /м ³ ; $\chi_{H_2O}(x,y) = g_{H_2O_g}(x,y)/(g_{H_2O_g}(x,y) + g_g M_{H_2O}/M_g)$
I	– индекс возможности процесса испарения воды из влажного материала
$I = 1$	– если $G_{H_2O_m}(x) \neq 0$
$I = 0$	– если $G_{H_2O_m}(x) = 0$ и $[\pi_{H_2O}(t_m(x))/(t_m(x) + 273,15) - \chi_{H_2O}(x,y) \cdot P/(t_g(x,y) + 273,15)] > 0$

ячейками перемешивание отсутствует. Считается, что для практических расчетов уже при числе ячеек $n > 10$ достаточно точно воспроизводятся свойства потока идеального вытеснения [4].

Структура потока ячеечной модели представляется следующим образом: 1) в каждой ячейке осуществляется полное завершение тепло- и массообмена теплоносителя и высушиваемого материала, влажность материала постоянна в пределах каждой i -й ячейки ($i = 1, 2, \dots, n$); 2) перемешивание между ячейками полностью исключено, что не относится к смешению потоков отходящих газов на выходе из сушилки; 3) объемная скорость сухого материала постоянна по длине и сечению аппарата.

В качестве примера проведем моделирование процесса сушки песка в аппарате ПС желобного типа в производстве сухих строительных смесей ($L = 2,8$ м; $B = 0,7$; $H = 0,25$ м).

Весь объем ПС V разбиваем на n ячеек одинакового объема V_1 , суммарный объем которых равен объему слоя $V = n V_1$. Среднее время пребывания частиц во всей системе $\tau = n \tau_1$. Выполняются последовательно расчеты теплового и материального балансов, причем выходные параметры предыдущей являются входными для последующей ячейки.

Исходные данные для расчета аппарата (они же – входные параметры для расчета теплового и материального баланса первой ячейки): температура песка и воздуха на входе в сушилку – 20 °С; влажность песка на входе в сушилку – 7 %; температура теплоносителя (продуктов сгорания природного газа) – 400 °С; производительность по сухому песку – 10000 кг/ч; расход теплоносителя (общий) – 8150 кг/ч.

Теплофизические свойства песка, воды, водяного пара и содержание водяного пара в воздухе при температуре насыщения взяты из табличных данных [3]. Теплоноситель в равных долях распределяется по ячейкам.

В расчете принято, что для достижения необходимой влажности высушенного песка (< 0,2 %) его температура должна быть около 110 °С. Учтена влага, содержащаяся в воздухе и продуктах сгорания природного газа. Приняты 10 %-е потери тепла в окружающую среду. Рассчитывалась температура песка и уходящих газов, влажность песка на выходе из каждой ячейки.

На рис.1 приведены обработанные результаты расчетов: изменение температуры и влагосодержания песка по длине слоя. Средняя температура уходящих газов после смешения составляет 69 °С. В реальных условиях из-за недопущения конденсации в системе дымоудаления температуру уходящих газов приходится поднимать до 75–80 °С. При сушке песка в других аг-

Уравнения энергетического (теплового) баланса:

– для слоя материала

$$dt_m(x)/dx = \{B [g_g (H_g(t_g(x,0)) - H_g(t_g(x, H))) - g_{H_2Og}(x, H) \cdot H^v_{H_2O}(t_g(x, H)) + g_{H_2Og}(x, 0) \cdot H^v_{H_2O}(t_g(x, 0))] - H^l_{H_2O}(t_m(x)) \cdot dG_{H_2Om}(x)/dx\} / [G_m c_m(t_m(x)) + G_{H_2Om}(x) c^l_{H_2O}(t_m(x))];$$

– для теплоносителя

$$\partial t_g(x, y) / \partial y = \{S_s \alpha (t_m(x) - t_g(x, y)) + \partial g_{H_2Og}(x, y) / \partial y (H^* - H^v_{H_2O}(t_g(x, y)))\} / [g_g c_g(t_g(x, y)) + g_{H_2Og}(x, y) c^v_{H_2O}(t_g(x, y))],$$

где

- $c^l_{H_2O}(t_m)$ – удельная теплоемкость воды материала, кДж/(кг·К)
- $H_g(t_g(x, 0)), H_g(t_g(x, H))$ – энтальпия сухого газа на входе и выходе слоя в точке x , кДж/кг
- $H^v_{H_2O}(t_g(x, y))$ – энтальпия паров воды при температуре газа в точке (x, y) , кДж/кг
- $H^l_{H_2O}(t_m(x))$ – энтальпия воды материала при температуре материала в точке x , кДж/кг
- $c_g(t_g(x, y))$ – удельная теплоемкость сухого газа при температуре газа в точке (x, y) , кДж/(кг·К)
- $c^v_{H_2O}(t_g(x, y))$ – удельная теплоемкость паров воды при температуре газа в точке (x, y) , кДж/(кг·К)
- α – коэффициент теплоотдачи между твердой и газовой фазой, кВт/(м²·К)
- H^* – $H^* = H^v_{H_2O}(t_g(x, y))$ при конденсации влаги из газового потока
- H^* – $H^* = H^v_{H_2O}(t_m(x))$ при испарении воды из влажного материала

регатах температура уходящих газов выше. Так, для сушилок ПС круглого или квадратного сечения она составляет 105–110 °С, а для барабан-

ных сушилок 130–140 °С. Таким образом, при сушке в аппаратах с ПС желобного типа удельный расход топлива ниже на 10–15 % за счет снижения потерь с уходящими газами.

В начале аппарата количество испаренной влаги лимитируется температурой уходящих газов (по их насыщению), так как значительная часть тепла расходуется на нагрев влажного песка. В первой ячейке возникает даже дополнительное увлажнение песка из-за конденсации части влаги, содержащейся в газовом теплоносителе. Кривая 1 на рис.2 показывает изменение влагосодержания газов в начале аппарата. Вследствие того, что материал еще не нагрелся, происходит конденсация влаги из теплоносителя. Явление конденсации влаги из теплоносителя на частицах материала подтверждается опытом промышленной эксплуатации аппаратов с псевдоожи-

женным слоем при сушке песка и зольных микросфер, так как в загрузочной части сушильных аппаратов может происходить окомкование материала [5, 6].

По мере увеличения температуры песка и уходящих газов увеличивается влагосъем в последующих ячейках до наступления равновесного состояния, когда все тепло (за вычетом потерь с отходящими газами и в окружающую среду) расходуется только на испарение влаги. На этом участке влагосъем в каждой ячейке, температура песка и уходящих газов остаются примерно постоянными. В нашем случае 63 °С. В дальнейшем происходит подъем температуры по ячейкам вплоть до заданной температуры выгрузки сухого песка. Такое распределение температур по длине аппарата позволяет реализовать автоматическое управление процессом сушки по

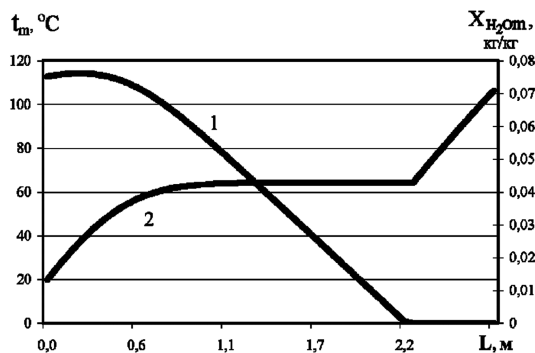


Рис.1. Изменение влагосодержания (1) и температуры (2) материала по длине слоя.

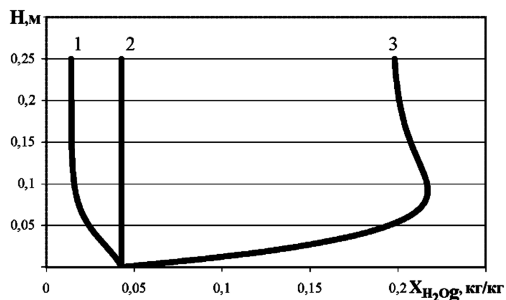


Рис.2. Изменение влагосодержания сушильного агента по высоте ПС в начале (1), конце (2) и середине (3) аппарата.

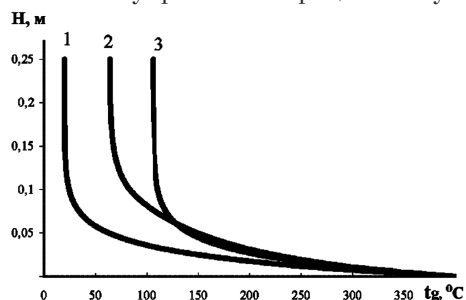


Рис.3. Изменение температуры сушильного агента по высоте ПС в начале (1), середине (2) и конце (3) аппарата.

температуре ПС. Температура слоя в конце сушильного агрегата будет характеризовать наличие в продукте влаги: при температуре около 63 °С еще происходит процесс испарения влаги, а рост температуры свидетельствует о том, что все тепло расходуется на нагрев материала.

На рис.3 показано изменение температуры теплоносителя по высоте слоя. Благодаря высокому коэффициенту теплопередачи в ПС, теплообмен теплоносителя с частицами материала практически завершается уже на высоте 10 см от газораспределительной решетки. Это оправдывает использование невысоких слоев для процессов сушки и согласуется с литературными данными [1, 2].

Расчетные параметры процесса сушки песка полностью согласуются с данными, полученными в результате промышленной эксплуатации сушилок песка, внедренных ООО «ТКС Сервис» на заводах по производству сухих строительных смесей ООО с ИИ «Хенкель Баутехник (Украина)» в г. Цюрупинск (Херсонская обл.) и г. Николаев (Львовская обл.) [6].

Выводы

Обоснована правомерность и определены условия, при которых аппараты ПС желобного типа можно рассматривать как теплообменники перекрестного тока. Таким условием является определенная скорость перемещения твердой фазы по длине аппарата, при которой теплопроводность направленным перемещением материала будет не меньше эффективной теплопроводности ПС. При соблюдении этого условия для моделирования тепло- и массообменных процессов аппарат желобного типа можно рас-

сматривать по твердой фазе как аппарат идеального вытеснения по длине и аппарат идеального смешения по высоте. С использованием этих положений проведено моделирование процесса сушки песка, результаты которого подтверждены промышленной эксплуатацией установок сушки песка на линиях по производству сухих строительных смесей ООО с ИИ «Хенкель Баутехник (Украина)». Разработанная программа расчета процесса сушки песка в аппаратах ПС желобного типа позволит оптимизировать параметры процесса сушки и конструктивные характеристики агрегатов для различных материалов и производств.

Список литературы

1. Забродский С.С. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое. — М.; Л. : Госэнергоиздат, 1963. — 488 с.
2. Мухленов И.П., Сажин Б.С., Фролов В.Ф. Расчеты аппаратов кипящего слоя : Справ. — Л. : Химия, 1986. — 352 с.
3. Михеев М.А. Основы теплопередачи. — М.; Л. : ГЭИ, 1956. — 392 с.
4. Федоткин И.М., Бурляй И.Ю., Рюмшин М.А. Математическое моделирование технологических процессов : Теория реакторов, рециркуляции и пограничного слоя. — Киев : Тэхника, 2003. — 424 с.
5. Костогрыз К.П., Хвастухин Ю.И. Сушка и классификация микросфер из золы ТЭС в аппаратах с псевдооживленным слоем // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2007. — № 2. — С. 21–29.
6. Хвастухин Ю.И., Костогрыз К.П. Энергоэффективная технология сушки песка в аппарате с псевдооживленным слоем // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2010. — № 3. — С. 38–44.

Поступила в редакцию 20.04.10

The Features of Fluidized Bed Apparatus of Trough Type Calculation for Disperse Materials Heat Treatment

Khvastukhin Yu.I., Kolesnik V.V., Orlyk V.M., Kostogryz K.P.

The Gas Institute of NASU, Kiev

The analysis of specific features of trough type fluidized bed apparatus for heat- and mass transferring processes intensification is conducted. The conditions at which the device can be considered as crosscurrent heat exchanger are determined. The software for sand drying process in the device calculation is developed. The obtained results analysis is completed. The results are confirmed by commercial application in JSC «Henkel Bautechnik (Ukraine)» sand drying line.

Key words: fluidized bed apparatus, sand drying, energy efficiency.

Received April 20, 2010