= ОСОБЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ =

УДК 636.085.62

ИСТИРАНИЕ ЧАСТИЦ В АППАРАТАХ ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ

© О. М. Флисюк, Н. А. Марцулевич

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26 E-mail: flissiyk@mail.ru

> Поступила в Редакцию 15 ноября 2019 г. После доработки 26 мая 2020 г. Принята к публикации 3 июня 2020 г.

Исследован процесс истирания частиц в аппарате со взвешенным слоем материала. Предложена математическая модель процесса истирания частиц, позволяющая определить плотность функции распределения частиц по массе, а также степень истирания в зависимости от среднего времени пребывания в слое. Проведено экспериментальное исследование процесса истирания частиц на примере гранул сульфата аммония в аппарате с фонтанирующим слоем и подтверждена адекватность предложенной модели реальному процессу.

Ключевые слова: кинетика истирания; математическая модель; функция распределения частиц по массе

DOI: 10.31857/S0044461820100084

Многие процессы, такие как сушка, адсорбция, гранулирование, охлаждение, каталитический крекинг, осуществляются в аппаратах со взвешенным слоем дисперсных частиц [1–3]. В этих аппаратах обеспечивается высокая интенсивность тепломассообменных процессов за счет интенсивных гидродинамических режимов и развитой поверхности контакта фаз. Однако такой способ организации процесса имеет и свой недостаток — это истирание частиц, которое может приводить к целому ряду нежелательных последствий: потере продукта, пылеуносу, загрязнению газовых потоков и т. д. Кроме того, в таких процессах с течением времени изменяется дисперсный состав твердых частиц, что, несомненно, сказывается на протекании тепломассообмена. Аналогичная проблема возникает и при пневмотранспорте сыпучих материалов [4], перемешивании [5], при нанесении покрытий на гранулы [6] и твердые лекарственные формы [7]. Как показали исследования, истирание существенно зависит от скорости соударения, размера частиц и многих других факторов [8].

В литературе немного статей, посвященных изучению процесса истирания частиц в аппаратах со взвешенным слом. Как следствие, отсутствуют надежные методики количественной оценки величины истирания, позволяющие учесть его влияние на основной процесс.

Цель исследования — получение расчетных соотношений для определения потери твердого материала за счет истирания в условиях работы аппарата со взвешенным слоем.

Методология исследования

Теоретический анализ процесса. Существующие модели истирания и измельчения частиц, сопровождающего технологические процессы во взвешенном слое, исходят из стохастических представлений об этом явлении, что позволяет использовать вероятностную теорию марковских процессов [9–13]. Общим недостатком таких моделей можно считать формальный учет кинетики истирания, который оставляет без внимания физический механизм этого явления. Между тем истирание является частным случаем большого класса процессов, в которых гранулометрический состав дисперсной фазы непостоянен. В общем случае, когда одновременно идут процессы коагуляции и дробления частиц, эволюция дисперсного состава описывается уравнением [14]

$$\frac{\partial f(m, z, t)}{\partial t} + w \frac{\partial f(m, z, t)}{\partial z} + f(m, z, t) \int_{0}^{\infty} k(m, s) f(s, z, t) ds + \frac{1}{2} f(m, z, t) \int_{0}^{m} g(m - s, s) ds = = \frac{1}{2} \int_{0}^{m} k(m - s, s) f(m - s, z, t) f(s, z, t) ds + \int_{m}^{\infty} g(m - s, m) f(s, z, t) ds,$$
(1)

где f(m, z, t) — плотность распределения вероятности частиц по их массе. Это значит, что величина f(m, z, t)dm представляет собой число частиц с массой от m до m + dm в единице объема слоя в сечении аппарата с координатой z в момент времени t. Функции k(m, s) и g(m - s, s) характеризуют соответственно вероятность коагуляции двух частиц с массами m и sв единицу времени и вероятность дробления частицы массой m в единицу времени на две частицы массами m - s и s. Таким образом, уравнение (1) представляет собой символьную запись баланса частиц с массами в диапазоне (m, m + dm) в единице объема взвешенного слоя. Оно учитывает изменение плотности вероятности распределения частиц f(m, z, t) в данном сечении аппарата за счет среднего движения твердой фазы, за счет прилипания частиц с массой (m, m + dm) к другим частицам, за счет дробления частиц с массой (m, m + dm), за счет коагуляции пары частиц с образованием одной частицы с массой (m, m + dm) и за счет дробления более крупной частицы с образованием осколка с массой (m, m + dm).

Если во взвешенном слое коагуляция отсутствует, имеет место только процесс истирания частиц, то для проточного аппарата с идеальным перемешиванием твердой фазы уравнение (1) существенно упростится:

$$\frac{\partial f(m,t)}{\partial t} + \frac{1}{\tau} f(m,t) - \frac{1}{\tau} f_0(m) + \int_0^m g(m-s,s) \mathrm{d}s = \int_m^\infty g(s-m,m) f(s,t) \mathrm{d}s, \tag{2}$$

где т — среднее время пребывания крупных частиц в аппарате; $f_0(m)$ — функция распределения частиц по массе исходного материала, поступающего в рабочий объем. Второе и третье слагаемые в левой части (2) отражают соответственно выход и поступление частиц в слой в единицу времени. Для конкретизации функции g(m - s, s) следует учесть, что истирание частиц представляет собой частный случай много-

кратных актов дробления, в каждом из которых от крупной частицы отделяется мельчайшая частичка с минимально возможной массой. Обозначим такую массу через x. Тогда вероятность дробления частиц симметрична относительно своих аргументов g(m - x, x) = g(x, m - x) и пропорциональна скорости истирания u, а уравнение (2) может быть записано в виде [15]

$$\frac{\partial f(m,t)}{\partial t} + \frac{1}{\tau} f(m,t) = \frac{1}{\tau} f_0(m) + \frac{1}{\tau} [u(m+x,t)f(m+x,t) - u(m,t)f(m,t)].$$
(3)

Решение этого уравнения для установившегося режима может быть представлено следующим образом:

$$f(m) = \sum_{k=0}^{\infty} f_k(m), \ f_k(m) \frac{x}{\tau u(m)} f_0(m+kx) \prod_{k=0}^{k} \frac{\tau u(m+ix)}{x+\tau u(m+ix)}.$$
(4)

Функции $f_k(m)$ имеют ясный физический смысл: каждая из них характеризует плотность распределения частиц во всем аппарате, которые k раз (k = 0, 1, 2,...) подвергались элементарному акту истирания; u(m) — массовая скорость истирания частиц. Выражение (4) может быть записано иначе:

$$f(m) = \frac{x}{\tau u(m)} \sum_{k=0}^{\infty} f_0(m+kx) \exp\left\{-\sum_{i=0}^{\infty} \ln\left[1+\frac{x}{\tau u(m+ix)}\right]\right\}.$$

Раскладывая логарифм в ряд и переходя к пределу при $x \rightarrow 0$, окончательно получим соотношение, связывающее функцию распределения частиц по их массе при известных среднем времени пребывания и скорости истирания с функцией распределения частиц, поступающих в аппарат:

$$f(m) = \frac{x}{\tau u(m)} \int_{m}^{\infty} d\xi f_0(\xi) \exp\left[-\int_{m}^{\xi} \frac{dz}{\tau u(z)}\right].$$
 (5)

Это соотношение принимает особенно простой вид в том случае, когда в аппарат подается материал монодисперсного состава. В этом случае исходное распределение частиц описывается дельта-функцией Дирака: $f_0(m) = N_0 \delta(m_0 - m)$, где m_0 — масса частиц, поступающих в аппарат; N_0 — их число. Подставляя указанное распределение в (5), получим

$$f(m) = \frac{N_0}{\tau u(m)} \exp\left[-\int_m^{m_0} \frac{dz}{\tau u(z)}\right] \theta(m_0 - m), \qquad (6)$$

где $\theta(m_0 - m)$ — функция Хевисайда.

Для количественной оценки величины истирания частиц необходимо иметь явный вид зависимости u(m). Приведенные в работах [16, 17] результаты исследований показали, что преимущественным механизмом истирания частиц является трение. Поэтому скорость истирания отдельной частицы пропорциональна площади ее поверхности или квадрату ее характерного размера $r: u \sim r^2$. Поскольку масса частицы пропорциональна кубу ее характерного размера, для скорости истирания имеем

$$u(m) = Am^{2/3}.$$
 (7)

Значение константы *А* зависит от множества факторов: механической прочности материала частиц, величины сил адгезии, формы частиц и т. п. Оно может быть найдено только опытным путем. Подстановка зависимости (7) в выражение (6) приводит к следующему виду нормированной функции распределения частиц в зависимости от среднего времени пребывания:

$$f(m) = \frac{N_0}{\tau u(m)} \exp\left[-\int_m^{m_0} \frac{dz}{\tau u(z)}\right] \theta(m_0 - m).$$
(8)

Тогда степень истирания частиц при известном среднем времени их пребывания в слое может быть оценена величиной

$$X = \frac{m_0 - \langle m \rangle}{m_0}, \quad \langle m \rangle = \int_0^{m_0} m f^*(m) \mathrm{d}m. \tag{9}$$

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования использовали гранулы сульфата аммония с влажностью 0.3% и прочностью 1.2 МПа, а также гранулы двуокиси марганца с влажностью 0.5% и прочностью 1.3 МПа, полученные на опытно-промышленной установке со взвешенным слоем научно-производственной компании ООО «ДИОМА». Для проведения эксперимента по истиранию гранул во взвешенном слое полученный материал был рассеян на ситах и отобрана фракция с размером гранул 3 мм, такой состав твердой фазы с большой степенью точности можно было считать монодисперсным.

Перед началом эксперимента в аппарат загружали слой гранул массой 2 кг. В ходе опыта в аппарат непрерывно подавался и выгружался твердый материал в таком количестве, чтобы масса слоя в аппарате была постоянной. Этот параметр контролировали по величине гидравлического сопротивления слоя. Среднее время пребывания гранул в аппарате оценивалось как $\tau = M_{cn}/G$, где M_{cn} — масса слоя, G — массовый расход выгружаемых из аппарата гранул. При этом считали, что насыпная плотность подаваемых и выгружаемых гранул не изменяется.

Загрузка и выгрузка гранул из аппарата в опытах осуществлялась таким образом, чтобы среднее время пребывания гранул в аппарате составляло 5, 10, 15 и 20 мин. Скорость воздуха в опытах изменялась в пределах от 1.5 до $3.0 \text{ м} \cdot \text{c}^{-1}$. Масса отобранных проб для анализа степени истирания частиц составляла около 150 г. Опытное определение степени истирания частиц проводили на основе оценки изменения их размера с помощью ситового анализа. Ситовой анализ проводился на ситах с размером ячеек 3, 2.8, 2.6, 2.4 и 2.2 мм.

Опытную проверку справедливости приведенных модельных представлений, величины погрешности полученных расчетных соотношений, а также определение зависимости величины истирания частиц от скорости газа проводили на установке, схема которой представлена на рис. 1. Основной частью установки является аппарат с фонтанирующим слоем (С) с тангенциальным подводом воздуха в слой. В этом аппарате пседоожижающий агент поступает в камеру через вертикально расположенную газораспределительную решетку и с помощью направляющего элемента плавно изменяет свое направление вдоль поверхности. При этом в центральной части аппарата формируется интенсивное и устойчивое фонтанирование, что особенно важно для частиц, склонных к слипанию при контакте друг с другом. Такая конструкция аппарата обеспечивает гидродинамическую стабильность работы слоя.

Исходные гранулы загружались в аппарат с помощью шнекового питателя (Ш), а выгружались из аппарата через боковой штуцер с помощью секторного затвора (СЗ).

Вытяжным вентилятором (В) в нижнюю камеру аппарата подавался воздух. Регулировка расхода воздуха осуществлялась вентиляционной заслонкой (ВЗ). Мелкая фракция, образовавшаяся при истира-



- Рис. 1. Схема установки для экспериментального исследования истирания в фонтанирующем слое.
- А аппарат фонтанирующего слоя, Ц циклон,
 В вытяжной вентилятор, Ш шнековый питатель,
 Е емкость для пыли, ВЗ вентиляционная заслонка,
 СЗ секторный затвор.
 Потоки: *I* атмосферный воздух, *2* отработанный воз-
- дух, 3 загрузка исходных гранул, 4 выгрузка твердой фазы.

нии, выносилась из аппарата вместе с потоком воздуха в циклон (Ц), а затем выгружалась в емкость для пыли (Е). Отработанный воздух, прошедший очистку в циклоне, вытяжным вентилятором выбрасывался в атмосферу.

Такие же опыты проводились и с гранулами двуокиси марганца, используемыми в качестве сорбента для улавливания сернистых газов.

Обсуждение результатов

С целью сопоставления экспериментальных данных и результатов расчета формула (8) была преобразована к форме зависимости функции распределения от размера частиц. Поскольку уравнение (1) инвариантно относительно замены массы частиц на их радиус, все преобразования, приводящие к соотношению (8), будут справедливы и для функции распределения частиц по размеру $\varphi(r)$. При этом скорость истирания будет не массовой, а линейной: $u = Br^2$. Константа *B*, так же как и константа *A* в (7), должна определяться экспериментально. С учетом этого для нормированной функции распределения частиц $\varphi^*(r)$ получим

$$\varphi^* = \frac{1}{B\tau r^2} \exp\left[\frac{1}{B\tau} (r_0^{-1} - r^{-1})\right] \theta(r_0 - r).$$
(10)



Рис. 2. Дифференциальная функция распределения гранул по размерам.

Сплошная линия — расчетные значения, точки — экспериментальные. Значение константы $B = 0.15 \ (\text{m} \cdot \text{c})^{-1}$.



Рис. 3. Изменение среднего размера (радиуса) с изменением среднего времени пребывания гранул в слое при скорости газа *w* = 3 м·с⁻¹.

Диаметр исходных гранул сульфата аммония 3 мм, влажность гранул 0.3%, прочность 1.2 МПа.





Для среднего радиуса частиц, покидающих рабочий объем, соответственно имеем

$$= \int_{0}^{r_{0}} r \phi^{*}(r) \mathrm{d}r.$$
 (11)

Результаты сравнения распределения гранул по размерам, полученного из опытов и рассчитанного по формуле (10), приведены на рис. 2. Анализ полученных результатов показал, что принятая гипотеза о кинетике истирания частиц соответствует действительности. Кроме того, хорошая сходимость расчетных и экспериментальных значений свидетельствует об эффективности предлагаемого авторами подхода к оценке изменения дисперсного состава частиц в аппаратах со взвешенным слоем твердой фазы.

Влияние среднего времени пребывания материала в слое на размер частиц иллюстрирует рис. 3. В интервале диаметров 2–3 мм зависимость близка к линейной. Значительно сильнее зависимость размера частиц от скорости газа (рис. 4), особенно при больших скоростях. С учетом того что масса частиц пропорциональна кубу их радиуса, степень истирания для некоторых материалов может оказаться недопустимой.

Аналогичные результаты были получены и при экспериментальном исследовании истирания гранул на основе двуокиси марганца.

Выводы

Разработанная математическая модель позволяет достаточно точно описать полученные экспериментальные результаты по истиранию гранул сульфата аммония в фонтанирующем слое. Методика расчета, основанная на указанной модели, может быть использована для оценки величины потерь дисперсного материала за счет истирания, а также для определения дисперсного состава частиц на выходе из аппаратов взвешенного или фонтанирующего слоя [соотношения (10) и (11)].

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Флисюк Олег Михайлович, зав. кафедрой процессов и аппаратов СПбГТИ (ТУ), д.т.н., проф., ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0527-8725 *Марцулевич Николай Александрович*, декан, зав. кафедрой механики СПбГТИ (ТУ), д.т.н., проф., ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9206-5976

Список литературы

- [1] Романков П. Г., Фролов В. Ф., Флисюк О. М. Массообменные процессы химической технологии. СПб:Химиздат, 2011. С. 407–437.
- [2] Фролов В. Ф., Флисюк О. М. Гранулирование в псевдоожиженном слое. СПб: Химиздат, 2008. С. 5–45.
- [3] Jiménez-García G., Aguilar-López R., Maya-Yescas R. The fluidized-bed catalytic cracking unit building its future environment // Fuel. 2011. V. 90. N 12. P. 3531– 3541. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.03.045
- [4] Uzi F., Kalman H., Levy A. A novel particle attrition model for conveying systems // Powder Technol. 2016.
 V. 298. P. 30–41.
 - https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.05.014
- [5] Tadamasa A., Takahashi K. Abrasion of particles by a small Impeller in an Agitated Vessel // J. Chem. Eng. Jpn. 2011. V. 44. P. 882–887. https://doi.org/10.1252/jcej.10we311
- [6] Laarhoven B., Wiers S. E., Schaafsma S. H., Meesters G. M. Attrition strength of different coated agglomerates // Chem. Eng. Sci. 2008. V. 63. P.1361– 1369. https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.07.006
- [7] Gamble J., Hoffmann M., Hughes H., Hutchins P., Tobyn M. Monitoring process induced attrition of drug substance particles within formulated // Int. J. Pharm. 2014. V. 470. P. 77–87.
- https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2014.04.028
- [8] Azimian M., Reiter A., Bart H. Computational investigation of impact attrition of particles // Powder Technol. 2015. V. 289. P. 169–181. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.055
- [9] Огурцов А. В., Жуков В. П., Овчинников Л. Н., Zbronski D. Вероятностная модель истирания порошка в кипящем слое // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2003. Т. 46. Вып. 2. С. 108–111.
- [10] Огурцов А. В., Жуков В. П., Мизонов В. Е., Овчинников Л. Н. Моделирование истирания частиц в кипящем слое на основе теории цепей Маркова // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2003. Т. 46. Вып. 7. С. 64–66.
- [11] Chakraborty J., Ramkrishna D. Identification of Markov matrices of milling models // Ind. Eng. Chem. Res. 2009. V. 48. P. 9763–9771. https://doi.org/10.1021/ie900456j
- Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology // Powder Technol. 2005. V. 157. P. 128–137. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.019

- [13] Berthiaux H. Analysis of grinding processes by Markov chains // Powder Technol. 2014. V. 253. P. 385–392. https://doi.org//10.1016/S0009-2509(00)00086-5
- [14] Флисюк О. М., Марцулевич Н. А., Шининов Т. Н. Гранулирование порошкообразных материалов в скоростном грануляторе // ЖПХ. 2016. Т. 89. № 4. С. 489–494 [*Flisyuk O. M., Martsulevich N. A., Shininov T. N.* Granulation of powdered materials in a high-speed granulator // Russ. J. Appl. Chem. 2016. V. 89. N 4. P. 603–608.

https://doi.org/10.1134/S1070427216040133].

[15] Пеньков Н. В., Флисюк О. М., Быков В. А. Стохастические методы моделирования процессов роста, истирания и дробления частиц в аппаратах периодического и непрерывного действия // ЖПХ. 1985. Т. 58. № 5. С. 1158–1160.

- [16] Горлов А. С. Исследование процесса истирания частиц твердой фазы в камере измельчения виброакустического диспергатора // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. 2015. № 5. С 179–183.
- [17] Горлов А. С., Порхало В. А., Горлов К. А. Математическое моделирование процесса истирания частиц // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 9. С. 183–187. https://doi.org/10.12737/ article 59a93b0f7260b4.49300932