

графия. – Сумы: «Козацкий вал» 2005. – 364 с. 5. Тарельник В.Б. «Комбинированные технологии электроэрозионного легирования». – К.: Техника, 1997. – 127 с. 6. Тарельник В.Б., Белоус А.В. Исследование качественных параметров поверхностных слоев при электроэрозионной цементации армо-железа и стали 12Х18Н10Т // Вісник СНАУ. – 2005. - №11. – С.115-119. 7. Белоус А.В. Влияние энергетических параметров электроэрозионной цементации на качественные параметры поверхностных слоев конструкционных сталей // Весник СумДУ. – 2006. - №12. – С.158-162.

Поступила в редколлегию 12.09.2007

УДК 614.73.16

Н.П. ЮХИМЕНКО

ЭНТРОПИЙНЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ МЕХАНИЗМА УНОСА ЧАСТИЦ В АППАРАТАХ ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ

By using entropy theory investigated the loss product function for fluidized bed.

Одними из эффективных аппаратов для осуществления процессов сушки, охлаждения, пневмоклассификации и обеспыливания зернистых материалов являются аппараты взвешенного слоя. В аппаратах со взвешенными слоями интенсивность взаимодействия фаз повышается как за счет развития поверхности контакта фаз, так и вследствие повышения относительной скорости движения газодисперсного потока. Неизбежный унос мелких частиц справедливо считается одним из основных недостатков техники псевдооживления и либо должен быть минимальным при проведении тепломассообменных процессов, либо регулируемым по количеству и размеру частиц при пневмоклассификации и обеспыливании зернистых материалов. При уменьшении объемов запыленного отходящего газа снижается нагрузка на пылеочистное оборудование и тем самым улучшается экологическая обстановка на производстве. Поэтому при расчетах и проектировании аппаратов взвешенного слоя важным этапом является определение величины уноса мелких частиц из взвешенного слоя зернистого материала.

Определению величины уноса посвящено достаточное количество научных публикаций и ряд монографий [1, 2]. Анализ приведенных расчетных зависимостей показывает, что они, из-за целого ряда допущений, носят частный характер. Первые попытки обобщить различные уравнения для расчета уноса были предприняты Тодесом и Цитовичем [1]. Авторами рассмотрены наиболее «практичные» уравнения, которые сведены к общеизвестной зависимости для скорости уноса вида

$$\frac{dC}{d\tau} = -kC \quad (1)$$

или

$$G_y = k G_{cr} C, \quad (2)$$

где C – концентрация мелких частиц в слое, кг/кг; τ – время процесса, с; G_y – скорость уноса, кг/с; G_{cn} – масса частиц в слое, кг; k – константа скорости уноса, с-1.

Для определения константы “ k ” в монографиях [1, 2] имеются достаточно громоздкие эмпирические корреляции в виде функции

$$k = f\left(\frac{W}{U_g}, Fr, Re, \frac{d_q}{H_{cn}}, \frac{D}{H_{cn}}, \frac{\rho}{\rho_q}, (1-\varepsilon)\right). \quad (3)$$

Более простой вид имеет корреляция для определения константы “ k ” в уравнении, предложенном Донатом [3]. Постулируется, что скорость уноса пропорциональна той предельной концентрации частиц данной крупности (Y_{np}), которая может возникнуть в потоке при его полном «насыщении» взвешенными частицами, то есть

$$\frac{dY}{d\tau} = -kY_{np}. \quad (4)$$

После преобразований, изложенных в работе [4], получаем уравнения позволяющие определять текущее значение концентрации частиц в газовом потоке на выходе из взвешенного слоя

$$\lg Y = \lg Y_{np} - k_1 / W, \quad (5)$$

$$\lg Y = \lg Y_{np} - k_2 h / W. \quad (6)$$

Из уравнения (6) определяется высота сепарационной зоны аппарата

$$h = \frac{W}{k_2} (\lg Y_{np} - \lg Y) = k_3 (\lg Y_{np} - \lg Y), \quad (7)$$

где Y – концентрация частиц данной крупности в газовом потоке (унос), г/м³; Y_{np} – предельная концентрация частиц в газовом потоке, г/м³; W – средняя скорость газового потока, м/с; h – высота сепарационной зоны, м; k_1 , k_2 , k_3 – опытные постоянные, являющиеся функцией скорости витания частиц U_g данной крупности.

Таким образом, сложный вид корреляций для определения констант скорости уноса является причиной не только расхождений результатов расчета, но и противоречивости характера зависимости уноса от скорости газа, диаметра аппарата, высоты слоя и сепарационной зоны и т.п. Механизм обобщения различных уравнений путем сведения параметров с помощью обычных арифметических преобразований [1] в обобщенную зависимость вида (2) не дал ожидаемых результатов, так как далеко не все уравнения поддаются данным преобразованиям (например, уравнения (5) и (6)). По этой причине некоторые из уравнений так и не нашли практического применения в инженерных расчетах.

Задачей данной работы составило теоретическое обоснование вида уравнения для определения величины уноса пылевидного материала из взве-

шенного слоя с помощью энтропийного подхода.

Энтропия применительно к технике псевдооживления характеризует неравномерность распределения частиц в рабочем объеме и определяет также интенсивность их хаотического движения. Величина энтропии “S” связана с вероятностным состоянием газодисперсной системы “ W_s ” и описывается функцией вида

$$\Delta S = k_s \ln W_s = k_s \ln \left(\frac{W}{W'} \right). \quad (8)$$

Допустим, что отношение вероятностей двух различных состояний газодисперсной системы W и W' определяется величиной отношения максимальной (предельной) концентрации мелких частиц в газовом потоке над поверхностью взвешенного слоя (Y_{np}) к концентрации их на произвольном уровне по высоте сепарационной зоны (Y). На этом уровне интенсивность движения частиц, то есть их хаос, больше, а система менее устойчива. С уменьшением скорости газового потока снижается интенсивность хаотического движения частиц, величина $Y \rightarrow Y_{np}$, то есть к равновесному состоянию с максимальной энтропией. Учитывая вышеизложенное, приращение энтропии газодисперсной системы определится из уравнения

$$\Delta S_{rc} = k_{rc} \ln \left(\frac{Y_{np}}{Y} \right). \quad (9)$$

С другой стороны, изменение энергии Гиббса (ΔG) в системе при (p, T) = const равно

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S. \quad (10)$$

Учитывая, что для обратимых самопроизвольно протекающих процессов, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, $\Delta G = 0$, имеем

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T}. \quad (11)$$

Изменение энтальпии системы (ΔH) складывается из ее внутренней энергии (принимая во внимание, что изменение объема не происходит), которая в свою очередь определяется суммой кинетической и потенциальной энергий движения частицы над взвешенным слоем и в сепарационной зоне аппарата. В отличие от термодинамической системы, в которой согласно уравнению (11) на изменение энергии движения молекул (микроуровень) влияние оказывает температура, в газодисперсной системе на изменение энергии движения твердых частиц (макроуровень) будет оказывать влияние сила аэродинамического воздействия газового потока (F). Логичность такой замены доказывают экспериментальные данные [5], подтверждающие практическую независимость уноса от температуры газового потока. В связи с этим постоянная Больцмана “ k_s ” в уравнении (8) для классической энтропии

(как мера теплового взаимодействия молекул) заменена на постоянную “ k_{rc} ” в уравнении (9) для изменения энтропии газодисперсной системы (как мера гидродинамического взаимодействия твердых частиц).

Учитывая вышеизложенное, осуществляя соответствующие замены в уравнении (11), приравнявая правые части уравнений (9) и (11) и произведя преобразования, имеем

$$\lg Y = \lg Y_{np} - \frac{m_q}{2,3k_{rc}F} \left(\frac{v_q^2}{2} + gh \right). \quad (12)$$

Для газодисперсной системы постоянная

$$k_{rc} = \frac{R_{rc}}{\sum N_q}, \quad (13)$$

где R_{rc} – постоянная, численно равная работе, совершаемой 1м3 газодисперсного потока при аэродинамической силе воздействия равной 1н (аналог газовой постоянной), Дж/(м3·н); $\sum N_q$ – суммарное количество твердых частиц в 1м3 газового потока (аналог постоянной Авогадро), м-3.

Рассмотрим два условия.

1. Если в аппарате взвешенного слоя мелкие частицы выводятся из слоя непосредственно у поверхности, тогда имеет место «динамический (инерционный) унос», обусловленный кинетической энергией частицы, вылетающей с поверхности слоя. В этом случае высота сепарационной зоны $h \rightarrow 0$ и уравнение (12) приобретает следующий вид

$$\lg Y = \lg Y_{np} - \frac{m_q}{2,3k_{rc1}F} \frac{v_q^2}{2}. \quad (14)$$

Во взвешенном слое каждая из частиц находится в равновесии относительно обтекающего потока (равенство сил тяжести и аэродинамического воздействия потока), то есть «витает» в потоке. Поэтому допускаем, что относительная скорость твердых частиц ($vч$) равна скорости их витания ($Uв$).

Произведя соответствующие подстановки в уравнении (14) и преобразовав его, имеем

$$\lg Y = \lg Y_{np} - 0,29 \frac{d_q}{k_{rc1}\zeta} \left(\frac{\rho_q}{\rho} \right) \left(\frac{U_в}{W} \right)^2, \quad (15)$$

где ζ – коэффициент сопротивления, $\zeta = f(Re)$; $dч$ – диаметр твердой частицы, м; $\rhoч$, ρ – плотности твердой частицы и газа, кг/м3.

2. Если в аппарате взвешенного слоя мелкие частицы транспортируются газовым потоком через сепарационную зону, то есть имеет место «кинетический унос», обусловленный выносом из слоя мелких частиц, скорость витания которых меньше скорости газа. В этом случае высота сепарационной зоны $0 << h < \infty$. А поскольку при установившемся движении твердых частиц на стационарном участке сепарационной зоны истинная скорость частицы равна скорости газового потока ($Uч = W$), то $vч = W - Uч = 0$. Тогда уравнение

(12) после соответствующих подстановок и преобразований приводится к виду

$$\lg Y = \lg Y_{np} - 0,29 \frac{h}{k_{rc2} \zeta} \left(\frac{\rho_u}{\rho} \right) \left(\frac{gd_u}{W^2} \right). \quad (16)$$

Из уравнения (16) определяется высота сепарационной зоны аппарата взвешенного слоя

$$h = \frac{k_{rc2} \zeta}{0,29} \left(\frac{\rho}{\rho_u} \right) \left(\frac{W^2}{gd_u} \right) (\lg Y_{np} - \lg Y). \quad (17)$$

Уравнения (15) - (17), полученные теоретическим путем, по форме сходны с эмпирическими зависимостями (5) - (7), последние же хорошо зарекомендовали себя в методиках инженерного расчета аппаратов взвешенного слоя [6]. Применимость теоретических уравнений (15) и (17) для практических расчетов возможна при определении постоянной “кгс” в виде функциональных связей

$$k_{rc1} = f(U_a), \quad k_{rc2} = f\left(\frac{1}{W}\right). \quad (18)$$

Автором получены эмпирические корреляции вида (18) путем обработки экспериментальных данных по обеспыливанию алюмосиликатного катализатора, алюминиевого и угольного порошка, кварцевого песка в аппаратах псевдооживленного и взвешенного на провальной решетке слоя, гранулированных суперфосфата, аммофоса, медного и угольного порошка в полочных аппаратах взвешенного слоя. Относительная погрешность расчетных значений от экспериментальных данных не превышает 5–30 %.

Таким образом, энтропийный подход к описанию механизма уноса мелких частиц из взвешенного слоя позволил выявить аналитическую взаимосвязь режимных параметров ведения процесса обеспыливания с энергетическими затратами путем введения постоянной “кгс”, которая показывает какой энергией должны обладать частицы при воздействии на них газового потока с определенной силой (аналог постоянной Больцмана). Данный подход позволит в дальнейших исследованиях проводить более качественный анализ по оптимизации технологических процессов в аппаратах взвешенного слоя с целью снижения энергозатрат.

Список литературы: 1. Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем: гидравлические и тепловые основы работы. –Л.: Химия, 1981.–296 с. 2. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник /Под ред. И.П. Мухленова и др.- Л.: Химия, 1986.- 352 с. 3. Донат Е.В., Голобурдин А.И. Аппараты со взвешенным слоем для интенсификация технологических процессов. – М.: Химия, 1993. –144 с. 4. Донат Е.В., Голобурдин А.И., Юхименко Н.П. Влияние концентрации частиц и диаметра трубопровода на скорость восходящего потока при пневмотранспорте //ЖПХ, №4, 1988, с. 789-794. 5. Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов. –М.: Химия, 1972. –240 с. 6. Юхименко Н.П. и др. Аппараты взвешенного слоя: теоретические основы и расчет. –Сумы: Собор, 2003. –304 с.

Поступила в редакцию 12.09.2007