



УДК 66.047:536.24

М.Г. Зиганшин – кандидат технических наук, доцент

А.М. Зиганшин – кандидат технических наук, доцент

Тел.: 89274268348, e-mail: mjihan@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

А.В. Дмитриев – кандидат технических наук, доцент

Нижекамский химико-технологический институт (НХТИ)

РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АППАРАТОВ С ФОНТАНИРУЮЩИМ СЛОЕМ ПОЛИДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА. ЧАСТЬ 1. РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЫ

АННОТАЦИЯ

Сопоставляются условия фонтанирования моно- и полифракционного материала. Проведен анализ действующих сил, составлен энергетический баланс, получен безразмерный комплекс потери устойчивости неподвижного полидисперсного слоя. Предложены расчетные соотношения для определения характерного размера частиц, лимитирующих переход в режим фонтанирования. Показана возможность корректировки существующих зависимостей на основе предложенных соотношений и расчетного определения параметров фонтанирования полидисперсного материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фонтанирующий слой, расчетные соотношения, полидисперсная система, потеря устойчивости.

M.G. Ziganshin – candidate of technical sciences, associate professor

A.M. Ziganshin – candidate of technical sciences, associate professor

Tel.: 89274268348, e-mail: mjihan@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)

A.V. Dmitriev – candidate of the technical sciences, associate professor

Nizhnekamsk institute of chemical technology (NICT)

THE REGIME PARAMETERS OF WITH THE POLYDISPERSE MATERIAL SPOUTED BED DEVICES. PART 1. ANALYSIS OF POLYDISPERSE SYSTEM STABILITY LOSS

ABSTRACT

A monofractional and a polyfractional material of spouting conditions are compared. The analysis of operating forces is lead, the power balance is made, the dimensionless complex of an immobile polydisperse layer stability loss is received. Settlement parities for definition the in a spouting mode transition limiting of the particles characteristic size are offered. The opportunity of existing dependences updating on the basis of the offered parities and opportunity of a polydisperse material spouting parameters calculation is shown.

KEYWORDS: spouted bed, settlement parities, polydisperse system, stability loss.

Аппараты с взвешенным слоем сыпучего материала часто находят применение в области стройиндустрии, а также в системах обработки газовоздушных потоков производственных зданий. Среди устройств с различными способами организации взвешенного слоя (кипящий слой, восходящий пневмотранспорт) установок с фонтанирующим материалом обладают рядом преимуществ. Основное из них заключается в обеспечении стабильности взвешенного слоя для полидисперсного материала в широком диапазоне размеров частиц (ориентировочно от $30 \cdot 10^{-6}$ до $30 \cdot 10^{-3}$ м). Однако в последнее время распространение

аппаратов с фонтанирующим слоем в различных областях техники заметно замедлилось, а в сфере стройиндустрии всегда имел место значительный резерв их внедрения. Одна из сдерживающих причин заключается в недостаточной надежности расчетной базы применительно к реальным процессам, хотя со времени первых исследований режимов фонтанирования, выполненных К.Б. Мазуром (К.В. Mathur) с соавторами, прошло более полувека.

Фонтанирующий режим образуется при центральной подаче струи газа под слой зернистого материала в конических и цилиндрических аппаратах. Для их оптимального конструирования и



эффективной эксплуатации необходима достоверная информация о параметрах стадий фонтанирования. Наиболее характерными параметрами являются: расход и максимальное давление газа при фильтрации через неподвижный слой; давление и минимальная скорость газа в начале фонтанирования; давление и максимальная скорость газа перед пневмотранспортом. Теоретические и эмпирические зависимости, позволяющие определять их, получены, как правило, для слоев из элементов одинакового размера и формы.

Достаточно полные обобщения экспериментов и теории фонтанирования представлены в [1, 2]. Много работ посвящено объяснению характерного пика давления перед началом фонтанирования. С позиций аэродинамики потока и механики сыпучих материалов изучены условия потери устойчивости. Исследованы границы режимов фонтанирования. Вместе с тем в строительной сфере для реальных производственных процессов характерно использование полифракционного сыпучего материала. Полидисперсность предлагается учитывать через медианный диаметр засыпки. Однако расчеты по среднему размеру засыпки приводят к расхождению с опытными результатами определения параметров полидисперсной фонтанирующей системы на 250...400 % и более, что можно объяснить следующим.

Расчеты по среднему диаметру предполагают, что искомое свойство неоднородной системы адекватно определяется по правилу аддитивности, что может быть справедливо при расчетах экстенсивных свойств, например, плотности смеси. Таким характерным свойством сыпучего материала в режимах фильтрации и перехода к фонтанированию является насыпная плотность, а в режиме устойчивого фонтанирования – кажущаяся. Однако в засыпке из полидисперсного материала на насыпную плотность сильно влияет фактор случайности первичной упаковки и последующего переуплотнения. В общем случае насыпная плотность смеси не будет соответствовать величине, вычисленной по сумме долей от насыпной плотности каждой фракции, пропорциональных их содержанию. Поэтому средний диаметр не может служить параметром, адекватно характеризующим условия потери устойчивости такого слоя. Кажущаяся плотность частиц среднего размера также не может адекватно отображать инерционных свойств полидисперсной системы, т.к. средний размер взвешенных частиц стохастическим образом изменяется во времени. Подсчет режимных параметров по среднему диаметру этого не учитывает.

Размеры частиц, определяющих параметры фонтанирования полидисперсного материала, специфичны для каждого режима. Для развитого фонтанирования это размер наибольшей фракции, а для режима с максимальной скоростью – наименьшей. Размер частиц, лимитирующий переход от фильтрации к фонтанированию, для полидисперсной смеси заранее

неизвестен. В целом, вопрос о параметрах, определяющих свойства полидисперсной смеси в процессе фонтанирования, пока разработан недостаточно, что показывает и сравнение результатов расчетов с опытом.

Максимальные давления при переходе полидисперсного слоя, рассчитанные по эмпирическим зависимостям для монодисперсных слоев, завышены в 2,5-4 и более раз по сравнению с экспериментально наблюдаемыми. Но при одинаковой высоте масса полидисперсной засыпки практически всегда больше, чем монодисперсной. Поэтому наблюдаемые давления должны были бы превосходить рассчитанные по среднему диаметру. Следовательно, он не является адекватной характеристикой свойств полидисперсной засыпки, лимитирующей переход в подвижное состояние. Достоверное нахождение лимитирующего размера полидисперсной системы должно обеспечить адекватность вычисления параметров ее фонтанирования.

Меньшие значения экспериментально наблюдаемых давлений в полидисперсном слое указывают также на меньшую затрату энергии при перестройке его структуры по сравнению с монодисперсным. Внешняя сила механического воздействия газового потока на неподвижный сухой сыпучий материал при отсутствии других внешних воздействий уравнивается силой, создаваемой тяжестью и межмолекулярным взаимодействием. Доля внешней силы и силы тяжести передается на межмолекулярные связи, вызывая рост амплитуд и частот колебаний поверхностных ионов, их поляризацию, деформацию поверхностных слоев, и в итоге – рост адгезии частиц. Влияние межмолекулярного взаимодействия существенно для субмиллиметровых фракций частиц и возрастает с уменьшением их размера.

Равномерно упакованная система одинаковых сферических элементов требует максимальной затраты работы на нарушение связей, удерживающих ее в равновесии. В полидисперсной хаотически упакованной системе внешние силы распределяются неравномерно. Для нарушения равновесия системы достаточно нарушить слабейшую связь. Легче поддались бы эрлифту самые мелкие фракции засыпки, но сила их межмолекулярного взаимодействия максимальна в данной системе (ориентировочно она обратно пропорциональна шестой степени отношения диаметров частиц). Крупные же фракции обладают наибольшей скоростью витания. Очевидно, при начальном минимальном усилии будут приведены в движение частицы промежуточного или минимального размера. Их место займут более крупные частицы. Затем система может обрести новое состояние равновесия или перейти в режим фонтанирования, что зависит от материала, формы и дисперсного состава частиц, величины внешней энергии, параметров газа и других факторов.



Характеристики режима фильтрации газа, подготавливающего структуру слоя к фонтанированию, специфичны для совокупностей частиц различных материалов и размеров. Основные свойства конкретных фракций полидисперсной системы и частиц усредненного размера не тождественны. Вместе с тем учет специфичных свойств каждой фракции в теории и на практике затруднителен. Размеры частиц, адекватно определяющих параметры перехода в режим фонтанирования, можно получить из условия нарушения равновесия между внешней силой и силами тяжести и межмолекулярного взаимодействия. Для реальных условий, при обработке влажного материала или газа, будет существенным и вклад капиллярных сил.

Нарушение равновесного состояния полидисперсной засыпки начнется с частиц некоторого лимитирующего размера D_{lim} , скорость витания которых окажется ниже действительной скорости потока по месту их расположения в неподвижном слое. Энергии потока должно быть достаточно и для преодоления аутогезионного взаимодействия частиц этого размера. При их эрлифте частицы следующего, более крупного, размера D_{lim+1} , еще остаются неподвижными, но имеют уже достаточную порозность. Исходя из этого, можно принять, что сила, необходимая для нарушения равновесия, должна превосходить силы тяжести и всех взаимодействий частиц фракции, включающей лимитирующий размер, но остается еще меньше силы тяжести частиц более крупной фракции.

Между частицами субмиллиметрового диапазона можно считать существенными межмолекулярные и капиллярные взаимодействия. Форму зависимости энергии вандерваальсовых взаимодействий E_{vdw} от расстояния получают из приближенного решения задачи о нулевых колебаниях атомов водорода как квантующихся осцилляторов: $E_{vdw} = \mathbf{h}\omega(1 - Cl^{-n})$ Дж. В этом выражении l , m – расстояние между центрами взаимодействующих молекул как колеблющихся мультиполей; $\mathbf{h}\omega$, Дж – постоянная Липшица – Ван дер Ваальса, значение которой зависит от вида взаимодействующих веществ; значения показателя степени n и коэффициента C подбираются эмпирически. По [3], для твердых материалов в воздушной среде $\mathbf{h}\omega = (1,6-16) \cdot 10^{-19}$ Дж на пару взаимодействующих элементов, или $\mathbf{h}\omega_N = (4,8-48) \cdot 10^7$ Дж на 1 кмоль таких пар. Необходимо также учесть, что пары контактирующих структурных единиц материала (атомов, ионов) располагаются на поверхностях частиц. Доля поверхностных единиц по отношению к их общему числу в пределах размеров частиц 60-700 мкм согласно [4] $s = 10^{-6}-0,7 \cdot 10^{-8}$. В [5] указывается на ослабление вандерваальсового взаимодействия из-за того, что вследствие неровностей не все пары поверхностных элементов соприкасающихся

частиц находятся на равновесных расстояниях. С учетом коэффициента ослабления $l = 5 \cdot 10^{-2} - 10^{-1}$ и числа взаимодействующих пар $N = (N_A/2) \cdot s \cdot l$ получим для засыпки из частиц размером 700 мкм $\mathbf{h}\omega = \mathbf{h}\omega_N \cdot s_{700} \cdot l_{700} = 3,36 \cdot 10^{-2} - 3,36 \cdot 10^{-1}$ Дж/кмоль, и частиц размером 60 мкм $\mathbf{h}\omega = \mathbf{h}\omega_N \cdot s_{60} \cdot l_{60} = 2,4-24$ Дж/кмоль. Используем еще из ([5]) эмпирическую зависимость силы взаимодействия между частицами радиусом R от расстояния r между ними: $F_{vdw} = RE_{vdw} / (4r^2)$. Со значением $E_{vdw} = \mathbf{h}\omega(2 - \sqrt{2})/2$, полученным из уточненного решения задачи о нулевых колебаниях ([6]), представим:

$$F_{vdw} = R E_{vdw} / (4r^2) = R\mathbf{h}\omega(2 - \sqrt{2}) / (8r^2). \quad (1)$$

При фильтрации влажного воздуха возможна конденсация пара с образованием в местах контакта прослоек капельной жидкости. Капиллярное взаимодействие, удерживающее частицы за счет поверхностного натяжения σ , Н/м: $F_\sigma = 8\sigma R$ ([3]). При влажности более 80 % оно может стать больше вандерваальсового, а их совместная сила – превзойти силу тяжести частиц.

В общем случае величина внешней силы, необходимой для нарушения равновесия полидисперсной системы, $F = F_{vdw} + F_\sigma + P_{lim} < P_{lim+r}$, или, с использованием выражения (1),

$$R_{lim} \mathbf{h}\omega(2 - \sqrt{2}) / 8r^2 + 8\sigma R_{lim} +$$

$$+ 4\pi R_{lim}^3 \rho_{lim} g / 3 < 4\pi R_{lim+1}^3 \rho_{lim+1} g / 3, \quad (2)$$

где P_{lim} , P_{lim+1} , R_{lim} , R_{lim+1} , ρ_{lim} , ρ_{lim+1} – соответственно, вес, Н, радиусы, м и насыпные плотности, кг/м³, частиц лимитирующей и последующей фракций.

Равновесные расстояния вандерваальсового взаимодействия значительно меньше размеров частиц, ввиду чего считаем расстояние между их центрами r приблизительно равным $2R$. Приняв еще, что для одного материала $\rho_{lim} = \rho_{lim+1} = \rho_p$, и обозначив $R_{lim+1}/R_{lim} = \varphi$, преобразуем (2) и получим условие нарушения равновесия полидисперсной системы в энергетическом представлении:

$$4\pi R_{lim}^4 \rho_p g (\varphi^3 - 1) / 3 - 8\sigma R_{lim}^2 - \mathbf{h}\omega(2 - \sqrt{2}) / 32 > 0. \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет получить условие потери устойчивости неподвижной полидисперсной системы в виде безразмерного параметра

$$LS = 2244,76 R_{lim}^4 \rho_p (\varphi^3 - 1) / (437,02 \sigma R_{lim}^2 + \mathbf{h}\omega) > 1. \quad (4)$$

При продувке неувлажненных измельченных материалов осушенным газом наиболее существенны вандерваальсовы взаимодействия и силы тяжести частиц. Тогда выражение (4) можно представить в виде:

$$LS = 2244,76 R_{lim}^4 \rho_p (\varphi^3 - 1) / \mathbf{h}\omega > 1. \quad (5)$$



При высокой влажности частиц и/или продуваемого газа капиллярное взаимодействие может стать больше вандерваальсового. Тогда потерю устойчивости слоя можно оценивать по энергии, необходимой для разрыва связей капиллярного взаимодействия, и механической энергии потока на преодоление силы тяжести. Выражение (4) преобразуется в

$$LS = 5,14R_{\text{lim}}^2 \rho_p (\varphi^3 - 1) / \sigma > 1. \quad (6)$$

Условие потери устойчивости полидисперсной системы позволяет также находить соотношение определяющих размеров частиц минимальной и последующей фракций R_{lim} и $R_{\text{lim},1}$. Если преимущественно капиллярное взаимодействие, то в соответствии с (6)

$$R_{\text{lim}} > \pm 0,44 \sqrt{\sigma / [\rho_p (\varphi^3 - 1)]}. \quad (7)$$

При преимущественно вандерваальсовом взаимодействии, из (5),

$$R_{\text{lim}} > \pm 0,145 \left\{ \frac{\mathbf{h}\omega}{[\rho_p (\varphi^3 - 1)]} \right\}^{0,25}. \quad (8)$$

В общем случае

$$R_{\text{lim}} > \pm 0,312 \sqrt{\frac{\sigma \pm \sqrt{\sigma^2 + 0,047 \rho_p (\varphi^3 - 1) \mathbf{h}\omega}}{\rho_p (\varphi^3 - 1)}}. \quad (9)$$

Из 4 корней зависимостей (8, 9) два комплексных и один действительный отрицательный. Но при $\varphi > 1$ каждое из выражений дает по одному действительному положительному корню, что удовлетворяет физическим условиям решаемой задачи.

При φ , близком к 1, зависимости (7, 8, 9) могут давать недостаточно объективные результаты. Такие случаи характерны для сыпучего материала, гранулометрический состав которого приближается к монодисперсному, что может иметь место, например, при обработке воздуха адсорбентом в виде гранул или таблеток, при сушке зерновых культур и т.д. Тогда R_{lim} в соответствии с (9) может стать математически неопределенным. Однако значение $\varphi=1$ не соответствует условиям поставленной задачи. В данной работе рассматриваются характеристики полидисперсной засыпки, значение φ для которой существенно отличается от 1. Для определения режимных характеристик фонтанирования монодисперсных или близких к ним по гранулометрическому составу сыпучих материалов рассчитывать значение R_{lim} не имеет смысла. Характерный размер элементов подобных засыпок, используемых для расчетов требуемых параметров, известен заранее. Для них также известен ряд проверенных многими исследователями и ставших классическими расчетных соотношений, таких как эмпирическая зависимость скорости начала

фонтанирования w_b от характеристик частиц твердой фазы, предложенная К.Б. Мазуром ([7]):

$$w_b = (D_p/D)(d_0/D)^{0,33} \sqrt{2gH_0(\rho_p - \rho_G)/\rho_G}, \quad (10)$$

где D_p, D – диаметр частиц и верхнего основания слоя, м; ρ_p, ρ_G – плотность частиц и газа, кг/м³; H_0 – высота слоя, м.

Выражение $\sqrt{2gH_0}$ в (10) должно представлять величину начальной скорости, которую имеет частица до преодоления слоя высотой H_0 . Однако в традиционных конструкциях конических и цилиндроконических аппаратов скорости частиц у основания конуса равны нулю вследствие изменения направления движения на противоположное.

Величину сопротивления фонтанирующего слоя для практических расчетов М.И. Рабиновичем с авторами ([2]) предлагается принимать по соотношению:

$$\Delta P_f = C g \rho_a H_0, \quad (11)$$

где ρ_a – насыпная плотность частиц кг/м³, $C = (0,64-0,75)$ – коэффициент.

В (11) также очевидно присутствует начальная скорость $(\sqrt{2gH_0})^2$. Поэтому модели, принятые в ([2, 7]),

при составлении зависимостей (10, 11) могут использоваться для аппаратов, в которых сопло, подводющее поток воздуха, выступает над основанием конической части. Тогда на уровне среза сопла начальная скорость за счет инжектирующего эффекта не будет равна нулю. У таких аппаратов при расчетах соответствующих параметров по формулам (10, 11) высоту слоя неподвижной засыпки H_0 необходимо отсчитывать от уровня среза сопла. Эти зависимости применимы при нахождении характеристик фонтанирования полидисперсного слоя в подобных аппаратах, но нуждаются в эмпирических поправках. Так, в выражении (11) необходимо введение корректирующей поправки к численному параметру C . Он получен, по данным авторов ([2]), при испытаниях аппаратов с крупной засыпкой. Инжекция потоком крупных частиц, начиная с миллиметрового диапазона, могла бы заметно повлиять на результаты опытов при скорости потока на срезе сопла, сопоставимой со скоростью витания, т.е. выше 10-20 м/с. Поэтому инжектирующий эффект в параметре C выражения (11) не учтен.

В [1] для определения w_{cr} и w_b предложена эмпирическая зависимость, построенная на другом принципе:

$$\text{Re}_{cr(b)} = B \cdot \text{Re}_t \left(\frac{D}{d_0} - 1 \right)^{0,82} \left(\text{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{0,1}, \quad (12)$$

где Re_t – критерий Рейнольдса, подсчитываемый по скорости витания частиц w_t диаметром D_p ; B –



эмпирический коэффициент, значение которого 0,364 для Re_{cr} и 0,706 для Re_b ; D, d_0 – диаметры верхнего основания слоя и нижнего основания конуса, м; θ – угол раскрытия конуса.

Отмеченная модель физически корректно, через скорость витания, связывает w_{cr} и w_b с размером отдельной частицы. Характеристики засыпки как совокупности частиц (насыпная плотность, высота слоя, силы взаимодействия и др.) однозначно фиксируются в ней эмпирическими параметрами. Если указанные характеристики отличаются от имевших место в работе [1], то до применения выражения (12) к полидисперсному материалу необходима его опытная корректировка.

В заключении теоретической части исследования можно сделать следующие выводы. Классические зависимости (10, 11, 12) физически корректно описывают процесс фонтанирования монофракционного материала и могут служить основой расчетных соотношений для аналогичных параметров полидисперсной засыпки. Выражения (10, 11) учитывают и некоторые конструктивные особенности, обеспечивающие энергоэкономичность аппаратов с фонтанирующим материалом. Составлен энергетический баланс с учетом вандерваальсовых и капиллярных сил, из

условия нарушения которого получен безразмерный параметр потери устойчивости слоя LS . Он позволяет находить размер частиц фракции, лимитирующей начало фонтанирования, если соотношение размеров соседних фракций φ существенно отличается от 1. Для проверки положений, разработанных в теоретической части, необходимо выполнение соответствующих экспериментальных исследований.

Литература

1. Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. – Л.: Химия, 1979. – 272 с.
2. Рабинович, М.И. Тепловые процессы в фонтанирующем слое. – Киев: Наукова думка, 1977. – 174 с.
3. Ейтс, Дж. Основы механики псевдооживления с приложениями. – М.: Мир, 1986. – 288 с.
4. Губин С.П. Химия кластеров. Основы классификации и строение. – М.: Наука, 1987. – 263 с.
5. Massimila L., Donsi G. Powder Tech., 1976, 15, p. 253.
6. Зиганшин М.Г. Теоретические основы пылегазоочистки. – Казань: Изд-во КазГАСУ, 2005. – 262 с.
7. Mathur K.B., Gishler P.E., Amer. Inst. Chem. Eng. J., 1955, v.1, № 2, p. 157.