

УДК 637.14

Е.С. Нечаева, Д.М. Попов**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПЫЛИ И ФАКЕЛА РАСПЫЛА ЖИДКОСТИ В РОТОРНОМ РАСПЫЛИТЕЛЬНОМ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕ**

Показана перспективность использования роторного распылительного пылеуловителя для тонкой очистки сушильных газов от пыли пищевых продуктов. Приведены результаты исследования дисперсного состава лактозы и различных жидкостей на контактном элементе пылеуловителя.

Роторный распылительный пылеуловитель, мокрый способ пылеулавливания, дисперсный состав.

Введение

Многие технологические процессы в перерабатывающих отраслях промышленности сопровождаются значительными выделениями пыли, например, при сушке молока и молочных продуктов, дрожжей, зерна и т. п. Такие выбросы ухудшают санитарно-гигиеническое состояние производственных помещений и прилегающих территорий, способствуют увеличению фактора взрывопожароопасности, а также связаны с прямыми потерями готовой продукции, что снижает показатели экономической эффективности. В ряде смежных с пищевой отраслей промышленности эта проблема зачастую стоит еще более остро, поскольку выбрасываемые в атмосферу аэрозоли являются токсичными веществами (химическая, энергетическая, металлургическая и др.). Особую проблему создают высокодисперсные фракции пылевидного продукта, которые в большинстве случаев не улавливаются многими существующими пылеотделителями. Поэтому создание оборудования для очистки технологических и аспирационных газов от аэрозолей имеет большое значение в решении общегосударственной проблемы по охране окружающей среды.

Наилучшей степенью очистки обладает мокрый способ, при котором в зависимости от конструкции аппарата могут улавливаться частицы пыли до 1 мкм с эффективностью 99 %. Из них, согласно [1, 2], наиболее перспективными аппаратами для тонкой очистки сушильных газов от пыли пищевых продуктов являются пылеуловители с внешним подводом энергии, позволяющие обеспечить внутреннюю циркуляцию и самоорошение рабочей жидкостью, например, роторный распылительный пылеуловитель нашей конструкции.

В нем формирование поверхности жидкости, улавливающей пыль на контактном элементе, осуществляется на двух стадиях – диспергирования жидкости в виде струй и капель и ударного взаимодействия первичных капель факела распыла с пленкой жидкости на поверхности пластинок пристенного каплеотбойника и внутренней стенке корпуса. Отличительная особенность пылеуловителя – многократная циркуляция жидкости, которая сопровождается многократным диспергированием и ударным взаимодействием. Пылеуловитель обладает низким гидравлическим сопротивлением при высокой плотности орошения, компактен, имеет малые удельные затраты энергии на организацию своей работы. Однако недоста-

точная изученность закономерностей формирования факела распыленной жидкости на контактном элементе и характеристик улавливаемой пыли не позволяет обоснованно подходить к расчету поверхности взаимодействия жидкости и газового потока с пылью и производительности аппарата по газу.

Данная статья направлена на исследование дисперсных характеристик частиц пыли лактозы и факела распыла воды на контактном элементе пылеуловителя.

Материалы и оборудование

В качестве пылеобразующего вещества использовалась лактоза (IST 173057512-17.2006 – стандарт предприятия Литвы), приобретенная у компании АО «Рокишки Сурис». Средний размер частиц лактозы составил 10–15 мкм, а задача эксперимента – улавливание частиц размером 1–3 мкм. Для этого было необходимо измельчить лактозу до нужного размера на вибрационной мельнице с рабочими органами в виде металлических стержней. После каждого прохода через мельницу производили анализ дисперсности. Для лактозы было установлено число проходов, равное трем. Пыль лактозы подавалась во входной воздуховод, в котором при помощи вентилятора нагнетался воздух из атмосферы. Скорость подачи воздуха регулировалась с помощью заслонки. Исследование дисперсного состава пыли заключалось в определении размера частиц и построении статистических рядов распределения количества частиц по размерам. Размеры частиц определялись в специальной программе, созданной в кросс-платформенной среде разработки программного обеспечения на языке программирования C++ Qt 4.7, по фотоснимкам. Фотосъемка осуществлялась с помощью цифровой камеры DCM 310 и микроскопа биологического LEVENHUK 40L NG.

Экспериментальное исследование дисперсного состава факела распыленной жидкости осуществлялось на контактном элементе пылеуловителя диаметром 0,25 м. Диспергирующее устройство было выполнено в виде цилиндра наружным диаметром 75 мм с одним рядом, состоящим из 24 распыляющих отверстий. При этом в различных опытах диаметр отверстий составлял 1,1; 1,5; 1,75 и 2,0 мм, толщина перфорированной стенки цилиндра – 1,5 мм. Частота вращения диспергирующего устройства изменялась в пределах 900...1500 об/мин. Для получения контрастных снимков использовались экраны

разных цветов: при распыливании молока использовался экран черного цвета; в остальных случаях – экран белого цвета. Вода, водные растворы NaOH и KOH подкрашивались черной тушью. Фотографирование факела распыленной жидкости осуществлялось цифровым фотоаппаратом OLYMPUS CAMEDIA C-2000Z с установленной экспозицией 800 с^{-1} .

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена эмпирическая кривая распределения массы частиц пыли лактозы по размерам. Общее процентное содержание частиц размером менее 1 мкм в общей массе составляло 41% .

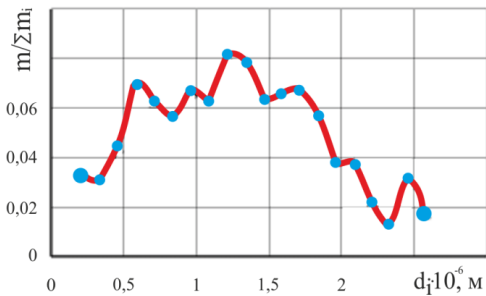


Рис. 1. Эмпирическая кривая распределения массы частиц пыли лактозы по их размерам

Для оценки дисперсности факела распыленной жидкости наиболее употребительной характеристикой служат дифференциальные и суммарные (интегральные) функции распределения числа, поверхности и массы капель по размерам. Основной из этих функций является дифференциальная функция распределения числа капель по размерам. Все остальные функции могут быть получены при ее пересчете. Распределение диаметра капель в совокупности имеет непрерывный характер. Для удобства непрерывная совокупность капель заменяется некоторой дискретной последовательностью с определенным количеством интервалов. Каждому среднему диаметру интервала d_i соответствует определенная численность капель n_i .

Дисперсность факела распыленной жидкости обычно характеризуется некоторым средним диаметром капель с учетом параметров того или иного закона распределения и длиной сплошного участка струи. В общем случае уравнение для любого среднего диаметра имеет вид:

$$d_{f,k} = f^{-k} \sqrt{\frac{\sum d_i^f \cdot n_i}{\sum d_i^k \cdot n_i}}, \quad (1)$$

где f и k – целые числа, зависящие от способа осреднения.

Для определения дисперсных характеристик используются эмпирические уравнения, связывающие их с основными факторами: конструктивные параметры и режим работы диспергирующего устройства, физико-химические свойства жидкости и окружающей среды. Анализ литературных данных показал, что из физических свойств взаимодействующих

фаз на дисперсность факела распыла оказывают влияние следующие величины: σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости; μ_1, μ_2 – коэффициенты динамической вязкости газа и жидкости; ρ_1, ρ_2 – плотности газа и жидкости.

Взаимосвязь между указанными величинами рекомендуется [2] описывать уравнением вида:

$$\frac{d_{f,k}}{d_0} = We_2^a \cdot Lp^b \cdot M^c \cdot N^d, \quad (2)$$

где $We_2 = U_2^2 \cdot d_0 \cdot \rho_2 / \sigma$ – критерий Вебера, характеризующий соотношение между нормальными силами поверхностного натяжения и силами инерции; $Lp = d_0 \cdot \rho_2 \cdot \sigma / \mu_2^2$ – критерий Лапласа, характеризующий соотношение сил поверхностного натяжения и вязкости; $M = \rho_2 / \rho_1$ и $N = \mu_2 / \mu_1$ – параметры, характеризующие соответственно соотношения плотности и вязкости распыливаемой жидкости и окружающей среды; a, b, c, d – константы, полученные опытным путем.

Выражение (2) можно представить в виде:

$$\frac{d_{f,k}}{d_0} = A \cdot U_2^x \cdot \mu_1^y \cdot \mu_2^z \cdot \sigma^p \cdot \rho_1^q \cdot \rho_2^r. \quad (3)$$

При этом показатель степени при каждом факторе позволяет оценить уровень его значимости.

Капли факела распыленной жидкости под воздействием силы сопротивления могут дробиться. Это явление будет происходить, если сила аэродинамического воздействия среды превысит давление, создаваемое внутри капли за счет сил поверхностного натяжения. Если максимальная скорость капли на $15 \dots 20 \%$ меньше скорости, при которой произойдет дробление капли, то при расчетах принято рассматривать каплю как твердую шарообразную частицу [3].

Для описания дисперсного состава факела жидкости наиболее применим нормальный закон распределения, также может быть использовано гамма-распределение [4].

Полученные фотографии были обработаны на компьютере в программе, использованной для фотографий пыли лактозы. На рис. 2 представлена гистограмма и рассчитанная теоретическая кривая. Сравнение гистограммы и теоретической кривой наглядно показывает, что теоретическая кривая удовлетворительно отражает данные наблюдений. Оценка близости эмпирического распределения к предполагаемому теоретическому с помощью критерия Пирсона показала, что в 80 из 96 опытов гипотеза о гамма-распределении числа капель по размерам не противоречит наблюдениям. Функция распределения числа капель по размерам имеет вид:

$$f(d_i) = \frac{1}{b^a \cdot \Gamma(a)} \cdot d_i^{a-1} \cdot e^{-d_i/b}, \quad (4)$$

где $\Gamma(a) = \int_0^\infty d_i^{a-1} \cdot e^{-d_i/b} \cdot d_i$ – гамма-функция; a, b – параметры распределения.

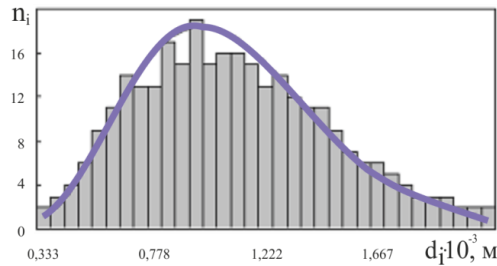


Рис. 2. Гистограмма и теоретическая кривая распределения числа капель воды по их размерам

С повышением вязкости наблюдается уменьшение размера капель и приближение дисперсности факела распыленной жидкости к монодисперсному. Однако в большинстве проведенных опытов наблюдается значительная степень полидисперсности факела распыленной жидкости. Поэтому для более полного описания распределения числа, поверхности и массы капель по размерам целесообразно к средним значениям дисперсности добавить другие статистические характеристики, отображающие основные свойства этих распределений. Наибольший интерес для расчетов, связанных с диспергированием жидкости на контактном элементе при проведении мокрой пылеочистки, представляют средний арифметический диаметр d_{10} , средний объемно-поверхностный диаметр d_{32} и средний массовый диаметр d_{43} . Обработка экспериментальных данных позволила выявить статистическую взаимосвязь между средними характеристиками дисперсности $d_{10} \div d_{32} \div d_{43} = 0,83 \div 1,00 \div 1,07$.

За меру рассеяния при изучении распыливания жидкости целесообразно принять коэффициент вариации. Для вычисления коэффициентов вариации распределения числа, поверхности и массы капель по размерам использовались формулы:

$$V_{10} = \frac{1}{d_{10}} \cdot \sqrt{\frac{\sum n_i \cdot (d_i - d_{10})^2}{\sum n_i}}, \quad (5)$$

$$V_{32} = \frac{1}{d_{32}} \cdot \sqrt{\frac{\sum f_i \cdot (d_i - d_{32})^2}{\sum f_i}}, \quad (6)$$

$$V_{43} = \frac{1}{d_{43}} \cdot \sqrt{\frac{\sum m_i \cdot (d_i - d_{43})^2}{\sum m_i}}, \quad (7)$$

где f_i и m_i – поверхность и масса капель диаметром d_i .

Средние арифметические значения коэффициентов вариации составляют:

$$\bar{V}_{10} = 0,3224^{+0,1082}_{-0,1039}, \quad (8)$$

$$\bar{V}_{32} = 0,2920^{+0,0965}_{-0,0775}, \quad (9)$$

$$\bar{V}_{43} = 0,2576^{+0,0827}_{-0,0587}. \quad (10)$$

Другой мерой рассеяния, часто применяемой при изучении диспергирования жидкости, является размах распределения R , под которым понимают разность максимального и минимального значений диаметра капель $R = d_{\max} - d_{\min}$. Так как распределения расположены в широком диапазоне изменения диаметра капель d_i , то целесообразно использовать относительный размах распределения:

$$R_{32} = \frac{d_{32\max} - d_{32\min}}{\sigma_{32}}, \quad (11)$$

$$R_{43} = \frac{d_{43\max} - d_{43\min}}{\sigma_{43}}, \quad (12)$$

где R_{32} и R_{43} – относительный размах распределения поверхности и массы капель по размерам соответственно.

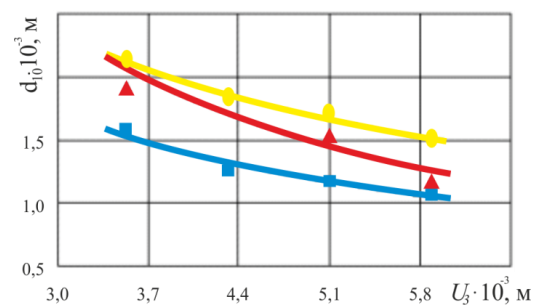
Средние значения величин \bar{R}_{32} и \bar{R}_{43} :

$$\bar{R}_{32} = 4,1961^{+0,8152}_{-1,8264}, \quad (13)$$

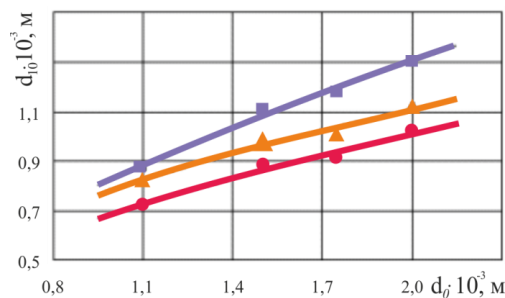
$$\bar{R}_{43} = 4,4252^{+0,7698}_{-1,0084}. \quad (14)$$

На рис. 3 приведены результаты математической обработки опытных данных. При увеличении скорости истечения жидкости в диапазоне 3...6 м/с вследствие увеличения длины нераспавшегося участка струи и уменьшения диаметра струи в месте начала распада наблюдается уменьшение среднего диаметра капель факела. С увеличением диаметра распыливающих отверстий диспергирующего устройства при постоянной скорости истечения жидкости наблюдается рост среднего диаметра первичных капель, что связано с увеличением диаметра сплошного участка струи.

С увеличением диаметра распыливающих отверстий диспергирующего устройства при постоянной скорости истечения жидкости наблюдается рост среднего диаметра первичных капель, что связано с увеличением диаметра сплошного участка струи.



а) зависимость среднего арифметического диаметра капель от скорости истечения жидкости



б) зависимость среднего арифметического диаметра капель от диаметра распыливающего отверстия

Рис. 3. Средний диаметр распыла в зависимости от различных факторов: ■ – $n = 1100$ об/мин; ▲ – $n = 1300$ об/мин; ● – $n = 1500$ об/мин

В инженерной практике часто невозможно экспериментально определить дисперсность факела распыленной жидкости. Для определения дисперсных характеристик используются эмпирические уравнения, связывающие эти характеристики с основными факторами. Как уже отмечалось, основными факторами являются: конструктивные параметры и режим работы диспергирующего устройства, физико-химические свойства жидкости. Поэтому для описания взаимосвязи средних характеристик дисперсности факела распыленной жидкости с основными факторами целесообразно использовать функциональную зависимость вида:

$$d_{f,k} = f(U_2, d_0, \rho_2, \mu_2, \sigma), \quad (15)$$

где U_2 – абсолютная скорость жидкости; d_0 – диаметр распыливающих отверстий диспергирующего устройства.

В результате обработки экспериментальных данных были получены уравнения для определения средних характеристик дисперсности факела распыленной жидкости:

$$d_{10} = \frac{d_0^{0,54} \cdot \rho_2^{0,33} \cdot \sigma^{0,35}}{172 \cdot U_2^{0,75} \cdot \mu_2^{0,28}}, \quad (16)$$

$$d_{32} = \frac{d_0^{0,59} \cdot \rho_2^{0,28} \cdot \sigma^{0,37}}{84 \cdot U_2^{0,85} \cdot \mu_2^{0,34}}, \quad (17)$$

$$d_{43} = \frac{d_0^{0,61} \cdot \rho_2^{0,27} \cdot \sigma^{0,37}}{67 \cdot U_2^{0,85} \cdot \mu_2^{0,35}}. \quad (18)$$

Полученные выражения справедливы в следующих пределах: $\rho_2 = (0,998 \dots 1,397) \cdot 10^3$ кг/м³; $\mu_2 = (0,886 \dots 4,064) \cdot 10^{-3}$ Па·с; $\sigma = (44,87 \dots 88,08) \cdot 10^{-3}$ Н/м; $t_{oc} = 20$ °С; $d_0 = (1,1 \dots 2,0) \cdot 10^{-3}$ м; $d_0/\delta = 0,733 \dots 1,333$; $We_2 = 190 \dots 1570$; $Re_2 = 1200 \dots 13500$.

Выражения удовлетворительно соответствуют известным данным в области распада струй под действием осесимметричных колебаний и в области волнообразного распада.

Полученные статистические характеристики частиц пыли и капель факела распыла будут использованы при создании вероятностной модели процесса пылеулавливания.

Список литературы

1. Варваров, В.В. Проблемы улавливания пылевидных фракций в технологии сыпучих пищевых продуктов / В.В. Варваров. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1988. – 136 с.
2. Сорокопуд, А.Ф. Разработка и совершенствование роторных распылительных аппаратов с целью интенсификации процессов в гетерогенных газожидкостных системах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.04:05.18.12: защищена 21.05. / Сорокопуд Александр Филиппович. – Кемерово, 1998. – 529 с.
3. Холин, Б.Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости / Б.Г. Холин. – М.: Машиностроение, 1977. – 182 с.
4. Попов, Д.М. Дисперсный анализ среды сложного состава / Д.М. Попов, С.Д. Руднев, А.В. Грачев // Materiały VII Międzynarodowej naukowo-pracycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami – 2011» (07–15 listopada 2011 roku). – Vol. 47. – Rolnictwo: Przemysł: Nauka i studia, 96 s. ISBN 978-966-8736-05-6. S. 56–59.

ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

E.S. Nechaeva, D.M. Popov

**INVESTIGATION OF DUST DISPERSE STRUCTURE AND DISPERSED LIQUID COLUMN
IN ROTARY SPRAY-TYPE DUST COLLECTOR**

The prospects of using the rotary spray-type dust collector for fine purification of drying gases from foodstuff dust are shown. The results of the research on the lactose disperse structure and on different liquids on the contact element of the dust collector are presented.

Rotary spray-type dust collector, the method of wet dust collection, disperse structure.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia.

Phone/fax: +7(3842) 73-40-40

e-mail: office@kemtipp.ru

