

лических сопротивлений сухого аппарата и динамического двухфазного слоя подвижной пены. Это объясняется недостаточной степенью инжекции, а также тем, что вдоль поверхности жидкости (направляющей плоскости) происходит плавное изменение направления движения газового потока.

Общее гидравлическое сопротивление мокрого КДПА в режиме скоростей газового потока в рабочем объеме контактной камеры 7–10 м/с находится в пределах 780–850 Па, т.е. значительно меньше, чем циклонно-пенных аппаратов в том же режиме (1200–1600 Па), при эффективности пылеулавливания, равной 99,9 %.

Исследования показывают, что предлагаемая схема комбинированного двухступенчатого инерционно-пенного аппарата позволяет соединить в одном устройстве принципы и достоинства двухступенчатой пылегазоочистки при значительном снижении энергетических затрат и упрощении конструкции установки.

Список литературы

1. Дьяченко В.Н. Исследование аппарата мокрого пылеулавливания с комбинированной схемой очистки // Охрана воздушного бассейна Волгоград. обл.: Тез. докл. 2 научно-техн. конф. Волгоград, 1983.
2. Дьяченко В.Н. Очистка выбросов производства асфальтобетона // Охрана окружающей среды. Мн., 1982. З. А.с. 637134 (СССР). Пылеуловитель / В.Г. Диденко.
4. Богатых С.А. Циклонно-пенные аппараты. Л., 1978.
5. Кафаров В.В. Основы массопередачи. М., 1972.
6. Кутаталадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. М., 1976.
7. Мухленов И.П., Тарат Э.Я. Пенный режим и пенные аппараты. Л., 1977.

УДК 66.045:631.9:533.6

Н.Д.БАЙЛУК, М.И.КУРПАН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВОЗДУХА ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ ЗЕРНА В ПЛОТНОМ СЛОЕ

Одним из направлений интенсификации процесса конвективной сушки зерна в плотном слое является увеличение скорости нагретого воздуха, т.е. сушильного агента [1, 2].

В данной работе решается задача определения оптимальной скорости воздуха, обеспечивающей расчетную скорость сушки зерна с минимальными энергозатратами. Для этой цели используется дифференциальное уравнение теплообмена

$$m_3 c_3 dt_3 = -aS (t_a - t_3) d\tau, \quad (1)$$

где m_3 — масса зерна, кг; c_3 — удельная теплоемкость зерна, Дж/(кг·°С); dt_3 — изменение температуры зерна за время $d\tau$, °С; a — коэффициент теплообмена, Вт/(м²·°С); S — площадь поверхности теплообмена, м²; t_a — температура сушильного агента, °С; t_3 — температура зерна, °С.

Решение этого уравнения сводится к определению a с помощью критерия Нуссельта по критериальной зависимости

$$Nu = f(Re \cdot Pr).$$

Анализ результатов различных исследований показывает, что наиболее подходящей для слоя с частицами нерегулярной формы является критериальная зависимость [3]

$$Nu = 0,395 Re^{0,64} Pr^{1/3}$$

для потоков, характеризуемых числом Рейнольдса в диапазоне $Re = 30-5 \cdot 10^5$.

Так как зерно, подаваемое на сушку, имеет определенную температуру и не должно нагреваться выше рекомендуемой температуры для обеспечения соответствующей его влажности (что в свою очередь определяет температуру сушильного агента), основным регулируемым параметром процесса сушки является скорость обтекания зерна воздухом. Из этого положения вытекает, что определяющими в расчетных формулах должны быть приведенный диаметр частицы (зерновки) и эквивалентный диаметр канальца, в котором воздух соприкасается с этой частицей. Приведенный диаметр частицы определяется как диаметр шара, объем которого равен объему отдельного зерна

$$V_{1з} = \frac{4}{3} \pi A_1 B_1 C_1,$$

где A_1 , B_1 , C_1 — половина соответственно длины, ширины и толщины зерновки.

Из формулы объема шара можно найти диаметр частицы, который в данном случае является приведенным: $d_{пр} = (6V_{1з}/\pi)^{1/3}$. Эквивалентный диаметр канальца или поры межзернового пространства в общем случае определяется как отношение учетверенной площади поперечного сечения этого канальца к длине его смоченного периметра. Для инженерных расчетов с достаточной степенью точности эквивалентный диаметр частицы можно найти по известному объему подаваемого на сушку зерна и его массе в зависимости от начальной влажности: $d_{зк} = 1,645 V_3 / m_3$.

Для определения площади поверхности теплообмена представим отдельное зерно как эллипсоид вращения с большой осью вращения, равной длине зерновки, и с малой осью вращения, равной среднему арифметическому ширины и толщины зерновки.

Площадь поверхности единичного зерна (площадь поверхности эллипсоида вращения)

$$f_{1з} = 2\pi B_1^2 + 2\pi \frac{A_1 + B_1}{\epsilon} \operatorname{arcsine} \epsilon,$$

где A_1 — большая полуось вращения, равная $A/2$; B_1 — малая полуось вращения, равная $(B + C)/4$; A , B , C — соответственно длина, ширина, толщина отдельного зерна; $\epsilon = (1 - (B + C)^2 / (4A^2))^{1/2}$.

После соответствующих преобразований получим

$$f_{1з} = \frac{\pi (B + C)^2}{8} + \frac{\pi A (B + C)}{4\epsilon} \operatorname{arcsine} \epsilon.$$

Площадь поверхности зерен массой 1 кг

$$f_1 = 10^6 f_{13} / m_{13},$$

где m_{13} — масса 1000 зерен, г.

Общая площадь поверхности теплообмена зерна массой m_3 , подлежащего сушке, $S = f_1 m_3$. С учетом коэффициента соприкосновения поверхностей зерен $k = 0,75$ $S = f_1 m_3 k$. Итак,

$$ad_{\text{пр}}/\lambda = 0,395 \text{Re}^{0,64} \text{Pr}^{1/3};$$

$$a = 0,395 \lambda \nu^{0,64} d_{\text{ЭК}}^{0,64} \text{Pr}^{1/3} / (\nu^{0,64} d_{\text{пр}}).$$

Подставляя полученные значения величин в формулу (1), получаем

$$m_3 c_3 dt_3 = - \frac{0,395 \lambda \nu^{0,64} d_{\text{ЭК}}^{0,64} \text{Pr}^{1/3}}{\nu^{0,64} d_{\text{пр}}} S (t_a - t_3) d\tau.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\frac{0,395 \lambda \nu^{0,64} d_{\text{ЭК}}^{0,64} \text{Pr}^{1/3} S \tau}{\nu^{0,64} d_{\text{пр}} c_3 m_3} = -\ln(t_a - t_3) + c;$$

в начальный момент времени (при $\tau = 0$) $c = \ln(t_a^H - t_3^H)$ и

$$\frac{0,395 \lambda \nu^{0,64} d_{\text{ЭК}}^{0,64} \text{Pr}^{1/3} S \tau}{\nu^{0,64} d_{\text{пр}} c_3 m_3} = \ln \frac{t_a^H - t_3^H}{t_a^K - t_3^K}. \quad (2)$$

Зная начальную температуру агента, принимая температуру зерна до сушки $t_3^H = 20$ °С (для условий Белоруссии) и предельно допустимую после сушки $t_3^K = 60$ °С, можно определить температуру сушильного агента в любой момент времени при различных скоростях его движения.

Выражение (2) можно упростить подстановкой в него известных или принимаемых числовых значений входящих в него величин. Рассмотрим конкретный пример. Рожь влажностью 20 % с размерами зерен $A = 7,5$ мм, $B = 2,5$ мм, $C = 2,35$ мм, объемом $4,8$ м³, плотностью 710 кг/м³ требуется высушить до влажности 14 % воздухом, подогретым до 120 °С. Начальная температура зерна 20 °С, температура окружающего воздуха $16,2$ °С, влажность 75 %. Удельная теплоемкость зерна $c_3 = 2,044$ кДж/(кг °С), масса 1000 зерен $m_{13} = 22,5$ г, масса всего зерна $m_3 = 710 \cdot 4,8 = 3408$ кг. Коэффициент теплопроводности воздуха $\lambda = 0,0328$ Вт/(м °С), кинематическая вязкость воздуха $\nu = 25,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Определим оптимальную скорость воздуха в процессе сушки зерна в слое высотой $H = 0,8$ м.

Объем единичного зерна

$$V_{13} = \frac{4}{3} \pi A_1 B_1 C_1 = \frac{4}{3} \pi \frac{A}{2} \frac{B}{2} \frac{C}{2} = 22,96 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Приведенный диаметр зерна

$$d_{\text{пр}} = (6V_{13}/\pi)^{1/3} = (6 \cdot 22,96 \cdot 10^{-9} / 3,14)^{1/3} = 3,527 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Эквивалентный диаметр пор межзернового пространства, по которым движется воздух:

$$d_{\text{эк}} = 1,645 V_3 / m_3 = 1,645 \cdot 4,8 / 3408 = 2,37 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Для отдельного зерна

$$\epsilon = (1 - (B + C)^2 / (4A^2))^{1/2} = (1 - (2,5 + 2,35)^2 / (4 \cdot 7,5^2))^{1/2} = 0,946.$$

Площадь поверхности единичного зерна

$$f_{13} = \frac{\pi(B + C)^2}{8} + \frac{\pi A(B + C)}{4\epsilon} \arcsin \epsilon = 46,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Площадь поверхности частиц зерна массой 1 кг

$$f_1 = 10^6 f_{13} / m_{13} = 10^6 \cdot 46,65 \cdot 10^{-6} / 22,5 = 2,073 \text{ м}^2.$$

Общая площадь поверхности теплообмена

$$S = 2,073 \cdot 3408 \cdot 0,75 = 5298,6 \text{ м}^2.$$

Находим соотношение между скоростью воздуха, его конечной температурой и временем, за которое воздух достигает этой температуры:

$$\tau = \frac{c_3 m_3 \nu^{0,64} d_{\text{пр}}}{0,395 \lambda d_{\text{эк}}^{0,64} Pr^{1/3} Sv^{0,64}} \ln \frac{t_a^H - t_3^H}{t_a^K - t_3^K} =$$

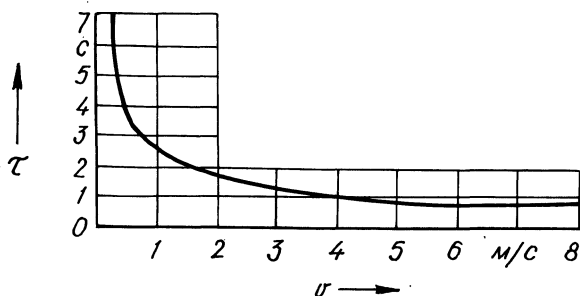


Рис. 1. Продолжительность сушки зерна в зависимости от скорости движения воздуха

$$= \frac{0,5674 \cdot 3408 (25,6 \cdot 10^{-6})^{0,64} 3,527 \cdot 10^{-3}}{0,395 \cdot 0,0328 (2,37 \cdot 10^{-3})^{0,64} 0,7^{1/3} 5298,6 v^{0,64}} \ln \frac{120-20}{80-60} =$$

$$= \frac{2,465}{v^{0,64}}$$

В зависимости от скорости движения воздуха v определяем τ . Из графика на рис. 1 видно, что наиболее приемлемы значения v в пределах 2—4 м/с.

Скорость воздуха, получаемая как частное от деления общей подачи воздуха в насыпь зерна на площадь, занимаемую насыпью, должна быть в пределах 0,8—1,6 м/с, что с учетом порозности слоя обеспечит скорость обтекания зерна воздухом в пределах 2—4 м/с. С учетом же квадратичной зависимости аэродинамического сопротивления слоя от скорости движения воздуха указанные значения последней будут оптимальными также с точки зрения энергозатрат на их обеспечение.

Список литературы

1. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М., 1985.
2. Мельник Б.Е. Активное вентилирование зерна. М., 1986.
3. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л., 1979.

УДК 621.547

Б.М.ХРУСТАЛЕВ, А.И.МОЖАР

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ СИСТЕМ ПНЕВМОТРАНСПОРТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

Одной из основных задач во многих отраслях народного хозяйства является дальнейшее развитие пневмотранспорта различных материалов (зерна, торфа, опилок, полимеров и др.).

Так как эффективность использования энергии несущей среды зависит от формы поперечного сечения трубопровода [1], разработка и исследование новых форм поперечных сечений трубопроводов является актуальной задачей. Ниже рассматривается одна из основных характеристик движения однородной среды по трубопроводам — распределение скоростей в сечении типа "сегмент".

Турбулентное течение однородной среды в трубопроводах наиболее часто наблюдается на практике. Изучению законов турбулентного движения жидкости или газа посвящены многочисленные исследования [1—6]. В то же время механизм турбулентности потока и его математическое описание до сих пор представляет собой нерешенную задачу. Анализ соответствующих скоростных полей и концентраций основан на эмпирических гипотезах, связывающих силы кажущейся вязкости жидкости при турбулентном перемешивании с осредненными во времени скоростями.

Согласно гипотезе Буссинеска [5], турбулентное кажущееся касатель-