

УДК 622.734.001.57

И.В. Тарабаева (ст. преподаватель),
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

АППРОКСИМАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Обоснованы методы приблизительного расчета параметров технологии сушки для модернизации процесса проектирования сушильного оборудования. Рассмотрена разработка аппроксимированных зависимостей для расчета основных параметров процесса сушки. Предложенные выкладки являются первой попыткой алгоритмизации процесса проектирования технологических схем обезвоживания влажной мелкофракционной угольной массы в «кипящем слое».

Ключевые слова: процесс, параметр, проектирование, технология, алгоритмизация.

Актуальность работы. Влажность – один из важнейших показателей качества угольного концентрата и ряда других сыпучих материалов. Использование углей повышенной влажности снижает эффективность работы тепловых станций и коксохимических заводов, а повышенная влажность транспортируемого сыпучего материала приводит к увеличению объемов перевозок балласта в виде избыточной воды и в зимнее время создает дополнительные трудности потребителям при разгрузке смерзшейся массы. В этой связи совершенствование технологии сушки влажных сыпучих материалов является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы – обоснование методов приближенного расчета параметров технологии сушки для модернизации процесса проектирования сушильного оборудования.

Основное содержание работы. Термическая сушка осуществляется при организованной подаче тепла и отводе агента сушки в специальных установках – сушилках, тип которых определяется в зависимости от свойств обезвоживаемого материала, вида используемого теплоносителя, способа отвода испаряющейся влаги и других технологических факторов. В качестве аппаратов термического обезвоживания используются сушилки различных конструкций: газовые барабанные, трубы-сушилки, «кипящего слоя» и др.

Одним из наиболее перспективных с точки зрения качества конечного продукта является метод «кипящего слоя». Сушилки «кипящего слоя» просты как в конструктивном исполнении, так и в эксплуатации, легко поддаются автоматизации. Корпус сушилок «кипящего слоя» неподвижен, что значительно упрощает требования к монтажу и эксплуатации. Удельный влагосъем на сушилках «кипящего слоя» в отдельных случаях достигает 1000 кг влаги с 1 м² площади газораспределительной решетки. Сушилки «кипящего слоя» нашли применение для сушки влажного сыпучего материала крупностью до 13 мм с влажностью до 20%.

Сущность способа заключается в продувке газа через слой материала, находящегося на газораспределительной решетке, с такой скоростью, при которой устойчивость слоя нарушается, высота его постепенно увеличивается, и частицы приходят в беспорядочное движение, а слой материала приобретает вид «кипящей воды». Горячие газы, проходя через отверстия в газораспределительной решетке с высокой скоростью, создают хороший контакт между горячим агентом и влажным материалом, последний «течет» по решетке от точки питания к разгрузочному устройству сушилки.

Как правило, параметры сушилок «кипящего слоя» определяются для сушки конкретного материала (в частности, мелкофракционных углей) и учитывают начальную и конечную влажность материала, его физико-механические свойства, требования к температурному режиму, минимизации или максимизации уноса пылевидных частиц и другие требования [1].

Проектирование технологических схем обезвоживания по методу «кипящего слоя» должно включать выбор формы аппарата, конструктивных материалов, установление физических и теплофизических свойств псевдоожижающего агента, определение вспомогательного оборудования и параметров процесса при максимально возможном учете всех влияющих факторов [2].

В данной статье рассматривается разработка аппроксимированных зависимостей для расчета основных параметров процесса сушки и их применение при проектировании сушильных аппаратов.

Введем обозначения:

P – давление, Па (кг/(м·с²)), μ – коэффициент вязкости среды ($\mu_{жс}$ – вязкость псевдоожижающего агента), Па·с (кг·с/м²); ρ – плотность текущего вещества (ρ_m – плотность твердой фазы, $\rho_{жс}$ – плотность псевдоожижающего агента), кг/м³; $\vec{w} = \vec{i}w_x + \vec{j}w_y$ – вектор скорости

частиц в рабочем объеме (w_x – продольная компонента скорости, w_y – поперечная компонента), м/с; ω – скорость поступающего газа, м/с; T – температура вещества (T_z – температура поступающего газа, T_s – температура внешнего слоя), $^{\circ}\text{C}$; C – концентрация вещества в рабочем объеме, %; d_T – размер частиц твердого материала, м; k – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·град); α – коэффициент теплообмена, Вт/(м·град); c – удельная теплоемкость среды, Дж/(кг·град); D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; l , b , h – размеры рабочего объема (длина, ширина, высота), м; M – производительность аппарата, кг/с; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; φ_v , $\varphi_{вн}$ – соответственно коэффициенты внутреннего и внешнего трения;

β – угол наклона решетки к горизонту, град.[3].

1. Расчет поля температур в рабочем объеме аппарата.

1.1 Общие требования.

Сушильный агент, поступающий в камеру, передает взвешенным частицам достаточно тепла для испарения требуемого количества влаги. В случае снижения температуры сушильного агента влажность его увеличивается и водяной пар конденсируется. При этом «кипящий слой» оседает и возникает опасность возгорания частиц.

Поэтому температуру сушильного агента над «кипящим слоем» материала следует поддерживать минимальной в соответствии с расходом, крупностью и влажностью массы, поступающей в камеру.

1.2. Теоретические предпосылки.

Распределение температуры в поперечном сечении аппарата описывается уравнением:

$$\omega \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \alpha (T - T_s)$$

$$\text{при } 0 < x < l \quad \left. \frac{\partial T(x,y)}{\partial y} \right|_{y=h} = 0$$

$$\text{при } 0 \leq y \leq h \quad \left. \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} \right|_{x=l} = 0 \quad (1)$$

$$\text{при } (x,y) \in \Gamma_k \quad \frac{\partial T(x,y)}{\partial y} = 0$$

$$\text{при } (x,y) \in D_k \quad T(x,y) = T_s$$

здесь Γ_k – точки непроницаемой границы, D_k – отверстия решетки.

1.3. Расчетные соотношения.

После упрощений получены формулы для инженерного расчета температуры в текущих точках $T(s)$:

$$T(s) = \frac{\overline{\omega c \rho}}{\overline{k}} \exp[(\omega c \rho - \alpha) \cdot s] \quad (2)$$

здесь:

$\overline{\omega}, \overline{c}, \overline{\rho}, \overline{k}$ – заданные «характерные» (как правило, максимальные) значения соответствующих величин;

ω, c, ρ, α – текущие значения соответствующих параметров, выбираемые при проектировании;

s – линейная координата точки.

Для контроля температуры измерительные термопары размещаются на входе в аппарат, газододах, сушильной камере и перед ней, на выходе из топки. Этим определяются координаты контрольных точек $s(x, y)$.

2. Расчет поля скоростей частиц обезвоживаемого материала.

2.1. Общие требования.

Скорость перемешивания частиц обезвоживаемого материала во многом определяет качество конечного продукта. Для нормальной эксплуатации сушилки «кипящего слоя» важнейшее значение имеет правильное соотношение между напорной характеристикой вентилятора и конструкцией газораспределительной решетки в сушильной камере, чтобы обеспечивалось равномерное распределение массы по всему сечению и материал не зависал и не осаждался на горячую решетку.

2.2. Теоретические предпосылки.

Компоненты скорости связаны нелинейным уравнением:

$$\begin{cases} w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} = -\frac{dP}{dx} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} \\ \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

В исходной постановке уравнения дополняются краевыми условиями, и задача решается численно методом конечных разностей [3].

2.3. Расчетные соотношения.

В результате упрощений задача сводится к решению обыкновенных и дифференциальных уравнений, после чего получаются формулы для инженерного расчета:

$$w_x = \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2} \cdot \sin(f \cdot x), \quad x \in (0; l) \quad (4)$$

где f – плотность газораспределительной решетки;

ω_1, ω_2 – скорость соответственно в начальной ($x = 0$) и конечной ($x = l$) точках;

$$w_y = \begin{cases} -\omega_1(y - 0,1b)^2 + \omega_2, & y \in (0; y_H) \\ \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}, & x \in (y_H, y_K) \\ -\omega_1(y - 0,9b)^2 + \omega_2, & x \in (y_K; b) \end{cases} \quad (5)$$

3. Расчет поля концентрации материала в рабочем объеме аппарата.

3.1. Общие требования.

При поступлении влажной массы в рабочий объем аппарата распределение ее по пространству является крайне неравномерным в принципе. По мере развития процесса и образования «кипящего слоя» распределение материала устанавливается в соответствии с параметрами решетки и динамическими характеристиками оборудования, при этом минимальная концентрация образуется на «гребне» волны, а минимальная – на «впадине».

3.2. Теоретические предпосылки.

Распределение концентрации представляет собой функцию $C(x, y, t)$, на вид которой существенно влияет частота отверстий в газораспределительной решетке. Эта функция является решением конвективного уравнения диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - w_x \frac{\partial C}{\partial x} - w_y \frac{\partial C}{\partial y}. \quad (6)$$

Начальные и граничные условия формируются на основе геометрических характеристик, полученная краевая задача решается ме-

тодом редукции к системе задач Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений.

3.3. Расчетные зависимости.

В результате упрощений получаются следующие формулы для инженерного расчета:

$$C(x, y, t) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{l}{h} \cos \left(t - \frac{\omega_i}{w_x} x \right) + \frac{b}{h} \sin \left(t - \frac{\omega_i}{w_y} y \right) \right], \quad (7)$$

где n – число отверстий вдоль оси газораспределительной решетки;
 ω_i – скорость в точке x_i , соответствующей отверстию в газораспределительной решетке.

4. Критериальная модель расчета скорости слоя обезвоживаемого материала.

4.1. Общие требования.

Для оперативных инженерных расчетов удобно иметь соотношения, «напрямую» выражающие выходные параметры через технологические данные. Одним из методов получения таких соотношений является критериальный подход.

4.2. Теоретические предпосылки.

Будем рассматривать скорость слоя w_T как функцию:

$$w_T = q \cdot \mu^n b^m \rho_T^x \rho_{Ж}^y d_T^z \mu_{Ж}^\alpha w_{Ж}^h g^\lambda \Phi_b^\gamma \Phi_{вн}^\delta \varepsilon_0^r, \quad (8)$$

где q – коэффициент пропорциональности.

Согласно π -теореме:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{bw_T}{\mu}; \quad \pi_2 = \frac{b\rho_T \mu}{M}; \quad \pi_3 = \frac{b\rho_{Ж} \mu}{M}; \\ \pi_4 &= \frac{dT}{b}; \quad \pi_5 = \frac{bw_{Ж}}{\mu}; \quad \pi_6 = \frac{b^3 g}{\mu^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

4.3 Расчетные соотношения.

Методом компьютерного подбора по опытным данным получено:

$$w_T = \left(\frac{b\rho_T \mu}{M} \right)^{3,1} \left(\frac{b\rho_{Ж} \mu}{M} \right)^{2,1} \left(\frac{dT}{b} \right)^{4,1} \left(\frac{bw_{Ж}}{\mu} \right)^{2,4} \left(\frac{b^3 g}{\mu^2} \right)^{0,4} \Phi_b^{2,5} \Phi_{вн}^{0,3} \beta^{0,2}. \quad (10)$$

Формула зручна для оперативного розрахунку швидкості шару висушуваного матеріалу при заданих технологічних характеристиках.

Висновки і напрямки подальших досліджень. Предложенные выкладки являются первой попыткой алгоритмизации процесса проектирования технологических схем обезвоживания влажной мелкофракционной угольной массы в «кипящем слое». Ввиду сложности физических процессов, происходящих при сушке, их описание основывается на нелинейных уравнениях математической физики, которые не решаются аналитически.

Дальнейшей перспективой развития теоретических основ процесса сушки в «кипящем слое» является создание компьютерной системы автоматизированного проектирования, основанной на комплексной математической модели, представляющей полный набор уравнений термодинамических и физико-механических процессов.

Список литературы

1. Филиппов В.А. Конструкции, расчеты и эксплуатация устройств и оборудования для сушки минерального сырья / В.А.Филиппов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: «НЕДРА», 1989. – 309 с.
2. Павлыш В.Н. Расчет параметров машин, осуществляющих сушку в «кипящем слое» / В.Н.Павлыш, И.В.Тарабаева // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – 2005. – Вып. 30. – С.176-181.
3. Регламентные требования к проектированию и расчету параметров технологии обезвоживания мелкофракционной угольной массы с использованием «кипящего слоя» / В.Н.Павлыш, И.В.Тарабаева, В.И.Зензеров // Нормативный документ. Министерство угольной промышленности Украины. Государственное предприятие «Дзержинскуголь». – Донецк: ДонНТУ, 2010. – 12 с.

Стаття надійшла до редакції 20.04.2013

І.В. Тарабаєва. ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Апроксимації розрахункових залежностей при проектуванні технології сушіння сипучих матеріалів

Обґрунтовано методи приблизного розрахунку параметрів технології сушіння для модернізації процесу проектування сушильного обладнання. Розглянута розробка апроксимованих залежностей для розрахунку основних параметрів процесу сушіння. Запропоновані викладки є першою спробою алгоритмізації процесу проектування технологічної схеми зневоднення вологої дрібнофракційної вугільної маси в «киплячому шарі».

Ключові слова: процес, параметр, проектування, технологія, алгоритмізація.

I. Tarabaeva. Donetsk National Technical University

Approximations of Calculation Dependences When Designing the Technology of Bulk Materials Drying

The problem of modernization of the process of designing the equipment for quick-sand materials drying with the use of approximated calculations is considered. The “boiling layer” method is one of the most promising ways to raise the quality of the final product. Drying equipment, using the “boiling layer” method, is simple both in design and in operation, and is rather easy for automatic control application. In case the temperature of the drying agent decreases its humidity increases and water vapor condenses. For operational engineering calculations it is convenient to obtain relations, which “directly” express the parameters of the project through the technological data. One of the methods of obtaining such relations is the linearization of mathematical physics equations. Besides, useful results can be obtained with the help of the criteria approach.

Keywords: process, design, technology, algorithmization.