

УДК 621.926.4

*Титова Е.В., Кравец В.И., Минакова Н.А., Чернецкий Е.В., Гнатко Е.Н.***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ С ОДНОВРЕМЕННОЙ СУШКОЙ МАТЕРИАЛА В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЕ**

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр, Украина

В данной работе рассмотрена актуальная задача получения математического описания процесса измельчения материала в центробежной мельнице с одновременной сушкой материала. Исследование процесса сушки с одновременным измельчением показали не только его универсальность при обработке самых разнообразных материалов, но и практически мгновенное удаление большей части влаги. При этом сушка интенсифицируется вследствие не только быстрого развития поверхности контакта, но и активного перемешивания воздуха и материала, а также в результате более быстрого испарения влаги со свежесформированных поверхностей. Измельчение материалов в центробежных мельницах, особенно тонкого помола, сопровождается значительным тепловыделением, что позволяет осуществлять сушку материала одновременно с измельчением. Образование теплоты в рабочих зонах данного типа измельчителей обусловлено следующими факторами: трением воздуха и материала о рабочие элементы, турбулизации пылегазовой смеси, возникновением новых поверхностей при разрушении, многократным сжатием пылегазовой смеси и т.д. Снижение влажности измельченного продукта является необходимым условием для дальнейшего использования в производстве, для чего используют дополнительное сушильное оборудование. С другой стороны, чрезмерное повышение температуры при измельчении для многих материалов нежелательно, так как может привести к ухудшению качества продукта, а также, приводит к созданию взрывоопасной обстановки. Полученная математическая модель позволяет прогнозировать работу измельчителя и определять значения входных величин для получения качественного измельченного продукта с необходимой конечной влажностью. В статье представлен тепловой баланс центробежной мельницы. Приведены математические зависимости для расчета удельного расхода теплоты и температуры пылегазовой смеси на выходе из центробежной мельницы. Получены экспериментальные зависимости по влиянию технологических параметров на температуру пылегазовой смеси, подтверждающие результаты теоретических исследований.

Ключевые слова: моделирование процесса измельчения, теплота измельчения, температура пылегазовой смеси, центробежная мельница, уравнение регрессии.

DOI: 10.32434/2521-6406-2019-5-1-70-74

Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций

Метод сушки влажных материалов с одновременным измельчением характеризуется высокой интенсивностью процесса, широким диапазоном свойств обрабатываемых материалов, хорошими технико-экономическими показателями. При сушке с одновременным измельчением происходит интенсификация внутреннего

и внешнего теплообмена, причем в этом случае отсутствуют ограничения, присущие большинству сушилок взвешенного слоя, и могут перерабатываться крупнокусковые, комкующиеся и слипающиеся материалы.

Исследование процесса сушки с одновременным измельчением показали не только его универсальность при обработке самых разнообразных материалов, но и практически мгновен-

ное удаление большей части влаги [1]. При этом сушка интенсифицируется вследствие не только быстрого развития поверхности контакта, но и активного перемешивания воздуха и материала, а также, вероятно, в результате более быстрого испарения влаги со свежесформированных поверхностей. Сравнение различных типов сушилок показало, что сушилки с одновременным измельчением материала имеют преимущества по допустимым температурам газа, времени пребывания, степени перемешивания, занимаемым габаритам.

Измельчение материалов в центробежных мельницах, особенно тонкого помола, сопровождается значительным тепловыделением, что позволяет осуществлять сушку материала одновременно с измельчением [2]. Образование теплоты в рабочих зонах данного типа измельчителей обусловлено следующими факторами: трением воздуха и материала о рабочие элементы, турбулизации пылегазовой смеси, возникновением новых поверхностей при разрушении, многократным сжатием пылегазовой смеси и т.д. Для большого количества материалов снижение влажности является необходимым условием для дальнейшего использования в производстве, для чего используют дополнительное сушильное оборудование. С другой стороны, чрезмерное повышение температуры при измельчении для многих материалов нежелательно, так как в некоторых случаях это приводит к ухудшению качества продукта, а также, приводит к созданию взрывоопасной обстановки.

Таким образом, актуальной проблемой является нахождение математических зависимостей, позволяющих прогнозировать работу измельчителя и определять оптимальные значения входных величин для получения качественного измельченного продукта с необходимой конечной влажностью.

Формулировка целей статьи

Задачей исследования является установление математической зависимости между входными и выходными технологическими параметрами процесса измельчения, что позволит расчетным путем определять оптимальные значения параметров в центробежной мельнице.

Изложение основного материала исследования

Выполним параметрический анализ центробежной мельницы на основании теплового баланса процесса измельчения.

В мельницу поступает G_0 (кг/с) исходного материала, имеющего температуру Θ_0 (°C) и начальную влажность ω_0 (%), из которого испаря-

ется W (кг/с) влаги. В измельчитель поступает L_0 (кг/с) влажного воздуха с температурой t_0 (°C) и относительной влажностью воздуха ϕ_0 , содержащего L (кг/с) абсолютно сухого воздуха. Энтальпия воздуха на входе в мельницу – I_0 (Дж/кг). Из мельницы удаляется G_2 (кг/с) высушенного материала с температурой ω_2 (°C) и конечной влажностью Θ_2 (%). Воздух, выходящий из мельницы, имеет энтальпию I_2 (Дж/кг) и температуру t_2 (°C).

Получение математической зависимости температуры пылегазовой смеси на выходе измельчителя t_2 от изменения входных параметров выполним аналитическим способом [3].

Общий тепловой баланс процесса выражается зависимостью [4]:

$$\Sigma Q_H = \Sigma Q_K, \tag{1}$$

где ΣQ_H – приход тепла, Вт; ΣQ_K – расход тепла, Вт.

Схема тепловых потоков в мельнице представлена на рис. 1.

Составим уравнение теплового баланса:

$$LI_0 + G_0 C_{вл.м} \Theta_0 + Q_d = LI_2 + G_2 C_m \Theta_2 + Q_n, \tag{2}$$

где $C_{вл.м}$ – теплоемкость влажного материала, Дж/(кг·K); Q_d – теплота, возникающая в рабочей зоне мельницы при измельчении (теплота измельчения), Вт; C_m – теплоемкость высушенного материала, Дж/(кг·K); Q_n – потери теплоты в окружающую среду, Вт.

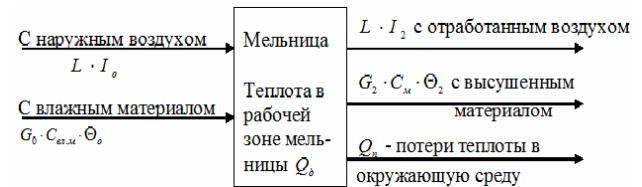


Рис. 1. Схема тепловых потоков в центробежной мельнице

Приход теплоты с влажным материалом представим как сумму двух составляющих: теплоты, приходящей с высушенным материалом, и теплоты, приходящей с удаляемой влагой:

$$G_0 C_{вл.м} \Theta_0 = G_2 C_m \Theta_0 + W C_{вл.м} \Theta_0. \tag{3}$$

Подставив уравнение (3) в формулу (2), получим:

$$LI_0 + G_2 C_m \Theta_0 + W C_{вл.м} \Theta_0 + Q_d = LI_2 + G_2 C_m \Theta_2 + Q_n. \tag{4}$$

Из уравнения (4) выразим расход теплоты

измельчения Q_d :

$$Q_d = L(I_2 - I_0) + G_2 C_m (\Theta_2 - \Theta_0) - W C_{вл.} \Theta_0 + Q_n. \quad (5)$$

Расход абсолютно сухого воздуха определим через расход влажного воздуха:

$$L = L_0 (1 - X_0), \quad (6)$$

где X_0 – начальное влагосодержание воздуха, (кг вл./кг сух.мат.).

Расход высушенного материала выразим через расход влажного материала [5]:

$$G_2 = G_0 \frac{(100 - \omega_0)}{(100 - \omega_2)}. \quad (7)$$

Расход удаленной влаги определим по уравнению:

$$W = G_0 \frac{(\omega_0 - \omega_2)}{(100 - \omega_2)}. \quad (8)$$

Конечное влагосодержание воздуха представим в виде:

$$X_2 = X_0 + X_d, \quad (9)$$

где X_d – дополнительное влагосодержание, которое возникает в результате перехода испаренной влаги в воздух, (кг вл./кг сух.мат.).

Дополнительное влагосодержание определим как отношение расхода удаленной влаги к расходу абсолютно сухого воздуха:

$$\begin{aligned} X_d &= \frac{W}{L} = \frac{W}{L_0 (1 - X_0)} = \\ &= \frac{G_0 (\omega_0 - \omega_2)}{(100 - \omega_2) L_0 (1 - X_0)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Начальную энтальпию воздуха определим по уравнению:

$$I_0 = C_{с.в.} t_0 + i_{п.0} X_0, \quad (11)$$

где $C_{с.в.}$ – теплоемкость сухого воздуха, Дж/(кг·К); $i_{п.0}$ – начальная энтальпия пара, Дж/кг.

Конечную энтальпию воздуха определим по уравнению:

$$I_2 = C_{с.в.} t_2 + i_{п.2} X_2, \quad (12)$$

где $i_{п.2}$ – конечная энтальпия пара, Дж/кг.

Потери теплоты представляют собой сложную теплоотдачу от поверхности измельчителя в окружающую среду [6]:

$$Q_n = \alpha F \Delta t, \quad (13)$$

где α – суммарный коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией, Вт/(м²·К); F – площадь поверхности мельницы, м²; Δt – разность температур между поверхностью мельницы и окружающей средой, °С.

Суммарный коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией определим по уравнению [5]:

$$\alpha = 9,74 + 0,07 \Delta t. \quad (14)$$

Подставив уравнения (6)–(14) в уравнение (5), получим:

$$\begin{aligned} Q_d &= L_0 (1 - X_0) \times \\ &\times \left[\left(C_{с.в.} t_2 + i_{п.2} \times \right. \right. \\ &\times \left. \left. \left(X_0 + \frac{G_0 (\omega_0 - \omega_2)}{(100 - \omega_2) L_0 (1 - X_0)} \right) \right) - \right. \\ &\left. - (C_{с.в.} t_0 + i_{п.0} X_0) \right] + \\ &+ G_0 \frac{100 - \omega_0}{100 - \omega_2} C_m (t_2 - t_0) - \\ &- G_0 \frac{(\omega_0 - \omega_2)}{100 - \omega_2} C_{вл.} t_0 + Q_n. \end{aligned} \quad (15)$$

После преобразований получим:

$$\begin{aligned} Q_d &= L_0 (1 - X_0) \left[C_{с.в.} (t_2 - t_0) + \right. \\ &\left. + X_0 (i_{п.2} - i_{п.0}) \right] + \\ &+ \frac{G}{100 - \omega_2} \left[(\omega_0 - \omega_2) (i_{п.2} - C_{с.в.} t_0) + \right. \\ &\left. + (100 - \omega_0) C_m (t_2 - t_0) \right] + Q_n. \end{aligned} \quad (16)$$

Разделив обе части уравнения (16) на массовый расход пылегазовой смеси $M_{см}$ получим удельный расход теплоты измельчения, то есть теплоту измельчения, приходящуюся на 1 кг пылегазовой смеси:

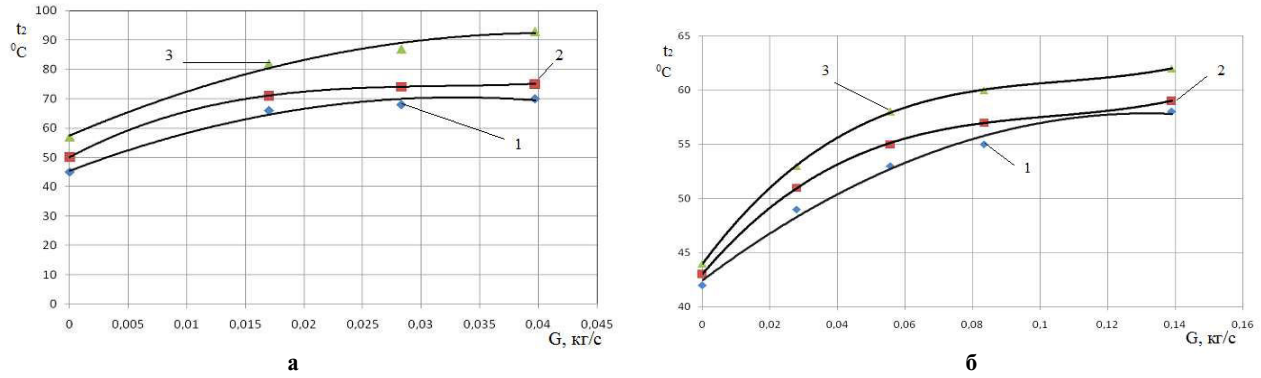


Рис. 2. Зависимость температуры пылегазовой смеси на выходе из мельницы от расхода материала и расхода воздуха при измельчении: а) мрамора: — экспериментальные данные при расходе воздуха: 1 — 0,034 кг/с, 2 — 0,030 кг/с, 3 — 0,024 кг/с; — — данные, рассчитанные по зависимости (18); б) красного железо-окисного пигмента: — экспериментальные данные при расходе воздуха: 1 — 0,115 кг/с, 2 — 0,108 кг/с, 3 — 0,09 кг/с; — — данные, рассчитанные по зависимости (18)

$$q = \frac{Q_d}{M_{cm}} = \frac{L_0(1-X_0)[C_{c.v.}(t_2 - t_0) + X_0(i_{n,2} - i_{n,0})]}{M_{cm}} + \frac{G_0}{100 - \omega_2} \left[\frac{(\omega_0 - \omega_2)(i_{n,2} - C_{c.v.}t_0) + (100 - \omega_0)C_m(t_2 - t_0)}{M_{cm}} \right] + \frac{Q_n}{M_{cm}} \quad (17)$$

Преобразование формулы (16) позволяет получить зависимость температуры пылегазовой смеси от технологических параметров процесса:

$$t_2 = \frac{Q_d - Q_n + L_0(1 - X_0) \times [C_{c.v.}t_0 - X_0(i_{n,2} - i_{n,0})]}{L_0(1 - X_0)C_{c.v.} + \frac{G_0(100 - \omega_2)C_m}{100 - \omega_2}} - \frac{\frac{G_0}{100 - \omega_2} \left[(\omega_0 - \omega_2)(i_{n,2} - C_{c.v.}t_0) - (100 - \omega_0)C_m - t_0 \right]}{L_0(1 - X_0)C_{c.v.} + \frac{G_0(100 - \omega_2)C_m}{100 - \omega_2}} \quad (18)$$

Для проверки зависимости (18) на адекватность проведены экспериментальные исследования по влиянию технологических параметров процесса измельчения на температуру пылегазовой смеси на выходе из мельницы.

На рис. 2 представлены графические зависимости температуры пылегазовой смеси от расхода материала при измельчении мрамора и красного железо-окисного пигмента.

Для полученной математической зависимости были рассчитаны показатели адекватности и сделан вывод, что математическая модель является достоверной и может быть использована для такого типа измельчителей.

Выводы

В результате проведенных теоретических исследований, получена математическая зависимость влияния технологических параметров процесса измельчения на температуру пылегазовой смеси на выходе мельницы. Полученная математическая модель позволяет прогнозировать работу измельчителя и определять оптимальные значения входных величин для получения качественного измельченного продукта с необходимой конечной влажностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Процеси та обладнання хімічної технології: підруч. / Я.М. Корнієнко, Ю.Ю. Лукач, І.О. Мікульонюк та ін. — К.: НТУУ «КПІ», 2011. — Ч.2. — 416 с.
2. Utilization of the industrial solid wastes by the fine grinding using centrifugal mill / E. Leshenko, V.I. Kravets, E. Gnatko, A. Omelchenko // The NATO Science for Peace and Security Programme. Environmental and food security and sap by in southeast Europe and Ukraine (Dnipropetrovs'k, Ukraine, May 16-19 2011). — М., 2011. — Р.66.
3. Дубовой В.М. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування: навчальний посібник. — Вінниця: ВНТУ, 2012. — 308 с.
4. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие. — Л.: Химия, 1987. — 576 с.
5. Поперечный А.М. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник для студентів вищих навчальних закладів / За ред. Поперечного А.М. — Київ: ДонДУЕіТ, 2007. — 304 с.

6. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др. Под ред. Ю.И. Дытнерского. – М.: Химия, 1991. – 496 с.

Поступила в редакцию 09.05.2019

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ З ОДНОЧАСНИМ СУШІННЯМ МАТЕРІАЛУ В ВІДЦЕНТРОВОМУ МЛІНІ

Тітова О.В., Кравець В.І., Мінакова Н.О., Чернецький Є.В., Гнатко О.М.

У даній роботі розглянута актуальна задача отримання математичного опису процесу подрібнення матеріалу в відцентровому млині з одночасною сушкою матеріалу. Дослідження процесу сушіння з одночасним подрібненням показали не тільки його універсальність при обробці найрізноманітніших матеріалів, але і практично миттєве видалення більшої частини вологи. При цьому сушіння інтенсифікується внаслідок не тільки швидкого розвитку поверхні контакту, але і активного перемішування повітря і матеріалу, а також в результаті більш швидкого випаровування вологи з свіжостворених поверхонь. Подрібнення матеріалів у відцентрових млинах, особливо тонкого помелу, супроводжується значним виділенням тепла, що дозволяє здійснювати сушіння матеріалу одночасно з подрібненням. Утворення теплоти в робочих зонах даного типу подрібнювачів обумовлено наступними факторами: тертям повітря і матеріалу об робочі елементи, турбулізації пилосазової суміші, виникненням нових поверхонь при руйнуванні, багаторазовим стисненням пилосазової суміші та ін. Зниження вологості подрібненого продукту є необхідною умовою для подальшого використання у виробництві, для чого використовують додаткове сушильне устаткування. З іншого боку, надмірне підвищення температури при подрібненні для багатьох матеріалів небажано, оскільки може привести до погіршення якості продукту, а також, призводить до створення вибухонебезпечної обстановки. Отримана математична модель дозволяє прогнозувати роботу подрібнювача і визначати значення вхідних величин для одержання якісного подрібненого продукту з необхідною кінцевою вологістю. У статті наданий тепловий баланс відцентрового млина. Наведено математичні залежності для розрахунку питомої витрати теплоти і температури пилосазової суміші на виході з відцентрового млина. Отримано експериментальні залежності щодо впливу технологічних параметрів на температуру пилосазової суміші, що підтверджують результати теоретичних досліджень.

Ключові слова: моделювання процесу подрібнення, теплота подрібнення, температура пилосазової суміші, відцентровий млин, рівняння регресії.

MATHEMATICAL MODELING OF THE GRINDING PROCESS WITH SIMULTANEOUS DRYING OF THE MATERIAL IN A CENTRIFUGAL MILL

Titova O.V., Kravets V.I., Minakova N.O., Chernetsky E.V., Gnatko O.M.

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

In this work, the relevant task of obtaining a mathematical description of the process of material grinding in a centrifugal mill with simultaneous drying of the material is considered. The study of

the drying process with simultaneous grinding showed not only its versatility in processing a wide variety of materials, but also almost instantaneous removal of most of the moisture. In this case, drying is intensified due to not only the rapid development of the contact surface, but also the active mixing of air and material, as well as due to the more rapid evaporation of moisture from freshly formed surfaces. The grinding of materials in centrifugal mills, especially fine grinding, is accompanied by a significant heat release, which allows the material to be dried simultaneously with grinding. The formation of heat in the working areas of this type of grinders happens due to following factors: air and material friction on work items, turbulence in the dust-gas mixture, emergence of new surfaces during fracture, repeated compression of the dust-gas mixture, etc. Reducing the moisture content of the crushed product is a prerequisite for further use in production, for which additional drying equipment is used. On the other hand, excessive temperature increase during grinding is undesirable for many materials, as it can lead to deterioration of the product quality, and also leads to the creation of an explosive situation. The obtained mathematical model makes it possible to predict the operation of the shredder and determine the values of input quantities to obtain a high-quality grinded product with a required final humidity. The article presents the heat balance of a centrifugal mill. Mathematical dependences are given for calculating the specific heat consumption and temperature of the dust-gas mixture at the exit from the centrifugal mill. Experimental dependences on the influence of technological parameters on the temperature of the dust-gas mixture, confirming the results of theoretical studies, are obtained.

Keywords: modeling of grinding process, heat of grinding, temperature of the gas-dust mixture, centrifugal mill, regression equation.

REFERENCES

1. Korniyenko Ya.M., Lukach Yu.Yu., Mikul'onok I.O. ta in. Protsesy ta obladnannya khimichnoyi tekhnolohiyi [Processes and equipment of chemical technology]: pidruch. Kiev, NTUU «KPI», 2011. CH.2. 416 p. (in Ukrainian).
2. Leshenko E., Kravets V.I., Gnatko E., Omelchenko A. Utilization of the industrial solid wastes by the fine grinding using centrifugal mill. // The NATO Science for Peace and Security Programme. Environmental and food security and sap by in southeast Europe and Ukraine (Dnipropetrovs'k, Ukraine, May 16-19 2011). Moscow, 2011, pp. 66.
3. Dubovoy V.M. Identifikatsiya ta modelyuvannya tehnologichnih ob'ektiv i sistem keruvannya: navchalnyi posibnik [Identification and modeling of technological objects and control systems: textbook]. Vinnitsa, VNTU, 2012, 308 p. (in Ukrainian).
4. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov himicheskoy tekhnologii [Examples and tasks on the course of processes and devices of chemical technology]. Textbook. 10 th ed., Pererab. and add. Lviv, Chemistry, 1987, 576 p. (in Ukrainian).
5. Protsesy y aparaty kharchovykh vyrobnytstv [Processes and devices of food production]: pidruchnyk dlya studentiv Vyshchyykh Navchal'nykh Zakladiv / Poperechnyy A.M. ta in. Za red. Poperechnoho A.M. DonDUEit. Khyiv: 2007, 304 p. (in Ukrainian).
6. Borysov H.S., Brykiv V.P., Dytnerskiy Yu.I. i in. Osnovni protsesy i aparaty khimichnoyi tekhnolohiyi [Basic processes and apparatuses of chemical technology]: Posibnyk z proektuvannya / Pid red. Yu.I. Dytnerskiy, 2-e yzd., Pererab. i dopoln. Moscow, Khimiya, 1991, 496 p. (in Russian).