

**ИНТЕРВАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЖИГА
ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА
(на примере переработки фосфогипса)**

Т.А. Фролова¹, Д.С. Туляков¹, Д.В. Кутузов², М.И. Шиккульский³

*Кафедры: «Автоматизированное проектирование технологического оборудования», ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (1); frolova@mail.gaps.tstu.ru;
«Управление качеством», ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный университет» (2); «Прикладная информатика в экономике»,
ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет» (3), г. Астрахань*

Представлена членом редколлегии профессором Н.Ц. Гагаповой

Ключевые слова и фразы: вращающаяся печь; интервальные числа; неопределенные параметры; фосфогипс.

Аннотация: Показан процесс утилизации твердых промышленных отходов на примере фосфогипса. Построена математическая модель процесса обжига во вращающейся печи. Раскрыта неопределенность математической модели по средствам интервального анализа.

Переработка отходов деятельности химических заводов является актуальной задачей, так как отвалы занимают большую площадь земель и наносят существенный вред окружающей среде. Например, отходом производства фосфорных удобрений является фосфогипс [1], для которого необходимо отчуждать огромную площадь земель, так как каждый год эти отвалы увеличиваются на миллионы тонн. Перспективным является использование разработанной технологии переработки фосфогипса с целью получения извести и серной кислоты во вращающихся печах [2]. Эти разработки имеют большое значение, так как, с одной стороны, предусматривают утилизацию фосфогипса, а с другой, обеспечивают получение серной кислоты, используемой на предприятии в производстве минеральных удобрений.

Процесс производства извести и серного ангидрида ведется в две стадии, соответственно в двух вращающихся печах. Перед загрузкой материала в первую печь происходит подготовка исходной шихты. Фосфогипс поступает на шнековый смеситель вместе с компонентами исходной смеси (восстановителем и водой). Полученную в смесителе шихту транспортируют, далее гранулируют до размера частиц 1...5 мм, а затем направляют во вращающуюся печь.

Термическую обработку гранулированной шихты осуществляют во вращающейся печи. Для поддержания температурного режима применяется факельное сжигание природного газа [3]. Материал в печи движется противотоком продуктам сгорания. В первой печи происходят подготовительные стадии физико-

химической обработки: сушка материала, химические превращения. Далее материал попадает во вторую вращающуюся печь, где осуществляется завершающая стадия переработки фосфогипса. В этой печи материал движется прямоотокком продуктам сгорания. Отходящий из печи газ, содержащий продукты сгорания и диоксид серы SO_2 , поступает на катализ для дальнейшей переработки в серную кислоту, а известь CaO подается на охлаждение. Далее охлажденный продукт поступает в отделение отгрузки готовой продукции.

Разработана математическая модель процесса обжига во вращающейся печи [4]:

$$\frac{dT_M}{dl} = \frac{\varepsilon_M \sigma_0 (T_\Gamma^4 - T_M^4) \pi d \Delta l - \frac{2\pi(T_M - T_{\text{CT}}) \Delta l}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{D}{d}}}{\theta_M G_M}; \quad (1)$$

$$\frac{dT_\Gamma}{dl} = \frac{-\varepsilon_M \sigma_0 (T_\Gamma^4 - T_M^4) \pi d \Delta l + 2ml G_T \Omega e^{-ml^2}}{\theta_\Gamma G_\Gamma}; \quad (2)$$

$$\frac{2\pi(T_M - T_{\text{CT}}) \Delta l}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{D}{d}} = \varepsilon_{\text{CT}} \sigma_0 (T_{\text{CT}}^4 - T_{\text{CP}}^4) \pi D \Delta l; \quad (3)$$

$$T_M|_{l=0} = T_M^{\text{BX}}; \quad (4)$$

$$T_\Gamma|_{l=0} = T_\Gamma^{\text{BX}}; \quad (5)$$

где T_M , T_Γ , T_{CT} , T_{CP} – температура материала, газа, стенки и среды соответственно, К; l – текущая длина печи, м; ε_{CT} , ε_M – степень черноты футеровки и материала соответственно; d , D – внутренний и внешний диаметры печи соответственно, м; L – общая длина печи, м; σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; λ – коэффициент теплопроводности материала футеровки, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; Ω – тепло, выделяющееся от сгорания 1 кг топлива (удельная теплота сгорания), $\text{Дж}/\text{кг}$; θ_M , θ_Γ – теплоемкость материала и газа соответственно, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; G_M , G_Γ , G_T – расход материала, газа и топлива соответственно, $\text{кг}/\text{с}$; m – эмпирический коэффициент.

В данной математической модели есть неопределенные параметры, численные значения которых изначально неизвестны. Это степень черноты материала ε_M , теплоемкость материала θ_M и длина факела l_Φ .

Чтобы раскрыть данную неопределенность используют несколько подходов. Широко применяют вероятностный подход, в котором неопределенные параметры характеризуются функциями плотности распределения. Математические модели, в состав которых входят такие параметры, имеют названия вероятностных [5]. В этом случае функции распределения строятся на основании накопленных статистических данных о поведении стохастических параметров. Трудность применяемой методики связана с необходимостью проведения большого числа экспериментов на объекте во время хода технологического процесса для определения параметров законов распределения стохастических величин.

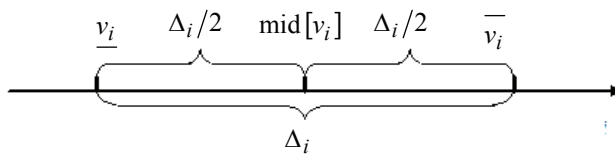


Рис. 1. Изображение интервального параметра $[v_i]$

Другой подход связан с использованием теории нечетких множеств [6] и уходит в сферу субъективной информации. Неопределенные параметры характеризуются функциями принадлежности, которые строятся на основе опросов экспертов. Модели, в которых неопределенные параметры характеризуются функциями принадлежности, получили название нечетких математических моделей. Недостатком этой методики является то, что для надежного построения функции принадлежности требуется мнение нескольких экспертов, а это не всегда возможно.

Еще один подход связан с использованием интервального анализа [7], то есть неопределенные значения предлагается задавать в виде интервальных чисел:

$$[v_i] = [v_i \leq v_i \leq \bar{v}_i, v_i \leq \bar{v}_i] = [v_i, \bar{v}_i] \equiv \text{mid}[v_i] \pm \frac{\Delta_i}{2}, \quad i = 1, p,$$

где \bar{v}_i, v_i – нижняя и верхняя граница параметра v_i ; $\text{mid}[v_i]$ – середина интервала $[v_i]$ (рис. 1)

$$\text{mid}[v_i] = (v_i + \bar{v}_i)/2; \tag{6}$$

величина Δ_i – интервал, который определяется по формуле

$$\Delta_i = \bar{v}_i - v_i. \tag{7}$$

Очевидно, что интервальные числа $[v_i]$ содержат минимальную информацию о неопределенных параметрах, которую проще всего получить. Параметры v_i могут иметь как стохастическую, так и детерминированную природу. Неопределенность параметров, имеющих детерминированную природу, может быть связана с отсутствием знаний об их точных значениях.

Следовательно, математическая модель с такими параметрами будет называться интервальной математической моделью и неопределенные параметры будут задаваться в виде интервальных чисел: $[\varepsilon_M], [\theta_M], [l_\Phi]$. Интервальные параметры лежат в диапазоне: $[\varepsilon_M] = [0,3 \dots 0,7]$; $[\theta_M] = [1000 \dots 1200]$; $[l_\Phi] = [7 \dots 15]$. В данной математической модели (1)–(5) выходными параметрами являются распределение температур газа, материала и стенки по длине печи, но исследования проведем для температуры материала, так как остальные параметры вычисляются аналогично. Границы интервала для распределения температуры материала показаны на рис. 2.

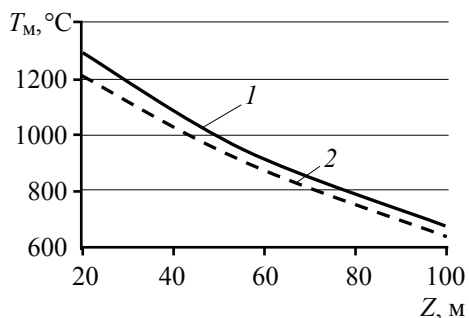


Рис. 2. Границы интервалараспределения температуры материала:

$$1 - y_j(z); \quad 2 - \underline{y}_j(z)$$

Таким образом, представленная методика позволяет найти выходные параметры интервальной модели, которые определяются верхней и нижней границами выходного параметра, что дает возможность успешно строить математические модели процессов химических технологий при неопределенных параметрах.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 14.В37.21.0234 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Список литературы

1. Ахмедов, М.А. Фосфогипс. Исследование и применение / М.А. Ахмедов, Т.А. Атакузиев. – Ташкент : Фан, 1980. – 88 с.
2. Туляков, Д.С. Переработка фосфогипса в условиях неопределенности исходных данных / Д.С. Туляков // Развитие инженерного образования в России : материалы Всерос. науч. конф. – СПб., 2012. – С. 135.
3. Лисиенко, В.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология. В 2 кн. Кн. 2 : справ. изд. / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев. – М. : Теплотехник, 2004. – 592 с.
4. Фролова, Т.А. Математическое моделирование процесса обжига во вращающихся печах / Т.А. Фролова, Д.С. Туляков // Информатика: проблемы, методология, технология : материалы XII Междунар. науч.-метод. конф. : Воронеж, 9–10 февр. 2012 г. : в 2-х т. / Воронеж. гос. ун-т. – Воронеж, 2012. – Т. 1. – С. 424–425.
5. Алон, Н. Вероятностный метод : учеб. пособие для вузов / Н. Алон, Дж. Спенсер ; пер. 2-го англ. изд. под ред. А.А. Сапоженко. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2007. – 320 с.
6. Новак, В. Математические принципы нечеткой логики / В. Новак, И. Перфильева, И. Мочкрож. – М. : Физматлит, 2006. – 352 с.
7. Добронез, Б.С. Интервальная математика : учеб. пособие / Б.С. Добронез ; М-во образования Рос. Федерации, Краснояр. гос. ун-т. – Красноярск : [б. и.], 2004. – 219 с.

Interval Mathematical Model of Burning in Rotary Furnace when Recycling Solid Industrial Waste (Phosphogypsum Processing)

T.A. Frolova¹, D.S. Tulyakov¹, D.V. Kutuzov², M.I. Shikulsky³

*Departments: «Computer-Aided Design of Processing Equipment»,
TSTU (1); frolova@mail.gaps.tstu.ru;
«Quality Management», Astrakhan State University, (2);
«Applied Computer Sciences in Economics»,
Astrakhan State Technical University (3), Astrakhan*

Key words and phrases: interval numbers; rotary furnace; uncertain parameters; phosphogypsum.

Abstract: The paper describes the process of recycling solid industrial waste on the example of phosphogypsum; a mathematical model of the firing process in rotary furnace has been constructed; the uncertainty of the mathematical model has been revealed by means of interval analysis.

Mathematisches Intervallmodell des Brennens in der Drehofen bei der Verwertung der harten Industrieabfälle (am Beispiel der Verarbeitung des Phosphogipses)

Zusammenfassung: Es ist das Prozess der Verwertung der harten Industrieabfälle am Beispiel der Verarbeitung des Phosphogipses gezeigt, es ist das mathematische Modell des Prozesses des Brennens in der Drehofen aufgebaut, es ist die Unbestimmtheit des mathematischen Modells durch die Intervallanalyse aufgedeckt.

Modèle mathématique d'interligne de cuite dans un four tournant lors de l'utilisation des déchets industriels solides (à l'exemple du traitement du phosphogypse)

Résumé: Est montré le processus de l'utilisation des déchets industriels solides à l'exemple du phosphogypse, est construit le modèle mathématique du processus de cuite dans un four tournant, est démontrée l'indécision du modèle mathématique par l'analyse d'interligne.

Авторы: *Фролова Татьяна Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированное проектирование технологического оборудования»; *Туляков Дмитрий Сергеевич* – аспирант кафедры «Автоматизированное проектирование технологического оборудования», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; *Кутузов Денис Валерьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление качеством», ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный университет»; *Шкульский Михаил Игоревич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная информатика в экономике», ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань.

Рецензент: *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
