

УДК 66.021.4

ГИБРИДНАЯ НЕЧЕТКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ПРОДУКЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СУШКИ ОКАТЫША В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

© 2020 г. Академик РАН В. П. Мешалкин^{1,2}, В. И. Бобков^{3,*}, В. В. Борисов³, М. И. Дли³

Поступило 06.07.2020 г.

После доработки 30.08.2020 г.

Принято к публикации 21.09.2020 г.

Разработана оригинальная гибридная нечеткая дифференциально-продукционная модель динамического процесса сушки многослойного окатыша как дисперсного сферического тела, отображающая скорость движения локализованного фронта испарения внутри высушиваемого окатыша и отличающаяся использованием системы дифференциальных уравнений в частных производных теплопроводности и скорости сушки с нечеткими параметрами, представляющими собой интервальные значения теплофизических свойств дисперсных частиц окатыша и вычислительных операций уменьшения накопления ошибок применяемых конечно-разностных методов, а также заменой аппроксимирующей многомерной конечно-разностной системы уравнений совокупностью специальных нечетких продукционных правил, описывающих сложную зависимость скорости движения локализованного фронта испарения от нечетких теплофизических и тепломассообменных параметров процесса сушки, что позволяет осуществлять быстродействующий расчет значений параметров технологического режима ресурсоэнергосберегающего процесса сушки многослойного окатыша с предотвращением снижения прочности и разрушаемости окатышей вследствие “теплового шока”. Разработка предложенной гибридной нечеткой дифференциально-продукционной модели основана на использовании современных методов искусственного интеллекта с учетом физико-химических особенностей процессов сушки.

Ключевые слова: химико-энерготехнологический процесс, сушка, окатыши, утилизация техногенных отходов, гибридная нечеткая модель, энергоресурсоэффективность

DOI: 10.31857/S2686953520050167

ВВЕДЕНИЕ

Окатыши представляют собой сферические капиллярно-пористые тела, полученные окомкованием мелкодисперсных сырьевых рудных материалов, и после обжига являются обогащенным сырьем для производства чугуна, стали, цветных металлов и других материалов для металлургической и горнохимической промышленности. Начальным этапом термической обработки окатышей для их дальнейшей переплавки в рудно-термических печах является химико-энерготехнологический процесс сушки. Он определяет ка-

чество получаемых окатышей и влияет на энергоресурсоэффективность их производства.

Поэтому приоритетным направлением повышения эффективности металлургической и горнохимической промышленности является реализация комплексного подхода к производству высококачественного обогащенного окомкованного сырья, обеспечивающего, с одной стороны, оптимальный гранулометрический состав окатышей при минимальном содержании влаги, карбонатных включений, примесей и летучих газов, а с другой стороны, экологически безопасную утилизацию техногенных отходов горно-обогачительных предприятий [1–4].

Однако, до сих пор до конца нерешенной проблемой анализа динамики химико-энерготехнологических процессов производства обогащенного сырья остается учет следующих требований: большое число разнородных параметров и их нелинейная взаимозависимость; неопределенность динамики протекания этих процессов; существенное влияние внешних факторов; уникальность оборудования химико-энерготехнологиче-

¹ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

² Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук, Москва, Россия

³ Филиал ФГБОУ ВО Национальный Исследовательский Университет “МЭИ”, Смоленск, Россия

*E-mail: vovabobkoff@mail.ru

ских систем пеллетирования техногенного мелкодисперсного сырья [5, 6].

Это, в свою очередь, обуславливает целесообразность создания моделей и методов анализа динамики химико-энерготехнологических процессов сушки окатышей на основе методологии нечеткого моделирования с использованием современных методов искусственного интеллекта, учитывающих физико-химические особенности процессов сушки [7, 8].

Известны работы, в которых предлагаются нечеткие модели анализа динамических процессов. Так, например, в работе [9] предложена нечеткая модель для анализа динамических процессов на основе дифференциальных уравнений с нечеткими параметрами. Для решения этих задач в условиях неопределенности разработан нечеткий численный метод, основанный на обобщенных полиномах Лежандра. В статье [10] для решения подобных задач применяется численный метод на основе нечеткой матрицы обобщенных полиномов Лагерра.

Однако использование в этих работах рассмотренных нечетких численных методов для решения дифференциальных уравнений с нечеткими параметрами приводит к проблеме возрастания неопределенности результатов вследствие массовых итерационных вычислений. С другой стороны, определение для этих уравнений значений целого ряда нечетких параметров характеризуется значительной вычислительной сложностью.

Поэтому анализ динамики химико-энерготехнологических процессов сушки окатышей требует разработки гибридной нечеткой дифференциально-продукционной (НДП) модели, основанной на принципе гибридизации “с функциональным замещением”, когда одна из моделей выбирается в качестве доминирующей, отдельные компоненты которой заменяются другими моделями, компенсирующими ее ограничения [11].

В статье предлагается оригинальная гибридная НДП-модель для анализа динамики химико-энерготехнологического процесса сушки окатышей, удовлетворяющая сформированным требованиям. Оригинальность предлагаемой модели заключается в следующем:

– во-первых, для оценки теплопроводности окатышей используются дифференциальные уравнения с нечеткими параметрами (теплофизическими характеристиками окатышей), при решении которых нечеткими численными методами проблема накопления неопределенности (степени размытости) результатов решается способом, основанным на так называемом модальном взаимодействии нечетких параметров;

– во-вторых, для определения наиболее сложного, с вычислительной точки зрения, нечеткого параметра (температуры мокрого термометра, за-

висящей от температуры газа-теплоносителя и влагосодержания) применяется нечеткая продукционная модель.

Анализ специфики удаления влаги из окомкованных рудных апатит-нефелиновых отходов. Влага в окатышах из отходов рудной мелочи находится в порах между зёрнами, на поверхности и в составе химических соединений [12]. На удаление влаги данных типов в процессе сушки окатышей в обжиговой машине конвейерного типа расходуется значительное количество тепловой энергии на обеспечение парообразования в системе [13]. Следует также учитывать, что наибольшие затраты тепловой энергии приходятся на удаление влаги химических соединений [14].

Особенности динамики внешнего обмена влагой при сушке окатышей обусловлены разностью концентраций паров влаги перпендикулярно фронту испарения и изменением температуры газа-теплоносителя на поверхности сырого окатыша. Изменение концентрации формирует поток паров влаги к поверхности, а подвод тепловой энергии обеспечивается разницей температур между поверхностью окатыша и газом-теплоносителем. Вблизи поверхности влажного окатыша образуются гидродинамическая, тепловая и концентрационная пограничные области [15].

Исследования сложной структуры сырых окатышей из отходов апатит-нефелиновых руд показали, что они представляют собой капиллярно-пористые тела, для которых перенос влаги и теплоты инициируется в результате термического воздействия на пеллетированный влажный материал. Такое термическое воздействие вызывает процесс парообразования, что приводит к перемещению водяных паров от внутренних слоев окатыша к внешним.

В то же время для реальных производственных условий характерны две основные негативные ситуации. Первая ситуация, обусловленная чрезмерным давлением пара во внутренних слоях окатыша, приводит к разрушению окатышей из-за так называемого “термического шока”. Вторая ситуация связана с концентрацией избыточной влаги в окатышах, расположенных в нижних горизонтах их многослойной массы в рабочей зоне конвейерной обжиговой машины, вследствие конденсации увлажненного сушильного агента. Это влечет за собой размягчение и деформацию продукции и, как следствие, нарушение аэродинамического режима функционирования оборудования и необоснованный рост удельного энергопотребления.

Описание гибридной нечеткой модели динамики процесса сушки окатышей. В процессе сушки влага перераспределяется в пористой структуре окатыша достаточно свободно, происходит движение локализованного фронта испарения от по-

верхности вглубь. На фронте испарения теплота расходуется на парообразование, а подводится через высушенную внешнюю область окатыша. Внутри пористой структуры окатыша создается давление, под действием которого пары фильтруются от фронта испарения к поверхности. Скорость удаления влаги из окатыша зависит от термического и фильтрационного сопротивлений. Давление паров и температура на фронте испарения устанавливаются в процессе сушки и связаны между собой как параметры насыщенного пара. Такая модель рассматривалась авторами в работе [6].

С учетом определенных допущений окатыш может рассматриваться как шар с радиусом R , теплоемкостью c_m , плотностью вещества ρ_m , теплопроводностью λ , нагреваемый в процессе сушки до температуры T_m . Указанные характеристики существенно зависят от партии исходного сырья и настройки управляющих параметров обжиговой машины и оборудования для окомкования апатит-нефелиновой рудной мелочи. Нелинейное уравнение с нечеткими параметрами для описания теплопроводности может быть записано как:

$$\tilde{\rho}_m \tilde{c}_m \frac{\partial \tilde{T}_m}{\partial \tau} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\tilde{\lambda} x^2 \frac{\partial \tilde{T}_m}{\partial x} \right) - Q \tilde{\omega}, \quad (1)$$

где символ “ \sim ” над переменными означает, что соответствующее значение представляется в виде нечеткого числа.

Учитывая нечеткий характер переменных процесса сушки и свойств исходного сырья, скорость данного процесса может быть описана уравнением вида:

$$\tilde{\omega} = \frac{d\tilde{\gamma}}{d\tau} = \frac{3\tilde{\lambda} (\tilde{T}_m|_{x=R} - \tilde{t}_M) \sqrt[3]{\tilde{\gamma}}}{\tilde{\rho}_m \tilde{u}_0 Q \tilde{R}^2 (\sqrt[3]{\tilde{\gamma}} - 1)}, \quad (2)$$

где в качестве нечетких характеристик (кроме указанных выше) рассматриваются: $\tilde{\gamma}$ – относительная степень высушивания окатыша, \tilde{u}_0 – начальное влагосодержание, \tilde{t}_M – температура точки росы (мокрого термометра), \tilde{T}_g – температура сушильного агента.

Выражения (1) и (2) образуют систему дифференциальных уравнений, для которой начальные и граничные условия определяются параметрами рассматриваемого процесса [6].

Для оценивания нечеткой характеристики $\tilde{\gamma}$ рассмотрим разработанную нечеткую модель $\tilde{\gamma} = \Phi(\tilde{T}_g, \tilde{T}_{m0}, \tilde{u}_0, \tilde{R}, \tilde{\lambda}, \tilde{\rho}_m, \tilde{c}_m)$, сформированную на основе нечетких правил:

$$\text{IF } (\tilde{p}_1 \text{ is } A_{i1}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (\tilde{p}_7 \text{ is } A_{i7}), \\ \text{THEN } (\tilde{\gamma} \text{ is } B_i), \quad i = 1, \dots, N.$$

Здесь нечеткие множества A_{i1}, \dots, A_{i7} предназначены для формализованного описания предпосылки, а B_i – заключения i -го правила. Переобозначим нечеткие характеристики: $\tilde{T} \Rightarrow \tilde{p}_1$, $\tilde{T}_{m0} \Rightarrow \tilde{p}_2$, $\tilde{u}_0 \Rightarrow \tilde{p}_3$, $\tilde{R} \Rightarrow \tilde{p}_4$, $\tilde{\lambda} \Rightarrow \tilde{p}_5$, $\tilde{\rho}_m \Rightarrow \tilde{p}_6$, $\tilde{c}_m \Rightarrow \tilde{p}_7$.

В качестве операции импликации, определяющей причинно-следственное отношение между предпосылками и заключениями правил модели, используется нечеткая импликация Мамдани (min-активизация). При этом предварительно выполняется настройка функций принадлежности нечетких множеств предпосылок и заключений всех правил [9].

Моделирование и расчет относительной степени высушивания $\tilde{\gamma}$ предлагается осуществлять параллельно. При использовании вычислительных средств с GPU-архитектурой и M графическими ядрами оперативность оценивается как:

$$T \approx \left[\text{div} \left(\frac{N-1}{M} \right) + 1 \right] [4t_1 + (2m+4)t_2 + t_3],$$

где t_1 – время выполнения операций сложения и вычитания, t_2 – время выполнения операций умножения и деления, t_3 – время выполнения операции exp; div – целое от деления.

Например, при $N \leq M$, $m = 8$, $N \leq 512$ и $t_1 \approx t_2 \approx t_3 \approx 1$ мс, время моделирования и расчета $\tilde{\gamma}$ снижается более чем в 1×10^2 раз.

Анализ динамики процесса сушки окатышей на основе разработанной гибридной нечеткой модели. Рассмотрим результаты анализа динамики процесса сушки окатышей на основе разработанной гибридной НДП-модели. Для этого при решении дифференциальных уравнений с нечеткими параметрами (теплофизическими характеристиками окатышей) воспользуемся нечетким численным методом, в котором проблема накопления неопределенности (степени размытости) результатов решается способом, основанным на так называемом модальном взаимодействии нечетких параметров.

Вычисления осуществлялись для сферических окатышей радиусом \tilde{R} в диапазоне [1.5; 2.5] см (задаваемом окомкователем – тарельчатым гранулятором), $\tilde{u}_0 \in [9.5; 10.5]\%$ при скорости подачи сушильного агента $\tilde{W}_g \in [0.5; 1.5]$ м/с с температурой $\tilde{T}_g \in [100; 500]^\circ\text{C}$.

Из рис. 1 и 2 видно, что зависимости, полученные при использовании предлагаемой гибридной НДП-модели, в достаточной степени совпадают с данными натурных экспериментов, что свидетельствует об ее адекватности.

На рис. 2 представлена зависимость от времени нечеткой переменной $\tilde{\gamma}$, полученная в вычис-

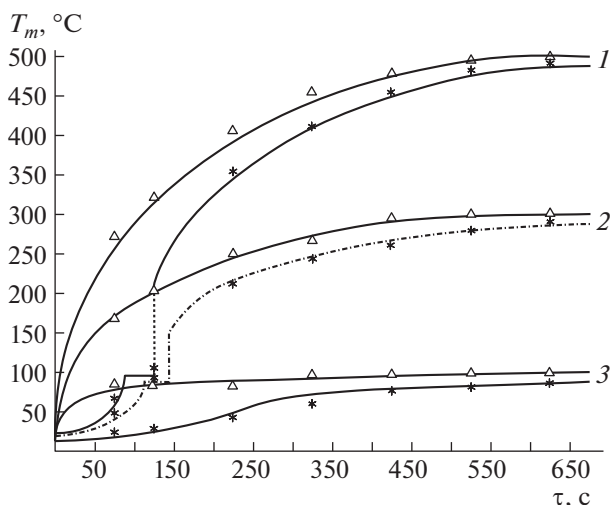


Рис. 1. Изменение во времени температуры внешней поверхности окатыша и его центра, в зависимости от степени нагрева сушильного агента (1 – $T_g = 100^\circ\text{C}$, 2 – $T_g = 300^\circ\text{C}$, 3 – $T_g = 500^\circ\text{C}$); данные натурных экспериментов: Δ – для центра окатыша, * – для его поверхности.

лительном эксперименте, проведенном по построенной гибридной НДП-модели $\tilde{\gamma} = \Phi(\tilde{T}_g, \tilde{T}_{m0}, \tilde{u}_0, \tilde{R}, \tilde{\lambda}, \tilde{\rho}_m, \tilde{c}_m)$, при фиксированном нагреве сушильного агента $T_g = 300^\circ\text{C}$.

Из рис. 2 следует, что результаты моделирования с использованием предложенной гибридной НДП-модели являются достоверными, так как все полученные в результате экспериментов дефазифицированные (т.е. приведенные к четкому виду) значения γ соответствуют вычисленным значениям функций принадлежности нечеткого параметра $\tilde{\gamma}$ на уровне не ниже 0.5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для анализа динамики химико-энерготехнологического процесса сушки окатышей предложена гибридная НДП-модель, в которой:

- для оценки теплопроводности окатышей использованы дифференциальные уравнения с нечеткими параметрами, а проблема накопления неопределенности результатов при использовании нечеткого численного метода решена за счет модального взаимодействия этих параметров;

- для определения наиболее вычислительно сложного нечеткого параметра применена нечеткая продукционная модель.

Разработанная гибридная НДП-модель позволила в среднем на 2 порядка повысить оперативность нечетких вычислений при распараллеливании, по сравнению с типовым подходом. А повышение сложности модели лишь несущественно

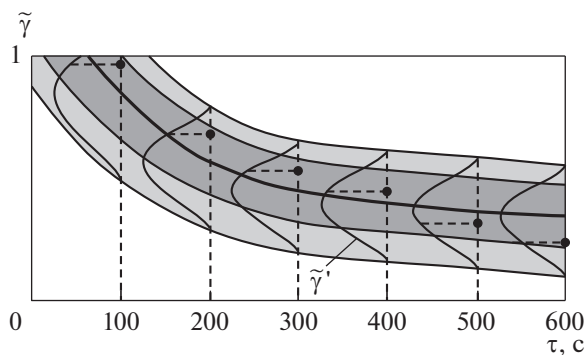


Рис. 2. Пример нечеткой зависимости относительной степени высушивания окатыша $\tilde{\gamma}$ от времени при температуре газа-теплоносителя 300°C .

повлияло на общую оценку оперативности нечетких вычислений.

Сопоставление результатов экспериментов и моделирования говорит об адекватности разработанной гибридной НДП-модели и о достоверности полученных итогов нечеткого моделирования.

Результаты применения разработанной модели могут применяться для выбора режимов управления химико-технологическим процессом сушки окомкованной апатит-нефелиновой рудной мелочи для повышения его ресурсоэффективности на основе снижения доли брака, вызванного термоградиентным разрушением окатышей, в объеме производимой продукции.

Применение разработанной гибридной НДП-модели может способствовать развитию применения систем искусственного интеллекта в химической технологии в целом.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-24094 МК) и в рамках исполнения государственного задания (проект № FSWF-2020-0019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dil'din A.N., Trofimov E.A., Chumanov I.V. Improving the processing of steelmaking waste. Part 1. Thermodynamic analysis // Steel Transl. 2017. V. 47. № 1. P. 1–6.
2. Leont'ev L.I., Grigorovich K.V., Kostina M.V. The development of new metallurgical and technologies. Part 1 // Steel Transl. 2016. V. 46. № 1. P. 6–15.
3. Shatokhin I.M., Kuz'min A.L., Smirnov L.A., Leont'ev L.I., Bigeev V.A., Manashev I.R. New method for processing metallurgical wastes // Metallurgist. 2017. V. 61. № 7–8. P. 523–528.
4. Novichikhin A.V., Shorokhova A.V. Control procedures for the step-by-step processing of iron ore mining waste // In-

- stitution news. *Ferrous metallurgy*. 2018. V. 60. № 7. P. 565–572.
5. Bobkov V.I., Fedulov A.S., Dli M.I., Meshalkin V.P., Morgunova E.V. Scientific basis of effective energy resource use and environmentally safe processing of phosphorus-containing manufacturing waste of ore-dressing barrows and processing enterprises // *Clean Techn. Environ. Policy*. 2018. V. 20. № 10. P. 2209–2221.
 6. Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Dli M.I., Khodchenko S.M. Computer-aided modeling of the chemical process of drying of a moving dense multilayer mass of phosphorite pellets // *Dokl. Chem.* 2017. V. 475. Part 2, P. 188–191.
 7. Мешалкин В.П. Экспертные системы в химической технологии. Основы теории, опыт разработки и применения / М.: Химия, 1995. 368 с.
 8. Russell S. Norvig P. *Artificial intelligence: a modern approach*, 4th Edition. Pearson Education, Inc. 2020. 1069 p.
 9. Ahmadian A., Salahshour S., Baleanu D., Amirkhani H., Yunus R. Tau method for the numerical solution of a fuzzy fractional kinetic model and its application to the oil palm frond as a promising source of xylose // *J. Comput. Phys.* 2015. V. 294. P. 562–584.
 10. Ahmadian A., Ismail F., Salahshour S., Baleanu D., Ghaemi F. Uncertain viscoelastic models with fractional order: A new spectral tau method to study the numerical simulations of the solution // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2017. V. 53. P. 44–64.
 11. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. 2-е изд. Стереотип. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 284 с.
 12. Luis P., Van der Bruggen B. Exergy analysis of energy-intensive production processes: advancing towards a sustainable chemical industry // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2014. V. 89. № 9. P. 1288–1303.
 13. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2015. V. 119. № 1. P. 265–271.
 14. Bokovikov B.A., Bragin V.V., Shvydkii V.S. Role of the thermal-inertia zone in conveyer roasting machines // *Steel Transl.* 2014. V. 44. № 8. P. 595–601.
 15. Gimadiev A.G., Grechnikov F.V., Stadnik D.M., Odi-nokov D. Development of mathematical model and analysis of characteristics of gas dampener for power plant fuel main line // *Procedia Engineering*. 2015. V. 106. P. 53–61.

HYBRID FUZZY DIFFERENTIAL PRODUCTION MODEL OF DYNAMIC PROCESS OF PELLET DRYING UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

Academician of the RAS V. P. Meshalkin^{a,b}, V. I. Bobkov^{c,#}, V. V. Borisov^c, and M. I. Dli^c

^a D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

^b Kurnakov institute of inorganic chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^c Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute, Smolensk, Russian Federation

[#]E-mail: vovabobkoff@mail.ru

An original hybrid fuzzy differential production model of the dynamic drying process of the multilayer pellet has been developed, as a dispersed spherical body, which represents the speed of movement of the localized evaporation front inside the dried pellet and is characterized by using a system of differential equations in partial derivatives of thermal conductivity and drying speed with fuzzy parameters; representing interval values of thermophysical properties of dispersed pellet particles and computational operations of reducing error accumulation of applied finite-difference methods; as well as replacing the approximating multidimensional finite difference system of equations with a set of special fuzzy production rules, describing the complex dependence of the speed of the localized evaporation front on the fuzzy thermophysical and heat and mass exchange parameters of the drying process, this makes it possible to perform fast-acting calculation of parameters of technological mode of resource-energy-saving drying process of multilayer pellet with prevention of reduction of strength and breakability of pellets due to “heat shock.” The development of the proposed hybrid fuzzy differential production model is based on the use of modern artificial intelligence methods, taking into account the physicochemical features of drying processes.

Keywords: chemical-energy process, drying, pellets, disposal of technogenic wastes, hybrid fuzzy model, energy efficiency