

УДК 004.2+66.021.4

Подход к исследованию теплопроводности нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик

Бобков В. И., Борисов В. В., Дли М. И.

Постановка задачи: традиционный подход к решению большого класса задач исследования термически активируемых химико-энерготехнологических процессов не позволяет учесть присущую теплофизическим характеристикам этих процессов неопределенность. Использование же при решении дифференциальных уравнений математической физики нечетких численных методов приводит к проблеме возрастания неопределенности вследствие итерационных вычислений над нечеткими параметрами. Требуется предложить подход к исследованию термически активируемых химико-энерготехнологических процессов, обеспечивающий отсутствие накопления неопределенности при выполнении итерационных вычислений над нечеткими параметрами конечно-разностного уравнения теплопроводности. **Целью работы** является создание подхода к исследованию термически активируемых химико-энерготехнологических процессов нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик. **Используемые методы:** нечеткие численные методы, методы теории нечетких множеств и вычислений. **Новизна:** предлагается оригинальный подход к исследованию термически активируемых химико-энерготехнологических процессов нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик, позволяющий решить проблему возрастания неопределенности результатов при итерационных вычислениях на основе модального взаимодействия параметров, представленных нечеткими числами. **Результат:** предлагаемый подход использован для исследования распределения температуры сферических окатышей в условиях неопределенности теплофизических характеристик. Описана процедура реализации операций над нечеткими параметрами конечно-разностного уравнения теплопроводности с использованием нечеткого интервального метода и предлагаемого подхода. **Практическая значимость:** предложенный в статье подход и полученные на его основе соотношения позволяют исследовать сложные динамические процессы нагрева окатышей, учитывающие эндо- и экзотермические эффекты физико-химических превращений, параметры тепло- и массопереноса и кинетики гетерогенных процессов в условиях неопределенности.

Ключевые слова: теплотехнологическая система, теплофизические характеристики, нечеткие численные методы, окатыши, теплопроводность, теплоемкость.

Актуальность

Существует большой класс задач исследования термически активируемых химико-энерготехнологических процессов, целью которых является определение оптимальных режимов работы теплотехнологических систем и способов воздействия на термически активируемые процессы с целью повышения их эффективности [1]. Исследование термически активируемых химико-

Библиографическая ссылка на статью:

Бобков В. И., Борисов В. В., Дли М. И. Подход к исследованию теплопроводности нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 73-83. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/03-Bobkov.pdf>

Reference for citation:

Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I. Approach to a Heat Conductivity Research by Fuzzy Numerical Methods in the Conditions of Indeterminacy Thermal Characteristics. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 3, pp. 73-83. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/03-Bobkov.pdf> (in Russian).

энерготехнологических процессов является сложной, многофакторной и дорогостоящей задачей, требует подробного изучения закономерностей физико-химических превращений и тепло-массообменных характеристик сырьевых материалов, продуктов и промежуточных компонентов, участвующих во всех стадиях технологического процесса подготовки окатышей [2-6]. Именно поэтому предпочтение при выполнении таких исследований отдается математическому моделированию процессов и аппаратов, теплотехнологических систем в целом [7].

Для математического описания и исследования химико-энерготехнологических процессов, как правило, используются системы дифференциальных уравнений, решение которых реализуется численными методами. Однако такой подход не позволяет учесть присущую теплофизическим характеристикам этих процессов неопределенность. Поэтому актуальной научной задачей является исследование этих процессов нечеткими численными методами.

Вместе с тем, итерационные вычисления над нечеткими параметрами конечно-разностных уравнений приводят к проблеме возрастания (накопления) неопределенности и к «размыванию» результатов, вследствие чего они оказываются сложно интерпретируемыми и непригодными для дальнейшего анализа.

В статье предлагается подход к решению дифференциальных уравнений математической физики в условиях неопределенности параметров с использованием нечетких численных методов, позволяющий решить проблему возрастания неопределенности при итерационных вычислениях на основе модального взаимодействия нечетких чисел.

Приведен пример использования предлагаемого подхода к исследованию распределения температуры сферических окатышей в условиях неопределенности теплофизических характеристик. Описана процедура реализации операций над нечеткими параметрами конечно-разностного уравнения теплопроводности с использованием нечеткого интервального метода и решением проблемы возрастания неопределенности при выполнении итерационных вычислений над этими параметрами на основе модального взаимодействия между нечеткими числами.

Постановка задачи. Описание модели с нечеткими параметрами

Для содержательной постановки и решения задачи в работе введены обозначения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
λ	– теплопроводность, Вт/(м·К)
ρc	– объемная теплоемкость, Дж/(м ³ ·К)
T_m	– температура материала окатыша, К
T_g	– температура греющего газа-теплоносителя, К
α_F	– коэффициент теплоотдачи с поверхности, Вт/(м ² ·К)
τ	– время, с
R	– радиус окатыша, м

Обозначение	Физический смысл обозначения
x	– координата радиуса окатыша
T_{m0}	– начальная температура материала окатыша, К
Σq	– сумма истоков и стоков теплоты в результате эндо- и экзотермических превращений в материале окатыша, Дж
$\Delta\tau$	– шаг разбиения по времени, с
Δx	– шаг разбиения по координате радиуса окатыша, м

Рассмотрим содержательную постановку задачи исследования химико-энерготехнологических процессов на примере типовой задачи исследования распределения температуры сферических окатышей в условиях неопределенности теплофизических характеристик.

На всех этапах подготовки и переработки фосфатного сырья по термической технологии целевые химико-энерготехнологические процессы: сушка, дегидратация, диссоциация карбонатов, спекание, восстановление и возгонка фосфора осуществляется путем регламентного теплового воздействия на исходный материал [8, 9]. Нагрев сырья происходит в результате высокоинтенсивного теплообмена с продуктами сгорания топлива или реакционными газами, фильтрующимися через плотный слой сырых окатышей [10]. Поскольку целевые процессы носят термически активируемый характер, их интенсивность находится в прямой зависимости от условий внешнего и внутреннего теплообмена, которые в свою очередь, определяются теплофизическими характеристиками обрабатываемых материалов [11]. Существенное влияние теплофизических характеристик фосфатного сырья на ход и эффективность процесса обжига в движущейся многослойной массе на конвейере обжиговой машины с перекрестной подачей греющего газа-теплоносителя отмечалось в работе [8].

Основным механизмом переноса тепла в материале окатышей является их теплопроводность [6]. Однако сложная изменяющаяся в процессе нагрева структура, гамма физико-химических превращений, сопровождающихся эндо- и экзотермическими эффектами, взаимопределяющий характер зависимостей, параметров тепло- и массопереноса и кинетики гетерогенных процессов не позволяют однозначно охарактеризовать параметры теплопроводности и объемной теплоемкости. Экспериментальные исследования, для различных фосфоритовых руд и пород, а также прессовок и окатышей, показывают, что для температур обжига теплопроводность λ находится в диапазоне $\lambda \in [1; 5]$, а объемная теплоемкость $\rho c \cdot 10^{-6}$ – в диапазоне $\rho c \in [2; 3,5]$. При этом по результатам этих исследований можно определить дополнительное свойство этих параметров – степень их значений принадлежности к указанным диапазонам.

Представим каждый из этих параметров в виде нечетких чисел $\tilde{\lambda}$, ρc , соответственно:

- $\tilde{\lambda}$, заданное в диапазоне $[1; 5]$, представляет собой совокупность упорядоченных пар $\tilde{\lambda} = \{(\mu_{\tilde{\lambda}}^*(\lambda), \lambda)\}$, где степень принадлежности $\mu_{\tilde{\lambda}}^*(\lambda) \forall \lambda \in [1; 5]$ к множеству $\tilde{\lambda}$ задается с использованием функции принад-

лежности $\mu_{\tilde{\lambda}}(\lambda)$, отображающей каждый элемент λ на диапазон действительных чисел $[0; 1]$;

- ρc , заданное в диапазоне $[2; 3,5]$, представляет собой совокупность упорядоченных пар $\rho c = \{(\mu_{\rho c}^*(\rho c), \rho c)\}$, где степень принадлежности $\mu_{\rho c}^*(x) \forall \rho c \in [2; 3,5]$ к множеству ρc задается с использованием функции принадлежности $\mu_{\rho c}(x)$, отображающей каждый элемент ρc на диапазон действительных чисел $[0; 1]$;

На рис. 1 показаны примеры нечетких параметров теплопроводности и объемной теплоёмкости в виде треугольных нечетких чисел $\tilde{\lambda}$ и ρc , соответственно.

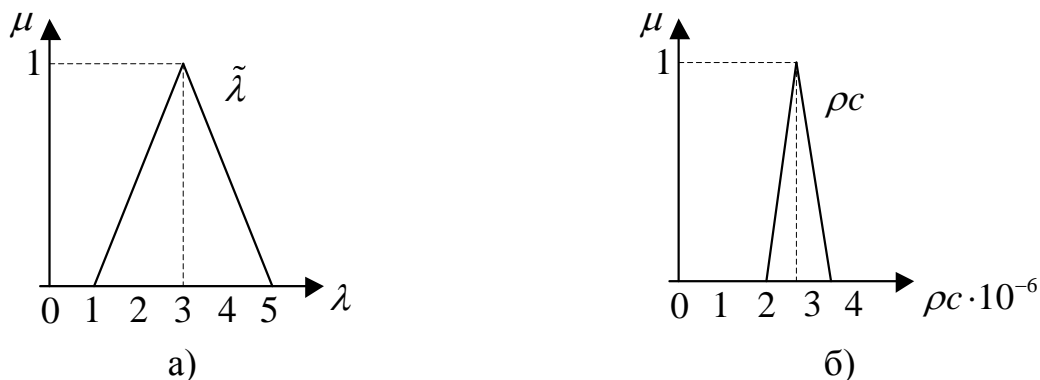


Рис. 1. Нечеткие параметры теплопроводности (а) и объемной теплоёмкости (б) в виде нечетких треугольных чисел

Математическое описание тепловых процессов в окатыше базируется на системе дифференциальных уравнений с нечеткими параметрами ρc и $\tilde{\lambda}$:

$$\rho c \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\tilde{\lambda} x^2 \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) - \sum_l q_l \quad (1)$$

при начальных и граничных условиях:

$$\tau = 0, \quad T_m = T_{m_0}; \quad (2)$$

$$x = 0, \quad \frac{\partial T_m}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$x = R, \quad -\lambda \left(\frac{\partial T_m}{\partial x} \right) = \alpha_F (T_g - T_m)_{x=R}. \quad (4)$$

Решение с использованием нечетких численных методов

Решение поставленной задачи реализуется нечеткими численными методами. Конечно-разностное представление уравнения (1) проводится по равномерной сетке с числом разбиений по радиусу окатышей N и по времени K .

$$\rho c_i^k \frac{T_{m_i}^k - T_{m_i}^{k-1}}{\Delta \tau} = \frac{1}{x_i^2} \frac{1}{\Delta x^2} \left(x_{(i+1)/2}^2 \tilde{\lambda}_{(i+1)/2, j}^k (T_{m_{i+1}}^k - T_{m_i}^k) - x_{(i-1)/2}^2 \tilde{\lambda}_{(i-1)/2}^k (T_{m_i}^k - T_{m_{i-1}}^k) \right) + q_{\Sigma i}^k,$$

где

$$\tilde{\lambda}_{(i+1)/2} = \frac{\tilde{\lambda}_{i+1} + \tilde{\lambda}_i}{2}, \quad \tilde{\lambda}_{(i-1)/2} = \frac{\tilde{\lambda}_i + \tilde{\lambda}_{i-1}}{2}, \quad q_{\Sigma} = \sum_l q_l. \quad (5)$$

Конечно-разностное уравнение теплопроводности (5) записано в неявной форме и для решения используется метод прогонки. Расчетные соотношения для решения внутренней задачи теплопроводности в окатыше, опустив для наглядности индексы k на каждом временном «слое» $\Delta\tau$, запишутся в стандартной форме:

$$\tilde{A}_i \tilde{C}_{i-1} - \tilde{C}_i \tilde{T}_i + \tilde{B}_i \tilde{T}_{i+1} = \tilde{D}_i, \quad i = 2, \dots, N-1,$$

где

$$\tilde{A}_i = \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} x_{(i-1)/2}^2 \tilde{\lambda}_{(i-1)/2},$$

$$\tilde{C}_i = \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} \left(x_{(i+1)/2}^2 \tilde{\lambda}_{(i+1)/2} + x_{(i-1)/2}^2 \tilde{\lambda}_{(i-1)/2} \right) + x_i^2 \rho c_i,$$

$$\tilde{B}_i = \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} x_{(i+1)/2}^2 \tilde{\lambda}_{(i+1)/2},$$

$$\tilde{D}_i = x_i^2 \left(\rho c_i T_{mi} + \Delta\tau q_{\Sigma i} \right).$$

Решение ищется методом прогонки с использованием рекуррентного соотношения

$$\tilde{T}_i = \tilde{\beta}_{i+1} \tilde{T}_{i+1} + \tilde{\gamma}_{i+1}, \quad i = 2, \dots, N,$$

Для прогоночных коэффициентов $\tilde{\beta}_{i+1}$ и $\tilde{\gamma}_{i+1}$ справедливы зависимости

$$\tilde{\beta}_{i+1} = \frac{\tilde{B}_i}{\tilde{C}_i - \tilde{A}_i \tilde{\beta}_i}, \quad \tilde{\gamma}_{i+1} = \frac{\tilde{A}_i \tilde{\gamma}_i + \tilde{D}_i}{\tilde{C}_i - \tilde{A}_i \tilde{\beta}_i}, \quad i = 2, \dots, N-1.$$

С учетом граничных условий (4) определяются нечеткие значения коэффициентов $\tilde{\beta}_1, \tilde{\gamma}_1$ и температуры на правой границе (поверхности окатыша) T_{N+1} .

Полученные соотношения позволяют решить внутреннюю задачу теплопроводности в условиях неопределенности теплофизических характеристик и описать нечеткое распределение температуры сферических окатышей нечеткими численными методами.

Выполнение нечетких операций над нечеткими параметрами

Для реализации операций над нечеткими параметрами конечно-разностного уравнения теплопроводности используем нечеткий интервальный метод [12].

Пусть в качестве примера заданы входные параметры в виде нечетких треугольных чисел $\tilde{A} = (a_1, M(\tilde{A}), a_3)$ и $\tilde{B} = (b_1, M(\tilde{B}), b_3)$ и нечеткое число $\tilde{C} = (c_1, M(\tilde{C}), c_3)$, являющееся результатом некоторой операции $\tilde{*}$ над \tilde{A} и \tilde{B} . Здесь a_1, b_1, c_1 – левые границы, $M(\tilde{A}), M(\tilde{B}), M(\tilde{C})$ – модальные значения и a_3, b_3, c_3 – правые границы нечетких чисел $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$, соответственно.

Тогда процедура выполнения некоторой операции $\tilde{*}$ над нечеткими треугольными числами \tilde{A} и \tilde{B} на основе интервального метода заключается в следующем.

Этап 1. Декомпозиция входных параметров \tilde{A} и \tilde{B} на α -уровни $A_\alpha = [a_1^{(\alpha)}, a_3^{(\alpha)}]$ и $B_\alpha = [b_1^{(\alpha)}, b_3^{(\alpha)}]$. Критерий выбора α -уровней – требуемая точность результата.

Этап 2. Для каждого интервала α -уровня выполняется соответствующая интервальная операция: $C_\alpha = A_\alpha * B_\alpha$, $C_\alpha = [c_1^{(\alpha)}, c_3^{(\alpha)}]$.

Этап 3. Выполняется композиция результата операции над нечеткими числами из его α -уровней: $\tilde{C} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} \alpha C_\alpha$.

Ограничение возрастания неопределенности результатов при итерационных вычислениях на основе модального взаимодействия нечетких чисел

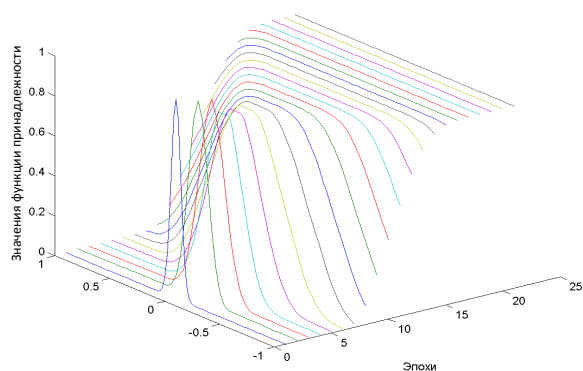
При наличии итерационных вычислений над нечеткими параметрами конечно-разностного уравнения теплопроводности требуется решить проблему «размывания» результата, вследствие чего он может оказаться сложно интерпретируемым и непригодным для дальнейшего анализа. В качестве одного из наиболее эффективных способов ограничения возрастания (накопления) нечеткости воспользуемся способом, предложенным в [13], заключающимся в использовании так называемого модального взаимодействия нечетких чисел.

В результате модифицированные (с учетом модального взаимодействия) операции над интервалами α -уровней нечетких чисел \tilde{A} и \tilde{B} вычисляются в соответствии со следующими выражениями:

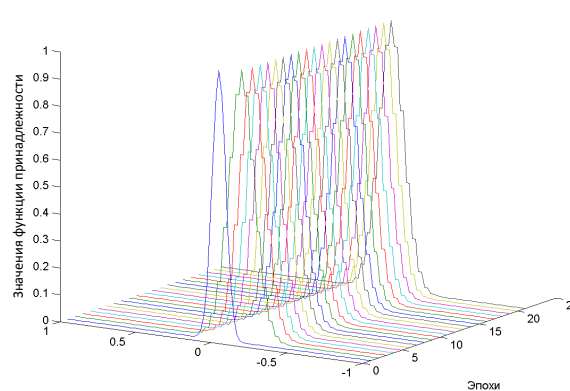
$$\begin{aligned} C_\alpha &= A_\alpha + B_\alpha = [c_1^{(\alpha)}, c_3^{(\alpha)}] = \\ &= \left[\min(a_1^{(\alpha)} + M(\tilde{B}), b_1^{(\alpha)} + M(\tilde{A})), \max(a_3^{(\alpha)} + M(\tilde{B}), b_3^{(\alpha)} + M(\tilde{A})) \right], \\ C_\alpha &= A_\alpha - B_\alpha = [c_1^{(\alpha)}, c_3^{(\alpha)}] = \\ &= \left[\min(a_1^{(\alpha)} - M(\tilde{B}), -b_3^{(\alpha)} + M(\tilde{A})), \max(a_3^{(\alpha)} - M(\tilde{B}), -b_1^{(\alpha)} + M(\tilde{A})) \right], \\ C_\alpha &= A_\alpha \cdot B_\alpha = [c_1^{(\alpha)}, c_3^{(\alpha)}] = \\ &= \left[\min(a_1^{(\alpha)} \cdot M(\tilde{B}), a_3^{(\alpha)} \cdot M(\tilde{B}), M(\tilde{A}) \cdot b_1^{(\alpha)}, M(\tilde{A}) \cdot b_3^{(\alpha)}), \right. \\ &\quad \left. \max(a_1^{(\alpha)} \cdot M(\tilde{B}), a_3^{(\alpha)} \cdot M(\tilde{B}), M(\tilde{A}) \cdot b_1^{(\alpha)}, M(\tilde{A}) \cdot b_3^{(\alpha)}) \right], \\ C_\alpha &= \frac{A_\alpha}{B_\alpha} = [c_1^{(\alpha)}, c_3^{(\alpha)}] = \\ &= \left[\min\left(\frac{a_1^{(\alpha)}}{M(\tilde{B})}, \frac{a_3^{(\alpha)}}{M(\tilde{B})}, \frac{M(\tilde{A})}{b_1^{(\alpha)}}, \frac{M(\tilde{A})}{b_3^{(\alpha)}}\right), \max\left(\frac{a_1^{(\alpha)}}{M(\tilde{B})}, \frac{a_3^{(\alpha)}}{M(\tilde{B})}, \frac{M(\tilde{A})}{b_1^{(\alpha)}}, \frac{M(\tilde{A})}{b_3^{(\alpha)}}\right) \right]. \end{aligned}$$

Примечание. Если в качестве операнда используется четкое число, то для такого числа (чисел) левая и правая границы приравняются к его модальному значению.

На рис. 2, а проиллюстрирован эффект возрастания неопределенности результата итерационных вычислений над нечеткими параметрами без использования модального взаимодействия между нечеткими числами, а на рис. 2, б – отсутствие накопления нечеткости при использовании модального взаимодействия между нечеткими числами.



а)



б)

Рис. 2. Результаты итерационных вычислений без модального взаимодействия нечетких чисел (а) и с модальным взаимодействием нечетких чисел (б)

Заключение

В статье предлагается оригинальный подход к исследованию термически активируемых химико-энерготехнологических процессов нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик, позволяющий решить проблему возрастания неопределенности результатов при итерационных вычислениях на основе модального взаимодействия параметров, представленных нечеткими числами.

Приведен пример использования предлагаемого подхода к исследованию распределения температуры сферических окатышей в условиях неопределенности теплофизических характеристик. Описана процедура реализации операций над нечеткими параметрами конечно-разностного уравнения теплопроводности с использованием нечеткого интервального метода и предлагаемого подхода.

Полученные соотношения позволяют решить внутреннюю задачу теплопроводности в условиях неопределенности теплофизических характеристик и описать нечеткое распределение температуры сферических окатышей нечеткими численными методами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 17-01-00189_a.

Литература

1. Леонтьев Л. И. Физико-химические особенности комплексной переработки железо-содержащих руд и техногенных отходов // В книге: XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии Тезисы докладов в 5 томах. Уральское отделение Российской академии наук. – Екатеринбург. 2016. – С. 92.
2. Юсфин Ю. С., Пашков Н. Ф., Антоненко Л. К., Жак Р. М., Майзель Г. М., Базилевич Т. Н. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.
3. Luis P., Van der Bruggen B. Exergy analysis of energy-intensive production processes: advancing towards a sustainable chemical industry // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2014. Vol 89. № 9. pp. 1288-1291.
4. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2015. Vol. 119. № 1. pp. 265-269.
5. Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I., Meshalkin V. P. Multicriterial optimization of the energy efficiency of the thermal preparation of raw materials // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. Vol. 49. № 6. pp. 842-846.
6. Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I., Meshalkin V. P. Modeling the calcination of phosphorite pellets in a dense bed // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. Vol. 49. № 2. pp. 176-182.
7. Rudobashta S. P. Calculation of the kinetics of drying disperse materials on the basis of analytical methods // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2010. Vol. 83. № 4. pp. 753-759.
8. Бобков В. И. Моделирование технологических процессов при термической подготовке дисперсного фосфатного сырья // Химическая технология. 2016. № 6. – С. 263–271.
9. Panchenko S. V., Shirokikh T. V. Thermal Hydraulics of moving dispersive layer of process units // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2016. Vol. 50. № 2. pp. 217-224.
10. Panchenko S. V., Shirokikh T. V. Thermophysical processes in burden zone of submerged arc furnaces // Theoretical Foundation of Chemical Engineering. 2014. Vol. 48. № 1. pp. 77-81.
11. Meshalkin V. P., Men'shikov V. V., Panchenko S. V., Panchenko D. S., Kazak A. S. Computer-aided simulation of heat- and mass-transfer processes in an ore reduction electrothermal reactor // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. V.49. № 5. pp. 55-60.
12. Борисов В. В., Федулов А. С., Зернов М. М. Основы нечеткого логического вывода. Серия «Основы нечеткой математики». Книга 4. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2014. – 122 с.
13. Федулов А. С. Вид взаимодействия нечетких чисел, ограничивающий возрастание неопределенности при выполнении операций нечеткой арифметики // Вестник Московского энергетического института. 2006. № 1. – С. 101–109.

References

1. Leont'ev L. I. Physical and chemical features of the complex processing of iron-stones and technogenic wastes. *V knige: XX Mendeleevskii s"ezd po obshchei i prikladnoi khimii Tezisy dokladov v 5 tomakh. Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk* [XX Mendeleev congress on general and applied chemical]. Ekaterinburg, 2016, p. 92 (in Russian).
2. Iusfin Iu. S., Pashkov N. F., Antonenko L. K., Zhak R. M., Maizel' G. M., Bazilevich T. N. *Intensifikatsiia proizvodstva i uluchshenie kachestva okatyshei* [Intensification of production and improvement of quality of pellets]. Moscow, Metallurgii, 1994. 240 p. (in Russian).
3. Luis P., Van der Bruggen B. Exergy analysis of energy-intensive production processes: advancing towards a sustainable chemical industry. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2014, vol. 89, no. 9. pp. 1288-1291.
4. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2015, vol. 119, no. 1, pp. 265-269.
5. Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I., Meshalkin V. P. Multicriterial optimization of the energy efficiency of the thermal preparation of raw materials. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2015, vol. 49, no. 6, pp. 842-846.
6. Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I., Meshalkin V. P. Modeling the calcination of phosphorite pellets in a dense bed. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2015, vol. 49, №2, pp.176-182.
7. Rudobashta S. P. Calculation of the kinetics of drying disperse materials on the basis of analytical methods. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, no. 4, pp. 753-759.
8. Bobkov V. I. Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov pri termicheskoi podgotovke dispersnogo fosfatnogo syr'ia [Design of technological processes at thermal preparation of dispersible phosphatic raw material]. *Chemical Engineering*, 2016, no. 6, pp. 263-271 (in Russian).
9. Panchenko S.V., Shirokikh T.V. Thermal Hydraulics of moving dispersive layer of process units. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, vol. 50, no. 2, pp. 217-224.
10. Panchenko S. V., Shirokikh T. V. Thermophysical processes in burden zone of submerged arc furnaces. *Theoretical Foundation of Chemical Engineering*, 2014, vol. 48, no. 1. pp. 77-81.
11. Meshalkin V. P., Men'shikov V. V., Panchenko S. V., Panchenko D. S., Kazak A. S. Computer-aided simulation of heat- and mass-transfer processes in an ore-reduction electrothermal reactor. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2015, vol. 49, no. 5, pp. 55-60.
12. Borisov V. V., Fedulov A. S., Zernov M. M. *Osnovy nechetkogo logicheskogo vyvoda. Seriiia «Osnovy nechetkoi matematiki». Kniga 4. Uchebnoe posobie dlia vuzov* [Bases of unclear inferencing. Series of "Basis of unclear mathematics". Book 4. Train aid for institutions of higher learning]. Moscow, Goriachaia liniia–Telekom Publ., 2014. – 122 p. (in Russian).

13. Fedulov A. S. Vid vzaimodeistviia nechetkikh chisel, ogranichivaiushchii voзрастание neopredelennosti pri vypolnenii operatsii nechetkoi arifmetiki [Type of cooperation of unclear numbers, limiting growth of vagueness at implementation of operations of unclear arithmetic]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*. 2006, no. 1, pp. 101-109 (in Russian).

Статья поступила 06 декабря 2017 г.

Информация об авторах

Бобков Владимир Иванович – кандидат технических наук. Доцент кафедры высшей математики. Национальный исследовательский университет «МЭИ» (филиал в г. Смоленске). Области научных интересов: системный анализ сложных теплотехнологических систем; оптимизация теплотехнологических процессов; математическое моделирование; интеллектуальная поддержка принятия решений; интеллектуальный анализ данных. E-mail: vovabobkoff@mail.ru

Борисов Вадим Владимирович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры вычислительной техники. Национальный исследовательский университет «МЭИ» (филиал в г. Смоленске). Старший научный сотрудник научно-исследовательского центра. Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных сил Российской Федерации им. А.М. Василевского. Области научных интересов: нечеткий и нейро-нечеткий анализ, моделирование сложных систем и процессов; интеллектуальная поддержка принятия решений; ассоциативные системы хранения и обработки информации. E-mail: vbor67@mail.ru

Дли Максим Иосифович – доктор технических наук, профессор. Заместитель директора по научной работе. Национальный исследовательский университет «МЭИ» (филиал в г. Смоленске). Области научных интересов: нечеткий когнитивный анализ и моделирование сложных систем и процессов; интеллектуальная поддержка принятия решений. E-mail: midli@mail.ru

Адрес: 214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, д. 1.

Approach to a Heat Conductivity Research by Fuzzy Numerical Methods in the Conditions of Indeterminacy Thermal Characteristics

V. I. Bobkov, V. V. Borisov, M. I. Dli

Problem definition: traditional approach to the solution of a big class of research problems of thermally activated chemical and power technological processes does not allow to consider indeterminacy inherent in thermal characteristics of these processes. Use at the solution of differential equations of mathematical physics of fuzzy numerical methods leads to a problem of increase of indeterminacy owing to iterative calculations over indistinct parameters. It is required to offer the approach to a research of thermally activated chemical and power technological processes providing lack of accumulation of indeterminacy when performing iterative calculations over fuzzy parameters of a finite-difference heat conduction equation. The purpose of work is creation of approach to a research of thermally activated chemical and power technological processes by fuzzy numerical methods in the conditions of indeterminacy of thermal characteris-

tics. The used methods: fuzzy numerical methods, methods of the theory of fuzzy sets and calculations. Novelty: the original approach to a research of thermally activated chemical and power technological processes by fuzzy numerical methods in the conditions of indeterminacy of thermal characteristics allowing to solve a problem of increase of indeterminacy of results at iterative calculations on the basis of modal interaction of the parameters presented by fuzzy numbers is offered. Result: the offered approach is used for a research of distribution of temperature of spherical pellets in the conditions of indeterminacy of thermal characteristics. The procedure of realization of operations over fuzzy parameters of a finite-difference heat conduction equation with use of an fuzzy interval method and the offered approach is described. Practical significance: the approach offered in article and the ratios received on its basis allow to investigate the complex dynamic processes of heating of pellets considering endo- and exotherms of physical and chemical transformations, parameters warm and a mass transfer and a kinetics of heterogeneous processes in the conditions of indeterminacy.

Keywords: heat-engineering system, physical and heat characteristics, fuzzy numerical methods, pellets, thermal conductivity, heat capacity.

Information about Authors

Vladimir Ivanovich Bobkov – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor of the Department of Computer Engineering. The Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk. Fields of research: system analysis of complex heat engineering systems; optimization of heat engineering processes; math modeling; intellectual decision-making support; high-performance data processing. E-mail: vovabobkoff@mail.ru

Vadim Vladimirovich Borisov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Professor of the Department of Computer Engineering. The Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk. Senior researcher. Military Academy of Army Air Defence A.M. Vasilevsky. Fields of research: fuzzy and fuzzy neural models and networks, intellectual decision-making support, associative memory, associative systems of storage and processing of the information and knowledge. E-mail: vbor67@mail.ru

Maxim Iosifovich Dli – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Head of the Department of Science. The Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk. Fields of research: fuzzy cognitive analysis and modeling of complex systems and processes; digital signal processing; intellectual decision-making. E-mail: midli@mail.ru

Address: Russia, 214013, Smolensk, Energeticheskiy proezd, 1.