

---

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

---

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ (05.13.06)

УДК 519.816:519.863:004.94

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-101-109

### **Модель комплексного управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процессов на примере сложных теплотехнологических систем**

В.В. Борисов, М.И. Дли, В.И. Бобков

В условиях возрастания сложности процессов в технологических системах основные задачи управления рисками не могут быть решены на основе традиционных методов, основанных на точном представлении проблемных ситуаций, поскольку характеризуются большим количеством параметров, неопределенностью, нечеткостью данных. Внешняя среда для подобных систем отличается условиями нестабильности и неопределенности, обусловленными, с одной стороны, высокой вариативностью внешней среды, а с другой — уникальностью возникающих проблемных ситуаций.

Поставлена задача и предложена каскадно-композиционная модель комплексного управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процессов на примере сложных теплотехнологических систем (СТТС), основанная на нечетком подходе и методах гибридизации и комплексирования нечетких моделей.

Комплексность управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процессов в СТТС обусловливается, прежде всего, требованием непревышения допустимого уровня рисков нарушения. При этом допустимый уровень риска может быть установлен не только для нарушения технологических процессов в СТТС в целом, но и для всех стадий и отдельных технологических процессов.

Предложенная каскадно-композиционная модель включает в себя нечеткие модели для покомпонентного анализа технологических процессов в СТТС, оценки ресурсо- и энергоэффективности технологических процессов, оценки рисков при обеспечении ресурсо- и энергосбережения.

Описан подход к решению задачи комплексного управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процессов в СТТС с использованием предлагаемой модели, заключающийся в задании различных сочетаний управляющих параметров на каждой стадии для всех технологических процессов с учетом накладываемых на эти процессы ограничений, в моделировании и в определении таких сочетаний управляющих параметров, которые обеспечат повышение ресурсо- и энергоэффективности технологических процессов в СТТС при непревышении допустимого уровня рисков нарушения.

Представлены экспериментальные результаты комплексного управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения с использованием предложенной модели и подхода на примере процесса сушки фосфоритовых окатышей в обжиговой конвейерной машине. Полученные результаты в дальнейшем планируется использовать для комплексного управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процесса для различных процессов в СТТС.

*Ключевые слова:* каскадно-композиционная модель, комплексное управление рисками, ресурсо- и энергосбережение, сложная теплотехнологическая система.

*Для цитирования:* Борисов В.В., Дли М.И., Бобков В.И. Модель комплексного управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процессов на примере сложных теплотехнологических систем // Вестник МЭИ. 2019. № 5. С. 101—109. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-101-109.

## An Integrated Risk Management Model in Setting Up Resource and Energy Saving Processes Taking Complex Thermal Processing Systems as an Example

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

Under the conditions of constantly growing complexity of the processes used in technological systems, the main risk management tasks cannot be solved by using the traditional methods implying exact representation of problem situations. This is because such tasks are characterized by a large number of parameters, uncertainty and data ambiguity. The external environmental conditions for such systems are characterized by instability and uncertainty, which are caused, on the one hand, by high variability of the external environment and, on the other hand, by uniqueness of the emerging problem situations.

The problem is formulated, and a cascade-composition integrated risk management model in setting up resource and energy saving processes is proposed taking complex thermal processing systems (CTPS) as an example. The proposed model is based on a fuzzy approach and on fuzzy model hybridization and integration methods.

The need for comprehensively managing the risks in setting up resource and energy saving processes in a CTPS is primarily stemming from the requirement of keeping the violation risks within the acceptable level. It should be noted that the acceptable level of risk can be established not only for violation of technological processes in a CTPS as a whole, but also for all stages and for individual technological processes.

The proposed cascade-composition model includes fuzzy models for carrying out a component-wise analysis of the technological processes in the CTPS, for estimating the resource and energy efficiency of technological processes, and for assessing the risks in setting up resource and energy savings.

The article describes an approach to solving the problem of integrated risk management in setting up resource and energy saving processes in the CTPS using the proposed model. The approach implies specification of different combinations of control parameters at each stage for all technological processes with taking into account all constraints imposed on these processes, and modeling and determining the combinations of control parameters that will make it possible to improve the resource and energy efficiency of technological processes in the CTPS while keeping the violation risks within the acceptable level.

The article presents the experimental results of integrated risk management in setting up resource and energy savings using the proposed model and approach taking as an example the process of drying phosphate pellets in the calcining conveyor machine. The obtained results are supposed to be used for integrated risk management in setting up resource and energy saving for various processes in CTPSs.

*Key words:* cascade-composition model, integrated risk management, resource and energy saving, complex thermal processing system.

*For citation:* Borisov V.V., Dli M.I., Bobkov V.I. An Integrated Risk Management Model in Setting Up Resource and Energy Saving Processes Taking Complex Thermal Processing Systems as an Example. Bulletin of MPEI. 2019;5:101—109. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-101-109.

### Введение

Риск нарушения процессов в сложных системах — неизбежный сопутствующий фактор функционирования и развития. Под ним понимается возможность негативных событий, зачастую в сочетании с их последствиями [1, 2].

В настоящем исследовании на примере теплотехнологических систем (СТТС) под риском при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процессов подразумевается возможность нарушения технологических процессов.

Комплексность управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения обусловлена, прежде всего, требованием непревышения допустимого уровня рисков нарушения на всех стадиях всех процессов в СТТС.

В условиях возрастания сложности процессов основные задачи управления рисками практически не могут быть решены на основе традиционных методов, основанных на точном представлении проблемных ситуаций [3, 4]. Они характеризуются большим количеством параметров, неопределенностью, нечеткостью данных. Внешняя среда для подобных СТТС обладает условиями нестабильности и неопределенности, обусловленными, с одной стороны, высокой вариативно-

стью внешней среды, а с другой — уникальностью возникающих проблемных ситуаций [5 — 8]. Это, в свою очередь, требует создания методов управления рисками, основанных на методологии нечеткого моделирования, а также гибридизации и комплексирования нечетких моделей.

### Постановка задачи

Постановка задачи комплексного управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения технологических процессов в СТТС формулируется следующим образом.

$$S = \frac{P = \{p_i^{jk}\}, i = 1 \dots J_j, j = 1 \dots J_k, k = 1 \dots K}{\rightarrow \min},$$

$$\text{при } R \leq R_{(per)};$$

$$S = s_E E + s_H H;$$

$$E = FE(E_1, \dots, E_k, \dots, E_K);$$

$$E_k = FE_k(E_1^k, \dots, E_j^k, \dots, E_{j_k}^k), \quad k = 1 \dots K;$$

$$E_j^k = FE_j^k(Tg_0^{jk}, Tg_n^{jk}, W_g^{jk}), \quad j = 1 \dots J_k, k = 1 \dots K;$$

$$H = FH(H_1, \dots, H_k, \dots, H_K);$$

$$H_k = FH_k \left( H_1^k, \dots, H_j^k, \dots, H_{J_k}^k \right), \quad k = 1 \dots K;$$

$$H_j^k = FH_j^k \left( Tg_0^{jk}, Tg_n^{jk}, Wg^{jk} \right), \quad j = 1 \dots J_k, k = 1 \dots K;$$

$$R = FR \left( R_1, \dots, R_k, \dots, R_K \right);$$

$$R_k = FR_k \left( R_1^k, \dots, R_j^k, \dots, R_{J_k}^k \right), \quad k = 1 \dots K;$$

$$R_j^k = FR_j^k \left( E_j^k, H_j^k \right), \quad j = 1 \dots J_k, k = 1 \dots K,$$

где  $S$  — суммарные затраты на электрическую и тепловую энергию;  $R, R_{(per)}$  — обобщенный риск (в целом) и допустимый уровень обобщенного риска нарушения технологических процессов в СТТС;  $E, H$  — общие затраты на электрическую и тепловую энергию;  $s_E, s_H$  — удельная стоимость электрической и тепловой энергии;  $E_k, H_k$  — затраты на электрическую и тепловую энергию  $k$ -го технологического процесса;  $FE, FH$  — зависимости между затратами на электрическую и тепловую энергию для отдельных технологических процессов и общими затратами на электрическую и тепловую энергию;  $R_k$  — риск нарушения  $k$ -го технологического процесса;  $FR$  — зависимость между рисками нарушения отдельных технологических процессов и обобщенным риском нарушения технологических процессов в СТТС в целом;  $E_j^k, H_j^k$  — затраты на электрическую и тепловую энергию для  $j$ -й стадии  $k$ -го технологического процесса;  $FE_k, FH_k$  — зависимости между затратами на электрическую и тепловую энергию для  $j$ -й стадии  $k$ -го технологического процесса и затратами на электрическую и тепловую энергию для всего  $k$ -го процесса;  $R_j^k$  — риск нарушения  $j$ -й стадии  $k$ -го технологического процесса;  $FR_k$  — зависимость между рисками нарушения отдельных стадий  $k$ -го технологического процесса и риском нарушения всего  $k$ -го процесса;  $FE_j^k, FH_j^k$  — зависимости между управляющими параметрами и затратами на электрическую и тепловую энергию для  $j$ -й стадии  $k$ -го технологического процесса;  $FR_j^k$  — зависимость между затратами на электрическую и тепловую энергию для  $j$ -й стадии  $k$ -го технологического процесса и риском нарушения этой стадии;  $P = \{p_l^{jk}\}$  — управляющие параметры технологических процессов в СТТС,  $l = 1 \dots L_j; j = 1 \dots J_k; k = 1 \dots K$ .

Допустимый уровень риска может быть установлен не только для нарушения технологических процессов в целом, но и для отдельных процессов, а также для всех стадий, то есть

$$R_k \leq R_{k(per)}, \quad k = 1 \dots K;$$

$$R_j^k \leq R_{j(per)}^k, \quad j = 1 \dots J_k, k = 1 \dots K.$$

Рассмотрим в качестве примера СТТС обжиговую конвейерную машину типа ОК-520/536, предназначенную для производства фосфоритовых окатышей.

Последовательно выполняемыми процессами производства окатышей являются сушка, подогрев, высокотемпературный обжиг, рекуперация и охлаждение.

Используются как электрическая, так и тепловая энергия. Электрическая энергия расходуется эксгаустерами для формирования потока газа-теплоносителя с требуемыми управляющими параметрами, а тепловая обеспечивает начальную температуру газа.

Указанные технологические процессы различаются значениями управляющих параметров для каждой стадии (для каждой из вакуум-камер обжиговой машины). Управляющими параметрами технологических процессов в обжиговой конвейерной машине для  $j$ -й стадии  $k$ -го процесса считаются:

- $Tg_0^{jk}$  — температура газа-теплоносителя на входе в слой окатышей;
- $Tg_n^{jk}$  — температура газа-теплоносителя после прохождения всех  $n$  слоев окатышей;
- $Wg^{jk}$  — скорость движения газа-теплоносителя.

Таким образом, целевой критерий повышения ресурсо- и энергоэффективности процессов производства фосфоритовых окатышей в обжиговой конвейерной машине конкретизируется следующим образом:

$$S \xrightarrow{Tg_0^{jk}, Tg_n^{jk}, Wg^{jk}, j=1 \dots J_k, k=1 \dots K} \min, \text{ при } R \leq R_{(per)}.$$

Для обжиговой конвейерной машины типа ОК-520/536 и выполняемых в ней процессов  $k = 1 \dots K, K = 5$ , при этом:

- для сушки и подогрева окатышей ( $k = 1$ ) —  $J_1 = 11$ , ( $k = 2$ ) —  $J_2 = 2$ ;
- для высокотемпературного обжига ( $k = 3$ ) —  $J_3 = 8$ ;
- для рекуперации и охлаждения окатышей ( $k = 4$ ) —  $J_4 = 2$ , ( $k = 5$ ) —  $J_5 = 10$ .

#### Структура и описание каскадно-композиционной модели комплексного управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процессов в сложных теплотехнологических системах

Зависимости между управляющими параметрами и затратами на электрическую и тепловую энергию на всех стадиях различных технологических процессов в СТТС, а также их воздействия на риски нарушения этих процессов носят существенно нелинейный характер [3, 4]. Это обусловлено, с одной стороны, спецификой самих процессов и уникальностью оборудования СТТС, а с другой — влиянием параметров внешней среды в условиях неопределенности. Поэтому для анализа технологических процессов в СТТС, оценки ресурсо- и энергоэффективности технологических процессов, а также оценки рисков при обеспечении ресурсо- и энергосбережения целесообразно использовать нечеткий подход [9], а также методы гибридизации и комплексирования нечетких моделей [10].

Предложена каскадно-композиционная модель комплексного управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процессов в СТТС, структура которой приведена на рис. 1.

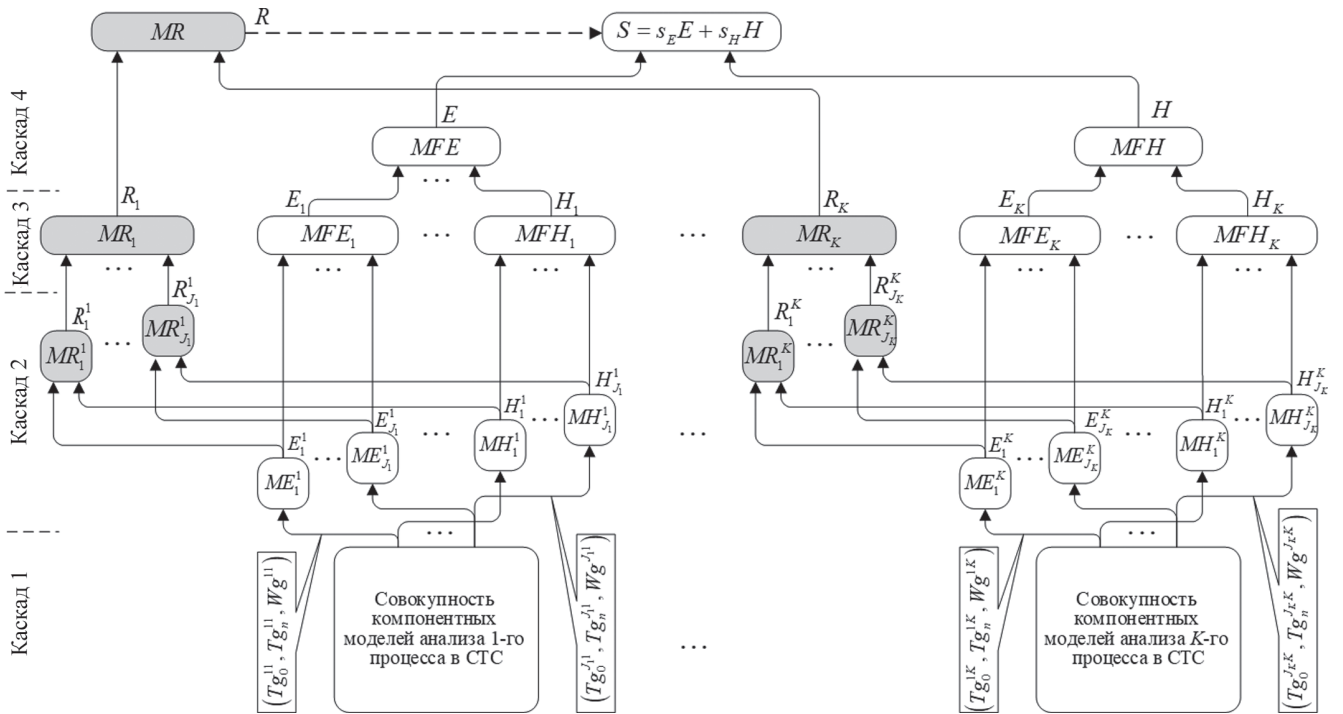


Рис. 1. Структура каскадно-композиционной модели

Каскадно-композиционная модель состоит из нескольких каскадов.

Каскад 1 включает в себя совокупности нечетких компонентных моделей  $\{M_{comp_i}^{jk} \mid i = 1 \dots n, j = 1 \dots J_k\}$  для анализа  $k$ -х ( $k = 1 \dots K$ ) процессов производства окатышей (сушки, подогрева, высокотемпературного обжига, рекуперации и охлаждения).

Модели соответствуют результатам декомпозиции рассматриваемых процессов. Каждая из них предназначена для решения внутренней задачи теплопроводности по отдельно взятому окатышу с учетом неопределенности его теплофизических характеристик и нечеткого распределения температуры. Анализ с использованием указанной модели основан, во-первых, на построении системы дифференциальных уравнений с нечеткими теплофизическими характеристиками (объемной теплоемкостью, теплопроводностью, коэффициентом теплоотдачи с поверхности) [11], во-вторых, на предложенном в [12] подходе к решению системы уравнений нечеткими численными методами.

В каскад 2 входят совокупности моделей

$$\{ME_j^k \mid j = 1 \dots J_k, k = 1 \dots K\};$$

$$\{MH_j^k \mid j = 1 \dots J_k, k = 1 \dots K\},$$

реализующие зависимости  $FE_j^k, FH_j^k$  и предназначенные для оценки затрат  $E_j^k, H_j^k$  на электрическую и тепловую энергию на  $j$ -ых стадиях ( $j = 1 \dots J_k$ ) для  $k$ -ых ( $k = 1 \dots K$ ) процессов производства окатышей.

Взаимодействие нечетких компонентных моделей  $\{M_{comp_i}^{jk} \mid i = 1 \dots n, j = 1 \dots J_k\}$  первого каскада с моделями  $\{ME_j^k \mid j = 1 \dots J_k\}$  и  $\{MH_j^k \mid j = 1 \dots J_k\}$  второго каскада для  $k$ -го процесса в СТТС дано на рис. 2.

В качестве основы для создаваемых моделей второго каскада выбран нечетко-логический подход, а сами модели представляют собой согласованные базы нечетких продукционных правил [9]. Процедуры построения и использования предлагаемых моделей рассмотрим на примере модели  $ME_j^k$  оценки затрат  $E_j^k$  на электрическую энергию.

Этап 1. Задание входных и выходной нечетких переменных модели.

Входными нечеткими переменными модели считаются управляющие параметры  $Tg_0^{jk}, Tg_n^{jk}$  и  $Wg^{jk}$ . Выходная нечеткая переменная — затраты  $E_j^k$  на электрическую энергию.

Этап 2. Построение лингвистических шкал для входных и выходной нечетких переменных.

Для типизации описания зададим одни те же термы всех нечетких переменных  $\{L — малый, M — средний, H — большой\}$ .

Этап 3. Формирование базы нечетких продукционных правил модели.

По результатам этапа формируется совокупность согласованных правил следующего типа:

$$\Pi_1: \text{Если } Tg_0^{jk} \text{ есть } L \text{ И } Tg_n^{jk} \text{ есть } L \text{ И } Wg^{jk} \text{ есть } L, \\ \text{То } E_j^k \text{ есть } L; \\ \dots$$

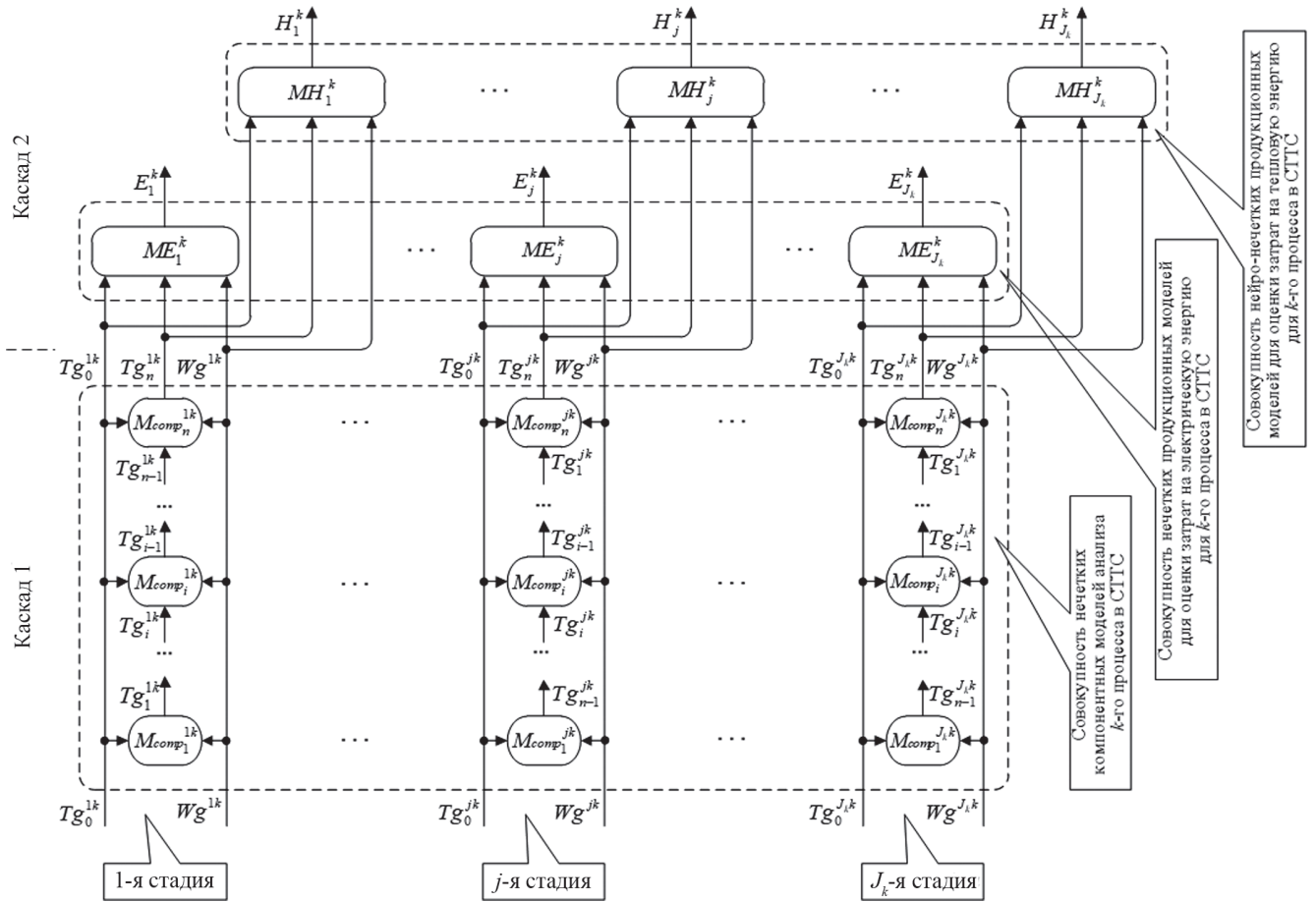


Рис. 2. Организация взаимодействия нечетких компонентных моделей  $\{M_{comp_i}^{jk} \mid i=1...n, j=1...J_k\}$  первого каскада с моделями  $\{ME_j^k \mid j=1...J_k\}$  и  $\{MH_j^k \mid j=1...J_k\}$  второго каскада для  $k$ -го процесса в СТТС

$\Pi_y$ : Если  $Tg_0^{jk}$  есть М И  $Tg_n^{jk}$  есть М И  $Wg^{jk}$  есть М,  
То  $E_j^k$  есть М;

...

$\Pi_y$ : Если  $Tg_0^{jk}$  есть Н И  $Tg_n^{jk}$  есть Н И  $Wg^{jk}$  есть Н,  
То  $E_j^k$  есть Н.

Оценка затрат  $E_j^k$  на электрическую энергию с использованием построенной модели выполняется на основе известных алгоритмов нечеткого логического вывода [9].

Аналогично строится и использование всех моделей  $\{ME_j^k \mid j=1...J_k, k=1...K\}$ ,  $\{MH_j^k \mid j=1...J_k, k=1...K\}$ .

Во 2-й каскад также входят модели

$$\{MR_j^k \mid j=1...J_k, k=1...K\},$$

реализующие зависимости  $FR_j^k$  и предназначенные для оценки рисков нарушения  $j$ -ых стадий ( $j=1...J_k$ ) для  $k$ -ых ( $k=1...K$ ) процессов производства окатышей.

Они строятся на основе нечетко-логического подхода и представляют собой согласованные базы нечетких производственных правил. Входными нечеткими переменными для модели  $MR_j^k$  служат переменные  $E_j^k, H_j^k$ , а выходной —  $R_j^k$ . Пример восстановленной зависимости

ти  $R_j^k = FR_j^k(E_j^k, H_j^k)$ , реализуемой этой моделью, изображен на рис. 3.

Каскад 3 включает совокупности нечетких производственных моделей  $\{MFE_k \mid k=1...K\}$  и  $\{MFH_k \mid k=1...K\}$ ,

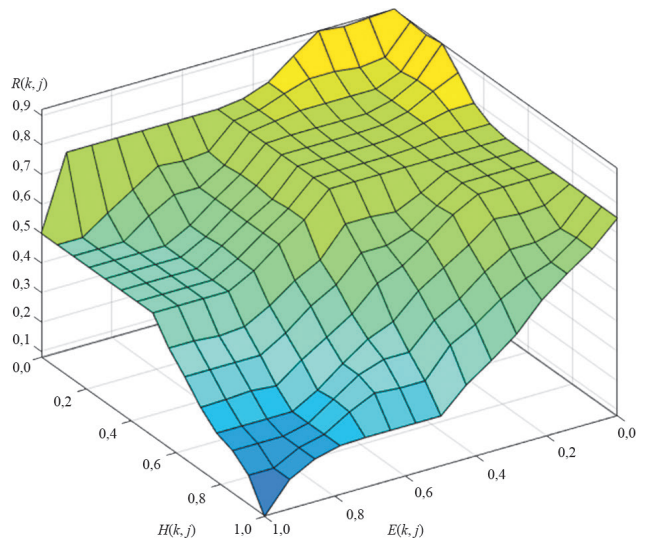


Рис. 3. Пример зависимости  $R_j^k = FR_j^k(E_j^k, H_j^k)$ , реализуемой моделью  $MR_j^k$

используемых для оценки затрат  $E_k$  и  $H_k$  на электрическую и тепловую энергию для  $k$ -ых процессов производства окатышей.

В таблице 1 кратко продемонстрировано построение моделей третьего каскада на примере модели  $MFE_k$  для оценки затрат  $E_k$  на электрическую энергию для  $k$ -го процесса, реализующей зависимость  $E_k = FE_k(E_1^k, \dots, E_j^k, \dots, E_{J_k}^k)$ .

Таблица 1

**Фрагмент структуры базы нечетких производственных правил модели  $MFE_k$  для оценки затрат  $E_k$  на электрическую энергию для  $k$ -го процесса**

Номер правила	Нечеткие входные переменные					Нечеткая выходная переменная $E_k$
	$E_1^k$	...	$E_j^k$	...	$E_{J_k}^k$	
$\Pi_1$	$L$	...	$L$	...	$L$	$L$
...	...	...	...	...	...	...
$\Pi_g$	$M$	...	$M$	...	$M$	$M$
...	...	...	...	...	...	...
$\Pi_Q$	$H$	...	$H$	...	$H$	$H$

Помимо моделей  $\{MFE_k | k = 1 \dots K\}$  и  $\{MFH_k | k = 1 \dots K\}$  в состав третьего каскада входят модели  $MFR_k | k = 1 \dots K\}$  оценки рисков нарушения процессов в СТТС, реализующие зависимость  $R_k = FR_k(R_1^k, \dots, R_j^k, \dots, R_{J_k}^k)$ .

С учетом выбранной стратегии оценивания и управления рисками могут быть использованы различные модели оценки рисков  $R_k$ , например в типовом случае:

$$R_k = \max(R_1^k, \dots, R_j^k, \dots, R_{J_k}^k), k = 1 \dots K.$$

Каскад 4 содержит нечеткие производственные модели  $MFE$  и  $MFH$ , необходимые для оценки общих затрат  $E$  и  $H$  на электрическую и тепловую энергию.

Пример фрагмента структуры базы правил модели  $MFE$ , входными нечеткими переменными которой являются нечеткие выходные переменные  $E_k$  моделей третьего каскада  $\{MFE_k | k = 1 \dots K\}$ , а выходной нечеткой переменной —  $E$ , показан в табл. 2.

Таблица 2

**Фрагмент структуры базы нечетких производственных правил модели  $MFE$  для оценки затрат  $E$  на электрическую энергию**

Номер правила	Нечеткие входные переменные					Нечеткая выходная переменная $E$
	$E_1$	...	$E_k$	...	$E_K$	
$\Pi_1$	$L$	...	$L$	...	$L$	$L$
...	...	...	...	...	...	...
$\Pi_u$	$M$	...	$M$	...	$M$	$M$
...	...	...	...	...	...	...
$\Pi_U$	$H$	...	$H$	...	$H$	$H$

Аналогично выполняется построение модели  $MFH$  для оценки общих затрат  $H$  на тепловую энергию.

Помимо моделей  $E$  и  $H$  в состав четвертого каскада входит модель  $MR$  оценки обобщенного риска нарушения технологических процессов в СТТС в целом, которая реализует зависимость  $R = FR_k(R_1, \dots, R_k, \dots, R_K)$ .

С учетом выбранной стратегии оценивания и управления рисками могут быть использованы различные модели оценки рисков  $R$ , например в типовом случае:

$$R = \max(R_1, \dots, R_k, \dots, R_K).$$

**Реализация предлагаемого подхода к комплексному управлению рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процессов в сложных теплотехнологических системах**

Предлагаемый подход к комплексному управлению рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процессов в СТТС заключается, во-первых, в задании различных сочетаний управляющих параметров  $Tg_0^{jk}, Tg_n^{jk}, Wg^{jk}$  на каждой стадии для всех технологических процессов в СТТС с учетом накладываемых ограничений, в том числе рисков нарушения  $j$ -х стадий  $k$ -х технологических процессов  $R_j^k \leq R_{j(per)}^k$ , во-вторых, в моделировании и определении подобных сочетаний управляющих параметров, которые повысят ресурсо- и энергоэффективность технологических процессов в СТТС при непревышении допустимого уровня обобщенного риска нарушения технологических процессов в СТТС в целом.

Итоги комплексного управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процесса сушки фосфоритовых окатышей в обжиговой конвейерной машине (в виде результирующих нечетких множеств) при непревышении уровня риска технологического процесса, равного 0,6 ( $R_1 \leq 0,6$ ), представлены на рис. 4. На рисунке 5 они показаны в виде дефаззифицированных (приведенных к четкому виду) значений  $E_{dry}^{*k}$ .

**Заключение**

Представлена постановка задачи комплексного управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процессов на примере сложных теплотехнологических систем.

Разработана каскадно-композиционная модель комплексного управления рисками, основанная на нечетком подходе и методах гибридизации и комплексирования нечетких моделей и включающая в себя совокупности:

- нечетких компонентных моделей для анализа процессов в СТТС на первом каскаде;
- моделей для оценки затрат на электрическую и на тепловую энергию и модели оценки рисков нарушения отдельных стадий различных процессов в СТТС на втором каскаде;

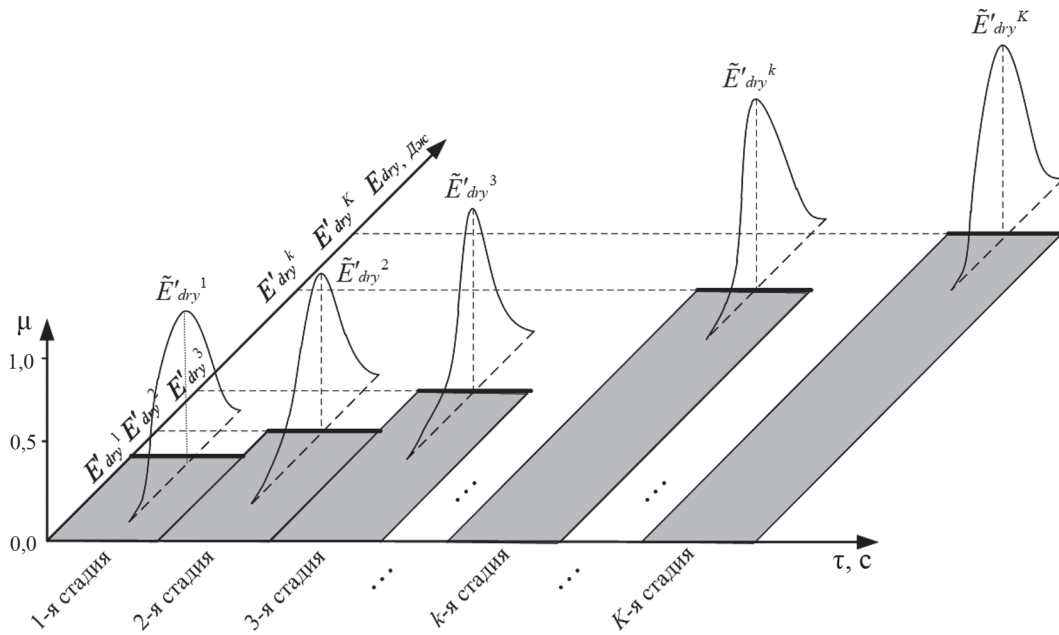


Рис. 4. Результаты оценки ресурсо- и энергосбережения для различных стадий процесса сушки окатышей в обжиговой конвейерной машине при  $R_1 \leq 0,6$

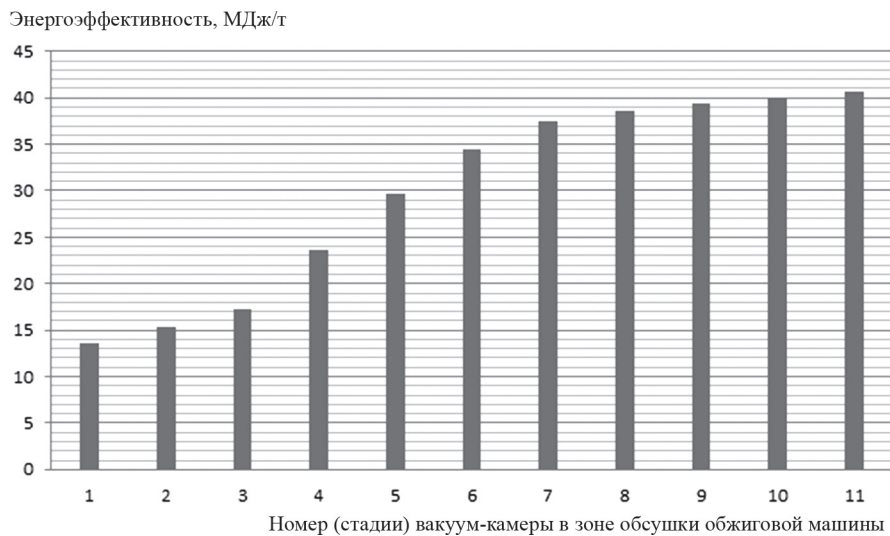


Рис. 5. Дефазифицированные результаты оценки ресурсо- и энергосбережения для различных стадий процесса сушки окатышей в обжиговой конвейерной машине при  $R_1 \leq 0,6$

- моделей для оценки затрат на электрическую и на тепловую энергию и модели оценки рисков нарушения различных процессов в СТТС на третьем каскаде;
- модели для оценки общих затрат на электрическую и на тепловую энергию и модель оценки обобщенного риска нарушения процессов в СТТС в целом на четвертом каскаде.

Описан предложенный подход к решению задачи комплексного управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процессов в СТТС с использованием разработанной каскадно-композиционной модели, заключающийся в задании различных сочетаний управляющих параметров на каждой стадии

для всех процессов в СТТС с учетом накладываемых на эти процессы ограничений, моделирования и определения сочетаний управляющих параметров, обеспечивающих повышение ресурсо- и энергоэффективности при непревышении допустимого уровня рисков нарушения самих процессов.

Даны экспериментальные результаты комплексного управления рисками с использованием предложенной модели и подхода на примере процесса сушки фосфоритовых окатышей в обжиговой конвейерной машине. Полученные результаты в дальнейшем планируется использовать для комплексного управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процесса для различных процессов в СТТС.

## Литература

## References

1. ГОСТ Р 51897—2002. Менеджмент риска. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 51898—2002. Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты.
3. Butkarev A.A., Butkarev A.P., Zhomiruk P.A., Martynenko V.V., Grinenko N.V. Pellet Heating on Modernized OK-124 Roasting Machine // Steel in Translation. 2010. V. 40. No. 3. Pp. 239—242.
4. Fan X.-H., Gan M., Jiang T., Yuan L.-S., Chen X.-L. Influence of Flux Additives on iron Ore Oxidized Pellets // J. Central South University of Technology. 2010. V. 17. No. 4. Pp. 732—737.
5. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the Structural and Mineralogical Changes of Tunisian Phosphorite During Calcinations // J. Thermal Analysis and Calorimetry. 2015. V. 119. No. 1. Pp. 265—271.
6. Luis P., Van der Bruggen B. Exergy Analysis of Energy-intensive Production Processes: Advancing Towards a Sustainable Chemical Industry // J. Chemical Techn. and Biotech. 2014. V. 89. No. 9. Pp. 1288—1303.
7. Butkarev A.A., Butkarev A.P., Ptichnikov A.G., Tumanov V.P. Boosting the Hot-blast Temperature in Blast Furnaces by of Optimal Control System // Steel in Translation. 2015. V. 45. No. 3. Pp. 199—206.
8. Bokovikov B.A., Bragin V.V., Shvydkii V.S. Role of the Thermal-inertia Zone in Conveyer Roasting Machines // Steel in Translation. 2014. V. 44. No. 8. Pp. 595—601.
9. Petrosino A., Fanelli A.M., Pedrycz W. Fuzzy Logic and Applications. Springer, 2011.
10. Borisov V.V. Hybridization of Intellectual Technologies for Analytical Tasks of Decision-making Support // J. Computer Eng. and Informatics. 2014. V. 2. Iss. 1. Pp. 148—156.
11. Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I., Meshal'kin V.P. Multicomponent Fuzzy Model for Evaluating the Energy Efficiency of Chemical and Power Engineering Processes of Drying of the Multilayer Mass of Phosphoresce Pellets // Theoretical Foundations of Chemical Eng. 2018. V. 52. No. 5. Pp. 786—799.
12. 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.

1. GOST R 51897—2002. Menedzhment riska. Terminy i opredeleniya. (in Russian).
2. GOST R 51898—2002. Aspekty Bezopasnosti. Pravila Vklyucheniya v Standarty. (in Russian).
3. Butkarev A.A., Butkarev A.P., Zhomiruk P.A., Martynenko V.V., Grinenko N.V. Pellet Heating on Modernized OK-124 Roasting Machine. Steel in Translation. 2010;40;3:239—242.
4. Fan X.-H., Gan M., Jiang T., Yuan L.-S., Chen X.-L. Influence of Flux Additives on iron Ore Oxidized Pellets. J. Central South University of Technology. 2010;17;4:732—737.
5. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the Structural and Mineralogical Changes of Tunisian Phosphorite During Calcinations. J. Thermal Analysis and Calorimetry. 2015;119; 1:265—271.
6. Luis P., Van der Bruggen B. Exergy Analysis of Energy-intensive Production Processes: Advancing Towards a Sustainable Chemical Industry. J. Chemical Techn. and Biotech. 2014; 89; 9:1288—1303.
7. Butkarev A.A., Butkarev A.P., Ptichnikov A.G., Tumanov V.P. Boosting the Hot-blast Temperature in Blast Furnaces by of Optimal Control System. Steel in Translation. 2015;45;3:199—206.
8. Bokovikov B.A., Bragin V.V., Shvydkii V.S. Role of the Thermal-inertia Zone in Conveyer Roasting Machines. Steel in Translation. 2014;44;8:595—601.
9. Petrosino A., Fanelli A.M., Pedrycz W. Fuzzy Logic and Applications. Springer, 2011.
10. Borisov V.V. Hybridization of Intellectual Technologies for Analytical Tasks of Decision-making Support. J. Computer Eng. and Informatics. 2014;2;1:148—156.
11. Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I., Meshal'kin V.P. Multicomponent Fuzzy Model for Evaluating the Energy Efficiency of Chemical and Power Engineering Processes of Drying of the Multilayer Mass of Phosphoresce Pellets. Theoretical Foundations of Chemical Eng. 2018;52;5:786—799.
12. Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I. Podkhod k Issledovaniyu Teploprovodnosti Nechetkimi Chislennymi Metodami v Usloviyakh Neopredelennosti Teplofizicheskikh Kharakteristik. Sistemy Upravleniya, Svyazi i Bezopasnosti. 2017;3:73—83. (in Russian).

## Сведения об авторах:

**Борисов Вадим Владимирович** — доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники Смоленского филиала НИУ «МЭИ», e-mail: vbog67@mail.ru

**Дли Максим Иосифович** — доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий кафедрой информационных технологий в экономике и управлении Смоленского филиала НИУ «МЭИ», e-mail: midli@mail.ru

**Бобков Владимир Иванович** — доктор технических наук, и.о. заведующего кафедрой высшей математики Смоленского филиала НИУ «МЭИ», e-mail: vovabobkoff@mail.ru



**Information about authors:**

**BorisoV Vadim V.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Computer Engineering Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: vbor67@mail.ru

**Dli Maksim I.** — Dr.Sci. (Techn.), Deputy Director for Research, Head of Management and Information Technology in Economy Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: midli@mail.ru

**Bobkov Vladimir I.** — Dr.Sci. (Techn.), Acting Head of Higher Mathematics Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: vovabobkoff@mail.ru

**Работа выполнена при поддержке:** Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 13.9597.2017/БЧ)

**The work is executed at support:** Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 13.9597.2017/БЧ)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 06.11.2018

**The article received to the editor:** 06.11.2018