

## ПОЛИМОДЕЛЬНОЕ СТРУКТУРНО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ

А. В. СПЕСИВЦЕВ

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,  
199178, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: sav2050@gmail.com*

При автоматизации процессов мониторинга состояния сложных технических объектов (СТО) основой представления знаний являются вычислительные модели (ВМ). Множество принципов и методов построения ВМ чрезвычайно богато, что обусловлено разнообразием как самих СТО, так и решаемых задач мониторинга. Подобные ситуации порождают неопределенность процедуры выбора структуры ВМ, особенно на начальных этапах синтеза интеллектуальных информационных технологий мониторинга состояния СТО. Однако правильному выбору способствует переход от конструкций метрических пространств к конструкциям более общего порядка — топологическим пространствам. Такой подход использован при создании интеллектуальной информационной технологии синтеза ВМ состояния пирометаллургического агрегата большой единичной мощности в сочетании с аппаратом построения нечетко-возможностных моделей. При этом предложен нечетко-возможностный подход, который позволяет описать сложную многофакторную модель СТО с применением семантической сети и полиномиального преобразования НЕ-факторов, суть которого состоит в формализации вербальных знаний эксперта в математическую модель в виде аналитической функции.

**Ключевые слова:** *структурно-топологическое описание, сложный технологический объект, вычислительная модель, экспертные знания, нечетко-возможностный подход*

**Введение.** Понятие сложного объекта, в том числе сложного технического (СТО), достаточно полно описано в технической литературе, хотя в каждой предметной области (Про) ему присваивают специфические особенности. Техническое состояние современных СТО описывается многими переменными. Задачи оценивания состояния СТО формулируются и описываются как вербально на профессиональном языке данной отрасли знаний, так и с использованием соответствующих классов моделей. При этом постановка и подготовка альтернативных решений по отнесению оценки фактического состояния СТО к определенному заранее классу типовых состояний предполагает использование не только количественной, но и качественной (вербальной, органолептической) информации. Под состоянием СТО в конкретный момент времени понимается множество значений его параметров (характеристик), определяемых контекстом решаемой задачи либо поставленной цели и позволяющих лицу, принимающему решения (ЛПР), своевременно и обоснованно считать объект работоспособным или неработоспособным [1, 2].

Влияние на СТО множества различных по физической природе факторов, взаимодействие с окружающей средой, увеличение числа входящих в его состав элементов, а также стремительный рост числа взаимосвязей между ними, не полностью устраняемая неопределенность процедур оценивания состояния объекта, ограниченность сведений по взаимовлияниям между ними часто приводят к необходимости использования знаний и опыта экспертов [2, 3].

Поэтому остро встает задача формализованного описания состояния конкретного СТО или его элементов в удобном для компьютерной обработки виде.

Перспективным направлением представляется создание новых поколений интеллектуальных систем (ИС) с использованием принципиально нового класса встроенных — киберфизических (КФС) — систем. В таких условиях исследование состояния каждого объекта или отдельного явления следует рассматривать как создание сложной системы с обязательными элементами контроля и диагностирования в динамике их управления. В пользу такого посыла свидетельствуют не только исследования последних десятилетий во многих областях [4—6], но и объективные обобщения сложившихся еще в середине прошлого столетия мнений, особенности которых в явном виде для природных, общественных и техносферных систем сформулированы академиком Н. Н. Моисеевым [7]: взаимозависимость свойств и организации; бесперспективность применения линейных аппроксимаций; стохастизирующий фактор; невыводимость свойств системы как целого из свойств ее элементов; невозпроизводимость поведения по начальным данным; неопределимость и логическая недоказуемость законов причинности; самоподобие; саморазвитие.

Таким образом, обобщенная структура и содержание решаемых задач, связанных с разработкой ВМ и технологий их применения, точно не определены и допускают появление мягких измерений и вычислений, связанных НЕ-факторами [2, 5, 6].

Как следует из перечисленных характеристик СТО, создание ВМ и управление ими требует использования различных сложных математических подходов и методов, что подтверждает известный закон Эшби: разнообразие управляющей системы должно быть не меньше разнообразия управляемого объекта [8].

В настоящей статье рассматривается проблема синтеза топологического подхода (как стратегии корректной постановки задачи распознавания состояния СТО) и нечетково-возможностного подхода (как тактического приема описания и исследования конкретного СТО). Такой путь исследований представляется фундаментальным для „преодоления сложности“ в создании систем управления СТО, принадлежащих к различным предметным областям [2, 4].

**Сложный технический объект как объект мониторинга и управления.** „Преодоление сложности“ покажем на примере построения интеллектуальной измерительно-диагностической системы (ИИДС) оценивания состояния печи Ванюкова (ПВ) и управления металлургическим процессом, протекающим в ней [9, 10]. Поскольку состояние промышленного объекта описывается сотнями переменных и дополнительно снимаемыми показаниями тысяч первичных приборов, то при синтезе ИИДС потребовалось создание модели „виртуальной печи“ со всеми службами и механизмами, вплоть до положения заслонок для измерения расходов в трактах подачи кислорода, воздуха или природного газа и др.

ИИДС ПВ, архитектура которой приведена на рис. 1, связывает основные физические и информационные потоки, обеспечивающие функционирование процесса, выполнение производственных заданий и „жизнедеятельность“ агрегата в целом.

Общая концепция объединения вычислительных моделей в систему для управления ПВ по степени согласованности схематически приведена на рис. 2 (цифрами обозначены номера условных конфликтов). Такая постановка задачи управления сложностью применительно к оцениванию состояния СТО справедлива для представления информации как в метрических пространствах, так и в виде формализованных экспертных знаний на основе нечетково-возможностного подхода.

Применительно к рассматриваемой задаче следует обратить внимание на одно важное обстоятельство: при построении показателя „степень согласованности“ процесса эксперт ввел в его факторное пространство вместе с параметрами, характеризующими загрузку шихтовых материалов, параметры дутья, параметры, характеризующие качество конечной продукции, а

также тепловой режим (см. рис. 2), связав естественным образом степень взаимообусловленности ранее разомкнутых контуров управления загрузки и подачи дутья в рамках единой интегральной модели, которая и стала базой знаний для интеллектуализации существующей АСУ ТП.

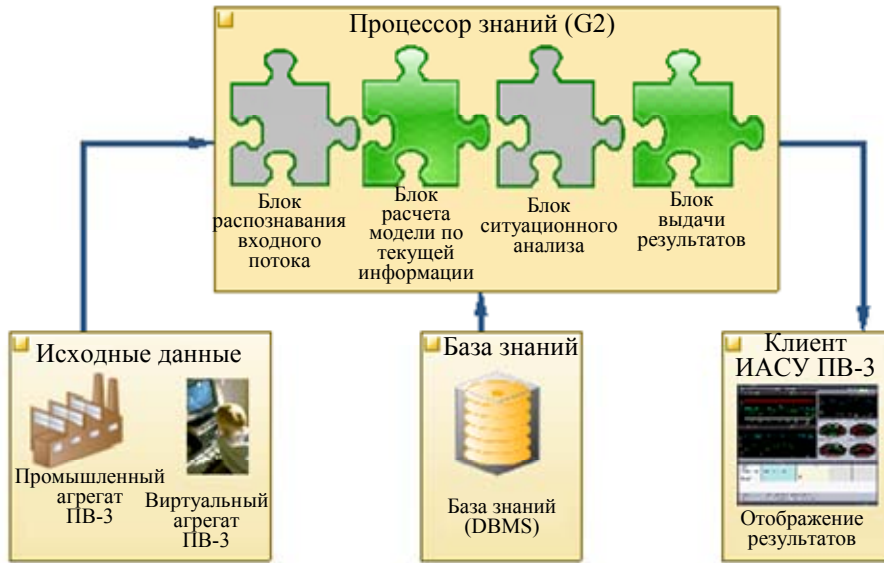


Рис. 1

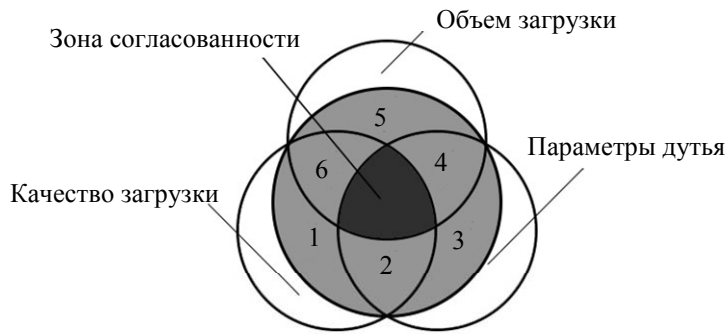


Рис. 2

Нечетко-возможностный подход к извлечению, структуризации, формализации и использованию явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния СТО на концептуальном уровне описания может быть представлен в следующем виде [2, 3]:

$$\langle X, \Phi_z, E_{zпр}, F_z, M_z, Z'_э(q,t,\mu), Z_{э.пр}(q,t,\mu), Z_{э.н}(q,t,\mu), Z_{э.с}(q,t,\mu), K, Y/\Xi \rangle,$$

где  $\Phi_z$  — множество методов извлечения знаний;  $E_{zпр}$  — множество методов представления знаний;  $F_z$  — множество методов и алгоритмов формализации знаний;  $M_z$  — множество условий, необходимых для выполнения всех операций при построении моделей;  $Z'_э(q,t,\mu)$  — метазнания эксперта, содержащие профессиональные явные  $Z_{э.пр}(q,t,\mu)$ , неявные  $Z_{э.н}(q,t,\mu)$  и смежные  $Z_{э.с}(q,t,\mu)$  знания;  $K$  — множество показателей качества решения задач оценивания состояния СТО;  $Y/\Xi$  — фактор-множество классов состояния СТО, к одному из которых следует отнести результат определения.

В результате использования перечисленных методов явные и неявные экспертные знания могут быть представлены нечетко-возможностными моделями [2, 9, 10] полиномиального типа.

Эффективным методом преодоления проблемы сложности при создании вычислительных моделей оценивания состояния СТО в общей семантической структуре ИИДС является построение G-моделей, представляющих собой одну из разновидностей семантических сетей [4]. G-модель можно выразить в виде кортежа

$$M_G = \langle X, R_G, P_G, \Delta_G \rangle,$$

где  $X = \{x_i, i = 1, \dots, n\}$  — множество переменных, характеризующих состояние СТО;  $P_G$  — конечное множество предикатов параметров из  $X$ ;  $\Delta_G$  — отображение  $R_G \rightarrow P_G$ .

На рис. 3 представлена трехступенчатая операторная схема СТО в виде G-модели на множестве параметров  $X$  и множестве операторов  $\Phi_G$ :  $M_G = \langle X, \Phi_G \rangle$ , у которой

$$X = \{x_1^1, \dots, x_6^1, x_1^2, \dots, x_8^2, x_1^3, \dots, x_{11}^3\},$$

$$\Phi_G = \{x_0 = \varphi_0(x_1^1, \dots, x_6^1); x_1^1 = \varphi_1(x_1^2, x_2^2, x_3^2), \dots, x_6^1 = \varphi_6(x_4^2, \dots, x_8^2);$$

$$x_1^2 = \varphi_7(x_1^3, x_2^3), x_2^2 = \varphi_8(x_3^3, x_4^3); \dots, x_8^2 = \varphi_{15}(x_{11}^3)\}.$$

В данном случае G-модель сформирована для целей мониторинга неизмеряемой переменной [Cu] — содержания меди в штейне в момент плавления исходной порции шихты определенного состава. При этом множество операторов задается функциями любого вида, в том числе и нечетко-возможностными моделями, с требуемой степенью адекватности описывающими соответствующие состояния элементов или подсистем СТО, а  $x_0(t)$  может выступать, например, как качество продукции в момент измерения.

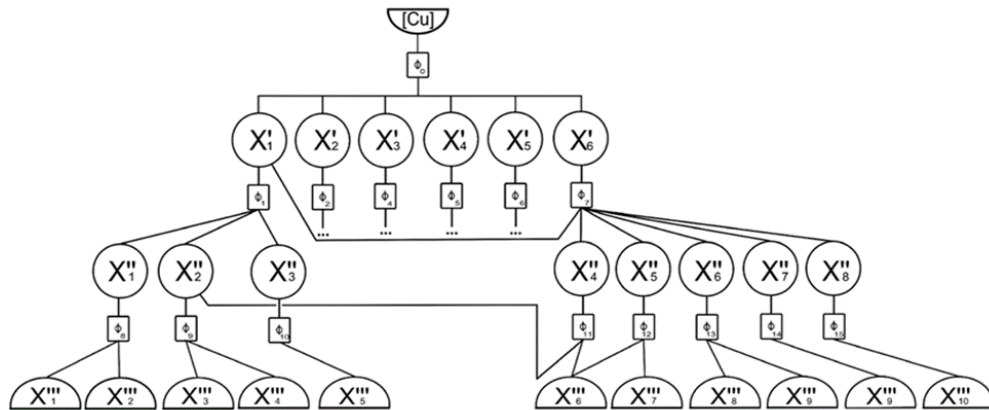


Рис. 3

Можно показать, что описание причинно-следственных связей, определяющих содержание меди в штейне  $Y_4$ , соответствующее G-модели рис. 3, при их нечетко-возможностной интерпретации принимает вид:

$$Y_4 = 57,820 + 5,391x_{13} + 0,875x_{14} + 0,820x_5 - 0,273x_{16} - 0,547x_7 +$$

$$+ 0,547x_{11} - 0,383x_{13}x_7 - 0,164x_{13}x_{11} - 0,164x_{14}x_7 - 0,164x_{14}x_{11} -$$

$$- 0,164x_5x_{16} - 0,219x_5x_{11} - 0,766x_{16}x_7 + 0,273x_{13}x_{14}x_{16}$$

$$+ 0,711x_{13}x_{16}x_7 - 0,164x_{14}x_{16}x_{11} - 0,219x_5x_{16}x_{11}, \quad (1)$$

где в стандартизованном виде представлены:  $X_{13}$  — удельный расход кислорода, м<sup>3</sup>/т;  $X_{14}$  — доля богатых оборотов от металлосодержащих в шихте, б/р;  $X_5$  — температура расплава, °С;  $X_{16}$  — содержание кислорода в кислородно-воздушной смеси, %;  $X_7$  — расход природного газа, м<sup>3</sup>/ч;  $X_{11}$  — доля техногенных составляющих от металлосодержащих, б/р.

В этом случае нечетко-возможностная модель степени согласованности процесса по фактическим значениям загрузки и дутьевых режимов с заданным содержанием меди в штейне примет следующий вид:

$$Y_1 = 0,4383 - 0,0352x_1 - 0,1008x_2 - 0,0914x_3 - 0,0352x_4 - 0,0164x_5 +$$

$$+ 0,0164x_1x_2 + 0,0258x_1x_3 + 0,0539x_2x_3 + 0,0164x_2x_4 + 0,0164x_2x_5 +$$

$$+ 0,0258x_3x_4 + 0,0164x_3x_5 - 0,0164x_2x_3x_5, \quad (2)$$

где в стандартизованном виде представлены:  $X_1$  — отклонение объема загрузки флюсов от заданной нормы, т/ч;  $X_2$  — нормированное отклонение удельного расхода кислорода на тонну металлосодержащих, б/р;  $X_3$  — отклонение расчетного содержания меди в штейне от норми-

руемого, %;  $X_4$  — расчетное содержание меди в шлаке, %;  $X_5$  — температура расплава, °С;  $Y_1$  — степень согласованности.

С помощью ИИДС ПВ на основании исходной информации, в режиме реального времени получаемой из АСУ ПВ и других информационных систем, рассчитывается текущее состояние процесса, анализируется наличие технологического дисбаланса и в случае возникновения „конфликтных ситуаций“ происходят их идентификация и формирование сообщения оператору с предложением сценария разрешения конфликта. Система выступает, таким образом, в роли „советчика“ и визуализирует данные информационных каналов на автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора.

Общая постановка задачи управления сложностью справедлива для любого вида представления информации как при моделировании, так и при формализации экспертных знаний. Представление экспертных знаний в виде нечетко-возможностных моделей для последующей компьютерной обработки расширяет возможности реализации закона Эшби в построении сложных систем управления СТО [8]. Поэтому целесообразно подробнее рассмотреть обобщающий методологический принцип создания систем управления СТО: переход от конструкций метрических пространств к топологическим пространствам [4].

**Связь этапов создания и использования вычислительной модели для распознавания состояния сложного объекта.** Производственные процессы сопровождаются, как правило, огромными информационными потоками различного уровня и назначения. В работе [4] поставлена и решена фундаментальная задача потоково-многоуровневого (ПМ) распознавания технического состояния СТО, независимо от его сложности, специфики и принадлежности к ПрО. В качестве примера приведем структурно-топологическое описание состояния СТО — плавильного агрегата ПВ большой единичной мощности и осуществляемого в нем пирометаллургического процесса.

Можно показать, что при решении задач структурно-потоково-многоуровневого (СПМ) распознавания состояния диаграммы связи этапов создания и использования соответствующей вычислительной модели принимают вид, показанный на рис. 4. Здесь соответствующие множества вместе со своими топологиями  $\tau$  составляют топологические пространства.

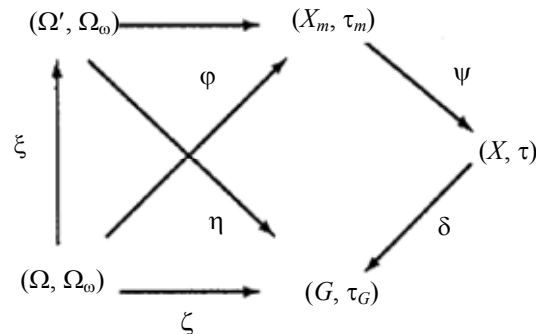


Рис. 4

На рис. 4 изображены базовые множества, отношения между которыми необходимы для анализа диаграммы [4]:  $(\Omega, \tau_\omega) = \{\omega\}$  — множество технических состояний, способных проявляться на СТО;  $(\Omega', \tau_\omega) \subset (\Omega, \tau_\omega)$  — множество технических состояний, являющееся обучающим множеством (для систем распознавания с обучением);  $(X_m, \tau_m) = \{x_m\}$  — множество значений измеряемых параметров СТО;  $(X, \tau) = \{x\}$  — множество (словарь) признаков, формирующее при распознавании некоторое признаковое пространство;  $(G, \tau_G) = \{g\}$  — множество решений (управляющих воздействий) соответствующей надсистемы для рассматриваемой системы распознавания — системы управления, функционирующей совместно с СТО.

Интерпретация отображений  $\zeta$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ,  $\phi$  дана ниже применительно к процессу ПВ.

**Пример.** Управление любым СТО, как показывает практика [9, 10], осуществляет оператор-технолог, выступающий при отсутствии „советчика оператору“ одновременно и в каче-

стве лица, осуществляющего контроль и диагностику состояния процесса функционирования СТО, и как ЛПР. Таким действиям на формальном уровне описания можно сопоставить следующее отображение

$$\zeta: (\Omega, \tau_\omega) \rightarrow (G, \tau_G). \quad (3)$$

В этом случае (см. рис. 4) оператор-технолог может быть отнесен к ИИДС [10]. При этом оператор выступает экспертом, осуществляет распознавание состояния СТО в реальном масштабе времени, вырабатывает соответствующее управляющее решение на уровне ЛПР и осуществляет воздействие на технологический процесс.

Однако при создании автоматизированной обобщенной вычислительной модели СПМ приходится идти „окружным путем“ за счет реализации композиции отношений:

$$\zeta = \delta \circ \psi \circ \varphi: (\Omega, \tau_\omega) \rightarrow (G, \tau_G). \quad (4)$$

Разберем детально этот путь получения и преобразования информации. Допустимо считать, что способ реализации отображения

$$\varphi: (\Omega, \tau_\omega) \rightarrow (X_m, \tau_m) \quad (5)$$

ставит в соответствие каждому элементу  $\omega \in \Omega$  его образ (точку) в измеряемом пространстве  $(X_m, \tau_m)$  и определяет результаты наблюдения или измерения. При этом считается, что в производственных условиях получение измеряемой информации не представляет трудностей. Однако на практике такая ситуация не выглядит тривиальной ввиду отсутствия устойчивых зависимостей между многими показателями информационных каналов по вполне объективным причинам [9—11].

Более конкретно следует остановиться на отображениях  $\psi$  и  $\delta$ . Так, отображение вычисления

$$\psi: (X_m, t_m) \rightarrow (X, \tau) \quad (6)$$

каждому элементу (точке) измеряемого пространства однозначно сопоставляет элемент (точку) пространства параметров состояния СТО. Это отображение дополняется посредством вычисления значений недостающих параметров состояния объекта вида  $X_c$ , рассчитываемых на основе измеряемых значений  $X_m$ , как было уже ранее показано на примере вычисления меди в штейне, по нечетко-возможностной модели вида (1).

Таким образом, в условиях производства для реализации отношения  $\psi$  необходимо создавать множество различных моделей, например вида (1) или (2), и программ для корректного вычисления параметров.

Необходимо уточнить, что композиция отношений  $\varphi$  и  $\psi$  задает соответствие элементов (точек) исходного пространства  $(\Omega, \tau_\omega)$  некоторой точке признакового пространства  $(X, \tau)$ :

$$\psi \circ \varphi: (\Omega, \tau_\omega) \rightarrow (X, \tau). \quad (7)$$

В формировании пространства  $(X, \tau)$  участвуют, таким образом, фактически все принятые во внимание особенности применяемых методов, построенные локальные модели и программы, обеспечивающие выработку правильного решения по оцениванию состояния ПВ в каждый момент времени.

Отображение следующего вида:

$$\delta: (X, \tau) \rightarrow (G, \tau_G) \quad (8)$$

каждой области в пространстве параметров состояний  $(X, \tau)$  сопоставляет элемент пространства классов  $(G, \tau_G)$ .

Таким образом, в результате проведенных рассуждений при организации СПМ распознавания состояния СТО может быть предложен новый „обходной“ путь, базирующийся на композиции отображений  $\varphi$  (5),  $\psi$  (6) и  $\delta$  (8), представленных на диаграмме (рис. 4), и приводящий к итоговому результату  $\varphi \circ \psi \circ \delta: (\Omega, \tau_\omega) \rightarrow (G, \tau_G)$ . При этом все перечисленные отображения формируются на основе явных и неявных экспертных знаний о СТО (в нашем случае о ПМ и происходящих в ней процессах) при их извлечении, представлении и формализации на основе нечетко-возможностного подхода.

Рассмотрим содержание перечисленных этапов диаграммы рис. 4 на примере построения и реализации СПМ распознавания состояния технологического процесса медного производства.

**Структурно-топологическое описание состояния технологического процесса.** Рассмотрим более детально (см. рис. 1) предложенную композицию отображений (7)  $\psi^\circ\varphi: (\Omega, \tau_\omega) \rightarrow (X, \tau)$  как наиболее „недоопределенную“ часть диаграммы, представленной на рис. 4, с точки зрения создания вычислительных моделей и использования многочисленного арсенала математических методов.

Так, множество значений  $X$  образуется из двух подмножеств:  $X_m$  — подмножества измеряемых значений параметров технического состояния СТО и  $X_c$  — подмножества вычисляемых (на основе разработанных моделей) параметров, характеризующих состояние технологического процесса, реализуемого в ПВ, а также работоспособность самого агрегата (например, температуру воды на сливе из кессонов).

Очевидное различие этих подмножеств порождает различие применяемых методологических и методических подходов к их определению: измеряемые значения  $X_m$ , как правило, формируются специальными приборами и попадают в множество  $X$  в заданном формате, а вычисляемые значения  $X_c$  получаются как результат применения различных математических методов построения расчетных моделей, в том числе заданных (как будет показано далее) в нечетко-возможностной форме.

В производственной практике встречаются переменные, которые определяются и используются экспертами на качественном уровне для описания определенного состояния СТО. Примером такой переменной является, как показано выше, введенная искусственно степень „согласованности процесса“ (рис. 2), хотя ни в одной технологической инструкции ПВ она не прописана. В других случаях количественную переменную, например температуру расплава в реакционной зоне печи, из-за особенностей производства объективно невозможно измерить ни одним из существующих способов. Однако такая переменная очень важна для отслеживания оператором-технологом полноты протекания физико-химических реакций в высокотемпературной (1350—1400 °С) ванне расплава и обеспечения кондиционной продукции плавки. В таких случаях приходится строить причинно-следственные зависимости в рассматриваемой предметной области на основе практического опыта и экспертных знаний с использованием нечетко-возможностного подхода [9, 10].

Так, в моделях (1) и (2) присутствует в качестве существенной переменной температура расплава  $X_5$ , значения которой можно вычислить с использованием нечетко-возможностной модели такого же типа:

$$X_5 = 1322,47 + 2,84x_{10} + 13,59x_{13} - 5,91x_{19} + 7,34x_7 + 5,09x_{10}x_{13} + 5,09x_{10}x_7 - 1,91x_{19}x_7 - 1,97x_{19}x_{20} + 1,97x_{10}x_{13}x_{19} - 1,91x_{10}x_{13}x_7, \quad (9)$$

где в стандартизованном виде представлены:  $X_{10}$  — загрузка металлсодержащих, т/ч;  $X_{13}$  — удельный расход кислорода, м<sup>3</sup>/т;  $X_{19}$  — доля инертных материалов, б/р;  $X_7$  — расход природного газа, м<sup>3</sup>/ч;  $X_{20}$  — влажность шихты, %.

На рис. 5 показан интерфейс АРМ оператора интеллектуальной автоматизированной системой управления (ИАСУ) ПВ, где в реальном масштабе времени отражаются значения основных переменных, рассчитанные по моделям. В главном окне интерфейса ИАСУ на рис. 5 представлены: 1 — один из основных показателей контролируемого процесса „Удельный расход кислорода на тонну металлсодержащих“; 2 — содержание меди в штейне; 3 — содержание диоксида кремния в шлаке; 4 — содержание меди в шлаке; 5 — доля флюсов от металлсодержащих; 6 — качество загрузки 7 — температура расплава; 8 — почасовая производительность по бункерам или материалам; 9 — индикатор распознанной конфликтной ситуации, связанной с фактом выхода процесса за зону согласованности (см. рис. 2); 10 — поле



выбора основного уровня сменного задания по кислороду „Удельный расход кислорода на тонну металлсодержащих“; 11 — индикация факта загрузки конвертерного шлака.



Рис. 5

Для оператора-технолога значения показателя температуры (см. рис. 5, 7) служат ориентиром, по которому он сверяет возможность выполнения планового сменного задания и в целом обеспечивает на основе этих данных требуемый уровень работоспособности агрегата ПВ.

Как следует из анализа, информация, выводимая на АРМ оператора, целиком соответствует требованиям обобщенной вычислительной модели СПМ распознавания для управления физико-химическими процессами в ПВ. Так, на основе проведенных исследований можно утверждать, что обеспечиваются основные требования, предъявляемые к процессам СПМ распознавания [4]: *структурность* распознавания — основным носителем знаний о ПВ является топологическая структура параметров технического состояния объекта; *потокость* распознавания состояния ПВ — обеспечивается наличием общей потоковой модели вычислений результатов распознавания в реальном масштабе времени; *многоуровневость* распознавания реализуется на нескольких уровнях, причем результаты распознавания на нижних уровнях используются как исходные данные для распознавания на более высоких уровнях.

**Закключение.** В рамках выполненных исследований фактически реализован наиболее общий структурно-топологический подход к описанию и решению задачи потокового многоуровневого распознавания технического состояния СТО на основе интегрированного использования измеренных данных, а также знаний экспертов. Практическая значимость такого подхода в сочетании с многоmodelьным описанием сложного технологического процесса функционирования печи Ванюкова на основе явных и неявных экспертных знаний в виде аналитических выражений (1), (2), (9) создает необходимые предпосылки для организации системы проактивного управления СТО. Суть проактивного управления СТО на основе ИИДС ПВ состоит в организации предварительного вычисления и своевременного устранения предпосылок к возможному переходу СТО из работоспособного состояния в неработоспособное.

Таким образом, предложенные в статье топологический подход к постановке задачи распознавания состояния СТО, а также нечетко-возможностный подход к описанию и исследованию конкретного СТО представляются фундаментальными для распознавания состояния указанных объектов на основе конструктивного использования явных и неявных экспертных знаний.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке в рамках бюджетной темы № 0073-2019-0004.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокопчина С. В., Шестопалов М. Ю., Уткин Л. В., Курприянов М. С., Лазарев В. Л., Имаев Д. Х., Горохов В. Л., Жук Ю. А., Спесивцев А. В. Управление в условиях неопределенности. СПб: Изд-во СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 2014. 304 с.
2. Игнатъев М. Б., Марлей В. Е., Михайлов В. В., Спесивцев А. В. Моделирование слабоформализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний. СПб: Политех-Экспресс, 2018. 430 с.
3. Спесивцев А. В. Нечетко-возможностный подход к формализации и использованию экспертных знаний для оценивания состояния сложных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 11. С. 985—994.
4. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.
5. Прокопчина С. В., Тарасов В. Б., Лазарев В. Л. и др. Мягкие вычисления и измерения. Теоретические основы и методы. Т. 1. М.: Научная библиотека, 2017. 420 с.
6. Нариньяни А. С. Недоопределенность в системе представления и обработки знаний // Техническая кибернетика. 1986. № 5. С. 3—28.
7. Моисеев Н. Н. Расставание с простотой. М.: Аграф, 1998. 480 с.
8. Эшби У. Р. Введение в кибернетику. М.: ИЛ, 1959. 428 с.
9. Спесивцев А. В. Металлургический процесс как объект изучения: новые концепции, системность, практика. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 307 с.
10. Спесивцев А. В., Дайманд И. Н., Лазарев В. И., Кацук А. П. Интеллектуальная автоматизированная система управления процессом плавки ПВ-3 Медного завода ЗФ ОАО „ГМК «Норильский никель»“ // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2014. № 5. С. 64—69.
11. Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2004. № 4. С. 5—16.
12. Пат. РФ 2571968. Способ автоматического управления процессом плавки медно-никелевого сульфидного сырья в печи Ванюкова при переработке сульфидной шихты на штейн / С. А. Орешкин, А. В. Спесивцев, В. Г. Козловский, В. И. Лазарев, А. П. Кацук. Оpubл. 27.12.2015. Бюл. № 36.

**Сведения об авторе****Александр Васильевич Спесивцев**

— д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; вед. научный сотрудник;  
E-mail: sav2050@gmail.com

Поступила в редакцию  
23.09.2021 г.

**Ссылка для цитирования:** Спесивцев А. В. Полимодельное структурно-топологическое описание состояния сложных технических объектов с использованием экспертных знаний // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 12. С. 972—981.

**MULTI-MODEL STRUCTURAL AND TOPOLOGICAL DESCRIPTION  
OF THE STATE OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS USING EXPERT KNOWLEDGE**

**A. V. Spesivtsev**

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, 199178, St. Petersburg, Russia  
E-mail: sav2050@gmail.com*

When automating the processes of monitoring a complex technical object state, the basis for the knowledge representation is computational model. The set of principles and methods for constructing the models is extremely rich, due to the diversity of the objects themselves as well as the tasks of monitoring to be completed. Such a situation give rise to uncertainty in the choice of the computational model struc-

ture, especially at initial stages of the synthesis of intelligent information technology for monitoring a complex technical object state. However, the correct choice of a strategy for solving problems of this type is facilitated by the transition from constructions of metric spaces to constructions of a more general order - topological spaces. Such an approach is implemented in the creation of an intelligent information technology for the synthesis of the model of the state of a specific object - a pyrometallurgical complex of large-power units - in combination with an apparatus for constructing fuzzy-probability models. At the same time, the use of unique methodology makes it possible to describe a complex multifactor model of technical objects using a semantic network and polynomial transformation of NON-factors, the essence of which is to formalize an expert's verbal knowledge into a mathematical model in the form of an analytical function. The first of the methodologies has the property of universality regardless of the subject type, and the second conveys the complex technical object specifics in its area through experience and expertise.

**Keywords:** structural and topological description, complex technological object, computational model, expert knowledge, fuzzy possibility approach

#### REFERENCES

1. Prokopchina S.V., Shestopalov M.Yu., Utkin L.V., Kupriyanov M.S., Lazarev V.L., Imaev D.Kh., Gorokhov V.L., Zhuk Yu.A., Spesivtsev, A.V. *Upravleniye v usloviyakh neopredelennosti* (Management under Conditions of Uncertainty), St. Petersburg, 2014, 304 p. (in Russ.)
2. Ignatiev M.B., Marley V.E., Mikhailov V.V., Spesivtsev A.V. *Modelirovaniye slaboformalizovannykh sistem na osnove yavnykh i neyavnykh ekspertnykh znaniy* (Modeling Weakly Formalized Systems Based on Explicit and Implicit Expert Knowledge), St. Petersburg, 2018, 430 p.
3. Spesivtsev A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 11(63), pp. 985–994. (in Russ.)
4. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob"yektov* (Intelligent Technologies for Monitoring and Controlling the Structural Dynamics of Complex Technical Objects), Moscow, 2006. (in Russ.)
5. Prokopchina S.V., Tarasov V.B., Lazarev V.L. et al. *Myagkiye vychisleniya i izmereniya. Teoreticheskiye osnovy i metody. T. I* (Soft Calculations and Measurements. Theoretical Foundations and Methods. Vol. I), Moscow, 2017, 420 p. (in Russ.)
6. Narinyani A.S. *Technical Cybernetics*, 1986, no. 5, pp. 3–28. (in Russ.)
7. Moiseev N.N. *Rasstavaniye s prostotoy* (Parting with Simplicity), Moscow, 1998, 480 p. (in Russ.)
8. Ashby W.R. *Introduction to Cybernetics*, London, Chapman & Hall, 1956.
9. Spesivtsev A.V. *Metallurgicheskiy protsess kak ob"yekt izucheniya: novyye kontseptsii, sistemnost', praktika* (Metallurgical Process as an Object of Study: New Concepts, Consistency, Practice), St. Petersburg, 2004, 307 p.
10. Spesivtsev A.V., Daymand I.N., Lazarev V.I., Kashchuk A.P. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya* (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy), 2014, no. 5, pp. 64–69. (in Russ.)
11. Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2004, no. 6(43), pp. 831–842.
12. Patent RU 2 571 968, *Sposob avtomaticheskogo upravleniya protsessom plavki medno-nikelevogo sulfidnogo syr'ya v pechi Vanyukova pri pererabotke sulfidnoy shikhty na shteyn* (Method for Automatic Control of the Process of Melting Copper-Nickel Sulphide Raw Materials in a Vanyukov Furnace during Processing of Sulphide Charge for Matte), S.A. Oreshkin, A.V. Spesivtsev, V.G. Kozlovsky, V.I. Lazarev, A.P. Kashchuk, Priority December 27, 2015, Bulletin 36. (in Russ.)

#### Data on author

**Aleksandr V. Spesivtsev**

— Dr. Sci., Associate Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Leading Researcher; E-mail: sav2050@gmail.com

**For citation:** Spesivtsev A. V. Multi-model structural and topological description of the state of complex technical objects using expert knowledge. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 12. P. 972—981 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-12-972-981