

**ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ФАКТОРНОГО ПРОСТРАНСТВА  
ПРИ ОЦЕНИВАНИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА**А. В. СПЕСИВЦЕВ<sup>\*1</sup>, А. Н. ПАВЛОВ<sup>1,2</sup><sup>1</sup>*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,  
Санкт-Петербург, Россия**\* sav2050@gmail.com*<sup>2</sup>*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Моделирование сложных объектов (СЛО) всегда сопряжено с решением проблем не только методологического, но и методического характера. К ним относится, например, проблема формирования и использования факторного пространства (ФП) при решении задачи оценивания и прогнозирования состояния СЛО. В рамках постановки задачи сформулированы основные правила, которыми должен пользоваться эксперт при выборе ФП для синтеза различных классов моделей, в том числе на примере построения нечетко-возможностной модели СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний. Рассмотрен пример построения ФП и соответствующей модели для одного и того же технологического процесса, связанного с твердофазным обжигом сульфидного концентрата, с использованием двух принципиально различных подходов к описанию данного процесса: классического балансового и нечетко-возможностного подхода. На практическом примере показано, что обоснованный выбор состава и структуры ФП, в особенности зависимых переменных (выходных параметров), играет важную роль в достижении желаемого результата — построении модели оценивания и прогнозирования состояния СЛО, которая с требуемой степенью адекватности описывает исследуемый процесс.

**Ключевые слова:** факторное пространство, явные и неявные экспертные знания, нечетко-возможностный подход и модель, количественные и качественные параметры и переменные, сложный объект и процесс

**Благодарности:** работа проводилась при финансовой поддержке в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0004.

**Ссылка для цитирования:** Спесивцев А. В., Павлов А. Н. Особенности выбора факторного пространства при оценивании и прогнозировании состояния сложного объекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 920—924. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-920-924.

**FEATURES OF THE CHOICE OF FACTOR SPACE IN THE ESTIMATION AND PREDICTION  
OF THE STATE OF A COMPLEX OBJECT**A. V. Spesivtsev<sup>\*1</sup>, A. N. Pavlov<sup>2</sup><sup>1</sup>*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,  
St. Petersburg, Russia**\* sav2050@gmail.com*<sup>2</sup>*A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia*

**Abstract.** Modeling of complex objects is always associated with the solution of problems not only of a methodological, but also of a methodical nature. Such problems include, for example, the problem of the formation and use of the factor space in solving the problem of estimating and predicting the state of the complex object. As part of the problem statement, the main rules are formulated that an expert should use when choosing a factor space for the synthesis of various classes of models, including the example of constructing a fuzzy-possibility model of complex object based on explicit and implicit expert knowledge. An example of constructing a factor space and the corresponding model for a technological process associated with solid-phase roasting of a sulfide concentrate is considered using two fundamentally different approaches to describing this process. These approaches are the classical balance approach and fuzzy-possible approach. On a practical example, it is shown that a reasonable choice of the factor space composition and structure, especially dependent variables (output parameters), plays an important role in achieving the desired result - building a model for estimating and predicting the state of the complex object, which describes the process under study with the required degree of adequacy.

**Keywords:** factor space, explicit and implicit expert knowledge, fuzzy-possibility approach and model, quantitative and qualitative parameters and variables, complex object and process

**Acknowledgment:** the work was carried out with financial support under the budget topic FFZF-2022-0004.

**For citation:** Spesivtsev A. V., Pavlov A. N. Features of the choice of factor space in the estimation and prediction of the state of a complex object. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 12. P. 920—924 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-920-924.

**Введение.** К настоящему времени разработан и в различных предметных областях (ПрО) на практике успешно применяется метод построения нечетко-возможностной модели (НВМ) при решении задач оценивания состояния сложных объектов (СЛО) с использованием явных и неявных знаний и опыта эксперта [1, 2]. При этом, как показывает анализ, выбор факторного пространства (ФП) при постановке и решении указанного класса задач достаточно произволен, что объясняется, с одной стороны, трудностью формализации конкретных правил выбора данного пространства, а с другой — зависимостью от компетентности и опыта конкретного эксперта-исследователя.

В связи со сказанным становятся весьма актуальными вопросы обобщения и структуризации накопленного опыта в формировании указанных ФП в виде ряда основных положений. Исследователю при решении задач описания (моделирования) и оценивания состояния СЛО в слабоструктурированных ПрО целесообразно придерживаться следующих правил:

— на основе технической документации и результатов эксплуатации СЛО сформировать наиболее полный список измеряемых и неизменяемых (неколичественных, лингвистических, вербальных) параметров (внутренних, внешних, объективных, субъективных), существенно влияющих на состояние рассматриваемого объекта, часть из которых впоследствии должна войти в ФП [1, 3];

— выделенные параметры и соответствующие переменные ФП должны позволить исследователю описывать и рассматривать СЛО с различных сторон, а также учитывать различные аспекты его функционирования;

— исходя из психолого-эргономических требований размерность ФП для синтеза НВМ следует ограничить семью факторами [1, 4];

— должен быть определен четкий физический смысл измеряемых параметров и соответствующих переменных ФП, должны быть определены единицы измерения, пределы изменения их значений, а также сформулированы требования к точности измерения значений данных параметров. Для качественных (неизменяемых) параметров должно быть проведено лингвистическое описание их смысла. При этом узкие интервалы варьирования рассматриваемых параметров (переменных) несут меньше информации о состоянии СЛО, а слишком широкие могут указывать на несущественное их влияние [2, 3];

— выбранные параметры (переменные) ФП должны быть привязаны к единой временной шкале (год, месяц, сутки, смена и др.) [2];

— зависимые (выходные) параметры (переменные), которые характеризуют состояние (обобщенное состояние) СЛО, должны описываться как комбинированные вербально-числовые величины [5];

Проиллюстрируем основные положения перечисленных рекомендаций на практическом примере, связанном с решением задач моделирования и оценивания состояния СЛО, который представляет собой сложный технологический процесс окислительного обжига сульфидных концентратов в печах кипящего слоя (КС) [6]. В примере рассмотрены два различных подхода к выбору и обоснованию ФП при построении модели оценивания состояния СЛО. К указанным подходам относятся классический балансовый подход [6] и НВП [1, 2].

В рамках этого примера будет продемонстрирована важность выбора и обоснования ФП при решении задач оценивания и прогнозирования состояния СЛО.

**Балансовый подход.** В одной из фундаментальных работ по твердофазному обжигу сульфидного концентрата (ТОСК) [6] отмечено, что главным параметром, по которому регулируется обжиг ТОСК в печах КС является температура кипящего слоя  $t_{\text{КС}}$ . Выбор температурного режима зависит от многих факторов, среди которых важнейшими признаны следующие параметры, вошедшие в состав ФП:  $\Phi_{\text{вл.ш}}$  — расход влажной шихты, т/ч;  $\delta_{\text{ш}}$  — степень десульфурации, %;  $\Phi_{\text{д}}$  — расход дутья, м<sup>3</sup>/ч;  $C_{\text{Wш}}$  — содержание влаги в шихте, %;  $C_{\text{Sш}}$  — содержание серы в шихте, %;  $Q_{\text{п}}$  — потери тепла через поверхность печи, ккал/ч;  $Q_{\text{ор.ш}}$  — тепло, поступающее с шихтой, ккал/ч.

Балансовая модель  $t_{\text{КС}}$  при этом имеет следующий вид [6]:

$$t_{\text{КС}} = \frac{4,45 \cdot \delta_{\text{ш}} (100 - C_{\text{Wш}}) C_{\text{Sш}} \cdot \Phi_{\text{вл.ш}} + Q_{\text{ор.ш}} + 6,2\Phi_{\text{д}} - 587700(C_{\text{Wш}}/100) \cdot \Phi_{\text{вл.ш}} - Q_{\text{п}}}{0,33 \cdot \Phi_{\text{д}} + \Phi_{\text{вл.ш}} + 333(C_{\text{Wш}}/100) \cdot \Phi_{\text{вл.ш}}}. \quad (1)$$

Из анализа выражения (1) можно сделать следующие выводы:

— температура в реакционной зоне КС не может служить управляющей переменной для процесса ТОСК;

— построенная на балансовой основе модель (1) в лучшем случае является лишь расчетной, а прогнозирование состояний процесса ТОСК в печи КС в предаварийных режимах не представляется возможным в принципе.

**Нечетко-возможностный подход.** На основе обработки явных и неявных экспертных знаний при синтезе НВМ оценивания и прогнозирования состояния процесса ТОСК в состав ФП были включены следующие переменные [2, 7]:  $X_1$  — скорость подачи концентрата, т/ч;  $X_2$  — скорость подачи пыли, т/ч;  $X_3$  — температура в реакционной зоне, °С;  $X_4$  — скорость изменения (градиент) температуры, °С/мин;  $X_5$  — разброс величины давления в рабочей камере, мм водяного столбца;  $X_6$  — время отслеживания процесса от момента предыдущего управляющего воздействия, мин;  $Y_1$  — уставка скорости подачи концентрата, т/ч. Таким образом, предложенное в рамках разработанного нечетко-возможностного подхода (НВП) ФП, содержит переменные, которые всесторонне (интегративно) описывают сложный технологический процесс окислительного обжига сульфидных концентратов в печах кипящего слоя.

После заполнения экспертом опросной матрицы полного факторного эксперимента и проведения соответствующих вычислительных процедур по методике НВП синтезированная НВМ принимает следующий вид [7]:

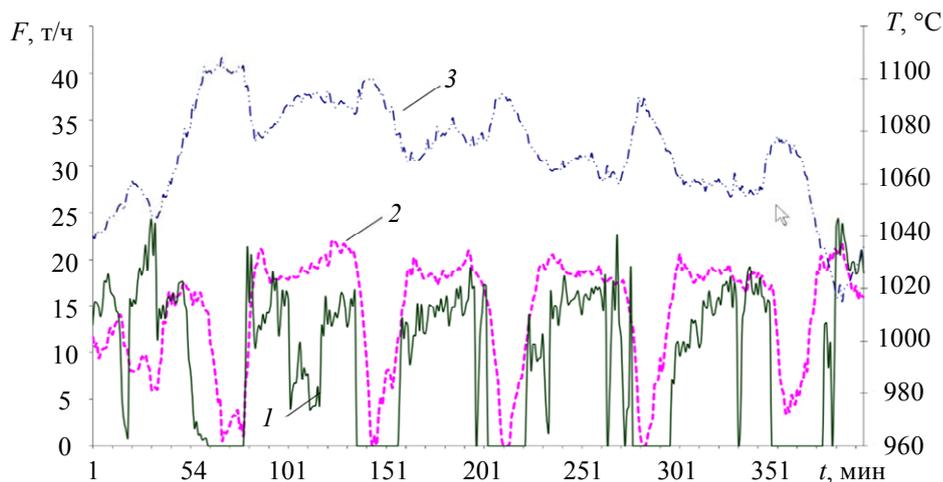
$$\begin{aligned} Y_1 = & 12,56 + 0,77x_1 + 1,31x_2 - 0,73x_1x_2 - 1,43x_6 - 1,15x_1x_6 - 2,1x_4 + \\ & + 1,83x_1x_4 - 1,24x_2x_4 - 1,19x_1x_2x_4 - 0,53x_2x_4x_6 - 0,95x_3 + 1,12x_1x_3 - \\ & - 1,72x_2x_3 - 0,72x_1x_2x_3 - 1,63x_2x_3x_6 - 1,22x_3x_4 - 1,23x_3x_4x_6 - \\ & - 0,75x_2x_5 + 0,56x_5x_6 - 0,55x_1x_5x_6 - 0,9x_3x_5. \end{aligned} \quad (2)$$

В состав выражения (2) включены члены разложения обобщенной функции, описывающей состояние уставки скорости подачи концентрата только со значимыми коэффициентами, а соответствующие переменные представлены в кодированном (стандартизованном) виде и рассчитываются по следующим формулам:

$$x_1 = (X_1 - 10) / 5; \quad x_2 = (X_2 - 5) / 2; \quad x_3 = (X_3 - 1050) / 60;$$

$$x_4 = (X_4 - 0) / 1,5; \quad x_5 = (X_5 - 1,5) / 0,5; \quad x_6 = (X_6 - 37,5) / 12,5.$$

Сравнение расчетных, полученных на основании предложенной модели (2), и фактических значений переменной, проиллюстрировано на рисунке. Как следует из анализа рисунка, расчетные значения по загрузке концентрата  $F$  (кривая 2) правильно отслеживают логику действий оператора ( $I$ ) относительно как реакции на подъем температуры в зоне печи (3), так и ведения технологического процесса в целом.



Таким образом, ведение процесса обжига на основе модели (2), отражающей знания и опыт принятия решений лучшими экспертами, демонстрирует возможности использования НВП для автоматизации решения задач оценивания и прогнозирования процессов ТОСК [7]. Предварительные исследования показали, что в этом случае возможно увеличение производительности печи твердофазного обжига сульфидного концентрата примерно на 30—35 %.

**Заключение.** На практическом примере показано, что обоснованный выбор состава и структуры ФП, в особенности зависимых переменных (выходных параметров), играет важную роль в достижении желаемого результата — построении модели оценивания и прогнозирования состояния СЛО, которая с требуемой степенью адекватности описывает исследуемый процесс.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Игнатьев М. Б., Марлей В. Е., Михайлов В. В., Спесивцев А. В.* Моделирование слабо формализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний. СПб: ПОЛИТЕХ-ЭКСПРЕСС, 2018. 430 с.
2. *Спесивцев А. В.* Металлургический процесс как объект изучения: новые концепции, системность, практика. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 307 с.
3. *Миллс Ф.* Статистические методы. М.: Госстатиздат, 1958. 798 с.
4. *Miller G. A.* The Magical Number Seven, Plus or Minus Two // *The Psychological Review*. 1956. Vol. 63. P. 81—97.
5. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
6. *Астафьев А. Ф., Алексеев Ю. В.* Окислительный обжиг никелевых сульфидных полупродуктов в кипящем слое. М.: Metallurgy, 1982. 175 с.
7. *Спесивцев А. В., Кимяев И. Т.* Информационная модель нечеткого логического регулятора с интеллектуализированной базой знаний // *Управление большими системами*. 2008. Вып. 21. М.: ИПУ РАН. С. 165—172.

#### Сведения об авторах

- Александр Васильевич Спесивцев** — д-р техн. наук, доцент; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; вед. научный сотрудник; E-mail: sav2050@gmail.ru
- Александр Николаевич Павлов** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космических комплексов; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; вед. научный сотрудник; E-mail: pavlov62@list.ru

Поступила в редакцию 30.08.2022; одобрена после рецензирования 16.09.2022; принята к публикации 31.10.2022.

## REFERENCES

1. 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. (in Russ.)
2. 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. (in Russ.)
3. Mills F.C. *Statistical methods*, NY, Columbia univ., 1924.
4. Miller G.A. *The Psychological Review*, 1956, vol. 63, pp. 81–97.
5. 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, 410 p. (in Russ.)
6. Astafiev A.F., Alekseev Yu.V. *Okislitel'nyy obzhig nikel'nykh sulfidnykh poluproduktov v kipyashchem sloye* (Oxidation Roasting of Nickel Sulphide Intermediates in a Fluidized Bed), Moscow, 1982, 175 p. (in Russ.)
7. Spesivtsev A.V., Kimyaev I.T. *Large Systems Management*, Moscow, 2008, no. 21, pp. 165–172. (in Russ.)

## Data on authors

- Aleksander 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.ru
- Aleksander N. Pavlov** — Dr. Sci., Professor; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Automated Control Systems for Space Complexes; 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: pavlov62@list.ru

Received 30.08.2022; approved after reviewing 16.09.2022; accepted for publication 31.10.2022.