Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-44-48

Формализация когнитивного моделирования при разработке систем поддержки принятия проектных решений технологических систем угольных шахт с учетом базовых онтологий

О.Ю. Козлова[1]✉, В.В. Агафонов[2]
[1] МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация
✉ kozlova_ou@mail.ru

Резюме: Результаты исследований представляют базовую технологическую, методическую и методологическую платформу решения поставленной проблемы с привлечением и адаптацией новых инновационных основ программно-целевого моделирования функциональных структур технологических систем угольных шахт. Технология угледобычи заявляется в виде самоорганизующейся производственной системы с динамичным развитием, имеющей множество альтернативных вариантов совокупности входных и выходных концептов, позволяющих с определенной долей неопределенности и стохастичности синтезировать рациональную технологическую систему угледобывающего предприятия. Текущее состояние функциональной структуры технологической системы шахты характеризуется конечным набором значений всех ее составляющих концептов (целевых, управляемых и внешних), а для того чтобы охарактеризовать целевое состояние, используется вектор значений составляющих целевых концептов-индикаторов. Блок-схема алгоритма адаптации методологии когнитивного моделирования к процедуре синтеза технологической системы угольной шахты подразумевает выполнение ряда итераций по его внутреннему наполнению с учетом ряда осложняющих факторов и ограничений внешней и внутренней сред функционирования. Эти ограничения имеют объективную и субъективную природу, поэтому должны обладать разными степенями воздействия на проблемные ситуации и процедуральные правила вынесения окончательных суждений в рамках выбора окончательного оптимального варианта функциональной структуры технологической системы угольной шахты с оптимальной стратегией развития в рамках жизненного цикла.

Ключевые слова: угольная шахта, функциональная структура технологических систем, системы поддержки проектных решений, когнитивное моделирование, алгоритм адаптации, целевой концепт, управляемый концепт, внешний концепт, когнитивная карта

Для цитирования: Козлова О.Ю., Агафонов В.В. Формализация когнитивного моделирования при разработке систем поддержки принятия проектных решений технологических систем угольных шахт с учетом базовых онтологий. *Горная промышленность.* 2025;(5):44–48. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-44-48

Formalization of cognitive modeling in development of design decision support systems for technological systems of coal mines with account of basic ontologies

O.Y. Kozlova[1] ✉, V.V. Agafonov[2]
[1] MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation
[2] National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation
✉ kozlova_ou@mail.ru

Abstract: The paper represents a basic technological, methodical and methodological platform to address the problem posed with assistance and adaptation of new innovative foundations for software-targeted modeling of functional structures of technological systems in coal mines. Coal mining technology is claimed to be a self-organizing production system with dynamic development, which is characterized with many alternative options for a set of input and output concepts that allow synthesizing a rational technological system of a coal mining operation with a certain degree of uncertainty and stochasticity. The current

state of the functional structure of the technological systems in mines is characterized by a finite set of values of all its constituent concepts (target, controlled and external), and a vector of values of the constituent target concepts-indicators is used in order to characterize the target state. The flowchart of the algorithm for adapting the cognitive modeling methodology to the procedure for synthesizing the technological system of a coal mine implies performing a number of iterations on its internal content with account of a number of complicating factors and limitations of the external and internal functioning environments. These limitations are objective and subjective in their nature, therefore they must have different degrees of influence on the problematic situations and procedural rules for making final decision regarding the choice of the final optimal variant of the functional structure of the technological system for a coal mine with an optimal development strategy within the life cycle.

Keywords: coal mine, functional structure of technological systems, design decision support systems, cognitive modeling, adaptation algorithm, target concept, controlled concept, external concept, cognitive map

For citation: Kozlova O.Y., Agafonov V.V. Formalization of cognitive modeling in development of design decision support systems for technological systems of coal mines with account of basic ontologies. *Russian Mining Industry.* 2025;(5):44–48. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-44-48

Введение

В качестве основной цели когнитивного моделирования при разработке систем поддержки принятия проектных решений технологических систем угольных шахт с учетом базовых онтологий заявляется генерация и проверка конечного множества альтернативных проектных решений устойчивой функциональной структуры технологических систем угольных шахт в современных макроэкономических условиях с учетом рационализации природопользования.

С учетом представленной концепции когнитивного моделирования проблемная ситуация синтеза проектных решений технологических систем угольных шахт, может быть решена посредством представления следующих итерационных процедур [1–4]:

– разработка, формирование и построение модели проблемной ситуации (синтез проектных решений технологических систем угольных шахт) в форме когнитивного представления (модели) – когнитивной карты;

– проведение и перебор ряда модельных альтернативных экспериментов с целью выявления и поиска оптимальных сочетаний проектных решений на базе методов анализа проблемной ситуации – когнитивной карты.

Результаты

Конкретную адаптацию методологии когнитивного моделирования к процедуре синтеза технологической системы угольной шахты можно осуществить на основе блок-схемы алгоритма, представленной на рис. 1.

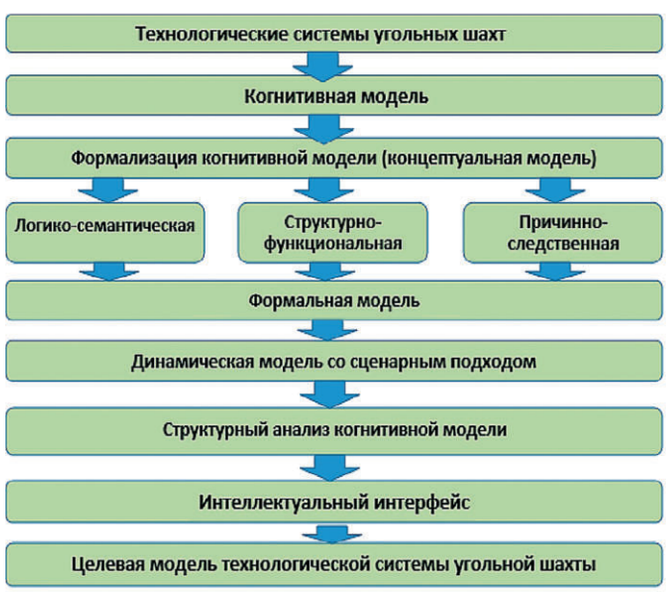

Рис. 1
Укрупненный алгоритм синтеза устойчивой технологической системы угольной шахты на основе когнитивного моделирования

Fig. 1
A high-level algorithm to synthesize a stable technological system of a coal mine based on cognitive modeling

Блок-схема алгоритма адаптации методологии когнитивного моделирования к процедуре синтеза технологической системы угольной шахты подразумевает выполнение ряда итераций по его внутреннему наполнению с учетом ряда осложняющих факторов и ограничений внешней и внутренней сред функционирования. Эти ограничения имеют объективную и субъективную природу, поэтому должны обладать разными степенями воздействия на проблемные ситуации и процедуральные правила вынесения окончательных суждений в рамках выбора окончательного оптимального варианта функциональной структуры технологической системы угольной шахты с оптимальной стратегией развития в рамках жизненного цикла.

В рамках концепции повышения объективности и достоверности процедуры синтеза проектных решений технологических систем угольных шахт, которые с полным основанием можно отнести к слабоструктурированным системам, что предопределяется высоким уровнем неопределенности исходной горно-геологической и горнотехнической информации с довольно большой областью множества плохо формализуемых конечных целей и оценочных критериев, привлекается когнитивное моделирование, под которым в общем случае понимаются функциональная структуризация и параметризация проектируемого объекта, которые подразумевают формирование и уточнение гипотезы об эффективности его функционирования в условиях определенной функциональной среды с учетом ограничений различной природы [5–8].

Как правило, в его основу закладывается основополагающий элемент, в качестве которого выступает когнитивная карта. В общепринятом представлении она представляет собой ориентированный граф (рис. 2).

Рис. 2
Структура нечеткой когнитивной модели (НКМ) оценки состояния функциональной структуры технологической системы угольной шахты (ориентированный граф)

Fig. 2
The structure of a fuzzy cognitive model (FCM) for assessing the state of the functional structure of the technological system of a coal mine (oriented graph)

Основным предназначением графа является реализация процедуры формализации взаимодействия складывающихся в технологической системе проектируемой угольной шахты основных связей производственного, технологического, технического, организационно-управленческого характера в процессе ее жизненного цикла. Вершины этого графа трактуются как концепты, а дуги, связывающие вершины, имеют *каузальную* отрицательную и положительную направленность связи между ними с весовой степенью влияния. В рамках этого для информационного обеспечения этой процедуры используются различные типы данных, представленных в виде неполных, нечетких, вербальных, противоречивых и других шкал. Все это безусловно требует проведения определенного объема междисциплинарных исследований для обобщения, адаптации и согласования представлений различного рода в рассматриваемой предметной области с использованием частных эффективных информативных технологий, направленных на формирование и вынесение четко согласованных коллективных мнений [9–12].

Обобщающие результаты когнитивного моделирования оценки состояния функциональной структуры технологической системы угольной шахты можно обозначить следующим образом: исходя из степени влияния факторов-концептов технологические, технические и организационно-управленческие решения в области повышения устойчивости и эффективности функционирования технологической системы угольной шахты G_8, текущее состояние промышленной инфраструктуры G_9, производственно-техническая и экономическая эффективность функционирования G_6, эффективность функционирования отдельных подсистем угольной шахты (транспорт-подъем, подготовительные и очистные работы, вентиляция и т.д.) G_3 – в конечном итоге оказывают превалирующее положительное влияние на общее состояние функциональной структуры технологической системы угольной шахты. Превалирующая степень негативного влияния присуща концепту G_4 – потребление материальных ресурсов, необходимых для осуществления основных и вспомогательных производственных процессов.

Если рассматривать второстепенные аспекты взаимовлияния, то в этой области можно отметить следующие тенденции и закономерности: исходя из степени влияния факторов-концептов общее состояние функциональной структуры технологической системы угольной шахты в конечном итоге оказывает превалирующее положительное влияние на эффективность функционирования отдельных подсистем угольной шахты (транспорт-подъем, подготовительные и очистные работы, вентиляция и т.д.) G_3, темпы развития функциональной структуры технологической системы угольной шахты G_7, G_4 – потребление материальных ресурсов, необходимых для осуществления основных и вспомогательных производственных процессов. Необходимо отдельно выделить отрицательную составляющую влияния общего состояния функциональной структуры технологической системы угольной шахты на состояние промышленной инфраструктуры G_9.

Основными негативными последствиями упрощения субъектно-формальных методов когнитивного моделирования в рамках формализации и привлечения первичных представлений при этом являются проектные решения с крайне низкой достоверностью, что предопределяется очень большой сложностью интерпретации и адаптации определенных математических конструкций в рамках проблемной области с использованием факторов-переменных нормальной формы в рамках измерительной (оценочной) шкалы. В этом случае основной *принцип транзитивности* (из *A* является причиной *B*, а *B* – причиной *C*, следует, что *A* является причиной *C*) очень часто трактуется как *ложная транзитивность*. В рамках этого подхода очень часто используются нечеткие когнитивные карты Б. Коско, В. Силова, нечеткие продукционные когнитивные карты и их разновидности.

В связи с вышеизложенным проблематика когнитивного моделирования технологических систем угольных шахт обусловлена следующими основными составляющими:

– разнородностью и неоднотипностью составляющих компонентов технологических систем, их многообразием и различным функциональным назначением, разнообразием взаимозависимых связей между ними, которые имеют расплывчатый и неустойчивый характер и не поддаются формализованному детализированному описанию в рамках единой функциональной модели;

– невозможностью построения граничной формы системы с учетом ее всевозможных состояний и проблемных ситуаций различного характера;

– невозможностью получения достаточного объема достоверной и объективной исходной информации для построения моделей приемлемой точности;

– информация представлена в этом случае в виде обобщенных экспертных оценок либо в стохастическом эвристическом виде, что не позволяет сформировать исходные аналитические зависимости с достаточным уровнем эмерджментости;

– предварительная оценка системных факторов-концептов производится с использованием различных по своей природе систем шкалирования;

– используемые модели оптимизации не способны учесть все типы неопределенности и рисков недропользования в условиях возможности трансформации технологических систем.

Заключение

Учитывая все вышеизложенное, следует использовать различные модификации когнитивных моделей с совершенно другими интерпретациями элементов графа, которые позволяют избежать этого недостатка. Так, в частности, возможно использование нечетких продукционных карт в рамках данного подхода, которое позволяет решить и обеспечить научно-методическим потенциалом ряд специфических задач, к которым можно отнести: (ниже рассмотрены не задачи)

– полная реализация нечеткого подхода при формировании целевой функции моделирования, в основе которого лежит процедура задания нечеткости концептов алгоритму выявления взаимовлияния факторов-концептов и моделирования динамической составляющей;

– всем концептам присуща количественная интерпретация в режиме сравнения (синглтоны, нечеткие множества, четкие значения и др.);

– предусматривается возможность реализации процедуры передачи степени влияния четких функций ввиду наличия механизма учета нечеткого влияния между концептами-факторами (нечеткое отображение);

– решена проблема казуальности (влияния различных знаковых весов) посредством введения функции принадлежности;

– в динамическую составляющую моделирования введена составляющая учета нелинейности поведения системы при моделировании путем ввода процедуры учета приращений и нечетких состояний, причем при оценке совместного влияния в обязательном порядке учитывается величина сдвига функции принадлежности в рамках координат базового терм-множества.

Не менее актуальным является использование гибридной нечеткой когнитивной модели с параметрической гибридизацией в рамках одной нечеткой технологии. Этот класс представлен нечеткими реляционными когнитивными моделями, которые характеризуются повышенной устойчивостью к формированию негативного возрастания фактора неопределенности проведения операций по преобразованию нечетких чисел и отношений. Присущий этим моделям и введенный в их функциональную структуру процесс моделирования системной динамики обуславливает основные особенности данного подхода, связанные со следующими аспектами:

– с позиций системной динамики на всех этапах моделирования достигается 100%-ное сохранение нечеткого представления значений концептов-факторов;

– с позиций когнитивного подхода достигается 100%-ное обеспечение принадлежности к кластеру нечетких чисел конечных значений и сопутствующих приращений концептов-факторов;

– с позиций обеспечения достаточной объективности и надежности когнитивного моделирования достигается необходимый уровень робастности влияния нечетких механизмов на процесс интегрирования нечетких значений концептов-факторов с учетом всех сопутствующих ограничений (превышение граничных значений концептов, непопадание в область агрегирования и др.).

Список литературы / References

1. Кретов В.А., Козлова О.Ю. Синтез организационно-технологических, организационно-технических и организационно-управленческих решений, обладающих наибольшим синергическим эффектом в рамках горноперерабатывающего предприятия. Уголь. 2022;(8):108–111. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-8-108-111
Kretov V.A., Kozlova O.Yu. Synthesis of organizational-technological, organizational-technical and organizational-management solutions that have the greatest synergistic effect within the mining enterprise. Ugol'. 2022;(8):108–111. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-8-108-111

2. Волошин В.А., Безносов А.В. Цифровизация производственных процессов на примере угольных шахт. Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2021;(3):31–36. Режим доступа: https://vestnik.sibsiu.ru/jour/article/view/243 (дата обращения: 12.05.2025).
Voloshin V.A., Beznosov A.V. Production processes digitalization by the example of coal mines. Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2021;(3):31–36. (In Russ.) Available at: https://vestnik.sibsiu.ru/jour/article/view/243 (accessed: 12.05.2025).

3. Зонова Н.О., Сердюк В.С. Разработка алгоритма превентивного регулирования человеческого фактора на угледобывающих предприятиях. Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2022;(3):43–53.
Zonova N.O., Serdiuk V.S. Development of the human factor preventive regulation algorithm at coal mining enterprises. Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry. 2022;(3):43–53. (In Russ.)

4. Куренков П.В. Симплициальные и мультиплициальные комплексы в мультимодальных транспортных системах. Интеллектуальные технологии на транспорте. 2021;(1):21–34. https://doi.org/10.24412/2413-2527-2021-125-21-34
Kurenkov P.V. Simplicial and multiplicial complexes in multimodal transportation systems. Intellectual Technologies on Transport. 2021;(1):21–34. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2413-2527-2021-125-21-34

5. Старостин А.М., Урбан Г.А., Тованчова Е.Н., Левчук Л.В. Современные энвайроментальные проблемы в глобальном и глокальном контексте. Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление. 2020;(4):130–135.
Starostin A.M., Urban G.A., Tovanchova E.N., Levchuk L.V. Modern environmental problems in a global and glocal context. Science and education: economy and financial economy; entrepreneurship; law and management. 2020;(4):130–135. (In Russ.)

6. Рахимбеков С.М. Критерий адаптации горной технологии. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020;(3):105–113. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-105-113
Rakhimbekov S.M. Mining technology adaptation criterion. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2020;(3):105–113. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-105-113

7. Захарова Е.Н., Иванова М.В. Когнитивное моделирование процесса обеспечения региональной конкурентоустойчивости. Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022;12(7-1):55–64.
Zakharova E.N., Ivanova M.V. Cognitive modeling of the process of ensuring regional competitiveness. Economics: Yesterday, Today and Tomorrow. 2022;12(7-1):55–64. (In Russ.)

8. Петухова М.С. Когнитивное моделирование как инструмент сценарного прогнозирования отрасли растениеводства. Экономический обзор. 2020;(1):25–29.
Petukhova M.S. Cognitive modeling as a tool for scenario forecasting of the crop industry. Economic Review. 2020;(1):25–29. (In Russ.)

9. Дышленко С.Г. Когнитивное моделирование в геоинформатике. Науки о Земле. 2020;(1):68–79.
Dyushlenko S.G. Cognitive modeling in geoinformatics. Geoscience. 2020;(1):68–79. (In Russ.)

10. Фомченкова Л.В., Фомченков В.П. Применение когнитивного моделирования для обоснования выбора бизнес-модели экономической организации. Прикладная информатика. 2021;16(4):6–20. https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-4-6-20
Fomchenkova L.V., Fomchenkov V.P. Cognitive modelling application to business model choice justify of an economic organization. Journal of Applied Informatics. 2021;16(4):6–20. (In Russ.) https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-4-6-20

11. Массель А.Г., Пяткова Н.И. Применение методов когнитивного моделирования для анализа угроз энергетической безопасности. Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020;(4):24–33. https://doi.org/10.38028/ESI.2020.20.4.002
Massel A.G., Pyatkova N.I. Application of cognitive modeling methods for energy security threat analysis. Information and Mathematical Technologies in Science and Management. 2020;(4):24–33. (In Russ.) https://doi.org/10.38028/ESI.2020.20.4.002

12. Васильев А.М., Черняховская Л.Р., Вульфин А.М. Моделирование процессов управления инновационной деятельностью в регионе с применением нечетких когнитивных карт. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020;(3):15–25. https://doi.org/10.24143/2072-9502-2020-3-15-25
Vasilyev V.I., Chernyakhovskaya L.R., Vulfin A.M. Modeling of innovative activity management processes in the region with use of fuzzy cognitive maps. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics. 2020;(3):15–25. (In Russ.) https://doi.org/10.24143/2072-9502-2020-3-15-25

Информация об авторах
Козлова Ольга Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kozlova_ou@mail.ru
Агафонов Валерий Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры геотехнологии освоения недр горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: agafonofvv@yandex.ru

Information about the authors
Olga Yu. Kozlova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Higher Mathematics, a MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation; e-mail: kozlova_ou@mail.ru
Valery V. Agafonov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Geotechnology of Subsurface Development at the Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: agafonofvv@yandex.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 03.06.2025
Поступила после рецензирования: 10.07.2025
Принята к публикации: 23.07.2025

Article info
Received: 03.06.2025
Revised: 10.07.2025
Accepted: 23.07.2025