

УДК 622.013.3 © В.В. Агафонов<sup>1</sup>, О.Ю. Козлова<sup>2</sup>, 2026UDC 622.013.3 © V.V. Agafonov<sup>1</sup>, O.Yu. Kozlova<sup>2</sup>, 2026<sup>1</sup> НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия<sup>1</sup> National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS),  
Moscow, 119049, Russian Federation<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,  
119454, г. Москва, Россия<sup>2</sup> MIREA – Russian Technological University,  
Moscow, 119454, Russian Federation

✉ e-mail: msmu-prpm@yandex.ru

✉ e-mail: msmu-prpm@yandex.ru

# Формирование кластеров проектных решений угольных шахт на основе метаэвристических алгоритмов

## Formation of clusters of design solutions for coal mines based on metaheuristic algorithms

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-2-80-84>**АГАФОНОВ В.В.**

Доктор техн. наук, профессор  
кафедры «Геотехнологии освоения недр»  
Горного института НИТУ «МИСИС»,  
119049, г. Москва, Россия,  
e-mail: msmu-prpm@yandex.ru

**КОЗЛОВА О.Ю.**

Канд. техн. наук, доцент  
кафедры Высшей математики -3,  
ФГБОУ ВО «МИРЭА- Российский  
технологический университет»,  
119454, г. Москва, Россия,  
e-mail: kozlova\_ou@mail.ru

Когнитивный процесс формирования кластеров проектных решений угольных шахт на основе метаэвристических алгоритмов сопровождается наличием базовой информации и информации, отражающей изменения эволюционной модели. При этом задача определения оптимальной траектории реализуется в модельном пространстве нечеткого ориентированного графа  $G = (E, W)$  со множеством вершин-концептов  $E$ , отражающих поведенческие особенности эволюции, и множеством взаимодействующих связей различной направленности между ними  $W$ . Данный аспект воспринимается как сопутствующие элементы когнитивного восприятия на основе когнитивных функций и моделей их взаимодействия.

**Ключевые слова:** угольная шахта, технологическая система, синтез проектных решений, функция принадлежности, метаэвристический алгоритм, нечеткий вывод.

**Для цитирования:** Агафонов В.В., Козлова О.Ю. Формирование кластеров проектных решений угольных шахт на основе метаэвристических алгоритмов // Уголь. 2026;(2):80-84. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-2-80-84.

**Abstract**

The cognitive process of forming clusters of coal mine design solutions based on metaheuristic algorithms is accompanied by the availability of basic information and information reflecting changes in the evolutionary model. In this case, the task of determining the optimal trajectory is realized in the model space of a fuzzy oriented graph  $G = (E, W)$  with a set of vertices-concepts  $E$  reflecting the behavioral features of evolution and a set of interacting links of various orientations between them  $W$ . This aspect is perceived as accompanying elements of cognitive perception based on cognitive functions and models of their interaction.

**Keywords**

Coal mine, technological system, synthesis of design solutions, membership function, metaheuristic algorithm, fuzzy inference.

**For citation**

Agafonov V.V., Kozlova O.Yu. Formation of clusters of design solutions for coal mines based on metaheuristic algorithms. *Ugol'*. 2026;(2):80-84. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-2-80-84.

**ВВЕДЕНИЕ**

Основные составляющие нечеткой когнитивной модели функциональной структуры технологической системы угольной шахты на основе сравнительного многоатрибутного ранжирования и оптимизации выглядят следующим образом: нечеткая когнитивная модель функциональной структуры технологической системы угольной шахты формализуется на основе следующих составляющих элементов (см. рисунок) [1, 2, 3, 4].

**ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Многофакторные задачи теории нечетких множеств и сам процесс выбора рациональных проектных решений технологических систем угольных шахт предполагают производить сравнение элементов технологических систем по предпочтительности. В этом случае каждый элемент технологической системы необходимо поставить в соответствие с его значимостью, т.е. проранжировать их с учетом влияющих факторов.

Необходимость ввода удельных коэффициентов важности отдельных элементов уровней при определении их значимости основана на следующих предпосылках:

– в силу ограниченности финансово-материальных ресурсов, которые на современном этапе развития рыночной экономики выделяются на строительство и развитие угольных шахт, почти каждый уровень технологической системы угольной шахты является конкурирующим с другими ее уровнями в том смысле, что увеличение качества какого-либо уровня до оптимальной величины обычно связано с уменьшением возможности увеличить до оптимальных значений качество других уровней технологической системы;

– естественно, что в этих условиях в большей степени нужно приближать к оптимальным значениям качества те уровни технологической системы, которые наиболее важны и актуальны для наибольшей эффективности их функционирования.

Согласно проводимым в данной области исследованиям, для достижения этой цели наиболее полно разработаны экспертные методы определения функций полезности частных элементов уровней технологических систем, которые при правильной постановке в методическом плане и проведении дают объективные и достоверные результаты с удовлетворяющей надежностью.

В данной работе это реализуется с помощью следующей процедуры. Каждому уровню важности, выраженному лингвистически, соответствует число, например, небольшому превосходству присваивается число 3, а очень большому – 9.

Собственный вектор матрицы находится из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} C \cdot W = \lambda_{\max} \cdot W \\ \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \dots + \omega_n = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где:  $C$  – множество Эджворта-Парето;  $W$  – собственный вектор матрицы;  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$  – координаты собственного вектора;  $\lambda_{\max}$  – максимальное собственное значение матрицы.

В окончательном виде вес каждого критерия определяется как корень  $n$ -ой степени ( $n$  – размерность матрицы сравнений) из произведений элементов каждой строки.

Синтез полученных коэффициентов важности осуществляется по следующей формуле:

$$S_j = \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot V_{ij}, \quad (2)$$

где:  $S_j$  – показатель качества  $j$ -ой альтернативы;  $\omega_i$  – вес  $i$ -го критерия;  $V_j$  – важность  $j$ -ой альтернативы по  $i$ -ому критерию.

Наибольший по значению показатель определяет лучший вариант из входящих в множество Эджворта-Парето.

Программное обеспечение нечеткого моделирования технологической системы угольной шахты



Составляющие элементы когнитивного моделирования

The constituent elements of cognitive modeling

с обоснованием основных проектных решений и их параметров представлено программным продуктом Fuzzy Logic Toolbox системы математического моделирования MATLAB [5, 6].

Процесс нечеткого моделирования может осуществляться в данной системе с помощью специального пакета расширения Fuzzy Logic Toolbox, в котором реализованы десятки различных функций нечеткой логики и нечеткого вывода и который поддерживает все этапы разработки нечетких систем, включая синтез, исследование, проектирование, моделирование и внедрение в режиме реального времени [7].

Входными параметрами первой стадии освоения месторождения (обоснование проектных решений по выбору способа отработки запасов месторождения) – первое обобщенное терм-множество – рассматриваются следующие нечеткие лингвистические переменные, характеризующие технологичность горно-геологических условий эксплуатации:

- Расстояние до верхней границы шахтного поля (мощность наносов). Терм-множество данной лингвистической переменной содержит следующие термы: «мощность наносов небольшая» (до 25 м), «мощность наносов средняя» (25-40 м), «мощность наносов большая» (более 40 м);

- Размеры шахтного поля по простиранию. Терм-множество данной лингвистической переменной содержит следующие термы: «малые» (от 0 до 3 км), «средние» (от 2,5 до 7,5 км), «большие» (от 7,0 до 15 км);

- Размеры шахтного поля по падению. Терм-множество данной лингвистической переменной будет содержать следующие термы – «малые» (от 0 до 3 км), «средние» (от 1,5 до 4,5 км), «большие» (от 4 до 6 км);

- Угол залегания пластов по падению. В терм-множество будут входить следующие значения в соответствии с существующей классификацией – «пологие» (от 0 до 18°), «наклонные» (от 19 до 35°), «круто-наклонные» (от 36 до 56°);

- Глубина залегания. В терм-множество будут входить следующие значения – «малая» (от 0 до 500 м), «средняя» (от 250 до 750 м), «значительная» (от 500 до 1000 м);

- Число вскрываемых пластов. Терм-множество данной лингвистической переменной будет содержать следующие термы – «один» и «несколько».

Выходные параметры первого обобщенного терм-множества будут представлены следующими лингвистическими переменными, которые согласованы с основными классификационными признаками – способ отработки запасов месторождения. Термы, входящие в данное множество: «открытый», «подземный», «совместный» («открыто-подземный»). Общее число правил, входящих в базу данных, – 7.

Входными параметрами второго обобщенного терм-множества – технологической структуры отработки запасов шахтных и выемочных полей – являются лингвистические переменные, перечисленные в первом обобщенном терм-множестве, с добавлением следующих:

- гипсометрия залегания угольных пластов. Включает два термина: «выдержанная» и «невыдержанная»;

- газообильность. Включает два термина: небольшая (0 – 15 м<sup>3</sup>/т), большая (свыше 15 м<sup>3</sup>/т).

Выходными параметрами второго обобщенного терм-множества являются технологические структуры отработки запасов. Термы, входящие в данное множество: «классические», «шахта-лава», «шахта-пласт». Общее число правил, входящих в базу данных, – 10.

Входными параметрами третьего обобщенного терм-множества (обоснование проектных решений по вскрытию шахтных полей) – рассматриваются следующие нечеткие лингвистические переменные – характеристики горно-геологических условий эксплуатации:

- Размеры шахтного поля по падению. Терм-множество данной лингвистической переменной будет содержать следующие термы: «малые» (от 0 до 3 км), «средние» (от 1,5 до 4,5 км), «большие» (от 4 до 6 км);

- Угол залегания пластов по падению. В терм-множество будут входить следующие значения в соответствии с существующей классификацией: «пологие» (от 0 до 18°), «наклонные» (от 19 до 35°), «круто-наклонные» (от 36 до 56°);

- Глубина залегания. В терм-множество будут входить следующие значения: «малая» (от 0 до 500 м), «средняя» (от 250 до 750 м), «значительная» (от 500 до 1000 м);

- Число вскрываемых пластов. Терм-множество данной лингвистической переменной будет содержать следующие термы – «один» и «несколько»;

- Газообильность. Термы, входящие в данное множество: «низкая» (от 0 до 5 м<sup>3</sup>/т), «средняя» (от 5 до 10 м<sup>3</sup>/т), «высокая» (от 10 до 15 м<sup>3</sup>/т), «сверхвысокая» (от 15 м<sup>3</sup>/т).

Выходные параметры третьего обобщенного терм-множества будут представлены следующими лингвистическими переменными, которые согласованы с основными классификационными признаками:

- Расположение главных вскрывающих выработок (стволов). Термы, входящие в данное множество: «центральное-сдвоенное», «центральное-отнесенное», «фланговое».

- Число транспортных (подъемных) горизонтов. Термы, входящие в данное множество: «одного горизонтное», «многогоризонтное».

- Тип главных вскрывающих выработок. Термы, входящие в данное множество: «наклонные», «наклонные и вертикальные», «вертикальные».

- Тип вспомогательных вскрывающих выработок. Терм-множество данной лингвистической переменной будет содержать следующие термы: «без вспомогательных вскрывающих выработок», «горизонтальные вскрывающие выработки», «наклонные вспомогательные вскрывающие выработки».

- Схемы вентиляции шахты. Терм-множество данной лингвистической переменной содержит следующие термы: «центральное-сдвоенное», «центральное-отнесенное», «фланговое», «секционная», «отнесенное». Общее число правил, входящих в базу знаний, – 10.

Входными параметрами второй стадии освоения месторождения (обоснование проектных решений по подготовке шахтных полей), формирующими четвертое обобщенное терм-множество, кроме уже рассмотренных ранее угла падения пластов, числа вскрываемых пластов, размера шахтного поля по падению, размера шахтного поля по простиранию, рассматриваются следующие нечеткие лингвистические переменные:

– Мощность пластов. Термы, входящие в данное множество: «весьма тонкие и тонкие» (0,7 -1,2 м), «средней мощности» (1,2 – 3,5м), «мощные» (более 3,5 м);

– Газообильность. Термы, входящие в данное множество: «низкая» (от 0 до 5 м<sup>3</sup>/т), «средняя» (от 5 до 10 м<sup>3</sup>/т), «высокая» (от 10 до 15 м<sup>3</sup>/т), «сверхвысокая» (от 15 м<sup>3</sup>/т);

– Водообильность. Терм-множество данной лингвистической переменной будет содержать следующие термы: «низкая» (менее 100 м<sup>3</sup>/ч), «средняя» (100-500 м<sup>3</sup>/ч), «высокая» (более 500 м<sup>3</sup>/ч).

В качестве выходных параметров подсистемы назначаются следующие лингвистические переменные: схема подготовки, термы, входящие в данное множество: «панельная», «этажная» и «погоризонтная»; тип системы подготовительных выработок на транспортном горизонте в зависимости от числа разрабатываемых пластов, термы, входящие в данное множество: «индивидуальная», «групповая»; расположение подготовительных выработок относительно пласта, терм-множество данной лингвистической переменной будет содержать следующие термы: «пластовые», «полевые», «пластово-полевые». База правил нечетких множеств формируется по аналогии с предыдущей. Число правил, входящих в базу знаний, – 8.

Входными параметрами совмещенной стадии «Отработка запасов шахтных полей» являются лингвистические переменные, рассмотренные ранее, – «угол залегания пластов по падению», «мощность пласта», «газообильность» и т.д.

Выходными параметрами являются следующие лингвистические переменные:

– Проведение подготовительных выработок по отношению к движению очистного забоя 1. Терм-множество лингвистической переменной состоит из следующих значений – «столбовая система», «сплошная система», «комбинированная система»;

– Проведение подготовительных выработок по отношению к движению очистного забоя 2. Терм-множество лингвистической переменной состоит из следующих значений: «камерная система», «камерно-столбовая система», «короткими столбами»;

– Длина очистного забоя. Терм-множество лингвистической переменной состоит из следующих значений: «короткозабойный» и «длиннозабойный»;

– Направление движения очистного забоя. Термы, входящие в данное множество: «по простиранию», «по падению», «по восстанию», «по диагонали». Число правил, входящих в базу знаний, – 10.

После создания подсистем нечеткого вывода на вход существующим подсистемам подается набор горно-геологических и горнотехнических характеристик и параметров, выраженных численно.

Необходимая база знаний представляется нечеткими продуктами, основанными на существующих нормативно-технических и технологических проектных документах. Форма правил базируется на использовании стандартных конструкций.

Для всех подсистем устанавливаются следующие характеристики нечеткого вывода:

– в качестве метода логической конъюнкции принят метод минимального значения;

– в качестве метода вывода заключения принят метод минимального значения;

– в качестве метода агрегирования принят метод максимального значения;

– в качестве метода введения нечеткости принят метод центра тяжести для дискретного множества.

В качестве превалирующей функции принадлежности в большинстве случаев используется треугольная с расширенной схемой обработки нечеткого вывода в рамках ANFIS [7, 8].

## ВЫВОДЫ

При формализации алгоритмического и архитектурного наполнения систем поддержки принятия проектных решений в режимах моделирования и прогнозирования весьма важной функцией является анализ динамических процессов различной направленности, так как объект моделирования (функциональная структура технологической системы угольной шахты) рассматривается в представлении совокупности взаимодействующих между собой технологических подсистем, процессов и операций, увязанных в реальном пространстве с учетом динамической составляющей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках решения задач заявленной проблематичной области удобно и корректно задействовать математический и логический аппарат теории графов (знаковых взвешенных и функциональных, квазиупорядоченных и т.п.), причем отдельные элементы графа могут выступать как в количественной, так и в качественной форме. Временной фактор в данном модельном представлении будет иметь функцию отражения последовательности изменения состояний функциональной структуры в режиме когнитивного моделирования.

## Список литературы • References

1. Беляев В.В., Агафонов В.В. Синтез высокопроизводительных и прогрессивных технологических систем угольных шахт // Уголь. 2020;(11):36-42. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-11-36-42. Belyaev V.V., Agafonov V.V. Synthesis of high-performance and advanced technological systems for coal mines. *Ugol*. 2020;(11):36-42. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-11-36-42.
2. Клевещ Н.И. Метаэвристические алгоритмы оптимизации. Симферополь, 2023. С. 218.
3. Влад А.И., Санникова Т.Е. Анализ метаэвристических методов идентификации параметров для агентных моделей / XIV Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2024. Москва 17-20 июня 2024 г. М., 2024.
4. Лапко Н.А. Алгоритм HONEY BADGER: метаэвристический алгоритм для решения задач оптимизации / Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова. 2023. С. 261-264.
5. Насфутдинова Д.Р. Разработка программного обеспечения для решения оптимизационных задач в среде MATLAB / Конференция Энергия-2022. Иваново, 11–13 мая 2022 года. 2022. С. 54.

6. Гатин Р.Р., Бикмухаметов Р.Р. Функции и возможности конструктора *Anfis* для проектирования нечетких нейронных сетей / Наука сегодня: реальность и перспективы. Материалы международной научно-практической конференции. 2019. С. 11-13.
7. Титов Д.Д. Алгоритмы вычисления центридов интервальных нечетких множеств второго типа. В сборнике статей: Математическое и программное обеспечение вычислительных систем. 2019. С. 58.
8. Лабинский А.Ю., Уткин О.В. Система нечеткого вывода с нечеткими функциями принадлежности // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2016. №. 1. С. 68-73.  
Labinsky A.Yu., Utkin O.V. Fuzzy inference system with fuzzy membership functions. *Scientific and analytical journal "Bulletin of the Saint Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia"*. 2016;(1):68-73. (In Russ.).

#### Authors Information

**Agafonov V.V.** – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Geotechnology of Subsoil Development, Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: msmu-prpm@yandex.ru

**Kozlova O.Yu.** – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics-3, MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: kozlova\_ou@mail.ru

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.09.2025

Поступила после рецензирования: 17.01.2026

Принята к публикации: 29.01.2026

#### Paper info

Received September 25, 2025

Reviewed January 17, 2026

Accepted January 29, 2026

## Работник «Южного Кузбасса» награжден Почетным знаком города Междуреченска «Служение»

**Машинист экскаватора угольной компании «Южный Кузбасс» (ПАО «Южный Кузбасс», входит в Группу «Мечел») Сергей Рудаков удостоен значимой городской награды – Почетного знака Междуреченского муниципального округа «Служение». Торжественное вручение награды состоялось в городском Дворце Культуры. Сергей Рудаков получил заслуженный Почетный знак из рук главы междуреченского муниципального округа Павла Камбалина.**

Почетный знак «Служение» – новая форма общественного признания горожан, которые внесли значимый вклад в развитие Междуреченска. Знак символизирует важность честного труда и преданность интересам родного края.

Вся трудовая деятельность Сергея Рудакова связана с угольной отраслью. Сергей Михайлович трудится на разрезе «Красногорский» 47 лет. За годы работы на предприятии он зарекомендовал себя в качестве высококвалифицированного специалиста, способного решать сложные задачи. Сегодня Сергей Михайлович – бригадир экипажа мощного шагающего экскаватора-драглайна. У коллектива хорошие производственные показатели. Сергей Рудаков не только отлично владеет техникой, но и постоянно совершенствует свои знания и навыки. Кроме того, Сергей Михайлович – силь-



ЮЖНЫЙ КУЗБАСС



ный наставник, передающий ценные знания и опыт молодому поколению.

«Сергей Рудаков – настоящий «золотой фонд» «Южного Кузбасса». Опытный и четко знающий свое дело специалист, ответственный и принципиальный. Победитель и призер корпоративных конкурсов профессионального мастерства. Почетный знак Междуреченского муниципального округа «Служение» – заслуженная награда для человека, который посвятил свою жизнь развитию угольной промышленности и прославлению родного края. Почетный знак займет достойное место среди других высоких наград Сергея Михайловича», – сказал генеральный директор ПАО «Южный Кузбасс» Алексей Тихонский.

Пресс-служба  
ПАО «Южный Кузбасс»