Логистические транспортные системы / Logistic Transport Systems

Научная статья Original article
DOI: 10.12731/3033-5965-2026-16-1-418 **EDN:** QDMXJM
УДК 656.073

Нечеткая система оценки определения объективного решения перевозки нефтепродуктов

А.Н. Ляшенко
Министерство экономического развития России, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. В статье рассматривается вопрос определения рационального варианта доставки груза M_T из пункта A^0 в пункт B^0 с максимальным удовлетворением системы критериев k_j. В сущности членам экспертного совета предлагается найти единую меру на множестве M_j, т.е. дать значения веса λ_j каждому M_j единого выбранного «эталона», предложенной системе по принятию решений. Вычисляемые M_{ji} соответствуют $Ц^{-1}_{ji}\,Ц_{ji}$ с точностью менее 0,1%. Это значительно упрощает задачу экспертного совета, повышает объективность оценок k_j, повышает обоснованность и объективность выбора рационального варианта доставки груза.

В области экспертного совета принимается интуитивный подход, при использовании предлагаемого математического аппарата принимается количественный подход.

Цель. Разработать и апробировать математическую модель на основе аппарата нечетких множеств, позволяющую формализовать процесс принятия решений при выборе маршрута доставки нефтепродуктов.

Материалы и методы. Теоретической и методологической основой исследования явились системный анализ и моделирование, теория нечетких множеств, статистический анализ и корреляционно-регрессивный анализ, а также научно-инженерные работы для различных видов экспертных оценок, используемый для определения значений критериев при сравнении рассматриваемых вариантов доставки нефтепродуктов.

Результат. Математический аппарат нацелен на многокритериальный анализ с математическим решением задачи и является инструментом для выбора лучших схем, в том числе гипотетических (планируемых), в частности с использованием логистических объектов по видам транспорта, согласно выбранным логистическим полигонам с конкурирующими маршрутами и с вариацией видов транспорта.

Ключевые слова: пути доставки нефтепродуктов; мультимодальная логистика; нечеткие множества; исходные данные; конечные цели; экспертный выбор рационального маршрута; математическая модель; вычисление оценок «качества» в процессе выбора; предложения по принятию решений

Для цитирования. Ляшенко, А. Н. (2026). Нечеткая система оценки определения объективного решения перевозки нефтепродуктов. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии, 16*(1), 115–131. https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-418

Fuzzy system for determining an objective solution for the transportation of petroleum products

A.N. Lyashenko

Ministry of Economic Development of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

Abstract

Background. The article discusses the issue of determining the rational option for delivering cargo M_T from point A^0 to point B^0 with maximum satisfaction of the k_j system of criteria. Essentially, the members of the expert council are asked to find a single measure on the set M_j, i.e., to assign a weight value λ_j to each M_j of a single selected «standard» proposed by the decision-making system. The calculated M_{ji} correspond to $Ц^{-1}_{ji}$ $Ц_{ji}$ with an accuracy of less than 0.1%. This significantly simplifies the task of the expert council and increases the objectivity of the k_j assessments, increases the validity and objectivity of choosing the most rational cargo delivery option.

In the field of the expert council, an intuitive approach is adopted, while using the proposed mathematical apparatus, a quantitative approach is adopted.

Purpose. To develop and test a mathematical model based on fuzzy sets that allows formalizing the decision-making process when selecting a delivery route for petroleum products.

Materials and methods. The theoretical and methodological basis of the study was the system analysis and modeling, fuzzy set theory, statistical analysis and correlation-regression analysis, as well as scientific and engineering works for various types of expert assessments, used to determine the values of criteria when comparing the considered options for the delivery of petroleum products.

Result. The mathematical apparatus is aimed at multi-criteria analysis with a mathematical solution of the problem and is a tool for selecting the best schemes, including hypothetical (planned) ones, in particular, using logistics facilities by mode of transport, according to the selected logistics polygons with competing routes and varying modes of transport.

Keywords: ways of delivery of oil products; multimodal logistics; fuzzy sets; initial data; final goals; expert selection of a rational route; mathematical model; calculating "quality" estimates in the selection process; proposals for decision-making

For citation. Lyashenko, A. N. (2026). Fuzzy system for determining an objective solution for the transportation of petroleum products. *Transportation and Information Technologies in Russia*, *16*(1), 115–131. https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-418

Введение

Предлагаемый математический аппарат является системой по принятию объективных решений, учитывающих в том числе транспортные узлы в мультимодальных перевозках. Представленная в работе система направлена на использование в разнопрофильных логистических проектах, нацеленных на обнаружение, сокращение излишних технических и финансовых издержек, выбор возможных рациональных альтернатив.

В настоящей работе предлагается возможность адаптации нечеткой системы оценки определения объективного решения перевозки нефтепродуктов под различные критерии риска, включая как обстановку на платформе нестабильных территорий с участием российской стороны и смежных операторов-иноагентов в целях рационализации транспортных проектов по управлению логистическими процессами [1-3]. В системе учтена возможность проработать риски, если они оценены в баллах, местах. Стоит учесть, что риски рассматриваются в закрытом режиме, пример Северный Поток-2 (последствия, результат). Предметом исследования выступает принцип теории нечетких множеств и сопутствующих узлов маршрутов доставки углеводородного сырья (принята номенклатура нефть сырая, нефтепродукты) при учете реальных и близких к реальным условиям различных режимов работ. Транзитивность достигается как по горизонтали, так и по вертикали. Любая пара $(M_j, П_j)$ определяет величины $M_{j\lambda i}$ для $\forall j \in N_2$, $\lambda \in N_{3j}$. По этим значениям находим лучшее удовлетворение k_j для $\forall j \in N_2$ (supp M_{ji}, или inf M_{ji} в зависимости от группы в которую отнесен k_j). Логистические транспортные системы с расширением плоскости учета рисков [4-12] требуют адаптированные системы оценок в условиях неопределенности с интегрированием экспертных знаний, качественных и количественных оценок, статистических данных. В трудах [13-21] определены оценки элементов нечеткого аппарата. На платформе теории нечетких множеств разработано множество способов к реализации нечетких вычислений [22-27].

В результате сложилась необходимость разработки математической модели выбора решений на нечетком множестве данных в сфере мультимодальной логистики.

В настоящей работе рассматриваются подобные задачи, возникающие в процессе определения законодательного варианта доставки груза из отправной точки до конечного пункта заказчика смежными видами транспорта в сфере мультимодальной логистики.

Вариантов доставки груза может быть несколько. Они должны удовлетворять ряд требований (критериев). Степень удовлетворения каждого критерия экспертный совет ставит релевантную оценку (места, баллы, очки). Их анализ рекомендует наиболее рациональную доставку груза.

Результаты и обсуждение

Применение системы к элементам объекта, узлам

Если вариантов доставки n_1, условий качества n_2, тогда каждый член экспертного совета должен дать n_1; n_2 оценок. Ответственность значительная. Проблема в том, что критерии имеют разные размерности, возможно определенно противоречивые. Решение таких задач практически отсутствует. В некоторых отраслях (например, при определенных оптимальных стационарных режимах работы магистральных газопроводов по произвольным сетям) решение находится, но при этом (часто завуалировано) используются приоритеты критериев (в сущности определяется мера на множестве критериев). Проблема сводится к рациональному удовлетворению некоторого одного гипотетического критерия.

В настоящей работе определение такой меры на множестве критериев достаточны только для одного варианта доставки груза, эталон остается за экспертным советом. Оценки для остальных вычисляются с использованием предлагаемой математической модели. Тогда выбор рационального варианта доставки на конечных множествах критериев и вариантов доставки элементарен.

Предлагаемая математическая модель позволяет существенно сократить трудозатраты экспертного совета, упростить процесс выбора варианта доставки груза, повысить объективность каждого критерия в каждом варианте. Оценки приоритетности критериев в эталонном варианте возлагается на экспертный совет. Настоящая система оценки определения объективного решения перевозки нефтепродуктов написана по аналогии с Рядом Тейлора, по направлению непрерывной топологии с использованием локальной линейной зависимости и с учетом локальной кривизны. Проверка на точность для всех i составляет до 0,1%.

Сохранение лучшего варианта при вычислении вариации исходных данных. В системе учтена возможностей проверки на устойчивость рационального $A_{i_0} \in A^{II}$ варианта. Устойчивость проверяется по основным критериям. В этих целях $Ц_{ji}$ цифровая величина k_j увеличивается (уменьшается), процесс прекращался при смене рационального $A_{i_0} \in A^{II}$ варианта, при этом определяются границы величин оценок критериев.

Техно-практическая постановка задачи

Рассмотрим практическую задачу определения рационального варианта доставки груза в частности жидкого топлива, в плановом регионе определенной массы из пункта A^0 в пункт B^0. Считаем заданной величину Т $\frac{\text{тонна}}{\text{время}}$ (плановая доставка массы груза в определенный период времени). Считаем, что варианты решения задачи множества А несколько. Из них выбраны возможные $A^{II} \subset A$, из которых определены допустимые $A^{II} \subset A^{I} \subset A$, т.е. гарантированно готовые к эксплуатации.

Каждый вариант $\forall A_i \subset A^{II}$, $i \in N_1$, $N_1 = \{1, 2, \ldots, n_1\}$, n_1 – число вариантов может включать в себя участки: $l_ж$ – железнодорожный транспорт, $l_м$ – морской, $l_р$ – речной, $l_а$ – автомобильный. Могут входить узлы перевалок груза, емкости хранения (резервуары, различные терминалы). Считаем, что данные о параметрах: $l_ж$, $l_м$, $l_р$, $l_а$; видов транспорта; терминалах известны.

Заказчик и исполнитель доставки груза всегда выдвигают соблюдения ряда требований. Обозначим их множеством $\{k_j\}$, $j\ N_2$, $N_2 = \{1, 2, \ldots, n_2\}$, n_2 – число требований (далее k_j), скоростей видов транспорта ($\frac{км}{час}$), длины участков l (км), выполнения работ по выгрузке (загрузки) груза и др. Т.е. критерии могут носить независимый характер и быть противоречивыми, что значительно усложняет процесс выбора рационального варианта A_i в котором заинтересован исполнитель.

Каждый критерий k_j имеет величину в своей размерности во всех вариантах A_i.

Задача экспертного состава

Представляется информация о $\forall A_i \in A^{II}$, $i \in N_1$; требования (критерии) k_j, $j \in N_2$ для $\forall A_i$; их величины цены $Ц_{ji}$. Требуется дать оценку каждому варианту доставки груза. По их анализу рекомендовать исполнителю наиболее рациональный вариант доставки груза. Исполнитель может представить свои поправки λ_{ji} (административный ресурс к $\forall k_j$ в любом варианта A_i с учетом λ_{ji} процесса выбора повторяется).

Критерии имеют различные технические размерности: время (t), стоимость (руб.).

Рассматривается математическая модель принятия решений в условиях нечеткости исходных данных на примере выбора «лучшего» варианта доставки груза M_T из пункта A^0 в пункт B^0, различными техническими комбинированными средствами: железнодорожный, автомобильный, водный. Возможны перевозки груза с использованием терминалов.

Сложность состоит в нечеткости исходных данных, понятие «лучшего» в вариантах доставки. Математическая модель содержит два способа решения. В первом полагается локальная линейность исходных и рассчитываемых данных, во втором учет их локальной кривизны. Решение должно максимально удовлетворять ряд критериев (требований, ограничений и пр.). Данные для сравнения вариантов имеют размерную физическую (техническую) размерность.

Задача по выбору лучших решений из сравниваемых актуальна не только при транспортировке грузов комбинированным транспортом, но и в других отраслях трудовой деятельности и окажет действительную помощь как при оперативном принятии решений, так и глубоком осмыслении рассчитанных данных для предстоящего выбора.

Основная цель настоящей работы найти «лучший» вариант доставки груза M_T из пункта A^0 в пункт B^0. Обозначим А варианты доставки, содержащие участки различного транспорта: $l_ж$ – железнодорожного транспорта, $l_а$ – автомобильного транспорта, $l_в$ – водного транспорта, возможны перевалки груза в терминалах. Выделим допустимые варианты $A^I \epsilon A$, готовые к эксплуатации. Обозначим $A_i \epsilon A^I C A$, $i \epsilon N_1 \neq (1,2, \dots, n_1)$, каждый отдельный вариант.

Для выбора «лучшего» варианта A_i ставится комплексные требования различного характера: стоимость перевозки, времени доставки груза, параметры терминалов, времени перегрузок и т.д. Выполнение параметров назовем критериями k_j, $j \epsilon N_2$. $N_2 = (1,2, \dots, n_2)$. Выделим из них основные k_j и $k \ \forall j \epsilon N_2$, вспомогательные $k_{j\lambda}$, $\lambda \epsilon N_{3j}$, $N_{3j} = (1, 2, \dots, n_{3j})$, полагая параметры $\sum_{\lambda=1}^{n_{3j}} k_{J\lambda} \leq k_J$.

Для части критериев понятие один «лучше» другого, если его параметры больше > (например, прибыль). Для другой части «лучше» – значит менее затратный (стоимость, время доставки и др.). Для третьих рост (убыль) безразлична, важна определенность (параметры устойчивости варианта). k_j делится на три группы. При выборе лучшего варианта доставки груза, на основные и вспомогательные.

Параметры $k_{j\lambda}$ представляются в виде прямоугольной матрицы $Ц_{j\lambda i}$, в которой вектор-строка - параметры $k_{j\lambda}$ в вариантах доставки A_i, $i \in N_1$ имеют одинаковую физическую размерность. Имеет место обычная топология, но с «оглядкой», ибо параметры k_j в разных вариантах доставки. Вектор-столбцы $Ц_{j\lambda}$ отражают значения $k_{j\lambda}$ в $\forall A_i \in A^I$. Значения компонентов имеют разные размерности.

Формализованная постановка задачи. Дано: $A_i \in A^I$, $i \in N_1$, $k_{j\lambda}$, $j \in N_2$, $\lambda \in N_{3j}$. Требуется найти «лучший» вариант доставки груза $M_т$ из пункта A^0 в пункт B^0 с более полным удовлетворением $k_{j\lambda}$.

В основе математической модели используется представление Тейлора в окрестности достаточно гладкой функции:

$$f(x_0 + x) = f(x_0) + \sum_{S=1}^{n} \frac{1}{S!} \frac{\lambda^S f(x)}{\lambda x^S}\Big|_{x = x_0} x^n + O(x^n). \qquad (1)$$

Используем принцип, что многое познается в сравнении.

Сделаем оценки данных $Ц_{j\lambda i}$ в «местах» $M_{j\lambda i}$ для $\forall_j \in N_2$, $\forall \lambda \in N_{3j}$, в $\forall i \in N_1$. Для этого примем математическую модель (конечно-разностный аналог (1)) в виде «трехточки» (составим на 2 способах вычисления $M_{j\lambda i}$. Первый предполагает локально-линейные отношения в исходных и вычисленных данных. Второй использует их локальную кривизну. Для упрощения изложения временно опускаем индексы jλ).

Способ 1. Принят в виде (два члена ряда (1))

$$-a_i M_{i-1} + M_i + (a_i - 1) M_{i+1} = 0, i \in N_1/(i = 1, i = n_i), \qquad (2)$$

где

$$a_i = \frac{Ц_{i+1} - Ц_i}{Ц_{i+1} - Ц_{i-1}}, Ц_{i-1} \neq Ц_i \neq Ц_{i+1}$$

Коэффициенты a_i вычисляются, используя исходные данные. Систему рекуррентных отношений (2) замкнем среднеарифметическим отношением со средним значением П.

$$\sum_{i \in N_2} (M_i - П) = 0 \qquad (3)$$

Присуждение количества «мест» часто оценивают по отношению к чему-то. Примем за «эталон» $M_1 = M^I$, тогда (2), (3) примет вид

$$CX = F, \text{ где} \tag{4}$$

$$C=\begin{pmatrix} 1 & a_2\text{-}1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -a_3 & 1 & a_3\text{-}1 & 0 & & 0 \\ 0 & -a_4 & 1 & a_4\text{-}1 & & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & & 0 \\ & & & & a_{n_{1-1}}-1 & a_{n_{1-1}}-1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$X=\begin{pmatrix} M_2 \\ M_3 \\ \vdots \\ M_{n_1} \end{pmatrix}, \quad F=\begin{pmatrix} a_2M^I \\ 0 \\ \vdots \\ (n_i\Pi^I - M^I) \end{pmatrix}$$

Определитель I C I трехдиагональный, легко вычисляется по исходным данным $Ц_{j\lambda i}$. Величины M_i, $i \in N_1$ / $i = 1$, вычисляются используя метод Крамера. Для этого вместо i-го столбца надо подставить вектор F. Вычисляя полученный определитель I C_i I имеем

$$M_i = \frac{I\,C_i\,I}{I\,C\,I}, i \in N_1 / i = 1 \tag{5}$$

Определитель I C_i I представим в виде разложения по i-му столбцу, тогда получим

$$M_i = \frac{(-1)^i}{I\,C\,I}[(M_{1i-1} + (-1)^{n1}M_{n1i-1}]\,(M^i - (-1)^{ni}M_{n1i-1}\Pi^I \tag{6}$$

где M_{1i-1}, M_{n1i-1} соответствующие миноры матрицы C_i, вычисляются с использованием исходных данных $Ц_{ji}$.

Выражение (6) линейно относительно пары (M^I, Π^I). Потребуем

$$M_i > 0, i \in N_2 \Rightarrow \Pi^I > 0 \tag{7}$$

Этим в пространстве пар определится множество значений G_i (количество мест). Прямые $M_i = 0$ (в пространстве M^I x Π^I) являются границей G_i. Общая часть (чаще между двумя лучами)

$$\bigcap_{i\in N_1} = G_1 \tag{8}$$

Является решением задача качества kj для каждого варианта $A_i \in A^I$.

Вернем индекс j. Вычислены оценки (в местах) для $\forall\, j \in N_2$, $\lambda \in N_{3j}$ для каждого варианта $A_i \in A^I$, $i \in N_1$, т.е. $M_{j\lambda i}$ со структурой аналогичной $Ц_{j\lambda i}$. В ней элемент каждой строки выражается только через пару (M^j, $П^j$), в сущности через элементы M^j.

Способ 2. вычисления $\overline{M}_{ji}$ (черта сверху для отличия от значений вычисленных по Способу 1) учитывает локальную кривизну исходных и рассчитываемых параметров. Матрица $\overline{C}$ тоже трехдиагональна (трехточка) имеет вид:

$$\overline{C}\,\overline{X} = \overline{F} \tag{9}$$

где

$$\overline{C} = \begin{pmatrix} \beta_2 & Y_2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & & & 0 \\ -\lambda_3 & \beta_3 & Y_3 & 0 & 0 & & 0 & & & 0 \\ 0 & -\lambda_4 & \beta_4 & Y_4 & 0 & & \vdots & & & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & & & 0 \\ 0 & & & & & \dots & 0 & -\lambda_{n_1-1} & \beta_{n_1-1} & Y_{n_1-1} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\overline{X} = \begin{pmatrix} \overline{M}_2^j \\ \overline{M}_3^j \\ \vdots \\ \overline{M}_{n_1}^j \end{pmatrix}, \quad \overline{F} = \begin{pmatrix} \lambda_2 \overline{M}^j \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ n_1 \overline{П}^j - \overline{M}^j \end{pmatrix}, \quad \overline{M}_1 = \overline{M}^1$$

где $\lambda_i = (b_i - a_i)$, $\beta_i = 1 - a_i - b_i$, $Y_i = 2a_i - 1$, $b_i = \dfrac{(Ц_{i+1} - Ц_i)^2}{(Ц_i - Ц_{i-1})(Ц_{i+1} - Ц_{i-1})}$,
$Ц_{i-1} \neq Ц_i \neq Ц_{i-1}$, $i \in N_1 / i = 1$.

Система уравнений (9) является аналогом (три члена ряда (1)) представления Тейлора в обычной топологии. Вычисление $\overline{M}_{ji}$ проходит аналогично процессу Способа 1. Любая пара (M^j,$П^j$) определяет величины $M_{j\lambda i}$ для $\forall j \in N_2$, $\lambda \in N_{3j}$. По этим значениям находим лучшее удовлетворение k_j для $\forall j \in N_2$ (supp M_{ji}, или inf M_{ji} в зависимости, от группы которой отнесен k_j). Если экстремумов несколько, то в выбор «лучшего» привлекаются вспомогательные $k_{j\lambda}$, $\lambda \in N_{3j}$.

Предпочтению Способа пока не даем. Заметим: 1) в примерах при $Ц_{ji}= Ц_{ji+1}$ определитель I C I равен нулю, т.е. для критерия k_j выбор «лучшего» не определен, G = ∅; 2) сумма элементов в строках матриц C, $\underline{C}$ для $\forall j \in N_1$ / i=1, i=n, равна нулю. Это является контролем в представлении исходных данных.

Перейдем ко второму формализованному процессу «лучшего» выбора достаточно определить меру во множестве $\{M_j\}$, тогда все M_{ji} определяться, выбор «лучшего» станет очевидным. В численных экспериментах в качестве меры принимаются обыденные отношения.

$$M^j = \frac{Ц_{jI}}{Ц_{joI}} M^{\lambda 0}, j \in N_2 / j_0 \tag{10}$$

Здесь $M^{\lambda 0}$ – «эталон», $j_o \in N_2$, $Ц_{ji}$, $Ц_{ji}$, $Ц_{jo1}$ – исходные данные.

Выбирая пару ($M^{\lambda 0}$, $П^{\lambda 0}$) $\in G \neq \emptyset$ фиксируем ее для всех k_j, $j \in N_2/j_0$.

Матрица $M_{j\lambda i}$ определена с единой мерой, в которой возможен подсчет для $\forall A_i \in A^I$, $i \in N_1$ суммы

$$\sum_{j \in N_2} M_{ji} = M^{0i} \tag{11}$$

Для каждой группы критериев обычным способом находится экстремум

$$\text{exct}\ \{ M^{0i}\} \tag{12}$$

Если лучших вариантов несколько, используются оценки второстепенных $k_{j\lambda}$, $\lambda \in N_{3j}$.

Результаты

Принятая математическая модель (10-12) решает многие логистические задачи по поддержке принятия решений в условиях нечетких исходных данных при выборе объективного варианта перевозки нефтепродуктов, не претендуя на универсальность и охватывает все звенья логистической цепи.

Прикладная направленность представленной системы состоит:

1. В решении основных технологических задач экспертного совета по выбору рационального варианта перевозки груза в условиях нечеткости множеств исходных данных;
2. в представлении расчетных и исходных данных для экспертного совета;
3. в представлении данных устойчивости лучшего варианта A_{i_0}, $i_0 \in N_1$, из допустимых A^{II};
4. в представлении математической модели для вычисления оценок M_{ji} в вариантах доставки груза A_i, $i \in N_1$;

Предложенную систему можно использовать в качестве основы компьютерного «тренажера» с функциями оценивания возможных вариантов доставки груза, устойчивости варианта A_{i_0}, $i \in N_1$, используя вариации параметров исходных данных $Ц_{ji}$, k_{ji}, M_{ji}, Y_m и др.

Заключение

Разработанная математическая модель обладает широким потенциалом применения в транспортной логистике. Математический аппарат может быть использован:

1. в задачах, где исходные данные затруднены в четком освещении (смежные направления, относящиеся как к транспорту, так и иным профильным направлениям).

2. в качестве информационного обеспечения к аналогичной подзадаче выбора рациональных элементов входящих в задачу узлов, т.е. быть вложенной подзадачей в общей задачи рационального выбора доставки груза;

3. для анализа временных параметров и оценки окупаемости принятых решений;

4. для анализа инноваций в их практическом внедрении;

5. в качестве инструмента экспертного анализа - «компьютерного тренажера» по анализу устойчивости принимаемых решений и рациональности в выборе путей достижения цели;

6. с учетом адаптации представленной системы, под различные критерии риска, включая как обстановку на платформе нестабиль-

ных территорий с участием российской стороны и смежных операторов-иноагентов, в целях рационализации транспортных проектов по управлению логистическими процессами;

7. для планирования инфраструктуры (например, размещения нефтяных терминалов) в точках пересечения предполагаемых (гипотетических) и существующих маршрутов для снижения издержек на перспективу развития логистики углеводородного сырья.

В области экспертного совета принимается интуитивный подход, при использовании настоящей модели принимается количественный подход. Представленная математическая модель является системой по принятию объективных решений, учитывающая в том числе транспортные узлы в мультимодальных перевозках. В сущности, членам экспертного совета предлагается найти единую меру на множестве M_j, т.е. дать значения веса каждому M_j единого выбранного «эталона» предложенной математической модели. Это повышает обоснованность и объективность выбора рационального варианта доставки груза.

Список литературы

1. Ляшенко, А. Н. (2024). Формализованная математическая постановка экспертной оценки по принятию решения в сфере мультимодальной логистики. *Транспорт: наука, техника, управление*, (1), 12–17. https://doi.org/10.36535/0236-1914-2024-01-2. EDN: https://elibrary.ru/PWJXZV
2. Ляшенко, А. Н. (2022). Постановка задачи принятия решений на нечётком множестве данных в сфере мультимодальных перевозок. *Транспорт Российской Федерации*, (1–2), 6–8. EDN: https://elibrary.ru/AUKHNO
3. Ляшенко, А. Н. (2022). Математическая модель принятия решений на нечётком множестве данных в сфере логистики. *Автоматика на транспорте*, *8*(2), 188–197. https://doi.org/10.20295/2412-9186-2022-8-02-188-197. EDN: https://elibrary.ru/QOSJLY
4. Котенко, А. Г. (2014). *Методология риск-ориентированного планирования качественных показателей эксплуатационной работы железных дорог* (Докторская диссертация, Петербургский государственный университет путей сообщения). Санкт-Петербург. 330 с. EDN: https://elibrary.ru/UXTVCI
5. Котенко, А. Г. (2011). О подходах к снижению вычислительной сложности логических задач анализа риска. *Известия Петербургского университета путей сообщения*, (1), 180–188. EDN: https://elibrary.ru/NTZCGJ

6. Amro, A. W., & Gkioulos, V. (2022). Communication and cybersecurity tested for autonomous passenger ship. В: *Computer Security. ESORICS 2021 International Workshops* (Vol. 13106, pp. 5–22). https://doi.org/10.1007/978-3-030-95484-0_1
7. Aven, T. (2010). *Misconceptions of risk*. John Wiley and Sons Inc. 248 p.
8. Aven, T. (2008). *Risk analysis. Assessing uncertainties beyond expected values and probabilities*. John Wiley and Sons Inc. 204 p.
9. Aven, T., & Vinnem, J. (2007). *Risk management: With application from the offshore petroleum industry*. London, England. 211 p.
10. Beaumont, E. A., & Forester, N. H. (1999). *Exploring for oil and gas trap*. The American Association of Petroleum Geologists. 100 p.
11. Kavallieratos, G., & Katsikas, S. (2020). Managing cyber security risks of the cyber-enabled ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, *8*(768), 19 p. https://doi.org/10.3390/jmse8100768. EDN: https://elibrary.ru/XOKTHF
12. Shapiro, J. F. (2001). *Modeling the supply chain*. Thomson Learning. 586 p.
13. Баранов, Л. А., Иванова, Н. Д., & Михалевич, И. Ф. (2024). Нечёткая система оценки рисков информационной безопасности интеллектуальных систем водного транспорта. *Автоматика на транспорте*, *10*(1), 7–17. https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-01-7-17. EDN: https://elibrary.ru/ULCDOD
14. Azam, M. H., Hasan, M. H., Hassan, S., et al. (2020). Fuzzy Type-1 triangular membership function approximation using fuzzy C-means. В: *International Conference on Computational Intelligence (ICCI)* (pp. 115–120). https://doi.org/10.1109/ICCI51257.2020.9247773
15. Cahyaningrum, Y., Suryono, S., & Warsito, B. (2021). Fuzzy-expert system for indicator and quality evaluation of teaching and learning processes online study programs. В: *The 6th International Conference on Energy, Environment, Epidemiology, and Information System (ICENIS 2021)* (Vol. 317, 11 p.). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131705021. EDN: https://elibrary.ru/LKKOVY
16. Dubois, D., & Prade, H. (1993). Fuzzy sets and probability: Misunderstandings, bridges and gaps. В: *2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZY 1993)* (pp. 1059–1068). IEEE.
17. Kharbanda, V. (2023). Application of artificial intelligence in cybersecurity (IJSPPC). *Journal*, *15*(1), 1–13. https://doi.org/10.4018/ijsppc.318676
18. Kharchenko, V., Illiashenko, O., Fesenko, H., et al. (2022). AI cybersecurity assurance for autonomous transport systems: Scenario, model, and IMECA-based analysis. В: Dziech, A., Mees, W., & Niemiec, M. (Eds.), *Multimedia communications, services and security. MCSS 2022. Communications in computer and information science* (Vol. 1689, pp. 66–79). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20215-5_6

19. Rizvi, S. S., Mitchell, J., Razaque, A., et al. (2020). A fuzzy inference system (FIS) to evaluate the security readiness of cloud service providers. *Journal of Cloud Computing*, *9*(1), 17 p. https://doi.org/10.1186/s13677-020-00164-z. EDN: https://elibrary.ru/GKXOAD
20. Jain, D., Sharma, S. K., & Dhiman, P. (2022). Comparative analysis of defuzzification techniques for fuzzy output. *Journal of Algebraic Statistics*, *13*(13), 874–882.
21. Goudosis, A., & Katsikas, S. (2022). Secure automatic identification system (SecAIS): Proof-of-concept implementation. *Journal of Marine Science and Engineering*, *10*, 805. https://doi.org/10.3390/jmse10060805. EDN: https://elibrary.ru/YNIACE
22. Chalco-Cano, Y., Lodwick, W. A., & Bede, B. (2014). Single level constraint interval arithmetic. *Fuzzy Sets and Systems*, *257*, 146–168. https://doi.org/10.1016/j.fss.2014.06.017
23. Dubois, D., & Prade, H. (1978). Operations on fuzzy numbers. *International Journal of Systems Science*, *9*(6), 613–626.
24. Klir, G. J. (1997). Fuzzy arithmetic with requisite constraints. *Fuzzy Sets and Systems*, *91*, 165–175.
25. Lodwick, W. A. (1999). Constrained interval arithmetic. *CCM Report*, *138*, 1–11.
26. Nagoor Gani, A., & Mohamed Assarudeen, S. N. (2012). New operation on triangular fuzzy number for solving fuzzy linear programming problem. *Applied Mathematical Sciences*, *11*, 525–532. https://doi.org/10.13140/2.1.3405.8881
27. Piegat, A. (2001). *Fuzzy modeling and control*. Springer-Verlag. 728 p.

References

1. Lyashenko, A. N. (2024). Formalized mathematical formulation of expert assessment for decision-making in multimodal logistics. *Transport: Science, Technology, Management*, *(1)*, 12–17. https://doi.org/10.36535/0236-1914-2024-01-2. EDN: https://elibrary.ru/PWJXZV
2. Lyashenko, A. N. (2022). Formulation of the decision-making problem on a fuzzy data set in multimodal transportation. *Transport of the Russian Federation*, *(1–2)*, 6–8. EDN: https://elibrary.ru/AUKHNO
3. Lyashenko, A. N. (2022). Mathematical model of decision-making on a fuzzy data set in logistics. *Automation in Transport*, *8*(2), 188–197. https://doi.org/10.20295/2412-9186-2022-8-02-188-197. EDN: https://elibrary.ru/QOSJLY
4. Kotenko, A. G. (2014). *Methodology of risk-oriented planning of quality indicators for railway operational performance* (Doctoral dissertation, Petersburg State Transport University). Saint Petersburg. 330 p. EDN: https://elibrary.ru/UXTVCI
5. Kotenko, A. G. (2011). On approaches to reducing the computational complexity of logical risk analysis problems. *Proceedings of Petersburg Transport University*, *(1)*, 180–188. EDN: https://elibrary.ru/NTZCGJ

6. Amro, A. W., & Gkioulos, V. (2022). Communication and cybersecurity tested for autonomous passenger ship. В: *Computer Security. ESORICS 2021 International Workshops* (Vol. 13106, pp. 5–22). https://doi.org/10.1007/978-3-030-95484-0_1
7. Aven, T. (2010). *Misconceptions of risk*. John Wiley and Sons Inc. 248 p.
8. Aven, T. (2008). *Risk analysis. Assessing uncertainties beyond expected values and probabilities*. John Wiley and Sons Inc. 204 p.
9. Aven, T., & Vinnem, J. (2007). *Risk management: With application from the offshore petroleum industry*. London, England. 211 p.
10. Beaumont, E. A., & Forester, N. H. (1999). *Exploring for oil and gas trap*. The American Association of Petroleum Geologists. 100 p.
11. Kavallieratos, G., & Katsikas, S. (2020). Managing cyber security risks of the cyber-enabled ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, *8*(768), 19 p. https://doi.org/10.3390/jmse8100768. EDN: https://elibrary.ru/XOKTHF
12. Shapiro, J. F. (2001). *Modeling the supply chain*. Thomson Learning. 586 p.
13. Баранов, Л. А., Иванова, Н. Д., & Михалевич, И. Ф. (2024). Нечёткая система оценки рисков информационной безопасности интеллектуальных систем водного транспорта. *Автоматика на транспорте*, *10*(1), 7–17. https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-01-7-17. EDN: https://elibrary.ru/ULCDOD
14. Azam, M. H., Hasan, M. H., Hassan, S., et al. (2020). Fuzzy Type-1 triangular membership function approximation using fuzzy C-means. В: *International Conference on Computational Intelligence (ICCI)* (pp. 115–120). https://doi.org/10.1109/ICCI51257.2020.9247773
15. Cahyaningrum, Y., Suryono, S., & Warsito, B. (2021). Fuzzy-expert system for indicator and quality evaluation of teaching and learning processes online study programs. В: *The 6th International Conference on Energy, Environment, Epidemiology, and Information System (ICENIS 2021)* (Vol. 317, 11 p.). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131705021. EDN: https://elibrary.ru/LKKOVY
16. Dubois, D., & Prade, H. (1993). Fuzzy sets and probability: Misunderstandings, bridges and gaps. В: *2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZY 1993)* (pp. 1059–1068). IEEE.
17. Kharbanda, V. (2023). Application of artificial intelligence in cybersecurity (IJSPPC). *Journal*, *15*(1), 1–13. https://doi.org/10.4018/ijsppc.318676
18. Kharchenko, V., Illiashenko, O., Fesenko, H., et al. (2022). AI cybersecurity assurance for autonomous transport systems: Scenario, model, and IMECA-based analysis. В: Dziech, A., Mees, W., & Niemiec, M. (Eds.), *Multimedia communications, services and security. MCSS 2022. Communications in computer and information science* (Vol. 1689, pp. 66–79). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20215-5_6

19. Rizvi, S. S., Mitchell, J., Razaque, A., et al. (2020). A fuzzy inference system (FIS) to evaluate the security readiness of cloud service providers. *Journal of Cloud Computing*, *9*(1), 17 p. https://doi.org/10.1186/s13677-020-00164-z. EDN: https://elibrary.ru/GKXOAD
20. Jain, D., Sharma, S. K., & Dhiman, P. (2022). Comparative analysis of defuzzification techniques for fuzzy output. *Journal of Algebraic Statistics*, *13*(13), 874–882.
21. Goudosis, A., & Katsikas, S. (2022). Secure automatic identification system (SecAIS): Proof-of-concept implementation. *Journal of Marine Science and Engineering*, *10*, 805. https://doi.org/10.3390/jmse10060805. EDN: https://elibrary.ru/YNIACE
22. Chalco-Cano, Y., Lodwick, W. A., & Bede, B. (2014). Single level constraint interval arithmetic. *Fuzzy Sets and Systems*, *257*, 146–168. https://doi.org/10.1016/j.fss.2014.06.017
23. Dubois, D., & Prade, H. (1978). Operations on fuzzy numbers. *International Journal of Systems Science*, *9*(6), 613–626.
24. Klir, G. J. (1997). Fuzzy arithmetic with requisite constraints. *Fuzzy Sets and Systems*, *91*, 165–175.
25. Lodwick, W. A. (1999). Constrained interval arithmetic. *CCM Report*, *138*, 1–11.
26. Nagoor Gani, A., & Mohamed Assarudeen, S. N. (2012). New operation on triangular fuzzy number for solving fuzzy linear programming problem. *Applied Mathematical Sciences*, *11*, 525–532. https://doi.org/10.13140/2.1.3405.8881
27. Piegat, A. (2001). *Fuzzy modeling and control*. Springer-Verlag. 728 p.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Ляшенко Антон Николаевич, ведущий консультант

Министерство экономического развития России
Пресненская наб., 10, стр. 2, г. Москва, 123112, Российская Федерация
an-lyashenko@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Anton N. Lyashenko, Lead Consultant

Ministry of Economic Development of the Russian Federation
10, build. 2, Presnenskaya Embankment, Moscow, 123112, Russian Federation
an-lyashenko@yandex.ru
SPIN-code: 4607-2567
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4609-5554

Поступила 11.02.2026 Received 11.02.2026
После рецензирования 10.03.2026 Revised 10.03.2026
Принята 13.03.2026 Accepted 13.03.2026