



МРНТИ 73.37

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-115-131>

## Математическое моделирование подготовки авиационного персонала в сфере обеспечения безопасности полетов

Н.А. Долженко , О.В. Гармаш 

«Академия Гражданской Авиации» Алматы, Республика Казахстан

*E mail:* <sup>1</sup>[n.dolzhenko@agakaz.kz](mailto:n.dolzhenko@agakaz.kz), <sup>2</sup>[o.garmash@agakaz.kz](mailto:o.garmash@agakaz.kz)

**Аннотация.** Современное развитие гражданской авиации сопровождается усложнением организационно-технических систем, ужесточением требований обеспечения безопасности полётов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности образовательных программ подготовки авиационного персонала за счёт применения методов математического моделирования, позволяющих оптимизировать процессы профессиональной подготовки с учётом требований безопасности. Предметом исследования являются процессы подготовки авиационного персонала в контексте обеспечения безопасности полётов. Задачи исследования включают анализ существующих подходов к организации подготовки, разработку математической модели, учитывающей профессиональные компетенции, параметры безопасности, а также внешние и внутренние факторы, влияющие на учебный процесс. Целью работы является построение и апробация математической модели, позволяющей оценить и оптимизировать процесс подготовки авиационного персонала. В исследовании использованы методы системного анализа, теории управления, математического моделирования и имитационного моделирования. Для демонстрации работы модели приведён числовой пример; его результаты носят иллюстративный характер на основе эмпирических данных, позволяющих определить ключевые параметры, оказывающие наибольшее влияние на эффективность подготовки. Результаты работы демонстрируют возможность количественной оценки влияния различных факторов на уровень профессиональной готовности персонала. Полученные выводы позволяют формировать рекомендации по корректировке образовательных программ, ответственных за безопасность полётов.

**Ключевые слова:** авиационный персонал; безопасность полётов; профессиональная подготовка; математическое моделирование;

Поступила 29.09.2025. Доработана 24.02.2026. Принята 27.02.2026. Доступна онлайн 30.03.2026

\* автор по корреспонденции

## **Введение**

Высокие требования к профессиональной деятельности авиационного персонала, обеспечивающего безопасность полётов, обуславливают необходимость формирования устойчивой профессиональной надёжности, включающей комплексную интеграцию мотивационных, когнитивных, эмоциональных, физических и психофизиологических характеристик, определяющих качество выполнения профессиональных функций. Формирование данных характеристик начинается на этапе профессионального самоопределения личности и достигает своего наибольшего развития в процессе получения высшего профессионального образования. Поддержание и развитие профессиональной надёжности требует поиска эффективных методических подходов и организационно-педагогических ресурсов профессиональной подготовки, максимально учитывающих специфику профессиональной деятельности авиационных специалистов.

Обострение данной проблемы обусловлено множеством факторов. Во-первых, специфика профессиональной деятельности авиационного персонала предъявляет высокие требования к состоянию здоровья, физической подготовке, эмоциональной устойчивости и способности функционировать в условиях высокой интенсивности труда. Во-вторых, необходим высокий уровень профессиональной компетентности, включающий фундаментальные теоретические знания, сформированные практические навыки и способность к оперативному усвоению новой информации. В-третьих, профессиональная деятельность сопряжена с высокой психофизиологической нагрузкой, повышающей вероятность возникновения стрессовых состояний, что требует от специалистов владения методами саморегуляции и поддержания психофизиологической устойчивости в экстремальных условиях.

Развитие современных информационно-коммуникационных технологий создало предпосылки для совершенствования технических средств обучения, включая создание современных тренажёрных комплексов, моделирующих как динамику полёта, так и окружающую среду. Применение данных технологий стало важным элементом системы подготовки, обеспечивая её адаптивность и повышение качества профессиональной подготовки авиационного персонала. Применение инновационных интегрированных учебно-тренировочных систем позволяет существенно повысить эффективность образовательного процесса, минимизировать количество профессиональных ошибок и повысить надёжность профессиональной деятельности.

Анализ статистических данных автоматизированных систем обеспечения безопасности полётов свидетельствует о высокой концентрации авиационных происшествий в зоне аэродромной деятельности при выполнении операций руления, взлёта, захода на посадку и посадки воздушных судов. Значительная доля (около 14%) летных происшествий связана с выкатыванием воздушного судна за пределы взлётно-посадочной полосы [1]. Указанные данные подтверждают актуальность разработки и совершенствования подходов к оценке уровня подготовки авиационного персонала как на этапе первоначальной профессиональной подготовки, так и в ходе последующего повышения квалификации.

Сложность исследуемой проблемы определяется многофакторностью профессиональной деятельности авиационных специалистов, необходимостью учёта взаимодействия и взаимовлияния различных факторов. В связи с этим предлагается применение математического аппарата нечетких когнитивных карт (НКК),

обеспечивающего возможность адекватного моделирования сложных динамических систем, опирающихся на качественные экспертные оценки.

Использование нечетких когнитивных карт позволяет репрезентировать сложные динамические процессы в форме, наиболее приближенной к особенностям человеческого восприятия и анализа [2]. К преимуществам данного метода относятся:

- включение в модель обратных связей;
- учёт большого количества переменных с нечеткими значениями;
- моделирование взаимосвязей между переменными при наличии неопределённости;
- использование экспертных знаний при ограниченности точных эмпирических данных;
- высокая скорость построения моделей и получения аналитических результатов;
- возможность интеграции разнородной информации в единую когнитивную структуру;
- оперативная оценка различных сценариев развития управленческих решений.

Применение НКК позволяет реализовать принцип несовместимости между сложностью системы и ограниченностью точности исходной информации, обеспечивая при этом системный анализ сложных профессионально-образовательных процессов. Междисциплинарный характер данного подхода формирует основу для комплексного изучения проблем подготовки авиационного персонала в сфере обеспечения безопасности полётов [2].

### **Методология**

Математическое моделирование процесса оценки уровня подготовки пилотов гражданской авиации предполагает формализацию рассматриваемых процессов путём выделения ограниченного числа наиболее значимых факторов с одновременным абстрагированием от переменных, влияние которых в заданных условиях может быть признано несущественным [3]. В этой связи при формировании множества концептов в настоящем исследовании предлагается учитывать факторы, непосредственно связанные с процессом профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации, обладающие как стимулирующим, так и сдерживающим воздействием на его динамику (см. табл. 1).

Учет перечисленных факторов в процессе математического моделирования позволяет более полно и объективно оценивать уровень профессиональной готовности пилотов, а также разрабатывать оптимальные управленческие решения в системе профессиональной подготовки авиационного персонала [4].

Факторы, приведённые в таблице 1 (возраст, образование, наличие судимостей, вредные привычки и др.), интегрированы в состав концептов модели С1–С7 и учитываются при построении нечеткой когнитивной карты.

Следует отметить, что в настоящее время не существует универсальной методологии для определения перечня факторов, влияющих на исследуемый процесс. В рамках настоящей работы единственным источником информации для идентификации и формализации критериев выступает экспертная оценка автора, сформулированная на естественном языке и основанная на совокупности профессиональных представлений, накопленного опыта, практических знаний и интуитивного восприятия исследуемой проблематики.

Таблица 1 - Факторы, влияющие на процесс профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации [4]

Наименование фактора	Положительное влияние	Отрицательное влияние
Возраст	20–35 лет	Старше 35 лет
Уровень образования	Высшее образование	Среднее образование
Успеваемость по точным наукам	Высокая успеваемость по физике и математике в процессе обучения	Средняя либо низкая успеваемость по физике и математике
Наличие судимостей	Отсутствие судимостей по административным или уголовным правонарушениям	Наличие административных или уголовных судимостей
Вредные привычки	Отсутствие вредных привычек (зависимостей)	Наличие вредных привычек (зависимостей)
Владение иностранными языками	Наличие сертификатов о знании одного или нескольких иностранных языков	Отсутствие подтверждённых знаний иностранных языков
Пилотажный опыт	Наличие опыта пилотирования воздушных судов гражданской авиации соответствующего класса	Отсутствие соответствующего практического опыта
Командные навыки	Наличие опыта управленческой деятельности	Отсутствие опыта управленческой деятельности
Обучаемость	Успешное усвоение профессиональных знаний, умений и навыков	Необходимость повторного прохождения обучения
Коммуникативные навыки	Высокий уровень взаимодействия с членами экипажа и обслуживающим персоналом	Низкий уровень взаимодействия с коллегами
Лидерские качества	Высокий уровень лидерских качеств	Низкий уровень лидерских качеств или их отсутствие
Стрессоустойчивость	Высокий уровень стрессоустойчивости	Уровень ниже среднего

Такой подход частично расходится с методологическими принципами моделирования, предложенными Ф. Ланкастером. В частности:

- уравнения Ф. Ланкастера изначально не предназначены для работы с экспертными суждениями, которые в настоящем исследовании являются основным источником информации при построении модели в условиях неопределенности;
- параметры эффективности, заложенные в формализм уравнений, требуют наличия значительного объёма статистических данных, которые, как правило, труднодоступны либо вызывают сомнения в их достоверности [5].

Для решения задачи оценки уровня профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации предлагается использовать метод построения нечеткой когнитивной карты (НКК), отражающей взаимосвязи и напряжённость между различными

факторами. Основанием для построения НКК выступает математический аппарат теории нечетких множеств и нечеткой логики, являющихся обобщением классической теории множеств и бинарной логики. Согласно определению Б. Козко, нечеткая когнитивная карта представляет собой ориентированный граф, в котором вершины (концепты) соответствуют переменным модели, а дуги — взаимосвязям между ними, количественно выраженным с помощью нечетких терминов. Вес дуг отражает интенсивность причинно-следственных воздействий одних переменных на другие. Термин «когнитивная» подчеркивает, что в качестве исходных данных для построения модели используются субъективные экспертные оценки, описывающие силу воздействия в терминах «увеличивается» либо «уменьшается». Атрибут «нечеткая» указывает на использование шкалы количественной оценки интенсивности воздействий в интервалах  $[0; 1]$  и  $[-1; 0]$ , что позволяет дифференцировать уровни изменений, обозначаемых как низкий, средний, высокий и др., согласно принципам теории нечетких множеств [6].

Применение теории нечетких множеств обеспечивает возможность формального описания качественно неопределённых понятий, обработки неполных и субъективных знаний, а также построения нечетких выводов. В отличие от классической логики, в нечеткой логике истина характеризуется не бинарной оценкой, а степенью истинности, принимающей значения в непрерывном интервале от 0 до 1.

Ключевым понятием, применяемым в рамках настоящего исследования, является «ранжирование» (англ. ranging, ranking, rating), под которым понимается упорядочивание исследуемых факторов по степени их значимости или влияния. В контексте данной работы — это формирование упорядоченного перечня факторов, способствующих снижению качества профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации. Само ранжирование рассматривается авторами как задача многокритериального анализа в условиях неопределенности.

В качестве методологической базы для решения поставленной задачи используются теория принятия решений в нечетких средах, разработанная Р. Беллманом и Л. Заде (Bellman & Zadeh, 1970) [7], а также концепция нечеткой перфектности, изложенная в работах А. Ротштейна. В качестве аналогичных примеров подхода можно привести исследования В. Корниенко и А. Ротштейна, посвящённые альтернативно-возможному выбору политических партий в условиях электоральной неопределенности [8].

Методика использования нечетких когнитивных карт включает в себя процедуру построения и применения нечеткой когнитивной карты (НКК) и состоит из нескольких этапов.

Формализация концептов. Пусть имеется конечное множество концептов  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ , отражающих совокупность переменных, принимаемых в качестве составляющих модели рассматриваемой динамической системы. В рамках настоящего исследования каждому концепту  $C_i$  сопоставляется числовое значение  $x_i$ , устанавливаемое на основе экспертной оценки. При этом предполагается, что  $x_i \in [x_i^{\min}, x_i^{\max}]$ , где  $x_i^{\min}$  и  $x_i^{\max}$  — соответственно нижняя и верхняя границы допустимого диапазона изменения значений концепта  $C_i$ .

Определение связей между концептами. Связи между концептами моделируются посредством ориентированных дуг, каждая из которых характеризуется весом  $w_{ij}$ ,

отражающим силу и характер воздействия концепта  $C_i$  на концепт  $C_j$ . Величина  $w_{ij}$  интерпретируется следующим образом:

- $w_{ij} > 0$  — положительное влияние: увеличение (уменьшение) значения переменной  $C_i$  приводит к увеличению (уменьшению) значения переменной  $C_j$ ;
- $w_{ij} < 0$  — отрицательное влияние: увеличение (уменьшение) значения переменной  $C_i$  приводит к уменьшению (увеличению) значения переменной  $C_j$ ;
- $w_{ij} = 0$  — отсутствие влияния: изменение значения  $C_i$  не оказывает воздействия на значение  $C_j$ .

Оценка силы влияния. Степень влияния связей  $w_{ij}$  устанавливается на основании экспертных суждений с использованием системы лингвистических переменных и соответствующей шкалы (термометрической шкалы), представленной в таблице 2. Такой подход позволяет формализовать качественные оценки силы связей между концептами в числовые значения для последующего математического анализа [8].

Таблица 2 - Лингвистическая шкала оценки силы влияния концептов в модели НКК [9]

Лингвистическая оценка	Числовое значение (интервал)	Характеристика воздействия
Очень сильное положительное влияние	+0.8 ÷ +1.0	Максимально усиливающее воздействие
Сильное положительное влияние	+0.6 ÷ +0.8	Существенно усиливающее воздействие
Среднее положительное влияние	+0.4 ÷ +0.6	Умеренно усиливающее воздействие
Слабое положительное влияние	+0.2 ÷ +0.4	Незначительное усиливающее воздействие
Практически отсутствующее влияние	-0.2 ÷ +0.2	Влияние отсутствует или незначительно
Слабое отрицательное влияние	-0.4 ÷ -0.2	Незначительное ослабляющее воздействие
Среднее отрицательное влияние	-0.6 ÷ -0.4	Умеренно ослабляющее воздействие
Сильное отрицательное влияние	-0.8 ÷ -0.6	Существенно ослабляющее воздействие
Очень сильное отрицательное влияние	-1.0 ÷ -0.8	Максимально ослабляющее воздействие

В случае привлечения нескольких экспертов для проведения оценивания, итоговое значение силы воздействия определяется как среднее арифметическое индивидуальных оценок, предоставленных каждым из экспертов.

Рекуррентное соотношение (от лат. *recurrens* — возвращающийся) представляет собой функциональную зависимость вида:

$$x_{t+1} = F(x_t, x_{t-1}, \dots, x_{t-k+1}) \quad (1)$$

где  $F$  — функция от  $k$  аргументов, позволяющая определять очередной член последовательности на основе значений предыдущих членов. Таким образом, рекуррентное соотношение однозначно задаёт последовательность  $\{x_t\}$ , при условии, что даны значения первых  $k$  её членов. Подобные соотношения позволяют описывать динамическое поведение моделируемых систем, включая колебательные процессы, возникающие при взаимодействии концептов в рамках нечётких когнитивных карт (НКК).

Для формализации влияний между концептами в НКК используется матрица весов  $W=\{w_{ij}\}$ , элементы которой  $w_{ij}$  отражают силу воздействия концепта  $C_i$  на концепт  $C_j$ . При этом диагональные элементы матрицы принимают нулевые значения:

$$w_{ii} = 0, \quad \forall i, \quad (2)$$

что соответствует отсутствию самовлияния концептов на самих себя.

$$W_0 = \begin{bmatrix} 0 & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & 0 & \dots & w_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Начальное состояние НКК, определяемая вектором:

$$X^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0] \quad (4)$$

элементы которого равны значению концептов на шаге  $k = 0$ .

Стационарное состояние НКК, определяемая вектором:

$$X^l = [x_1^l, x_2^l, \dots, x_n^l] \quad (5)$$

На некотором шаге итерационного процесса  $l$ , в результате взаимодействия между концептами, модель нечёткой когнитивной карты (НКК) достигает стационарного состояния, при котором значения элементов вектора состояния

$$X^{(l)} = (x_1^{(l)}, x_2^{(l)}, \dots, x_n^{(l)}) \quad (6)$$

прекращают изменяться, то есть наступает установившийся режим функционирования системы.

Динамика пошагового изменения значений концептов описывается рекуррентным соотношением  $x_i^{k+1} = x_i^k + \sum_{j=1}^n (x_j^k - x_j^{k-1}) w_{ji}$ , которое может быть представлено в матричной форме [9]:

$$X^{k+1} = X^k \oplus (X^k - X^{k-1}) W_0, \quad X^1 = X^0 \oplus X^0 W_0 \quad (7)$$

где  $W$  — матрица весов взаимных воздействий между концептами, а символы « $\oplus$ » и « $\ominus$ » обозначают операции поэлементного сложения и вычитания векторов соответственно, которые осуществляются по следующим правилам:

$$(a \oplus b) = \min(a+b, 1), (a \ominus b) = \max(a-b, 0), \quad (8)$$

Эти операции обеспечивают ограничение итоговых значений вектора состояния в пределах унифицированного интервала  $[0; 1]$ .

Прогнозирование значения целевой (исходной) переменной осуществляется в рамках системы типа «вход — выход», где рассматривается концепт  $C_y$  в качестве выходной переменной, а все остальные концепты  $\{C_1, C_2, \dots, C_{y-1}, C_{y+1}, \dots, C_n\}$  — в качестве входных факторов, оказывающих взаимное влияние. Соответственно, алгоритм прогнозирования значения выходной переменной реализуется следующим образом: [...]

*Шаг 1.* Установить исходное состояние НКК (4)

$$X^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_{n-1}^0, x_n^0 = 0], x_i \in [x_i, \bar{x}_i]. \quad (9)$$

*Шаг 2.* Пользуясь рекуррентным соотношением (7), вычислить вектор (6) значений концептов в стационарном (устойчивом) состоянии.

*Шаг 3.* В полученном векторе (6) зафиксировать значение  $x_n^j$  и считать его прогнозом  $\hat{x}_n$  выхода, соответствующего заданному входному вектору (9).

Ранжирование концептов. Ранговая оценка концептов, выступающих в качестве входных переменных, позволяет количественно определить их значимость в контексте влияния на выходную переменную модели. Методика ранжирования концептов в рамках нечётких когнитивных карт представлена в работе [8].

Индекс важности каждого отдельного входного концепта  $C_i$  определяется величиной  $x_u$ , рассчитанной для вектора состояния

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_i = 1, \dots, x_n = 0), \quad (10)$$

где значение анализируемого концепта  $C_i$  устанавливается на верхнем уровне принадлежности (единичное значение), а значения остальных входных концептов принимаются на нижнем уровне (нулевое значение).

В качестве целевой (выходной) переменной модели выбран концепт  $C_6$  — «Базовый уровень теоретической подготовки, знаний и практических умений» пилота. Ранговая оценка входных концептов  $C_1$ – $C_5$  и  $C_7$  выполняется с помощью вектора состояния, где единичное значение присваивается анализируемому концепту, а остальные принимают нулевое значение, что позволяет количественно оценить его влияние на целевой концепт  $C_6$ .

Таким образом моделируется изолированное влияние каждого концепта на выходную переменную.

Аналогичным образом могут быть вычислены индексы совокупного (интегрального) влияния различных комбинаций входных концептов на целевую переменную путём соответствующего варьирования начальных условий вектора состояния.

## Результаты и Обсуждение

Предлагаемая структура нечёткой когнитивной карты (НКК), отражающая модель процесса оценки уровня подготовки пилотов гражданской авиации, представлена на рисунке 1.

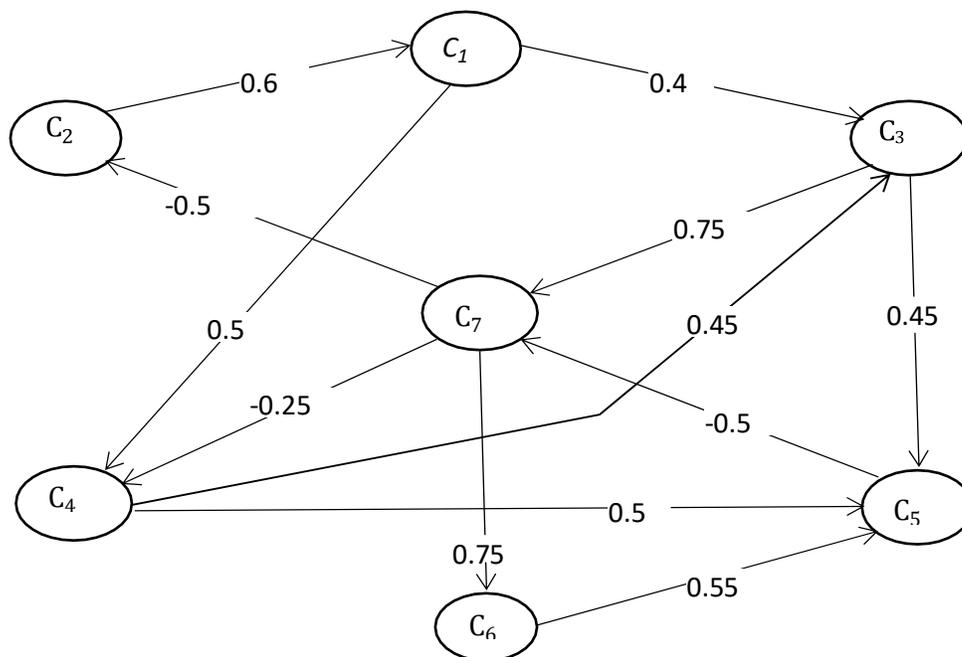


Рисунок 1. НКК процесса подготовки пилотов ГА

Примечание: составлено на основании данных [9]

Концепты, соответствующие вершинам представленного графа, систематизированы в таблице 3 с указанием интервалов возможных значений соответствующих переменных. Следует подчеркнуть, что приведённый перечень концептов не претендует на исчерпывающий характер и отражает авторскую интерпретацию структуры профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации на основе существующих теоретических и эмпирических представлений. Вместе с тем предложенные концепты обладают высокой конструктивной значимостью в рамках построения рассматриваемой нечёткой когнитивной карты и формируют основу для последующего математического анализа и моделирования.

Отбор концептов осуществлялся с учётом семантического анализа лексических единиц, наиболее часто встречающихся в интервью опытных пилотов, посвящённых профессиональным рискам, возникающим в условиях интенсивных эксплуатационных нагрузок, включая экстремальные, кризисные и конфликтные ситуации в авиационной деятельности [9].

Следует особо отметить, что в соответствии с данными таблицы 2, интервальные оценки отдельных концептов  $C_i$  варьируются в зависимости от их содержательной специфики. Различие диапазонов значений обусловлено природой соответствующих

факторов, а также степенью их влияния на процесс профессиональной подготовки пилотов, что учитывается при последующем формализованном моделировании и аналитической обработке.

Таблица 3. Характеристика концептов нечеткой когнитивной карты [9]

Концепт	Описание параметра	Диапазон оценивания
C1	Индивидуально-психологические характеристики пилота гражданской авиации	[0; 1]
C2	Практический опыт управления воздушными судами	[0; 1]
C3	Эффективность взаимодействия с членами экипажа и техническим персоналом	[0; 1]
C4	Организационно-деловые и управленческие компетенции пилота	[0; 1]
C5	Когнитивная способность к усвоению и адаптации новых знаний и навыков	[0; 1]
C6	Базовый уровень теоретической подготовки, знаний и практических умений	[0; 1]
C7	Владение иностранными языками на профессиональном уровне	[0; 1]

В таблице 3 указан диапазон оценивания концептов [0;1], который используется для нормализации значений при построении нечеткой когнитивной карты. Таблицы 5 и 6 отражают промежуточные этапы экспертной оценки, где применялись относительные баллы: максимальное значение 50 в таблице 5 соответствует полной шкале влияния концептов на оценку их значимости, а максимальное значение 25 в таблице 6 — промежуточная шкала для отдельных подкомпонентов оценки. После обработки и усреднения экспертных оценок все значения нормализуются к диапазону [0;1] для последующей работы с матрицей  $W$  и построения когнитивной карты.

Качественные параметры, подлежащие учету при экспертной оценке каждого из концептов, а также соответствующие силы их воздействия, систематизированы в таблице 4.

Структурная схема нечеткой когнитивной карты представлена на рисунке 1. Величины весов дуг графа, отражающих интенсивность взаимного влияния концептов, определены на основе экспертных оценок с применением параметров, приведённых в таблице 3.

Таблица 4. Параметры, используемые при экспертной оценке уровня концептов [9]

Концепт	Характеризующие факторы
C1	<ul style="list-style-type: none"> <li>внутренняя мотивация к профессиональной деятельности;</li> <li>развитые лидерские качества.</li> </ul>
C2	<ul style="list-style-type: none"> <li>наличие практического опыта управления воздушными судами;</li> <li>базовый уровень теоретической подготовки пилота.</li> </ul>
C3	<ul style="list-style-type: none"> <li>способность к эффективной коммуникативной деятельности в профессиональном коллективе;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• умение выстраивать и поддерживать конструктивные межличностные отношения.</li> </ul>
C4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• компетентность в выполнении должностных обязанностей с высокой скоростью и качеством.</li> </ul>
C5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• когнитивная способность к целенаправленному усвоению профессиональных знаний, навыков и умений.</li> </ul>
C6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• высокий уровень успеваемости по профильным дисциплинам (точные науки);</li> <li>• наличие практического опыта пилотирования воздушных судов соответствующего класса.</li> </ul>
C7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• владение основами иностранных языков;</li> <li>• наличие действующих сертификатов, подтверждающих уровень владения иностранными языками.</li> </ul>
<p>Источник. Ротштейн А.П. (2019). Нечеткие когнитивные карты в анализе надежности систем. Надежность, Том 19, №4. doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-4-24-3 [9]</p>	

Соответствующая матрица весовых коэффициентов  $W$ , характеризующая силы взаимодействия между концептами в модели, имеет следующий вид:

$$W_0 = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0.4 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0.75 \\ 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.55 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0 & -0.25 & 0 & 0.75 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$

Для проведения экспертной оценки переменных, соответствующих концептам, приведённым в таблице 2, применяются шкалы оценивания, представленные в таблицах 5 и 6. Указанные шкалы обеспечивают количественную интерпретацию качественных характеристик факторов, позволяя учитывать субъективные экспертные суждения в рамках формализации нечеткой когнитивной модели.

Весовые коэффициенты в матрице  $W$  были определены на основе экспертных оценок пяти специалистов с опытом работы в области безопасности полетов от 10 до 20 лет. Эксперты оценивали влияние каждого концепта на другие по шкале от 0 до 1; окончательные значения получены усреднением оценок. В случае значительных расхождений мнений проводилась дополнительная консультация для достижения согласованной оценки. Персональные данные экспертов не раскрываются и используются исключительно для целей исследования.

Следует отметить, что применение рекуррентного соотношения (7) может приводить к выходу накопленных значений концептов в стационарном режиме за пределы

установленных интервалов допустимых значений. Однако подобное отклонение не оказывает существенного влияния на качественную интерпретацию результатов моделирования, в связи с чем нормировочные процедуры в рамках настоящего исследования не применяются [13].

Таблица 5. Шкала экспертной оценки уровня развития концептов [9]

Лингвистическая характеристика уровня развития	Соответствующее числовое значение
Высокий уровень развития концепта	50
Уровень выше среднего	37,5
Средний уровень	25
Уровень ниже среднего	12,5
Низкий уровень развития концепта	0

Балюбаш В.А. и др. (2013). Разработка и реализация модели на основе экспертных оценок / В.А. Балюбаш, Ю.Г. Стегаличев, С.Е. Алёшичев, М.Б. Абугов: Учеб.-метод. пособие. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 58 с. [10]

Таблица 6. Шкала экспертной оценки силы влияния концептов [10]

Лингвистическая характеристика влияния	Соответствующее числовое значение
Максимальное положительное влияние	25
Повышенное положительное влияние	12,5
Нейтральное (стабильное) влияние	0
Сниженное отрицательное влияние	-12,5
Максимальное отрицательное влияние	-25

Балюбаш В.А. и др. (2013). Разработка и реализация модели на основе экспертных оценок / В.А. Балюбаш, Ю.Г. Стегаличев, С.Е. Алёшичев, М.Б. Абугов: Учеб.-метод. пособие. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 58 с. [10]

Матрица (11), совместно с рекуррентным соотношением, обеспечивает возможность анализа пошаговой динамики изменения значений концептов, представленных в таблице 1, при заданном исходном векторе (4).

В частности, при исходном состоянии НКК

$$X_0 = [40 \ 25 \ 20 \ 15 \ 10 \ 5 \ 0] \tag{12}$$

получено стационарное состояние системы, которое определяется вектором

$$X_t = [52 \ 20 \ 55 \ 43 \ 63 \ 12 \ 10] \tag{13}$$

Таким образом, нечеткие когнитивные карты (НКК) могут рассматриваться как функциональный аналог дифференциальных уравнений, традиционно используемых при моделировании процессов динамического формирования профессиональных компетенций, умений и навыков. Существенным преимуществом применения НКК по сравнению с дифференциальными моделями является возможность непосредственного

включения экспертной информации для комплексного учета взаимодействующих факторов, влияющих на динамику профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации.

### **Заключение**

В рамках проведенного исследования предложен и реализован метод математического моделирования процесса подготовки авиационного персонала с использованием аппарата нечетких когнитивных карт (НКК). Разработанная модель позволяет учитывать комплекс разноуровневых факторов, определяющих уровень профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации, включая как объективные, так и субъективные параметры, формализуемые на основе экспертных оценок [14].

Применение НКК обеспечивает возможность формализации сложных взаимосвязей между параметрами профессиональной надежности авиационного персонала в условиях ограниченности статистических данных и высокой степени неопределенности. В отличие от классических моделей динамики, разработанный подход позволяет оперативно интегрировать экспертные знания, учитывать нелинейные и взаимозависимые влияния факторов, что существенно повышает достоверность прогнозных оценок уровня профессиональной готовности летного состава [15].

Полученные результаты иллюстрационно демонстрируют эффективность использования нечетких когнитивных карт при анализе и прогнозировании процессов формирования профессиональных компетенций пилотов гражданской авиации. Разработанная методика может быть применена в практике образовательных учреждений, центров подготовки авиационного персонала, а также при проведении периодических аттестаций и формировании программ повышения квалификации специалистов.

Дальнейшие исследования предполагают расширение перечня факторов модели, совершенствование методов экспертной оценки весов влияния концептов, а также адаптацию предложенной модели для оценки подготовки специалистов в других отраслях транспортной безопасности.

### **Вклад авторов:**

**Долженко Н.А.** – внесла существенный вклад в разработку концепции и дизайна исследования, участвовала в анализе и интерпретации полученных результатов, осуществляла критический пересмотр содержания статьи. Утвердила окончательный вариант статьи для публикации и согласилась нести ответственность за достоверность данных и целостность исследования.

**Гармаш О.В.** – осуществляла сбор и анализ исходных данных, принимала участие в разработке математической модели подготовки авиационного персонала, подготовке и написании текста статьи. Утвердила окончательный вариант статьи для публикации и согласилась нести ответственность за все аспекты работы, связанные с достоверностью результатов и научной корректностью исследования.

### **Список литературы**

1. The development of a mathematical model of professional training of aviation personnel

- participated in ensuring flight safety. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. - №4(4(124)). – P.88–94. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286244>
2. The development of a method for assessing the preparation of aviation personnel participated in ensuring flight safety. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. - №5(3(125)). - №57–63. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289933>
  3. Департамент управления безопасностью полетов, качества, стратегии и соответствия стандартам АО «Авиационная администрация Казахстана». Анализ состояния безопасности полетов воздушных судов гражданской авиации республики Казахстан за 2023 год. 24с.
  4. Рыков Ю.Г. Технология использования нечетких когнитивных карт с математической точки зрения // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2021. № 73. 22 с.
  5. Кубланов М.С. Математическое моделирование задач летной эксплуатации воздушных судов на взлете и посадке: монография / М.С. Кубланов. - Москва: РИО МГТУ ГА, 2013. - 270 с
  6. Задорожный В.Д. Методика летного обучения: методические указания. – Ульяновск: УВАУ ГА (И). 22с.
  7. F. Wilfrid Lancaster. Indexing and abstracting in theory and practice. University of Illinois, Graduate School of Library and Information Science. P.412
  8. Заграновская А. В. Системный анализ на основе нечетких когнитивных карт. Вестник РЭУ им. Г. В. Плеханова, № 4 (100). DOI: <http://dx.doi.org/10.21686/2413-2829-2018-4-152-160>
  9. Марданов М.Дж., Рзаев Р.Р. Нечеткая логика Л.А. Заде как ключ к описанию гуманистических систем. DOI: 10.25045/jpis.v12.i2.02
  10. Ротштейн А. П. Анализ риска: нечеткая когнитивная карта как альтернатива дереву отказов. Известия РАН. Теория и системы управления, 2019, № 2, С. 47-57. DOI: 10.1134/S0002338819020161
  11. Ротштейн А.П. Нечеткие когнитивные карты в анализе надежности систем. Надежность, Том 19, №4. doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-4-24-3
  12. Балюбаш В.А. и др. Разработка и реализация модели на основе экспертных оценок / В.А. Балюбаш, Ю.Г. Стегаличев, С.Е. Алёшичев, М.Б. Абугов: Учеб.-метод. пособие. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 58 с.
  13. Долженко Н. Математическое моделирование и методы системного анализа в управлении безопасности полетов в гражданской авиации. Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. – №4(74). – Алматы, 2019. – С. 23–28.
  14. [Dolzhenko N., Assilbekova I., Abzhapbarova A., Mussayeva G., Sarzhanov T.](#) Unification of Training Programs for Aviation Professionals as a Flight Safety Criterion. Journal of Aerospace Technology and Management. - 2024. – Vol. 16/ - Article number e0124. DOI: [10.1590/jatm.v16.1320](https://doi.org/10.1590/jatm.v16.1320)
  15. [Dolzhenko N., Assilbekova I., Konakbay Z., Garmash O., Muratbekova G.](#) Organization of Transport Services and Transport Process Safety. Periodica Polytechnica Transportation Engineering. -2025. - № 53(3). - P. 277–291. DOI: [10.3311/PPtr.38137](https://doi.org/10.3311/PPtr.38137)

**Н.А. Долженко\*, О.В. Гармаш**

*«Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан Республикасы»*

### **Ұшу қауіпсіздігін қамтамасыз ету саласында авиациялық персоналды даярлауды математикалық модельдеу**

**Аңдатпа.** Азаматтық авиацияның қазіргі заманғы дамуы ұйымдастыру-техникалық жүйелердің күрделенуімен, ұшу қауіпсіздігін қамтамасыз ету талаптарының күшейтілуімен қатар жүреді. Зерттеудің өзектілігі қауіпсіздік талаптарын ескере отырып, кәсіптік даярлау процестерін оңтайландыруға мүмкіндік беретін математикалық модельдеу әдістерін қолдану есебінен авиаперсоналды даярлаудың білім беру бағдарламаларының тиімділігін арттыру қажеттілігіне негізделген. Зерттеу мәні ұшу қауіпсіздігін қамтамасыз ету тұрғысынан авиаперсоналды дайындау процестері болып табылады. Зерттеу міндеттері даярлықты ұйымдастырудың қолданыстағы тәсілдерін талдауды, кәсіби құзыреттерді, қауіпсіздік параметрлерін, сондай-ақ оқу процесіне әсер ететін сыртқы және ішкі факторларды ескеретін математикалық модельді әзірлеуді қамтиды. Жұмыстың мақсаты авиаперсоналды дайындау процесін бағалауға және оңтайландыруға мүмкіндік беретін математикалық модельді құру және сынақтан өткізу болып табылады. Зерттеуде жүйелі талдау, басқару теориясы, математикалық модельдеу және имитациялық модельдеу әдістері пайдаланылды. Модельдің жұмысын көрсету үшін сандық мысал келтірілген; оның нәтижелері дайындық тиімділігіне барынша әсер ететін негізгі параметрлерді айқындауға мүмкіндік беретін эмпирикалық деректер негізінде иллюстрациялық сипатта болады. Жұмыс нәтижелері персоналдың кәсіби дайындық деңгейіне әртүрлі факторлардың әсерін сандық бағалау мүмкіндігін көрсетеді. Алынған қорытындылар ұшу қауіпсіздігіне жауапты білім беру бағдарламаларын түзету бойынша ұсынымдарды қалыптастыруға мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** авиациялық персонал; ұшу қауіпсіздігі; кәсіби дайындық; математикалық модельдеу; анық емес танымдық карталар.

**N. Dolzhenko\*, O.Garmash**

*"Civil Aviation Academy", Almaty, Republic of Kazakhstan*

### **Mathematical modeling of aviation personnel training in the field of flight safety**

**Abstract.** The modern development of civil aviation is accompanied by the complication of organizational and technical systems, the tightening of flight safety requirements. The relevance of the study is due to the need to increase the effectiveness of educational programs for training aircraft personnel through the use of mathematical modeling methods that allow optimizing professional training processes taking into account safety requirements. The subject of the study is the processes of training aircraft personnel in the context of ensuring flight safety. The objectives of the study include the analysis of existing approaches to the organization of training, the development of a mathematical model that takes into account professional competencies, safety

parameters, as well as external and internal factors that affect the educational process. The purpose of the work is to build and test a mathematical model that allows you to evaluate and optimize the process of training aircraft personnel. The study used methods of system analysis, control theory, mathematical modeling and simulation modeling. To demonstrate the operation of the model, a numerical example is given; its results are illustrative based on empirical evidence to identify the key parameters that have the greatest impact on the effectiveness of training. The results of the work demonstrate the possibility of quantifying the impact of various factors on the level of professional readiness of personnel. The findings make it possible to formulate recommendations for adjusting educational programs responsible for flight safety.

**Keywords:** aviation personnel; flight safety; professional training; mathematical modeling; fuzzy cognitive maps.

### References

1. The development of a mathematical model of professional training of aviation personnel participated in ensuring flight safety. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. - №4(4(124)). – R.88–94. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286244>
2. The development of a method for assessing the preparation of aviation personnel participated in ensuring flight safety. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. - №5(3(125)). - №57–63. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289933>
3. Departament upravleniya bezopasnostyu poletov, kachestva, strategii i sootvetstviya standartam AO «Aviatsionnaya administratsiya Kazakhstana». Analiz sostoyaniya bezopasnosti poletov vozdushnikh sudov grazhdanskoi aviatsii respubliki Kazakhstan za 2023 god. 24s.
4. Rikov Yu.G. Tekhnologiya ispolzovaniya nechetkikh kognitivnikh kart s matematicheskoi tochki zreniya // Preprinti IPM im. M.V. Keldisha. 2021. № 73. 22 s.
5. Kublanov M.S. Matematicheskoe modelirovanie zadach letnoi ekspluatatsii vozdushnikh sudov na vzlete i posadke: monografiya / M.S. Kublanov. - Moskva: RIO MGTU GA, 2013. - 270 s
6. Zadorozhnii V.D. Metodika letnogo obucheniya: metodicheskie ukazaniya. – Ulyanovsk: UVAU GA (I). 22s.
7. F. Wilfrid Lancaster. Indexing and abstracting in theory and practice. University of Illinois, Graduate School of Library and Information Science. P.412
8. Zagranovskaya A. V. Sistemniy analiz na osnove nechetkikh kognitivnikh kart. Vestnik REU im. G. V. Plekhanova, № 4 (100). DOI: <http://dx.doi.org/10.21686/2413-2829-2018-4-152-160>
9. Mardanov M.Dzh., Rzaev R.R. Nechetkaya logika L.A. Zade kak klyuch k opisaniyu gumanisticheskikh sistem. DOI: [10.25045/jpis.v12.i2.02](https://doi.org/10.25045/jpis.v12.i2.02)
10. Rotshtein A. P. Analiz riska: nechetkaya kognitivnaya karta kak alternativa derevu otkazov. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemi upravleniya, 2019, № 2, S. 47-57. DOI: [10.1134/S0002338819020161](https://doi.org/10.1134/S0002338819020161)
11. Rotshtein A.P. Nechetkie kognitivnie karti v analize nadezhnosti sistem. Nadezhnost, Tom 19, №4. [doi.org/10.21683/1729\\_2646\\_2019\\_19\\_4\\_24\\_3](https://doi.org/10.21683/1729_2646_2019_19_4_24_3)

12. Balyubash V.A. i dr. Razrabotka i realizatsiya modeli na osnove ekspertnikh otsenok / V.A. Balyubash, Yu.G. Stegalichev, S.E. Alèshichev, M.B. Abugov: Ucheb.-metod. posobie. SPb.: NIU ITMO; IKhiBT, 58 s.
13. Dolzhenko N. Matematicheskoe modelirovanie i metodi sistemnogo analiza v upravlenii bezopasnosti poletov v grazhdanskoj aviatsii. Vestnik Natsionalnoi inzhenernoi akademii Respubliki Kazakhstan. – №4(74). – Almati, 2019. – S. 23–28.
14. Dolzhenko N., Assilbekova I., Abzhapbarova A., Mussayeva G., Sarzhanov T. Unification of Training Programs for Aviation Professionals as a Flight Safety Criterion. Journal of Aerospace Technology and Management. - 2024. – Vol. 16/ - Article number e0124. DOI: 10.1590/jatm.v16.1320
15. Dolzhenko N., Assilbekova I., Konakbay Z., Garmash O., Muratbekova G. Organization of Transport Services and Transport Process Safety. Periodica Polytechnica Transportation Engineering. -2025. - № 53(3). - R. 277–291. DOI:10.3311/PPtr.38137

### **Сведения об авторах:**

Долженко Н.А. - кандидат политических наук, доцент кафедры летной эксплуатации  
Гармаш О.В. – кандидат технических наук, ассоц. профессор Академии гражданской авиации Республики Казахстан,

Долженко Н.А. - саяси ғылымдарының кандидаты; Қазақстан Республикасы Азаматтық авиация академиясы Әуе кемелерінің ұшуын пайдалану кафедрасының доценті  
Гармаш О.В. - т. ғ. к., аға қауымдастырылған профессор, Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан Республикасы

Dolzhenko N. - Candidate of Political Sciences; Associate Professor of the Department of Aircraft Flight Operation of the Civil Aviation Academy of the Republic of Kazakhstan  
Garmash O. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor AGA, Academy of Civil Aviation, Almaty, Republic of Kazakhstan



**Copyright:** © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).