

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ КОГНИТИВНЫХ ФУНКЦИЙ АВИАЦИОННОГО ПЕРСОНАЛА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Д. С. Коптев¹ [0000-0002-7759-579X], Ю. А. Халин³ [0000-0002-7020-8515],
А. С. Сизов³ [0000-0001-9658-0318]

¹⁻³Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

¹d.s.koptev@mail.ru, ²yur-khalin@yandex.ru, ³sizov@mail.ru

Аннотация

Представлена информационно-аналитическая система оценки восьми когнитивных функций авиационного персонала на основе нечеткой логики. На вход системы подаются 14 входных переменных, являющихся результатами прохождения испытуемыми 13 валидизированных психодиагностических методик. Основой функционирования системы является алгоритм нечеткого вывода Мамдани, масштабируемый под размерность входного пространства (1, 2 или 3 метрики) и использующий адаптивные базы продукционных правил (3, 9 или 27). Сформированные количественные оценки восьми когнитивных функций в диапазоне [0; 1] поступают на трехуровневый классификатор, реализующий их качественную интерпретацию посредством отнесения к одной из трех зон: риска [0; 0.4], допустимого уровня (0.4; 0.7] или высокого уровня (0.7; 1]. Практическая значимость разработанной информационно-аналитической системы заключается в создании её как инструмента автоматизированной поддержки принятия решений для специалистов по профессиональному отбору. Внедрение системы позволит перейти от бинарной оценки «годен/не годен» к дифференцированному управлению кадровыми рисками, учитывающему структуру когнитивного профиля кандидата.

Ключевые слова: информационно-аналитическая система, когнитивные функции, авиационный персонал, нечеткая логика, психодиагностические методики, алгоритм Мамдани.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития авиационной сферы приоритетной задачей остается гарантированное обеспечение безопасности при выполнении полетов. Однако актуальные данные, предоставляемые авторитетными организациями (ICAO, FAA, EASA), говорят о том, что причиной около 80% всех авиационных происшествий является именно человеческий фактор [1]. Причиной большинства подобных инцидентов является снижение эффективности когнитивных функций летного состава [2]. В частности, это проявляется в виде ослабления концентрации и переключаемости внимания, истощения ресурсов рабочей памяти, замедления скорости зрительно-моторной реакции, нарушения механизмов эмоционально-волевой регуляции и многих других процессах [3].

Под когнитивной работоспособностью понимают интегральную характеристику индивида, отражающую его способность к реализации профессиональной деятельности заданного объема и степени ответственности, которая требует оперативного задействования нервно-психических ресурсов и комплексного функционирования всего набора когнитивных функций в условиях жестких временных ограничений и нормативных критериев результативности [4].

В научных работах [5–9] и регламентирующих документах по проведению профессионального психологического отбора летного состава^{1, 2} выделены восемь ключевых когнитивных функций (см. на рис. 1).

Целью настоящего исследования была разработка информационно-аналитической системы, функционирующей на основе нечеткого логического вывода и позволяющей формировать количественные оценки выбранных восьми

¹ Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 17 октября 2025 г. № 344 «Об установлении Порядка проведения профессионального отбора членов летного экипажа пилотируемого гражданского воздушного судна, за исключением сверхлегкого пилотируемого гражданского воздушного судна с массой конструкции 115 килограммов и менее, и диспетчеров управления воздушным движением, в том числе порядка определения их психофизиологических качеств, порядка психофизиологического обследования указанных лиц» // Официальный интернет-портал правовой информации. 2025. № 84206. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202511190014>.

² Руководство по психологическому обеспечению отбора, подготовки и профессиональной деятельности летного и диспетчерского состава гражданской авиации: утв. распоряжением Минтранса России от 31.10.2000 г. № 57-р. М.: Воздушный транспорт, 2001. 210 с.

когнитивных функций авиационного персонала и классифицировать их по уровню профессионального риска в рамках трехуровневой шкалы.

Функционал нечеткой логики в этой системе выполняет роль механизма, ключевым преимуществом которого перед классическими детерминированными моделями является способность моделировать когнитивные процессы, исключая искусственные разрывы при переходе через жесткие нормативные границы оценки той или иной когнитивной функции. Использование баз нечетких продукционных правил обеспечивает семантическую прозрачность механизма вывода, позволяя верифицировать логику формирования заключения на каждом этапе агрегации метрик. Кроме того, система на основе нечеткой логики демонстрирует повышенную устойчивость к случайным выбросам во входных данных [10]. Разработка подобных инструментов является весьма актуальным направлением в задачах превентивного мониторинга и раннего выявления рисков, связанных с человеческим фактором.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАБОРА ПСИХОДИАГНОСТИЧЕСКИХ МЕТОДИК ОЦЕНКИ КОГНИТИВНЫХ ФУНКЦИЙ АВИАЦИОННОГО ПЕРСОНАЛА

На основании систематизации современных подходов к оценке ключевых когнитивных функций авиационного персонала сформирован первоначальный набор психодиагностических методик для экспертного сравнения, который представлен на рис. 1. Критериями включения методик являлись возможность количественной регистрации результатов, а также соответствие требованиям руководства.



Рис. 1. Когнитивные функции и методики их оценки, включенные в сравнительный анализ.

Следующим этапом исследования было определение наиболее валидных методик оценки когнитивных функций с помощью экспертного метода. Верификация психодиагностического инструментария проведена методом независимой экспертной оценки группой из пяти экспертов. Каждой методике j ($j = 1, \dots, 49$), показанной на рис. 1, присваивался балл $E_{ij} \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ экспертом i ($i = 1, \dots, 5$) в соответствии с шкалой, представленной в табл. 1.

Табл. 1. Шкала оценки психодиагностических методик оценки когнитивных функций.

Балл	Качественная интерпретация
1	Отсутствие теоретико-эмпирического обоснования и профессиональной релевантности в авиационной отрасли.
2	Низкая конструктивная валидность, ограниченная применимость в авиационной практике.
3	Допустима как вспомогательный скрининговый инструмент после адаптации, но не для принятия итоговых кадровых решений.
4	Подтвержденная валидность, научная обоснованность, возможность применения в соответствии с требованиями руководящих документов.
5	Доказанная прогностическая валидность, широкая апробированность в системах авиационного профессионального психологического отбора.

Результирующая оценка методик получена путем агрегации индивидуальных оценок методом медианы, что обеспечило устойчивость итоговой оценки к расходящимся мнениям отдельных экспертов и стабильность итогового ранжирования методик:

$$S_j = \text{med}_{i=1}^5 \{E_{ij}\}. \quad (1)$$

где med – оператор определения медианы, представляющий собой значение, делящее упорядоченную выборку индивидуальных оценок экспертов пополам: одна половина оценок не превышает медианного значения, вторая половина – не меньше его.

Если для оценки когнитивной функции имелась единственная методика с медианной экспертной оценкой $S_j = 5.0$, она использовалась как самостоятельный диагностический инструмент. Если же имелись две методики с $S_j \geq 4.0$, которые оценивали различные аспекты одной когнитивной функции, то они обе включались в набор психодиагностических методик для повышения надежности заключения.

Решение о включении методики в итоговый диагностический комплекс принималось на основании порогового правила

$$M_j^{in} = \begin{cases} 1, & \text{если } S_j \geq 4.0, \\ 0, & \text{если } S_j < 4.0, \end{cases} \quad (2)$$

где $M_j^{in} = 1$ означает включение методики.

Таким образом, на основе результатов экспертного опроса и выражений (1) и (2) получен итоговый состав комплекса психодиагностических методик с указанием формируемых ими метрик. Он приведен в табл. 2.

Табл. 2. Метрики для оценки восьми когнитивных функций

Когнитивная функция (ее оценка)	Количество методик в оценке	Наименование методики	S_j	Метрики	Формулы для расчета метрик и их лингвистическая оценка
Внимание (Y_V)	2	Кольца Ландольта	5.0	X_{KL}	X_{KL} – количество обработанных пар колец за отведенный промежуток времени: $X_{KL} = K - (10p + 8d + 5n),$ K – количество просмотренных пар колец; p – количество незачеркнутых (пропущенных) пар колец, которые нужно было зачеркнуть в данном объеме; d – количество перечеркнутых колец, которые не нужно было зачеркивать; n – количество пар колец, зачеркнутых в неправильном направлении. Лингвистическая оценка: $T(X_{KL}) = \begin{cases} H, & X_{KL} \in [0; 126]; \\ C, & X_{KL} \in [127; 236]; \\ B, & X_{KL} \in [237; 330], \end{cases}$ где H – низкий уровень; C – средний уровень; B – высокий уровень.
				X_{CA}	X_{CA} – количество правильно отмеченных пар колец на бланке за отведенных промежуток времени. Лингвистическая оценка: $T(X_{CA}) = \begin{cases} H, & X_{CA} \in [0; 37]; \\ C, & X_{CA} \in [38; 58]; \\ B, & X_{CA} \in [59; 90]. \end{cases}$
		Отыскивание чисел с переключением	5.0	X_S	X_S – время выполнения задания в секундах. Лингвистическая оценка:

					$T(X_s) = \begin{cases} B, & X_s \in [0; 130]; \\ C, & X_s \in [131; 216]; \\ H, & X_s \in [217; 300]. \end{cases}$
Оперативная память (Y_{OP})	1	«Шкалы»	5.0	X_{SC}	X_{SC} – количество правильно выполненных заданий, шт. Лингвистическая оценка: $T(X_{SC}) = \begin{cases} H, & X_{SC} \in [0; 5]; \\ C, & X_{SC} \in [6; 8]; \\ B, & X_{SC} \in [9; 10]. \end{cases}$
Темп психических процессов (Y_{TPP})	2	СЗМР	5.0	X_{CVMR}	X_{CVMR} – интегральная оценка уровня сенсомоторных реакций, формирующаяся из среднего времени реакции на стимул и суммарного числа ошибок. Лингвистическая оценка: $T(X_{CVMR}) = \begin{cases} H, & X_{CVMR} \in [0; 0.37]; \\ C, & X_{CVMR} \in (0.37; 0.8]; \\ B, & X_{CVMR} \in (0.8; 1]. \end{cases}$
		Корректирующая проба с кольцами	4.0	X_{SP}	X_{SP} – показатель скорости переработки информации, бит/с. $X_{SP} = \frac{0.5436 \cdot N - 2.807 \cdot I}{t},$ где N – количество колец; t – время эксперимента; I – число пропущенных колец; 0.5436 – средняя информация, приходящаяся на одно кольцо; 2.807 – величина потери информации, приходящейся на 1 кольцо. $T(X_{SP}) = \begin{cases} H, & X_{SP} \in [0.57; 0.73]; \\ C, & X_{SP} \in (0.74; 1.19]; \\ B, & X_{SP} \in (1.20; 1.36]. \end{cases}$
Пространственные способности (Y_{PS})	1	«Компасы»	5.0	X_C	X_C – количество правильно определенных направлений, шт. Лингвистическая оценка: $T(X_C) = \begin{cases} H, & X_C \in [0; 15]; \\ C, & X_C \in [16; 30]; \\ B, & X_C \in [31; 50]. \end{cases}$

Логическое мышление (Y_{LM})	2	«Установление закономерностей»	5.0	X_{US}	X_{US} – значение коэффициента успешности: $X_{US} = \frac{P-N}{P+D} \cdot C,$ где P – число всех подчеркнутых слов; N – количество неправильно подчеркнутых слов; D – количество неподчеркнутых слов, которые следовало подчеркнуть; C – количество всех просмотренных слов. Лингвистическая оценка: $T(X_{US}) = \begin{cases} H, & X_{US} \in [0; 84]; \\ C, & X_{US} \in [85; 100]; \\ B, & X_{US} \in [101; 125]. \end{cases}$
		Тест Равена	4.0	X_R	X_R – количество правильно выполненных заданий, шт. Лингвистическая оценка: $T(X_R) = \begin{cases} H, & X_R \in [0; 39]; \\ C, & X_R \in [40; 51]; \\ B, & X_R \in [52; 60]. \end{cases}$
Счетно-математические способности (Y_{CM})	2	Тест интеллекта Р. Амтхауэра (субтест 5)	5.0	X_{AN}	X_{AN} – количество правильно решенных задач, шт. Лингвистическая оценка: $T(X_{AN}) = \begin{cases} H, & X_{AN} \in [0; 9]; \\ C, & X_{AN} \in [10; 15]; \\ B, & X_{AN} \in [16; 20]. \end{cases}$
		Тест интеллекта Р. Амтхауэра (субтест 6)	4.0	X_{MI}	X_{MI} – количество правильно решенных заданий, шт. Лингвистическая оценка: $T(X_{MI}) = \begin{cases} H, & X_{MI} \in [0; 9]; \\ C, & X_{MI} \in [10; 15]; \\ B, & X_{MI} \in [16; 20]. \end{cases}$
Точность управляющих движений (Y_{TD})	2	«Лабиринт»	5.0	X_{LAB}	X_{LAB} – длина пути в условных единицах. Лингвистическая оценка: $T(X_{LAB}) = \begin{cases} B, & X_{LAB} \in [2864; 3108]; \\ C, & X_{LAB} \in [3109; 3306]; \\ H, & X_{LAB} \in [3307; 3752]. \end{cases}$

		Реакция на движущийся объект	4.0	X_{RDO}	X_{RDO} – количество точных остановок движущегося объекта в заданном положении, ед. Лингвистическая оценка: $T(X_{RDO}) = \begin{cases} H, & X_{RDO} \in [0; 16]; \\ C, & X_{RDO} \in [17; 54]; \\ B, & X_{RDO} \in [55; 70]. \end{cases}$
Эмоциональная устойчивость (Y_{EU})	1	16-факторный личностный опросник Р. Кеттела (Фактор С)	5.0	X_{KT}	X_{KT} – стеновая оценка фактора эмоциональной устойчивости. Лингвистическая оценка: $T(X_{KT}) = \begin{cases} H, & X_{KT} \in [0; 4]; \\ C, & X_{KT} \in [5; 7]; \\ B, & X_{KT} \in [8; 10]. \end{cases}$

На основании результатов независимой экспертной оценки был сформирован итоговый набор психодиагностических методик, обеспечивающий комплексную диагностику восьми ключевых когнитивных функций авиационного персонала: Y_V , Y_{OP} , Y_{TPP} , Y_{PS} , Y_{LM} , Y_{CM} , Y_{TD} , Y_{EU} (см. табл. 2). Комплекс включает 13 диагностических процедур, результаты которых формализуются в вектор из 14 количественных метрик $\vec{X} = \{X_{KL}, X_{CA}, X_S, X_{SC}, X_{CVMR}, X_{SP}, X_C, X_{US}, X_R, X_{AN}, X_{MI}, X_{LAB}, X_{RDO}, X_{KT}\}$. Увеличение размерности вектора относительно числа процедур обусловлено мультипараметрическим характером теста Кольца Ландольта, генерирующего два независимых показателя (X_{KL} , X_{CA}) в рамках одной тестовой процедуры.

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОГНИТИВНЫХ ФУНКЦИЙ

Выбор нечеткого логического вывода в качестве механизма принятия решений в разрабатываемой информационно-аналитической системе обусловлен методологическими ограничениями детерминированных подходов при обработке разнородных психодиагностических данных. Ключевые преимущества аппарата нечетких множеств в рамках профессионального отбора авиационного персонала состоят в следующем.

1. Нечеткая логика позволяет привести все 14 разнородных метрик к единому безразмерному пространству через функции принадлежности (ФП), сохраняя семантическую нагрузку каждой метрики.

2. Поскольку когнитивные функции не имеют естественных разрывов между уровнями нормы и отклонения, применение аппарата нечетких множеств исключает эффект жестких пороговых оценок. Пограничные значения контролируемой метрики одновременно активируют смежные термы с определенной степенью истинности, что обеспечивает непрерывность оценки.

3. Ряд когнитивных функций диагностируется на основе нескольких входных метрик (например, внимание – объем, распределение, переключение). Нечеткая система позволяет задавать индивидуальные механизмы агрегации (конъюнкция, дизъюнкция, взвешенное среднее) в соответствии с психофизиологической структурой каждой функции, повышая валидность оценки [11].

4. Результаты тестирования подвержены влиянию функционального состояния, мотивации и суточных ритмов. Благодаря плавности ФП и механизму аккумуляции правил нечеткая система сглаживает малые изменения во входных переменных, предотвращая скачкообразные изменения итоговой оценки и обеспечивая воспроизводимость диагностики при повторных обследованиях.

5. Архитектура нечеткого вывода поддерживает многоуровневую градацию итоговых решений, что расширяет возможности управления кадровыми рисками. Вместо бинарного вывода «годен/не годен» система позволяет дать лингвистическую оценку уровня когнитивной функции, состоящую из заданного числа градаций, что соответствует современным требованиям риск-ориентированного подхода к организации безопасности полетов [12].

Таким образом, внедрение нечеткого моделирования является не технической адаптацией, а методологической необходимостью, обеспечивающей прогностическую валидность системы в условиях нормативно регламентированного профессионального отбора в авиационной отрасли.

НОРМИРОВАНИЕ И ФАЗЗИФИКАЦИЯ ВХОДНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧАЕМЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОЦЕНКИ КОГНИТИВНЫХ ФУНКЦИЙ

После формирования вектора входных метрик $\vec{X}$ следующим этапом построения нечеткой информационно-аналитической системы является процедура их приведения к единому пространству признаков. Процедура включает два последовательных этапа.

1. Нормирование – это приведение разнородных первичных значений к безразмерному пространству $[0;1]$. Для исходных данных, характеризующихся как прямой, так и обратной шкалами интерпретации, алгоритм приведения к унифицированному диапазону был реализован с помощью линейного масштабирования согласно выражению

$$X_{i,n} = \begin{cases} \frac{X_i - X_{i,\min}}{X_{i,\max} - X_{i,\min}}, & \text{если нормирование на максимум;} \\ \frac{X_{i,\max} - X_i}{X_{i,\max} - X_{i,\min}}, & \text{если нормирование на минимум.} \end{cases} \quad (3)$$

где $X_{i,n} \in [0; 1]$ – нормированное значение; X_i – первичное значение метрики в исходных единицах измерения; $X_{i,\min}$, $X_{i,\max}$ – нижняя и верхняя границы значений метрики.

Значения $X_{i,\min}$ и $X_{i,\max}$ для каждой метрики X_i , установленные на основе нормативных данных [8], представлены в табл. 2 в виде лингвистической оценки $T(X_i)$, интерпретирующей абсолютные значения метрик по трем качественным уровням: «низкий» (Н), «средний» (С) и «высокий» (В).

Так как метрики различаются физической природой и направленностью оптимизации, процедура нормирования осуществлялась дифференцированно. Для большинства входных переменных (X_{KL} , X_{CA} , X_{SC} , X_{CVMR} , X_{SP} , X_C , X_{US} , X_R , X_{AN} , X_{MI} , X_{RDO} , X_{KT}), где более высокое значение метрики свидетельствует о повышении эффективности деятельности (количество правильных ответов, коэффициент успешности, стеновые оценки и др.), применялось прямое линейное масштабирование с целевой установкой на максимум. В свою очередь, для метрик (X_S , X_{LAB}), характеризующих быстродействие и правильность выполнения серий испытаний, было использовано обратное преобразование, при котором минимальным первичным значениям соответствует более высокая качественная оценка.

2. Фаззификация – преобразование нормированных значений $X_{i,n}$ в степени принадлежности $\mu_T(X_{i,n})$ к лингвистическим термам $T \in \{\text{«Н»}, \text{«С»}, \text{«В»}\}$ посредством трапецевидных ФП, описываемых следующим образом:

$$\mu(X_{i,n}) = \begin{cases} 0, & X_{i,n} < a \\ \frac{X_{i,n} - a}{b - a}, & a \leq X_{i,n} < b \\ 1, & b \leq X_{i,n} \leq c \\ \frac{d - X_{i,n}}{d - c}, & c < X_{i,n} \leq d \\ 0, & X_{i,n} > d \end{cases} \quad (4)$$

где a – нижняя граница диапазона (значение, ниже которого $\mu(X_{i,n}) = 0$); b и c – начало и конец зоны с ($\mu(X_{i,n}) = 1$); d – верхняя граница диапазона (значение, выше которого $\mu(X_{i,n}) = 0$).

На основе данных табл. 2 для каждой входной метрики в соответствии с выражением (3) были определены опорные интервалы, соответствующие ядрам ФП (зонам с $\mu = 1$) для качественных уровней «Н», «С», «В». Прямое использование этих интервалов в системе нечеткого вывода способствует наличию разрывов между границами смежных уровней и образованию «мертвых зон» ($\mu = 0$). Для обеспечения корректности нечеткого вывода осуществлен переход от жестких нормативных границ к параметризованным трапецевидным ФП. Границы носителей сформированы симметричным расширением ядер на величину $\Delta = 0.05 - 0.15$ по шкале $[0;1]$, что гарантирует пересечение смежных термов при $\mu = 0.5$ и обеспечивает плавную агрегацию входных метрик при активации правил.

В табл. 3 представлены параметры ФП входных метрик $X_{i,n}$ для оценки когнитивных функций.

Табл. 3. Параметры функции принадлежности для входных метрик $X_{i,n}$.

Оценка когнитивной функции	Параметры функции принадлежности для входных метрик $X_{i,n}$
Y_V	$X_{KL,n}$: Н[0; 0; 0.382; 0.482]. С[0.382; 0.482; 0.715; 0.815]. В[0.715; 0.815; 1; 1] $X_{CA,n}$: Н[0; 0; 0.411; 0.511]. С[0.411; 0.511; 0.644; 0.744]. В[0.644; 0.744; 1; 1] $X_{S,n}$: Н[0; 0; 0.277; 0.377]. С[0.277; 0.377; 0.563; 0.663]. В[0.563; 0.663; 1; 1]
Y_{OP}	$X_{SC,n}$: Н[0; 0; 0.5; 0.6]. С[0.5; 0.6; 0.8; 0.9]. В[0.8; 0.9; 1; 1]
Y_{TPP}	$X_{CVMR,n}$: Н[0; 0; 0.37; 0.52]. С[0.37; 0.52; 0.8; 0.95]. В[0.8; 0.95; 1; 1] $X_{SP,n}$: Н[0; 0; 0.203; 0.353]. С[0.203; 0.353; 0.785; 0.935]. В[0.785; 0.935; 1; 1]
Y_{PS}	$X_{C,n}$: Н[0; 0; 0.3; 0.45]. С[0.3; 0.45; 0.6; 0.75]. В[0.6; 0.75; 1; 1]

Y_{LM}	$X_{US,n}$: H[0; 0; 0.672; 0.772]. C[0.672; 0.772; 0.8; 0.9]. B[0.8; 0.9; 1; 1] $X_{R,n}$: H[0; 0; 0.65; 0.75]. C[0.65; 0.75; 0.85; 0.95]. B[0.85; 0.95; 1; 1]
Y_{CM}	$X_{AN,n}$: H[0; 0; 0.45; 0.6]. C[0.45; 0.6; 0.75; 0.9]. B[0.75; 0.9; 1; 1] $X_{ML,n}$: H[0; 0; 0.45; 0.6]. C[0.45; 0.6; 0.75; 0.9]. B[0.75; 0.9; 1; 1]
Y_{TD}	$X_{LAB,n}$: H[0; 0; 0.501; 0.651]. C[0.501; 0.651; 0.724; 0.874]. B[0.724; 0.874; 1; 1] $X_{RDO,n}$: H[0; 0; 0.229; 0.379]. C[0.229; 0.379; 0.771; 0.921]. B[0.771; 0.921; 1; 1]
Y_{EU}	$X_{KT,n}$: H[0; 0; 0.4; 0.5]. C[0.4; 0.5; 0.7; 0.8]. B[0.7; 0.8; 1; 1]

Параметры ФП для выходной лингвистической переменной Y_j , используемой при оценке всех восьми когнитивных функций, установлены на основе структурированного экспертного опроса с последующей нормативной верификацией. В опросе приняли участие пять специалистов в области авиационной психологии и профессионального отбора (стаж работы ≥ 10 лет, наличие действующих допусков к экспертизе летного состава). Экспертам было предложено независимо определить границы трех качественных уровней когнитивной функции: «Н» (зона риска), «С» (допустимый уровень), «В» (оптимальный профиль) по унифицированной шкале [0; 1], исходя из требований к надежности операторской деятельности [7, 8] и собственного опыта интерпретации психодиагностических данных. Получены следующие параметры ФП для Y_j : H[0; 0; 0,25; 0,40], C[0,25; 0,40; 0,65; 0,75], B[0,65; 0,75; 1; 1].

На рис. 2 показано графическое представление ФП, разработанных для входных нормированных метрик $X_{KL,n}$, $X_{CA,n}$ и $X_{S,n}$. Графическое представление полученной ФП для выходной лингвистической переменной показано на рис. 3.

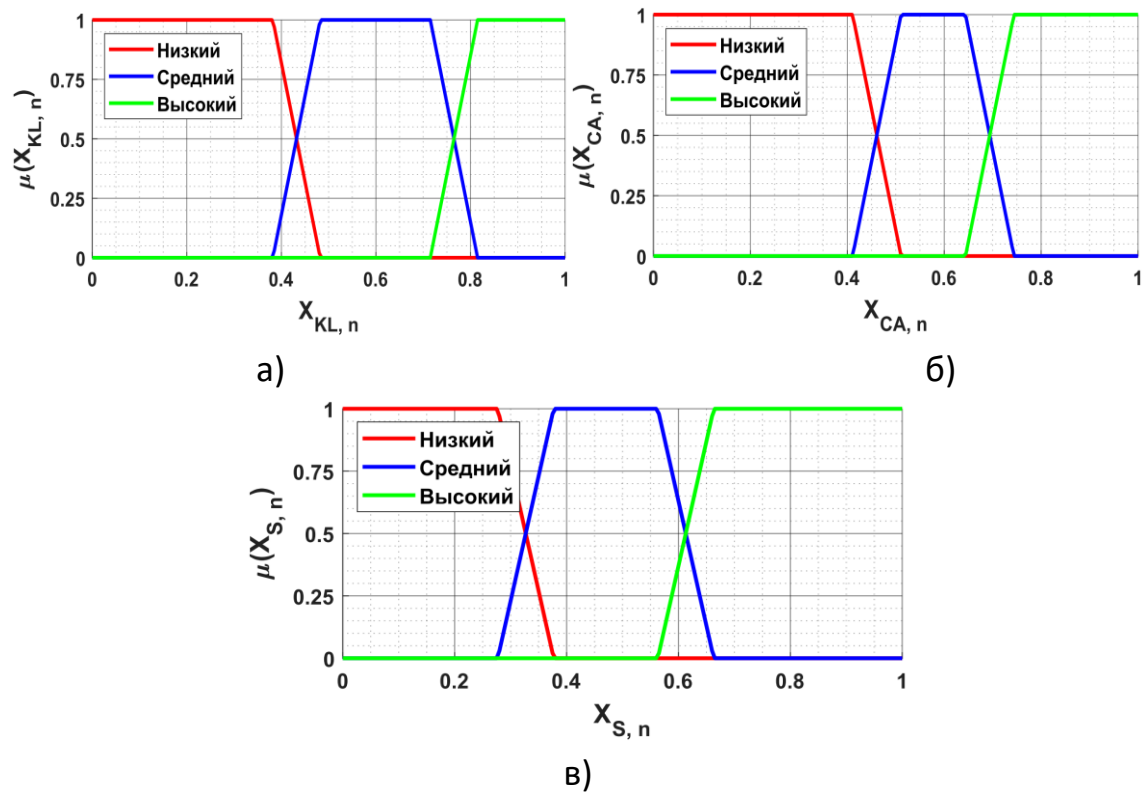


Рис. 2. Функции принадлежности для входных переменных (а) $X_{KL,n}$; (б) $X_{CA,n}$; (в) $X_{S,n}$.

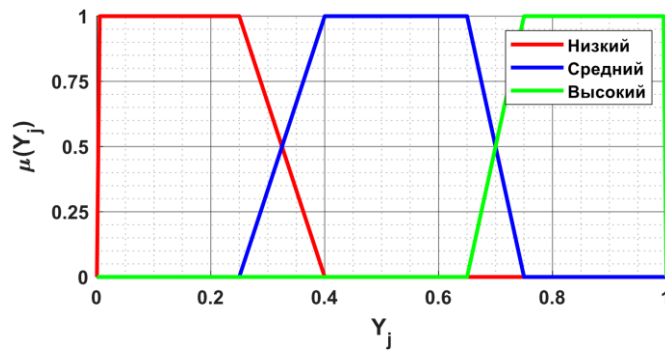


Рис. 3. Функции принадлежности для выходной лингвистической переменной Y_j .

Ключевой архитектурной особенностью разрабатываемой информационно-аналитической системы является структурная неоднородность входных метрик для получения итоговых оценок когнитивных функций. Оценки «оперативная память» (Y_{OP}), «пространственные способности» (Y_{PS}) и «эмоциональная устойчивость» (Y_{EU}) формируются на базе единичных входных метрик $X_{SC,n}$, $X_{C,n}$ и $X_{KT,n}$ соответственно. Оценки «темп психических процессов» (Y_{TPP}), «логическое

мышление» (Y_{LM}), «счетно-математические способности» (Y_{CM}) и «точность управляющих движений» (Y_{TD}), формируются с учетом двух входных метрик: $X_{CVMR,n}$ и $X_{SP,n}$; $X_{US,n}$ и $X_{R,n}$; $X_{AN,n}$ и $X_{MI,n}$; $X_{LAB,n}$ и $X_{RDO,n}$ соответственно. Оценка «внимание» (Y_V) является агрегацией трех входных метрик $X_{KL,n}$, $X_{CA,n}$ и $X_{S,n}$. Подобная неоднородность объясняется применяемым набором психодиагностических методик.

Результирующая оценка когнитивных функций на основе одной метрики формируется посредством прямой трансляции степеней принадлежности. Значение ФП входной метрики к лингвистическому терму без дополнительных преобразований переносится на выходной терм функции. Для функций, зависящих от двух или трех входных переменных, применена база нечетких правил вида «ЕСЛИ... И... ТО...». В условиях правил операторы нечеткой логики ($\min$ для конъюнкции, $\max$ для дизъюнкции) определяют степень истинности правила на базе степеней принадлежности входных метрик. Аккумуляция заключений осуществляется посредством операции $\max$, а итоговое четкое значение получается с помощью метода центра тяжести.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ КОГНИТИВНЫХ ФУНКЦИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

В разрабатываемой информационно-аналитической системе оценка когнитивных функций реализована на базе алгоритма нечеткого вывода Мамдани [12], конфигурация которого адаптирована под количество входных метрик.

Для получения оценок Y_{OP} , Y_{PS} и Y_{EU} когнитивных функций реализован алгоритм нечеткого вывода Мамдани с упрощенной базой правил. Процедура включает следующие этапы.

1. Фаззификация – это вычисление для каждой нормированной входной метрики $X_{i,n} \in [0; 1]$ степени принадлежности $\alpha_k = \mu_{Tk}(X_{i,n})$ (формула (4)) трем лингвистическим термам T_k данной входной переменной: «Н», «С», «В» (табл. 3), где $k \in \{Н, С, В\}$.

2. Активация правил – для каждого из трех правил вида

$$\text{ЕСЛИ } X_{i,n} \text{ есть } T_k, \text{ ТО } Y_j \text{ есть } T_{k,out} \quad (5)$$

вычислена степень истинности (активации) правила $\beta_k = \alpha_k$, где Y_j – выходная лингвистическая переменная; $T_{k,out}$ – лингвистические термы для Y_j , заданные на интервале $[0; 1]$ с параметрами, указанными в табл. 4.

3. Усечение заключений – ФП выходного терма $T_{k,out}$ для каждого $k \in \{H, C, B\}$ усекается на уровне β_k

$$\mu'_k(y) = \min(\mu_{T_{k,out}}(y), \beta_k), \quad (6)$$

где $y \in [0; 1]$ – аргумент в области определения Y_j .

4. Агрегация (аккумуляция) – усеченные ФП по формуле (6) объединены в единое результирующее нечеткое множество:

$$\mu_{\Sigma}(y) = \max(\mu'_H(y), \mu'_C(y), \mu'_B(y)), \quad (7)$$

где $\mu_{\Sigma}(y)$ – агрегированная ФП выходной лингвистической переменной Y_j , формируемая путем поточечного применения операции максимума к усеченным ФП выходных термов для всех $y \in [0; 1]$.

5. Дефаззификация – на основе результата агрегации (7) методом центра тяжести вычислено четкое значения выходной переменной Y_j в соответствии с выражением

$$Y_j = (\sum y \cdot \mu_{\Sigma}(y)) / (\sum \mu_{\Sigma}(y)). \quad (8)$$

На рис. 4 представлен количественный пример получения четкой оценки Y_{OP} когнитивной функции «оперативная память» на основе входного нормированного значения $X_{SC,n} = 0.5$ в соответствии с алгоритмом (3)–(8).

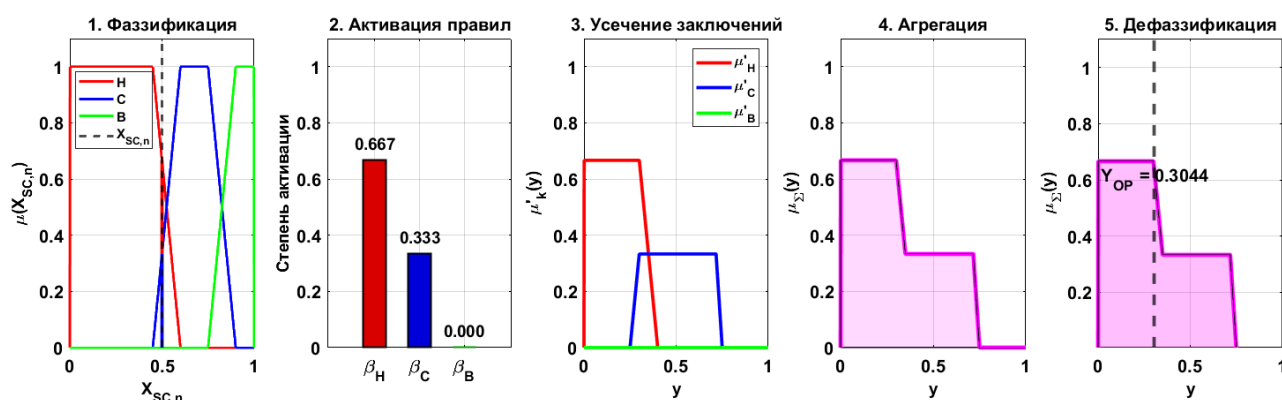


Рис. 4. Этапы формирования оценки Y_{OP} .

Для оценки когнитивных функций на основе двух входных метрик реализуется алгоритм нечеткого вывода Мамдани, включающий сформированную полную базу из 9 продукционных правил, связывающих комбинации входных термов T_{1k} и T_{2k} с лингвистическим термом $T_{k,out}$ выходной переменной Y_j . Приведем полную базу правил для оценки когнитивной функции Y_{TPP} на основе входных метрик $X_{CVMR,n}$ и $X_{SP,n}$ (табл. 4).

Табл. 4. База продукционных правил для оценки когнитивной функции на основе двух входных метрик (на примере Y_{TPP}).

$X_{CVMR,n}/X_{SP,n}$	T_{2H}	T_{2C}	T_{2B}
T_{1H}	Н	Н	С
T_{1C}	Н	С	В
T_{1B}	С	В	В

Аналогичным образом сформированы базы правил для функций Y_{LM} , Y_{CM} и Y_{TD} .

Для каждого правила вычислена степень его истинности β_j с помощью операции нечеткой конъюнкции между степенями активации условий правила:

$$\beta_j = \min(\alpha_{1k}, \alpha_{2k}). \quad (9)$$

На рис. 5 представлен количественный пример получения четкой оценки Y_{TPP} когнитивной функции «темп психических процессов» на основе входных нормированных значений $X_{CVMR,n} = 0.3$ и $X_{SP,n} = 0.9$.

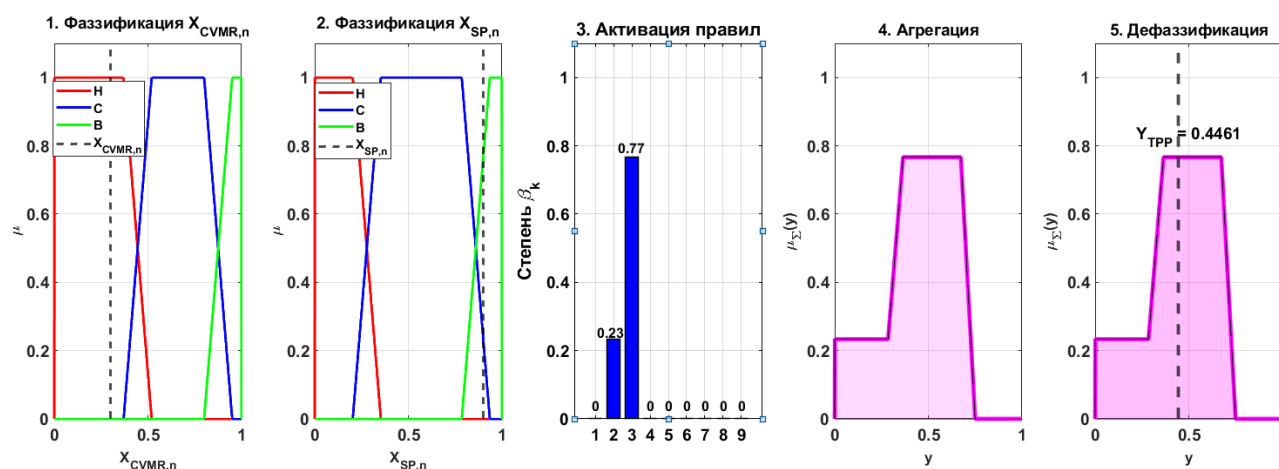


Рис. 5. Этапы формирования оценки Y_{TPP} .

Для оценки когнитивной функции Y_V на основе трех входных метрик $X_{KL,n}$, $X_{CA,n}$ и $X_{S,n}$ алгоритм нечеткого вывода предусматривает использование базы из 27 продукционных правил (табл. 6).

Табл. 6. База продукционных правил для оценки Y_V .

$X_{KL,n}$ и $X_{CA,n}/X_{S,n}$	T_{3H}	T_{3C}	T_{3B}
T_{1H} и T_{2H}	Н	Н	С
T_{1H} и T_{2C}	Н	С	С
T_{1H} и T_{2B}	С	С	В
T_{1C} и T_{2H}	Н	С	С
T_{1C} и T_{2C}	С	С	В
T_{1C} и T_{2B}	С	В	В
T_{1B} и T_{2H}	С	С	В
T_{1B} и T_{2C}	С	В	В
T_{1B} и T_{2B}	В	В	В

По аналогии с выражением (9) для каждого правила вычислялась степень его истинности θ_j :

$$\theta_j = \min(\alpha_{1k}, \alpha_{2k}, \alpha_{3k}). \quad (10)$$

Таким образом, рассмотрев алгоритмы оценки когнитивных функций на основе различного набора входных переменных, можно сформировать обобщенную структурную схему информационно-аналитической системы оценки когнитивных функций авиационного персонала на основе нечеткого вывода (рис. 6).

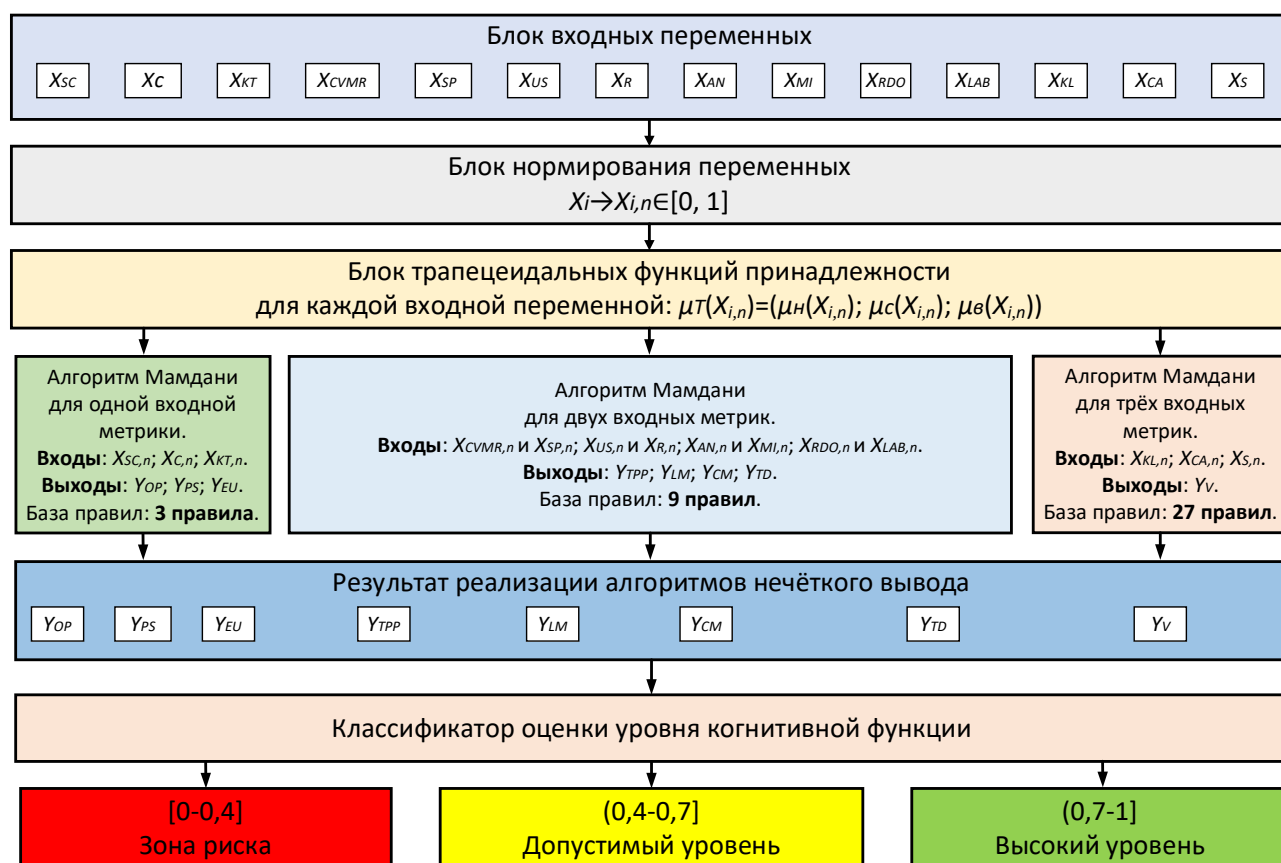


Рис. 6. Структурная схема информационно-аналитической системы нечеткого вывода для оценки когнитивных функций.

Разработанная информационно-аналитическая система оценки когнитивных функций авиационного персонала реализует модульную архитектуру нечеткого вывода, адаптированную под различную размерность входного пространства. В отличие от моделей жесткой агрегации, система осуществляет параллельную обработку диагностических данных через специализированные алгоритмические каналы, каждый из которых оптимизирован под количество метрик, валидирующих конкретную когнитивную функцию. Финальный этап работы системы обеспечивает прямую качественную интерпретацию результатов через специализированный классификатор.

Входным контуром системы является блок входных переменных, включающий 14 количественных метрик. Поскольку исходные данные характеризуются разнородной шкалой измерений, они поступают в блок нормирования переменных, где осуществляется их приведение к единому безразмерному пространству $X_{i,n} \in [0; 1]$ в соответствии с выражением (3).

Далее нормированные значения передаются в блок трапецеидальных функций принадлежности, где для каждой метрики вычисляются степени принадлежности $\mu_{Tk}(X_{i,n})$ к трем лингвистическим термам: (Н), (С) и (В) по формуле (4).

Ядро системы организовано по параллельному принципу и включает три алгоритмических модуля Мамдани. Для когнитивных функций, оцениваемых по одной метрике, база правил содержит три элемента, реализующие прямое отображение входного терма на выходной. Для функций, оцениваемых по двум метрикам, формируется полная комбинация, включающая 9 правил. Для оценки когнитивной функции «внимание» база масштабируется до 27 правил. Активация продукций осуществляется через оператор нечеткой конъюнкции (минимум степеней принадлежности условий), что гарантирует строгость оценки. Снижение показателя по любому из входов ограничивает степень срабатывания правила. Последующая агрегация усеченных выходных функций выполняется методом максимума, а преобразование нечеткого множества в четкое значение Y_j для каждой из восьми когнитивных функций реализуется дефаззификацией с помощью метода центра тяжести.

Результатом работы алгоритмических каналов является вектор из восьми нормированных оценок, который поступает в финальный модуль – классификатор оценки уровня когнитивной функции. Данный блок осуществляет качественную интерпретацию количественных значений $Y_j \in [0;1]$ путем их сопоставления с установленными пороговыми диапазонами. В зависимости от величины оценки система относит состояние функции к одной из трех зон:

- зона риска $[0; 0.4]$;
- допустимый уровень $(0.4; 0.7]$;
- высокий уровень $(0.7; 1.0]$.

Подобная архитектура обеспечивает прозрачность диагностического процесса и позволяет эксперту оперативно принимать решения о профессиональной пригодности на основе оценок отдельных когнитивных функций.

ОБОСНОВАНИЕ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ КЛАССИФИКАТОРА

Выбор пороговых значений классификатора обусловлен требованиями безопасности полетов и нормативными критериями профессионального отбора

авиационного персонала. Границы интервалов установлены на основе анализа статистических распределений когнитивных показателей в репрезентативных выборках кандидатов и действующих членов летных экипажей.

Зона риска [0; 0.4) соответствует нижней границе нормального распределения и характеризует выраженный дефицит когнитивной функции. Согласно [8], такие показатели являются основанием для ограничения допуска, так как не обеспечивают минимально необходимый уровень надежности операторской деятельности в условиях стандартной эксплуатационной нагрузки.

Допустимый уровень [0.4; 0.7) охватывает диапазон значений, соответствующих средним показателям профессиональной популяции, и удовлетворяет базовым требованиям профессиональной пригодности, однако предполагает необходимость периодического мониторинга или дополнительных тренировок для поддержания стабильности когнитивного статуса, особенно при работе на сложных типах воздушных судов.

Высокий уровень [0.7; 1.0] характеризует оптимальный когнитивный профиль, обеспечивающий резерв психической надежности и устойчивость к факторам авиационного стресса. Такие показатели рекомендованы для допуска к управлению сложными авиационными комплексами и выполнения полетов в особых условиях эксплуатации.

Разработанный классификатор методологически сопоставим с существующими подходами к оценке когнитивных функций в авиационной сфере. Использование перцентилей эмпирического распределения для определения границ зон риска и высокого уровня соответствует практике нормирования когнитивных тестов в системах отбора пилотов [13], где 25-й и 75-й перцентили применяются для дифференциации данных уровней.

Подобная градация согласуется с принципами риск-ориентированного управления безопасностью полетов, где критические дефициты отдельных функций не компенсируются высокими показателями по другим направлениям, что соответствует концепции «слабого звена» в авиационной эргономике. Необходимо отметить, что возможна дальнейшая незначительная верификация границ интервалов классификатора на репрезентативной выборке авиационного персонала с использованием методов критериальной валидности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана информационно-аналитическая система оценки когнитивных функций авиационного персонала, функционирующей на принципах нечеткого логического вывода. Получены следующие основные результаты.

1. Сформирован и обоснован набор из 13 психодиагностических методик, позволяющих количественно оценить восемь целевых когнитивных функций на базе 14 входных метрик различной физической природы.

2. Разработан модульный алгоритм нечеткого вывода Мамдани, реализующий параллельную обработку данных через специализированные каналы, рассчитанные на 1, 2 или 3 входные метрики. Масштабирование базы правил (3, 9, 27 продукций) обеспечивает корректную агрегацию входных переменных без экспоненциального роста вычислительной сложности.

3. Предложена процедура нормирования и фаззификации на основе трапециевидных функций принадлежности, исключающая образование «мертвых зон» и обеспечивающая плавность переходов между качественными уровнями оценки когнитивных функций.

4. Спроектирован классификатор оценки качественного уровня когнитивной функции с тремя градациями риска, согласованный с нормативными требованиями гражданской авиации.

Практическая значимость работы заключается в создании инструмента автоматизированной поддержки принятия решений для специалистов по профессиональному отбору. Внедрение системы позволит перейти от бинарной оценки «годен/не годен» к дифференцированному управлению кадровыми рисками, учитывающему структуру когнитивного профиля кандидата.

Дальнейшие исследования будут направлены на программную реализацию системы и верификацию ее прогностической валидности на репрезентативных выборках летного состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Civil Aviation Organization (ICAO). Safety Report 2024: State of Global Aviation Safety. Montréal: ICAO, 2025. 78 p.
URL: https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/safety/Documents/ICAO_SR_2024.pdf (дата обращения: 08.04.2026).

2. *Masi G., Amprimo G., Ferraris C., Priano L.* Stress and Workload Assessment in Aviation — A Narrative Review. *Sensors* 2023, 23, 3556.
<https://doi.org/10.3390/s23073556>
 3. *Vicente-Rodríguez M., Iglesias Gallego D., Fuentes-García J.P., Clemente-Suárez V.J.* Portable biosensors for psychophysiological stress monitoring of a helicopter crew // *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 23. P. 6849.
<https://doi.org/10.3390/s20236849>
 4. *Демина П.Н., Трофимов Е.А., Берсенева Е.Ю.* Методология оценки и контроля когнитивной работоспособности человека-оператора при осуществлении совмещенной деятельности в условиях воздействия неблагоприятных факторов среды // *Пилотируемые полеты в космос*. 2024. № 2(51). С. 35–46.
 5. *Пономаренко В.А.* Психология профессиональной деятельности: теоретические и прикладные проблемы. М.: Ин-т психологии РАН, 2006. 623 с.
 6. *Алексеев М.С., Серова А.А.* Системно-психологическая концепция профессионального отбора лиц летного и диспетчерского состава // *Системная психология и социология*. 2024. № 4 (52). С. 18–31.
<https://doi.org/10.24412/2223-6872-2024-452-18-31>
 7. *Райгородский Д.Я.* Практическая психодиагностика. Методики и тесты. Учебное пособие. Самара: Издательский Дом «БАХРАХ-М», 2001. 672 с.
 8. *Бурлачук Л.Ф.* Психодиагностика: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Питер, 2006. 351 с.
 9. *Анастаси А.* Психологическое тестирование: монография. М.: Директ-Медиа, 2008. 859 с.
 10. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление; пер. с англ. 5-е изд., электрон. М.: Лаборатория знаний, 2024. 801 с.
 11. *Усков А.А.* Системы с нечеткими моделями объектов управления. Монография. Смоленск: СФРУК, 2013. 153 с.
 12. *Mamdani E.H., Assilian S.* An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // *International Journal of Man-Machine Studies*. 1975. Vol. 7, No. 1. P. 1–13.
 13. *Compilation of Pilot Cognitive Ability Norms: technical report AFRL-SA-WP-TR-2012-0001 / Air Force Research Laboratory, Human Effectiveness Directorate. Wright-Patterson AFB, OH: U.S. Air Force, 2012. 48 p.*
-

INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM FOR ASSESSING COGNITIVE FUNCTIONS OF AVIATION PERSONNEL BASED ON FUZZY LOGIC

D. S. Koptev¹[0000-0002-7759-579X], Y. A. Khalin²[0000-0002-7020-8515],

A. S. Sizov³ [0000-0001-9658-0318]

¹⁻³ *Southwest State University, Kursk, Russia*

¹d.s.koptev@mail.ru, ²yur-khalin@yandex.ru, ³sizov@mail.ru

Abstract

The article presents an information and analytical system for assessing eight cognitive functions of aviation personnel based on fuzzy logic. The system receives 14 input variables, which are the results of subjects passing 13 validated psychodiagnostic methods. The system operates based on the Mamdani fuzzy inference algorithm, scalable to the input space dimension (1, 2 or 3 metrics) and using adaptive bases of production rules (3, 9 or 27). The generated quantitative assessments of eight cognitive functions in the range [0; 1] are fed to a three-level classifier, which implements their qualitative interpretation by assigning them to one of three zones: risk [0;0.4], acceptable level (0.4;0.7] or high level (0.7;1]. The practical significance of the developed information-analytical system lies in its role as a tool for automated decision support for professional selection specialists. Implementing the system will enable a shift from a binary «fit/unfit» assessment to a differentiated approach to managing personnel risks that takes into account the structure of a candidate's cognitive profile.

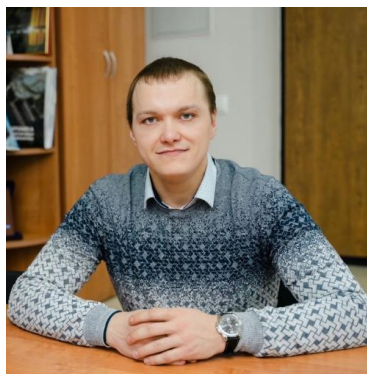
Keywords: *Information and analytical system, cognitive functions, aviation personnel, fuzzy logic, psychodiagnostic methods, Mamdani algorithm.*

REFERENCES

1. International Civil Aviation Organization (ICAO). Safety Report 2024: State of Global Aviation Safety. Montréal: ICAO, 2025. 78 p.
URL: https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/safety/Documents/ICAO_SR_2024.pdf (accessed 04.05.2026).
2. Masi G., Amprimo G., Ferraris C., Priano L. Stress and Workload Assessment in Aviation — A Narrative Review. *Sensors* 2023, 23, 3556.
<https://doi.org/10.3390/s23073556>.

3. *Vicente-Rodríguez M., Iglesias Gallego D., Fuentes-García J.P., Clemente-Suárez V.J.* Portable biosensors for psychophysiological stress monitoring of a helicopter crew // *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 23. P. 6849.
<https://doi.org/10.3390/s20236849>
4. *Demina P.N., Trofimov E.A., Bersenev E.Yu.* Methodology for assessing and monitoring the cognitive performance of a human operator during combined activities exposed to adverse environmental factors // *Manned Space Flights*. 2024. No. 2 (51). P. 35–46.
5. *Ponomarenko V.A.* Psychology of Professional Activity: Theoretical and Applied Problems. M.: Institute of Psychology, Russian Academy of Sciences, 2006. 623 p.
6. *Alekseenko M.S., Serova A.A.* Systemic-Psychological Concept of Professional Selection of Flight and Air Traffic Control Personnel // *Systemic Psychology and Sociology*. 2024. No. 4 (52). P. 18–31.
<https://doi.org/10.24412/2223-6872-2024-452-18-31>.
7. *Raigorodskiy D.Ya.* Practical Psychodiagnostics. Methods and Tests. Textbook. Samara: Publishing House "BAKHRAKH-M", 2001. 672 p.
8. *Burlachuk L.F.* Psychodiagnostics: Textbook for Universities. 2nd ed., revised and enlarged. St. Petersburg: Piter, 2006. 351 p.
9. *Anastasi A.* Psychological Testing: Monograph. M.: Direct-Media, 2008. 859 p.
10. *Pegat A.* Fuzzy Modeling and Control; Translated from English. 5th ed., electronic. Moscow: Knowledge Laboratory, 2024. 801 p.
11. *Uskov A.A.* Systems with Fuzzy Models of Control Objects. Monograph. Smolensk: SFRUK, 2013. 153 p.
12. *Mamdani E.H., Assilian S.* An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // *International Journal of Man-Machine Studies*. 1975. Vol. 7, No. 1. pp. 1–13.
13. *Compilation of Pilot Cognitive Ability Norms: technical report AFRL-SA-WP-TR-2012-0001 / Air Force Research Laboratory, Human Effectiveness Directorate. Wright-Patterson AFB, OH: U.S. Air Force, 2012. 48 p.*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



КОПТЕВ Дмитрий Сергеевич – старший преподаватель кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».

Dmitry Sergeevich KOPTEV – senior lecturer, Department of Information Security, Southwest State University.

email: d.s.koptev@mail.ru

ORCID 0000-0002-7759-579X



ХАЛИН Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Программная инженерия», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».

Yuri Alekseevich KHALIN – Candidat of Technical Science, Associate Professor, associate professor at the Department of Software Engineering, Southwest State University.

email: yur-khalin@yandex.ru

ORCID 0000-0002-7020-8515



СИЗОВ Александр Семенович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Программная инженерия», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет». Области исследований: нейронные сети и нечеткие системы, интеллектуальные системы управления сложными техническими объектами.

Alexander Semenovich SIZOV – Doctor of Technical Sciences, professor, professor at the Department of Software Engineering, Southwest State University. Research areas: neural networks and fuzzy systems, intelligent control systems for complex technical objects.

email: sizov@mail.ru

ORCID 0000-0001-9658-0318

Материал поступил в редакцию 30 июня 2026 года