ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.89 DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_12_130

А. С. Катасёв, Д. В. Катасёва, А. А. Сибгатуллин,
Г. Л. Дегтярёв

НЕЙРОНЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ УТОМЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Ключевые слова: нейронечеткая модель, функциональное состояние человека, утомление, нечеткая нейронная сеть, оценка состояния объектов.

Статья посвящена построению и тестированию нейронечеткой модели для определения состояния утомления человека. Классические подходы к оценке состояния утомления человека зачастую основаны на использовании субъективных методов, подверженных влиянию индивидуальных особенностей человека и ситуативных факторов. Это актуализирует необходимость разработки более объективных и точных методов, способных учитывать различные аспекты функционального состояния утомления. В настоящее время популярность в задачах определения утомления человека приобретают нечеткие и нейронечеткие модели. Они позволяют учитывать сложность и неопределенность, присущую процессам, связанным с функциональным состоянием человека. Ключевым преимуществом таких моделей является их способность работать с неточными, неполными и зашумленными данными, которые часто сопровождают процессы, связанные с человеком. Для построения нейронечеткой модели определения функционального состояния утомления человека потребовалось решение следующих задач: подготовки исходных данных для анализа, обучения нечеткой нейронной сети и оценки ее адекватности. В исследовании использован экспериментальный набор данных, полученный методом пупиллометрии у людей, находящихся в одном из двух функциональных состояний: нормальное состояние и состояние утомления. Набор данных содержал файлы, представленные в двух форматах: в виде текста (TXT) и в виде изображения (PNG). Папка «Норма» содержала 236 файлов, а папка «Отклонение» – 216. Текстовые файлы формата TXT представляли собой последовательности значений нормированного размера зрачка через каждые 0,04 секунды. Для формирования нейронечетких моделей в качестве исходных данных выбраны файлы TXT. Для удобства работы все исходные данные из этих файлов загружены в одну Excel-таблицу. На основе данных таблицы рассчитаны значения следующих характеристик зрачка: минимальный и конечный диаметры, амплитуда сужения, скорость сужения и расширения, а также время сужения. Общий объем данных для анализа содержал 452 записи. В качестве среды моделирования выбран авторский программный комплекс, позволяющий обучать нечеткую нейронную сеть. При ее обучении использованы следующие значения параметров: длина хромосомы в генетическом алгоритме – 10, число хромосом – 150, вероятность мутации дочерних хромосом – 10%, число эпох холостой работы – 50, число циклов холостого обучения сети – 2. Точность классификации построенной модели на обучающей выборке данных составила 95,95%, на тестовой выборке – 92,59%. Время обучения модели составило 23 минуты 35 секунд. Анализ полученных результатов свидетельствует об адекватности построенной модели и возможности ее эффективного практического использования.

A. S. Katasev, D. V. Kataseva, A. A. Sibgatullin,
G. L. Degtyarev

NEURAL FUZZY MODEL FOR DETERMINING THE FUNCTIONAL STATE OF HUMAN FATIGUE

Keywords: neural fuzzy model, human functional state, fatigue, fuzzy neural network, objects state assessment.

The article is devoted to the construction and testing of a neuro-fuzzy model for determining the state of human fatigue. Classical approaches to assessing the state of human fatigue are often based on the use of subjective methods influenced by individual characteristics of a person and situational factors. This actualizes the need to develop more objective and accurate methods that can take into account various aspects of the functional state of fatigue. Currently, fuzzy and neuro-fuzzy models are gaining popularity in the tasks of determining human fatigue. They allow taking into account the complexity and uncertainty inherent in the processes associated with the functional state of a person. The key advantage of such models is their ability to work with inaccurate, incomplete and noisy data that often accompany processes associated with a person. To build a neuro-fuzzy model for determining the functional state of human fatigue, it was necessary to solve the following problems: preparing the initial data for analysis, training a fuzzy neural network and assessing its adequacy. The study used an experimental data set obtained by the pupillometry method in people in one of two functional states: a normal state and a state of fatigue. The data set contained files presented in two formats: as text (TXT) and as an image (PNG). The "Norm" folder contained 236 files, and the "Deviation" folder contained 216. The TXT text files were sequences of normalized pupil size values every 0.04 seconds. TXT files were selected as the initial data to form neuro-fuzzy models. For ease of use, all the initial data from these files were loaded into one Excel table. Based on the table data, the following pupil characteristics were calculated: minimum and final diameters, constriction amplitude, constriction and expansion speed, and constriction time. The total data volume for analysis contained 452 records. The author's software package was selected as the modeling environment, allowing training a fuzzy neural network. The following parameter values were used for its training: chromosome length in the genetic algorithm – 10, number of chromosomes – 150, probability of daughter chromosome mutation – 10%, number of idle work epochs – 50, number of idle network training cycles – 2. The classification accuracy of the constructed

model on the training data sample was 95.95%, on the test sample – 92.59%. The training time of the model was 23 minutes 35 seconds. The analysis of the obtained results indicates the adequacy of the constructed model and the possibility of its effective practical use.

Введение

Современный мир характеризуется быстрыми темпами развития, интенсивными информационными нагрузками и постоянным стрессам, что часто приводит к состоянию утомления человека. Утомление представляет собой состояние, включающее в себя физические, когнитивные и эмоциональные компоненты, которые существенно влияют на работоспособность, производительность и безопасность жизнедеятельности человека. Своевременное определение и оценка функционального состояния утомления имеют важное значение для предотвращения негативных последствий и поддержания оптимального уровня работоспособности человека [1-3].

Классические подходы к оценке состояния утомления человека зачастую основаны на использовании субъективных методов, таких как опросы, которые могут быть подвержены влиянию разных индивидуальных особенностей и ситуативных факторов [4]. В связи с этим возникает необходимость разработки более объективных и точных методов, способных учитывать различные аспекты функционального состояния утомления человека [5].

С ростом автоматизации и с внедрением интеллектуальных систем в различных областях деятельности [6-10], таких как транспорт, производство и медицина, возрастает необходимость в точной и своевременной оценке уровня усталости операторов и специалистов. Это позволит повысить безопасность и производительность труда, а также снизить риски, связанные с человеческим фактором [11].

Применение нейросетевых [12, 13], нечетких [14, 15], нейронечетких моделей [16, 17] и технологий искусственного интеллекта [18] в этой области может способствовать более эффективному определению функционального состояния утомления [19]. Такие модели обладают уникальными преимуществами в обработке неопределенных и субъективных данных, что актуально для оценки утомления человека.

Анализ предметной области и постановка решаемой задачи

Функциональное состояние человека является важнейшим фактором, который определяет его работоспособность, эффективность деятельности и способность к адаптации в различных условиях. Одним из ключевых проявлений изменения функционального состояния является феномен утомления. Утомление – это состояние, при котором наблюдается временное снижение работоспособности и активности, возникающее под влиянием физической и умственной нагрузки. Оценка функционального состояния утомления имеет важное значение в различных сферах человеческой деятельности [20-22]: производстве, спорте, а также профессиях, характеризующихся высокой нагрузкой.

Изучению феномена утомления и разработке методов его оценки посвящено множество научных исследований [23-25] в области физиологии, психологии, эргономики и других дисциплин. Утомление является комплексным явлением, отражающим состояние различных физиологических систем и психических процессов организма.

Оценка функционального состояния утомления человека, как правило, основана на комплексном анализе физиологических, биохимических, психологических и поведенческих показателей. Такой анализ позволяет выявить как общие закономерности проявления этого феномена, так и его индивидуальные особенности у конкретного человека. Знание механизмов развития утомления и способов его диагностики имеет важное практическое значение для оптимизации трудовой, спортивной и другой деятельности человека. На основе данных об уровне утомления возможна своевременная коррекция режимов труда и отдыха, разработка эффективных реабилитационных программ, а также прогнозирование риска развития патологических состояний, связанных с хроническим перенапряжением.

Одними из наиболее распространенных методов оценки утомления человека являются субъективные методы, которые основаны на самоотчете испытуемого. Такие методы позволяют получить информацию о внутреннем состоянии человека, его ощущениях и восприятии собственного состояния.

Наряду с субъективными методами, существуют также объективные методы оценки функционального состояния утомления человека, основанные на регистрации и анализе физиологических показателей [26]. Одним из наиболее широко используемых объективных методов является метод, позволяющий регистрировать и анализировать электрическую активность мозга. Другим объективным методом является регистрация и анализ сердечного ритма. Преимуществами этого метода являются его неинвазивность, простота применения и возможность длительного мониторинга. Также для оценки утомления могут использоваться методы регистрации и анализа мышечной активности, дыхательной системы, окислительно-восстановительных процессов, гормональных и биохимических показателей крови и др. Каждый из этих методов имеет свои особенности и позволяет оценивать различные аспекты функционального состояния человека.

В настоящее время популярность в задачах определения утомления человека приобретают нечеткие и нейронечеткие модели [27, 28]. Они позволяют учитывать сложность и неопределенность, присущую процессам, связанным с функциональным состоянием человека. Ключевым преимуществом таких моделей является их способность работать с неточными, неполными и зашумленными данными, которые часто сопровождают процессы, связанные с человеком. Нейронечеткие модели могут успешно справляться с такими задачами, как распознавание образов [29, 30], оценка состояний объектов [31, 32], прогнозирование [33] и принятие решений в условиях неопределенности [34].

При оценке функционального состояния и уровня утомления человека нейронечеткие модели позволяют учитывать широкий спектр физиологических, психологических и поведенческих показателей. Это могут быть данные о частоте сердечных сокращений, артериальном давлении, показателях электроэнцефалограммы, результаты психологических тестов, а также информация о трудовой деятельности, режиме сна и отдыха и других факторах.

Построение нейронечетких моделей для оценки функционального состояния утомления человека обычно включает несколько этапов [35]. Первым шагом является сбор и анализ данных, характеризующих различные аспекты состояния человека. Затем обучается нечеткая нейронная сеть и формируется база нечетких правил, отражающих зависимости между входными переменными (физиологические, психологические и другие показатели) и выходной переменной (уровень утомления). На этом этапе также настраиваются значений параметров функций принадлежности для входных и выходных лингвистических переменных. Это позволяет преобразовать численные значения показателей в нечеткие множества, описываемые лингвистическими терминами, такими как «низкий», «средний» и «высокий» уровень утомления. Заключительным этапом является реализация нечеткого вывода, который осуществляет агрегацию нечетких правил и дефаззификацию результата для получения четкой оценки уровня утомления человека. Современные алгоритмы нечеткого вывода, такие как Мамдани и Сугено [36], обеспечивают высокую точность и гибкость в моделировании сложных зависимостей.

Таким образом, использование нечетких и нейронечетких моделей для оценки функционального состояния утомления человека имеет ряд преимуществ. Во-первых, они позволяют учитывать субъективные, лингвистические аспекты, которые трудно формализовать в виде четких математических зависимостей. Во-вторых, такие модели отличаются высокой адаптивностью и способностью к самообучению, что важно при работе с динамически изменяющимися данными о состоянии человека. В-третьих, они обладают большей устойчивостью к шумам и искажениям в исходных данных.

Для построения нейронечеткой модели определения функционального состояния утомления человека требуется решение следующих задач: подготовки исходных данных для анализа, обучения нечеткой нейронной сети и оценки ее адекватности.

Подготовка данных для анализа

Для проведения исследования оценки эффективности нечетких моделей определения функционального состояния утомления человека использован экспериментальный набор данных, полученный методом пупиллометрии у людей в двух функциональных состояниях: нормальное состояние и состояние утомления [37]. Пупиллометрия – это метод анализа зрачковой реакции на световой импульс, представляемый в виде пупиллограммы – временного ряда, который отражает размер зрачка в каждый момент времени в период видеорегистрации [38-40].

Исходный набор данных содержит файлы, представленные в двух форматах: в виде текста (TXT) и в виде изображения (PNG). Папка «Норма» содержит 236 файлов. В папке «Отклонение» содержится 216 файлов. Файлы формата PNG представляют собой изображения в виде пупиллограмм.

На рисунке 1 представлен пример графического изображения пупиллограммы из набора данных.

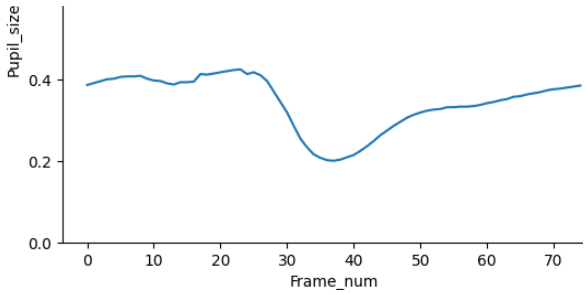

Рис. 1 – Пример пупиллограммы

Fig. 1 – An example of a pupillogram

На вертикальной оси в интервале от 0 до 1 показан нормированный (относительно радужной оболочки глаза) размер зрачка (Pupil_size). На горизонтальной оси – последовательность измерений в течение 3-х секунд (25 кадров в секунду).

Текстовые файлы формата TXT представляют собой последовательности значений нормированного размера зрачка через каждые 0,04 секунды. Для формирования нейронечетких моделей в качестве исходных данных выбраны файлы формата TXT. Для удобства работы все исходные данные из этих файлов были загружены в одну Excel-таблицу. Для автоматизации процесса загрузки использован скриптовый язык программирования PowerShell, встроенный в операционную систему Windows.

На основе данных таблицы рассчитаны значения следующих характеристик зрачка [41, 42]:

- D_{min} – минимальный диаметр;
- D_k – конечный диаметр;
- A_s – амплитуда сужения;
- V_s – скорость сужения;
- V_r – скорость расширения;
- t_s – время сужения.

Полученный набор значений был дополнительно обработан. Для оценки качества данных использована среда Deductor [43]. В ходе оценки выявлены значения, требующие незначительной предобработки: удаления выбросов и экстремальных значений.

Dmin	Dk	As	Vs	Vr	ts	Class
0,20143	0,38607	0,18607	0,12572	0,12476	1,48000	0
0,28857	0,53536	0,20429	0,14187	0,16236	1,44000	0
0,24857	0,38464	0,18357	0,13112	0,08723	1,40000	0
0,18714	0,33071	0,16964	0,15147	0,07803	1,12000	0
0,23143	0,38857	0,16857	0,15051	0,08540	1,12000	0
0,14857	0,28143	0,13990	0,12954	0,07067	1,08000	0
0,17333	0,33000	0,08500	0,07870	0,08333	1,08000	0
0,14333	0,22333	0,08667	0,08667	0,04082	1,00000	0
0,12000	0,18000	0,08667	0,09420	0,02273	0,92000	0
0,13000	0,21167	0,10167	0,10590	0,03141	0,96000	0
0,13000	0,23500	0,09167	0,10913	0,03860	0,84000	0
0,19000	0,35667	0,21833	0,19494	0,06831	1,12000	0

Рис. 2 – Фрагмент данных для анализа

Fig. 2 – Data fragment for analysis

На рисунке 2 представлен фрагмент полученных данных для анализа.

Полученная таблица данных объемом 452 записи содержит 6 столбцов с указанными входными параметрами и 1 столбец с выходным параметром – функциональным состоянием человека.

Построение и тестирование нейронечеткой модели

В качестве программной платформы для построения нейронечеткой модели определения функционального состояния утомления человека и дальнейшего анализа была выбрана среда «Нейронечеткая система формирования нечетких моделей оценки дискретного состояния объектов» [35].

В результате подготовки данных получена таблица, содержащая 452 строки с данными: 6 столбцов с входными параметрами (D_{min}, D_k, A_s, V_s, V_r, t_s) и 1 столбец с выходным параметром Class с указанием класса принадлежности к определенному состоянию: нормальное состояние (0) и функциональное состояние утомления (1). На основе анализа полученных данных в программной среде произведено обучение 5-ти нечетких нейронных сетей (ННС) и построено 5 нейронечетких моделей. Следует отметить, что для каждой ННС из подготовленных данных для анализа генерировалась соответствующая обучающая и тестовая выборка. Генерация выборок производилась на основе метода группового случайного сэмплинга с замещением [44].

В таблице 1 представлены достигнутые результаты точности классификации данных из обучающей и тестовой выборок на основе обученных ННС.

Таблица 1 – Точность классификации обучающих и тестовых данных

Table 1 – Training and testing data classification accuracy

№ ННС	Точность на обучающей выборке, %	Точность на тестовой выборке, %
1	0,9392	0,8936
2	0,9426	0,8889
3	0,9088	0,8235
4	0,9122	0,8824
5	0,9595	0,9259

При обучении ННС были использованы следующие значения параметров: длина хромосомы в генетическом алгоритме – 10, число хромосом – 150, вероятность мутации дочерних хромосом – 10%, число эпох холостой работы – 50, число циклов холостого обучения ННС – 2. Наиболее высокую точность классификации показала ННС №5.

На рисунке 3 представлен график обучения нейронечеткой модели (на примере 1-й ННС).

Верхний график на рисунке соответствует точности классификации данных из обучающей выборки, а нижний график – точности классификации тестовых данных.

На рисунке 5 представлены результаты обучения лучшей нейронечеткой модели.

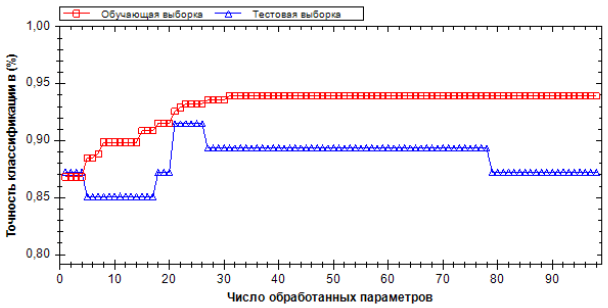

Рис. 3 – График обучения нейронечеткой модели

Fig. 3 – Neuro-fuzzy model training schedule

Результаты обучения ННС

Цикл обучения ННС	5
Параметр ФП / всего параметров	30 / 30
Эпоха ГА (настройка параметра)	5
Время обучения ННС (чч:мм:сс)	00:23:35
Точность классификации, % (train)	95,95
Точность классификации, % (test)	92,59

Рис. 4 – Результаты обучения нейронечеткой модели

Fig. 4 – Results of training the neuro-fuzzy model

Точность классификации построенной нейронечеткой модели на обучающей выборке данных составила 95,95%, на тестовой выборке – 92,59%. Время, затраченное на обучение модели, составило 23 минуты 35 секунд.

Анализ полученных результатов позволяет судить об адекватности построенной нейронечеткой модели и возможности ее эффективного практического использования для определения функционального состояния утомления человека в различных предметных областях.

Заключение

В ходе выполнения исследования проведен анализ предметной области и поставлена задача построения нейронечеткой модели определения функционального состояния утомления человека. Для ее решения подготовлены исходные данные, произведено обучение нечеткой нейронной сети, получены результаты ее тестирования.

В дальнейшем модель можно использовать в качестве эффективного инструмента для определения функционального состояния утомления человека, например, в составе интеллектуального устройства, встроенного в салон транспортного средства [45] либо в турникет при входе в здание [46].

Таким образом, перспективы применения нейронечетких моделей обусловлены их возможностями, такими как лингвистическое моделирование, способность работать с неопределенностью, универсальность и возможность интеграции с другими подходами. Широкий спектр областей применения,

развитие технологий и роль нейронечетких моделей в развитии искусственного интеллекта также говорят о высоком потенциале этого направления. Дальнейшее совершенствование теоретических основ и практических реализаций таких систем будет способствовать их более широкому внедрению и повышению эффективности решения задач в различных сферах человеческой деятельности.

Литература

1. Д.Ю. Захаров, Я.В. Щербатюк, В.А. Кочелаб, *Нефтегазовое дело*, **15**, 1, 241-248 (2017).
2. А.О. Булыгин, *Системы анализа и обработки данных*, 4 (92), 7-22 (2023).
3. И.Б. Лашков, *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, **22**, 1, 33-46 (2022).
4. А.О. Булыгин, А.М. Кашевник, *Системы анализа и обработки данных*, 3(83), 19-36 (2021).
5. А.М. Андрийченко, П.А. Емушинцев, *Морская медицина*, **9**, 2, 77-89 (2023).
6. Л.З. Гумерова, И.Ю. Мышкина, *Russian Journal of Education and Psychology*, **15**, 1-2, 165-173 (2024).
7. О.А. Пырнова, Р.С. Зарипова, *Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах*, 3 (21), 46-49 (2020).
8. Н.Н. Зиятдинов, Л.М. Дмитриева, А.Е. Сережкина, М.Е. Дмитриев, *Вестник Технологического университета*, **18**, 2, 357-361 (2015).
9. С.В. Новикова, З.З. Мингалиев, *Современные информационные технологии и ИТ-образование*, **17**, 1, 90-98 (2021).
10. Д.В. Катасёва, А.О. Баринова, *Вестник Технологического университета*, **25**, 2, 67-70 (2022).
11. Ю.Н. Баранов, А.П. Трясцин, А.Г. Дубровин, А.А. Катунин, О.С. Никитенко, *Вестник аграрной науки Дона*, 2 (50), 93-99 (2020).
12. А.М. Ахметвалеев, А.С. Катасёв, *Компьютерные исследования и моделирование*, **10**, 3, 285-293 (2018).
13. А.С. Катасёв, Д.В. Катасёва, А.П. Кирпичников, Я.Е. Семёнов, *Вестник Технологического университета*, **18**, 15, 217-220 (2015).
14. А.О. Баринова, Д.В. Катасёва, А.С. Катасёв, *Вестник Технологического университета*, **23**, 10, 75-78 (2020).
15. А.Р. Абдулхаков, А.С. Катасёв, А.П. Кирпичников, *Вестник Казанского технологического университета*, **17**, 23, 389-392 (2014).
16. Ю.Н. Воробьёва, Д.В. Катасёва, А.С. Катасёв, А.П. Кирпичников, *Вестник Технологического университета*, **21**, 2, 94-98 (2018).
17. А.С. Катасёв, Ч.Ф. Ахатова, *Программные продукты и системы*, 3, 6-12 (2011).
18. О.А. Пырнова, Р.С. Зарипова, *Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах*, 1 (15), 82-84 (2019).
19. А.М. Ахметвалеев, А.С. Катасёв, *Автоматизация процессов управления*, 3 (49), 88-95 (2017).
20. А.Е. Булатова, Е.А. Бузаева, Д.А. Евсевичев, *Научный вестник ГосНИИ ГА*, 42, 49-58 (2023).
21. А.Е. Булатова, *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации*, 2 (43), 5-14 (2024).
22. В.Н. Басков, А.В. Игнатов, *Мир транспорта и технологических машин*, 1 (76), 78-85 (2022).
23. Н.Л. Захарова, *Социально-гуманитарные технологии*, 1 (13), 55-60 (2020).
24. А.С. Кузнецов, *Физическое воспитание и детско-юношеский спорт*, 4, 84-90 (2016).
25. Л.Н. Цехмистро, Н.В. Иванова, *Прикладная спортивная наука*, 1 (5), 64-68 (2017).
26. М.М. Альбшлави, Е.В. Бурцева, В.А. Бурцев, *Наука и спорт: современные тенденции*, **21**, 4 (21), 60-66 (2018).
27. А.С. Катасёв, *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*, 4, 212-217 (2013).
28. В.И. Глова, А.С. Катасёв, Г.С. Корнилов, *Информационные технологии*, 5, 15-19 (2010).
29. Р.М. Шакирзянов, М.П. Шлеймович, С.В. Новикова, *Автоматика и телемеханика*, 7, 93-120 (2023).
30. О.А. Пырнова, Р.С. Зарипова, *International Journal of Advanced Studies*, **12**, 3-2, 46-51 (2022).
31. Q. Chen, I.E. Grossmann, N.N. Ziyatdinov, I.I. Emel'yanov, *Computers & Chemical Engineering*, **142**, 107042 (2020).
32. А.С. Катасёв, Д.В. Катасёва, А.П. Кирпичников, *Вестник Технологического университета*, **18**, 7, 255-259 (2015).
33. А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина, Л.Ю. Грудцына, *Онтология проектирования*, **9**, 2 (32), 203-213 (2019).
34. G.M. Ostrovsky, N.N. Ziyatdinov, T.V. Lapteva, *Chemical Engineering Science*, **65**, 7, 2373-2381 (2010).
35. А.С. Катасёв, *Автоматизация процессов управления*, 1 (55), 21-29 (2019).
36. Л.Ю. Емалетдинова, С.В. Новикова, *Программные системы и вычислительные методы*, 2, 151-159 (2013).
37. Д.Г. Петросянц, А.М. Ахметвалеев, А.С. Катасёв, *Компьютерные исследования и моделирование*, 13, 2, 417-427 (2021).
38. М.В. Цимбал, Н.В. Штейнберг, Д.С. Хомич, Н.А. Егоров, А.В. Туголуков, *Человек. Спорт. Медицина*, **19**, S1, 30-35 (2019).
39. А.А. Лебедев, М.И. Жилина, Е.С. Петрова, А.А. Лубяко, *Биомедицинская радиоэлектроника*, **25**, 1, 12-19 (2022).
40. Д.А. Добролюбова, *Автоматизация в промышленности*, 1, 62-64 (2019).
41. А.М. Ахметвалеев, А.С. Катасёв, М.А. Подольская, *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*, 1 (41), 69-85 (2018).
42. А.Л. Куцало, М.В. Цимбал, Н.В. Штейнберг, Д.С. Хомич, М.Г. Вареников, В.В. Волков, *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета*, 4 (68), 77-81 (2018).
43. Е.В. Фешина, А.П. Овчаров, В.Р. Лабинцева, *Colloquium-Journal*, 12-6 (23), 49-51 (2018).
44. Л.А. Демидова, М.М. Егин, Ю.С. Соколова, *Cloud of Science*, **4**, 4, 572-592 (2017).
45. В.В. Савченко, С.Н. Поддубко, *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2 (121), 181-187 (2018).
46. А.В. Маханкин, Д.Е. Намиот, *International Journal of Open Information Technologies*, **10**, 6, 133-140 (2022).

References

1. D.Yu. Zakharov, Ya.V. Shcherbatyuk, V.A. Kochelab, *Oil and Gas Business*, **15**, 1, 241-248 (2017).
2. A.O. Bulygin, *Systems of data analysis and processing*, 4 (92), 7-22 (2023).
3. I.B. Lashkov, *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, **22**, 1, 33-46 (2022).
4. A.O. Bulygin, A.M. Kashevnik, *Systems of data analysis and processing*, 3(83), 19-36 (2021).
5. A.M. Andriychenko, P.A. Emushintsev, *Marine Medicine*, **9**, 2, 77-89 (2023).
6. L.Z. Gumerova, I.Yu. Myshkina, *Russian Journal of Education and Psychology*, **15**, 1-2, 165-173 (2024).

7. O.A. Pyrnova, R.S. Zaripova, *Information technologies in construction, social and economic systems*, 3 (21), 46-49 (2020).
8. N.N. Ziyatdinov, L.M. Dmitrieva, A.E. Serezhkina, M.E. Dmitriev, *Herald of Technological University*, **18**, 2, 357-361 (2015).
9. S.V. Novikova, Z.Z. Mingaliev, *Modern information technologies and IT education*, **17**, 1, 90-98 (2021).
10. D.V. Kataseva, A.O. Barinova, *Herald of Technological University*, **25**, 2, 67-70 (2022).
11. Yu.N. Baranov, A.P. Tryastsin, A.G. Dubrovin, A.A. Katunin, O.S. Nikitenko, *Bulletin of Agrarian Science of the Don*, 2 (50), 93-99 (2020).
12. A.M. Akhmetvaleev, A.S. Katasev, *Computer Research and Modeling*, **10**, 3, 285-293 (2018).
13. A.S. Katasev, D.V. Kataseva, A.P. Kirpichnikov, Ya.E. Semenov, *Herald of Technological University*, **18**, 15, 217-220 (2015).
14. A.O. Barinova, D.V. Kataseva, A.S. Katasev, *Herald of Technological University*, **23**, 10, 75-78 (2020).
15. A.R. Abdulkhakov, A.S. Katasev, A.P. Kirpichnikov, *Herald of Kazan Technological University*, **17**, 23, 389-392 (2014).
16. Yu.N. Vorobyova, D.V. Kataseva, A.S. Katasev, A.P. Kirpichnikov, *Herald of Technological University*, **21**, 2, 94-98 (2018).
17. A.S. Katasev, Ch.F. Akhatova, *Software products and systems*, 3, 6-12 (2011).
18. O.A. Pyrnova, R.S. Zaripova, *Information technologies in construction, social and economic systems*, 1 (15), 82-84 (2019).
19. A.M. Akhmetvaleev, A.S. Katasev, *Automation of control processes*, 3 (49), 88-95 (2017).
20. A.E. Bulatova, E.A. Buzaeva, D.A. Evsevichev, *Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation*, 42, 49-58 (2023).
21. A.E. Bulatova, *Bulletin of the Saint Petersburg State University of Civil Aviation*, 2 (43), 5-14 (2024).
22. V.N. Baskov, A.V. Ignatov, *The World of Transport and Technological Machines*, 1 (76), 78-85 (2022).
23. N.L. Zakharova, *Social and Humanitarian Technologies*, 1 (13), 55-60 (2020).
24. A.S. Kuznetsov, *Physical education and youth sports*, 4, 84-90 (2016).
25. L.N. Tsekhmistro, N.V. Ivanova, *Applied Sports Science*, 1 (5), 64-68 (2017).
26. M.M. Albshlavi, E.V. Burtseva, V.A. Burtsev, *Science and Sport: Modern Trends*, **21**, 4 (21), 60-66 (2018).
27. A.S. Katasev, *Bulletin of the Kazan State Technical University n.a. A.N. Tupolev*, 4, 212-217 (2013).
28. V.I. Glova, A.S. Katasev, G.S. Kornilov, *Information Technologies*, 5, 15-19 (2010).
29. R.M. Shakirzyanov, M.P. Shleimovich, S.V. Novikova, *Automation and telemechanics*, 7, 93-120 (2023).
30. O.A. Pyrnova, R.S. Zaripova, *International Journal of Advanced Studies*, **12**, 3-2, 46-51 (2022).
31. Q. Chen, I.E. Grossmann, N.N. Ziyatdinov, I.I. Emel'yanov, *Computers & Chemical Engineering*, **142**, 107042 (2020).
32. A.S. Katasev, D.V. Kataseva, A.P. Kirpichnikov, *Herald of Technological University*, **18**, 7, 255-259 (2015).
33. A.Z. Asanov, I.Yu. Myshkina, L.Yu. Grudtsina, *Design ontology*, **9**, 2 (32), 203-213 (2019).
34. G.M. Ostrovsky, N.N. Ziyatdinov, T.V. Lapteva, *Chemical Engineering Science*, **65**, 7, 2373-2381 (2010).
35. A.S. Katasev, *Automation of control processes*, 1 (55), 21-29 (2019).
36. L.Yu. Emaletdinova, S.V. Novikova, *Software systems and computational methods*, 2, 151-159 (2013).
37. D.G. Petrosyants, A.M. Akhmetvaleev, A.S. Katasev, *Computer Research and Modeling*, 13, 2, 417-427 (2021).
38. M.V. Tsymbal, N.V. Steinberg, D.S. Khomich, N.A. Egorov, A.V. Tugolukov, *Man. Sport. Medicine*, **19**, S1, 30-35 (2019).
39. A.A. Lebedev, M.I. Zhilina, E.S. Petrova, A.A. Lu-byako, *Biomedical radioelectronics*, **25**, 1, 12-19 (2022).
40. D.A. Dobrolyubova, *Automation in industry*, 1, 62-64 (2019).
41. A.M. Akhmetvaleev, A.S. Katasev, M.A. Podolskaya, *Caspian Journal: management and high technologies*, 1 (41), 69-85 (2018).
42. A.L. Kutsalo, M.V. Tsymbal, N.V. Steinberg, D.S. Khomich, M.G. Varenikov, V.V. Volkov, *Bulletin of Volgograd State Medical University*, 4 (68), 77-81 (2018).
43. E.V. Feshina, A.P. Ovcharov, V.R. Labintseva, *Colloquium-Journal*, 12-6 (23), 49-51 (2018).
44. L.A. Demidova, M.M. Egin, Yu.S. Sokolova, *Cloud of Science*, **4**, 4, 572-592 (2017).
45. V.V. Savchenko, S.N. Poddubko, *Proceedings of NSTU n.a. R.E. Alekseev*, 2 (121), 181-187 (2018).
46. A.V. Makhankin, D.E. Namiot, *International Journal of Open Information Technologies*, **10**, 6, 133-140 (2022).

© **А. С. Катасёв** – д-р техн. наук, профессор кафедры Систем Информационной Безопасности (СИБ), Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ им. А.Н. Туполева), профессор кафедры Цифровых Систем и Моделей, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия, ASKatasev@kai.ru; **Д. В. Катасёва** – канд. техн. наук, доцент кафедры СИБ, КНИТУ им. А.Н. Туполева, dvkataseva@kai.ru; **А. А. Сибгатуллин** – магистрант кафедры СИБ, КНИТУ им. А.Н. Туполева, ainazsib@mail.ru; **Г. Л. Дегтярёв** – д-р техн. наук, профессор кафедры Автоматики и Управления, КНИТУ им. А.Н. Туполева, gldegtyarev@mail.ru.

© **A. S. Katasev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the Information Security Systems (ISS) Department, Kazan national research Technical University named after A.N. Tupolev (KNRTU named after A.N. Tupolev), Professor of the Digital Systems and Models Department, Kazan State Energy University, Kazan, Russia, ASKatasev@kai.ru; **D. V. Kataseva** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the ISS department, KNRTU named after A.N. Tupolev, dvkataseva@kai.ru; **A. A. Sibgatullin** – Master-Student of the ISS department, KNRTU named after A.N. Tupolev, ainazsib@mail.ru; **G. L. Degtyarev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the Automation and Control Department, KNRTU named after A.N. Tupolev, gldegtyarev@mail.ru.