

Б. Курбанов, А. С. Катасёв

ПРОГРАММА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЧИСЛОВЫХ ДАННЫХ ИЗ ВИДЕОПОТОКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СОНЛИВОСТИ ЧЕЛОВЕКА ПО ДИНАМИКЕ ВЫРАЖЕНИЯ ЛИЦА

Ключевые слова: видеопоток, состояние сонливости человека, динамика выражения лица, MediaPipe, MAR, EAR, программа извлечения признаков, нейронная сеть.

В статье решается задача разработки и использования программы для извлечения числовых данных из видеопотока и определения состояния сонливости человека по динамике выражения лица. Для ее разработки используется технология компьютерного зрения, в частности библиотека MediaPipe, предоставляющая алгоритмы для распознавания лиц и рук на изображениях. Библиотека также включает модуль Face Mesh для выделения до 468 ключевых точек лица на изображении. Это позволяет автоматизировать и упростить анализ мимики и выражения лица человека для определения состояния сонливости. Разработанная на языке Python 3.8 программа позволяет извлекать из видеопотока такие количественные данные, как среднее значение EAR (Eye Aspect Ratio), среднее значение MAR (Mouth Aspect Ratio), количество морганий, наличие зеваний, длительность одного моргания, частота морганий, а также среднее количество кадров, в течение которых фиксируется одно моргание. Представлен алгоритм обработки кадров из видеопотока, а также результаты его работы. Для определения корректности извлекаемых данных и возможности на их основе определять состояние сонливости человека по динамике выражения лица произведено обучение нейросетевой модели. Для обучения модели выбран набор исходных данных SUST Driver Drowsiness Dataset из общедоступного источника Kaggle. Набор содержит около 2200 видеофайлов, в которых запечатлены водители в состоянии бодрствования и сонливости. В рамках первичного исследования из набора данных экспертным путем отобрано 200 видеофайлов, из которых 100 соответствовали состоянию сонливости человека, а 100 – бодрствованию. С использованием разработанной программы из каждого видеофайла были извлечены числовые данные и сохранены в единый CSV-файл. Для построения нейросетевой модели полученные данные были разделены на обучающую выборку (80%) и тестовую (20%). Итоговая точность нейросетевой классификации составила 80.49%. Следовательно, числовые данные, извлекаемые из видеопотока с помощью разработанной программы, являются информативными и позволяют строить адекватные модели для определения состояния сонливости человека. Использование параметров EAR, MAR, количество морганий, наличие зеваний, длительность одного моргания, частота морганий, а также среднее количество кадров для одного моргания обеспечивает надежное определение сонливости человека по динамике выражения лица. Таким образом, программа представляет собой эффективный инструмент для получения данных, обучения интеллектуальных моделей и разработки систем автоматизированного мониторинга состояния сонливости человека.

B. Kurbanov, A. S. Katasev

PROGRAM FOR EXTRACTING NUMERICAL DATA FROM A VIDEO STREAM TO DETERMINE THE STATE OF HUMAN DROPPINESS BY THE DYNAMICS OF FACIAL EXPRESSION

Keywords: video stream, human sleepiness state, facial expression dynamics, MediaPipe, MAR, EAR, feature extraction program, neural network.

The article solves the problem of developing and using a program for extracting numerical data from a video stream and determining a person's sleepiness based on the dynamics of their facial expressions. Computer vision technology is used for its development, in particular the MediaPipe library, which provides algorithms for recognizing faces and hands in images. The library also includes a Face Mesh module for extracting up to 468 key facial points in an image. This allows automating and simplifying the analysis of facial expressions and facial expressions to determine a person's sleepiness. The program, developed in Python 3.8, allows extracting such quantitative data from a video stream as the average EAR (Eye Aspect Ratio) value, the average MAR (Mouth Aspect Ratio) value, the number of blinks, the presence of yawns, the duration of one blink, the frequency of blinks, and the average number of frames during which one blink is recorded. An algorithm for processing frames from a video stream and the results of its operation are presented. To determine the correctness of the extracted data and the possibility of using them to determine a person's drowsiness state based on the dynamics of facial expressions, a neural network model was trained. The SUST Driver Drowsiness Dataset from the publicly available Kaggle source was selected for training the model. The dataset contains about 2,200 video files that capture drivers in a state of wakefulness and drowsiness. As part of the primary study, 200 video files were selected from the dataset by experts, 100 of which corresponded to a person's drowsiness state, and 100 to wakefulness. Using the developed program, numerical data were extracted from each video file and saved in a single CSV file. To build a neural network model, the obtained data were divided into a training set (80%) and a test set (20%). The final accuracy of the neural network classification was 80.49%. Therefore, the numerical data extracted from the video stream using the developed program are informative and allow building adequate models for determining the state of human drowsiness. Using the parameters EAR, MAR, the number of blinks, the presence of yawns, the duration of one blink, the frequency of blinks, and the average number of frames for one blink ensures reliable determination of human drowsiness based on the dynamics of facial expression. Thus, the program is an effective tool for obtaining data, training intelligent models and developing automated monitoring systems for human drowsiness.

Введение

В настоящее время обеспечение безопасности является одной из приоритетных задач в различных сферах человеческой деятельности [1-3]. Одной из составляющих обеспечения безопасности является определение состояния сонливости человека [4, 5], например, при управлении автомобилем или на рабочем месте. Определение состояния сонливости актуально там, где критически важна высокая концентрация внимания человека, выполняющего определенные действия. Поэтому разработка эффективных методов мониторинга и определения состояния сонливости представляет научный и практический интерес в различных прикладных областях [6, 7].

Существуют различные методы определения состояния сонливости человека [8-10]. Наиболее точными считаются физиологические [11], включающие электроэнцефалографию, измерение частоты сердечных сокращений и кожно-гальванической реакции. Однако эти методы требуют использования специализированного оборудования, что затрудняет их внедрение в повседневную жизнь.

Альтернативным решением является анализ динамики выражения лица [12, 13]. Такой подход не требует физического контакта с человеком, может работать в режиме реального времени и требует лишь наличия видеокамеры, что делает его относительно недорогим и удобным в использовании.

Основной реализацией такого подхода является разработка и использование программы для извлечения числовых данных из видеопотока, характеризующих состояние сонливости человека, и анализ этих данных для принятия решения о состоянии сонливости. Извлеченные данные могут использоваться для построения нейросетевой [14-16], нечеткой [17-19] или нейронечеткой [20-22] модели, позволяющей определять состояние человека и предупреждать о возможных рисках, связанных с сонливостью. Рассмотрим авторский подход к извлечению числовых данных из видеопотока для определения состояния сонливости человека по динамике выражения лица.

Извлечение числовых данных из видеопотока

За последние годы наблюдается стремительное развитие технологий компьютерного зрения [23-25] и нейросетевого моделирования [26-28], что позволяет автоматизировать процессы анализа изображений и видеопотоков. Одним из эффективных инструментов для решения задач в этой области является библиотека MediaPipe [29]. Она предоставляет алгоритмы для распознавания лиц, рук, а также других элементов на изображениях. Библиотека также включает модуль Face Mesh [30], который распознает и выделяет до 468 ключевых точек лица на изображении. Это позволяет автоматизировать и упростить анализ мимики и выражения лица человека.

С использованием указанной библиотеки на языке Python 3.8 реализована программа извлечения из видеопотока данных для моделирования и определения состояния сонливости человека по динамике

выражения лица. В программе используются полученные с помощью модуля Face Mesh точки лица для извлечения числовых данных из видеопотока, значимо характеризующих сонливость человека. Такими данными являются среднее значение *EAR* (*Eye Aspect Ratio*), среднее значение *MAR* (*Mouth Aspect Ratio*), количество морганий, наличие зеваний, длительность одного моргания, частота морганий, а также среднее количество кадров, в течение которых фиксируется одно моргание.

Показатель *EAR* – это соотношение, позволяющее оценить степень закрытия глаз на изображении. Он вычисляется по следующей формуле [31]:

$$EAR = \frac{d_1 + d_2}{2d_3},$$

где d_1 – расстояние между верхними и нижними границами глаза, d_2 – расстояние между левыми и правыми границами глаза, d_3 – расстояние между верхней и нижней частью глаза.

Чем меньше значение *EAR*, тем сильнее происходит закрытие глаз, что может свидетельствовать о сонливости. Кроме того, на основе значений *EAR* динамично вычисляется количество морганий, их частота, время продолжительности моргания, а также среднее количество кадров, в течение которых фиксируется процесс моргания.

Аналогично *EAR*, показатель *MAR* вычисляется для оценки степени открытия рта. Формула расчета *MAR* выглядит следующим образом [31]:

$$MAR = \frac{d_4}{d_5},$$

где d_4 – вертикальное расстояние между верхними и нижними точками рта, d_5 – горизонтальное расстояние между углами рта.

При повышении значения *MAR* фиксируется открытие рта, что может указывать на зевание (признак сонливости). Кроме того, для повышения точности определения зевания человека дополнительно учитывается положение его руки относительно рта.

На рисунке 1 представлена блок-схема алгоритма обработки кадров из видеопотока.



Рис. 1 – Блок-схема алгоритма обработки кадров из видеопотока

Fig. 1 – Block diagram of the algorithm for processing frames from a video stream

После обработки каждого кадра осуществляется его визуализация (см. рис. 2).



Рис. 2 – Визуализация результатов обработки кадра из видеопотока

Fig. 2 – Visualization of the results of processing a frame from a video stream

Программа обрабатывает изображение и указывает на нем вычисленные значения параметров. Это позволяет в режиме реального времени оценивать корректность работы алгоритма.

Для определения корректности извлекаемых данных и возможности на их основе определять состояние сонливости человека по динамике выражения лица произведено обучение нейросетевой модели [32–34]. Рассмотрим результаты моделирования.

Построение и оценка модели

Для обучения нейросетевой модели потребовался набор исходных данных, в качестве которого выбран SUST Driver Drowsiness Dataset [35] с платформы Kaggle [36]. Набор содержит около 2200 видеофайлов, в которых запечатлены водители в состоянии бодрствования и сонливости. Каждый видеофайл состоит из примерно 250 кадров, что позволяет получить достаточную информацию для анализа динамики выражения лица в реальных условиях управления транспортным средством.

В рамках первичного исследования из набора данных экспертным путем отобрано 200 видеофайлов, из которых 100 соответствовали состоянию сонливости человека, а 100 – бодрствованию. С использованием разработанной программы из каждого видеофайла были извлечены числовые данные и сохранены в единый CSV-файл.

Для оценки качества извлеченных данных и их пригодности к определению состояния сонливости человека построена нейросетевая модель [37–39]. Задача модели заключается в определении класса состояния человека («сонливый» и «бодрствующий») на основе входных данных из CSV-файла.

Выбранная для эксперимента нейросетевая модель состоит из следующих слоев:

- входной слой из 12 нейронов с функцией активации ReLU и с применением L2-регуляризации для предотвращения переобучения;
- два скрытых слоя с 12 и 8 нейронами соответственно (в обоих слоях используется функция активации ReLU, а для повышения устойчивости модели к переобучению применена техника Dropout с коэффициентом 0.5, что позволяет случайным образом исключать часть нейронов во время обучения);
- выходной слой из 1 нейрона с сигмоидальной функцией активации, обеспечивающей оценку вероятности принадлежности к классу «сонливый».

Для обучения нейронной сети использован алгоритм Adam с начальной скоростью обучения 0.001. В качестве функции потерь выбрана бинарная кросс-энтропия, которая относится к бинарной классификации. Обучение проводилось в течение 100 эпох с использованием ранней остановки (*Early Stopping*), чтобы предотвратить переобучение.

Для построения модели полученные данные были разделены следующим образом [40]: 80% данных – обучающая выборка, 20% – тестовая выборка. Перед обучением выполнялось стандартизированное масштабирование признаков, что способствовало унификации диапазонов значений и ускорению сходимости алгоритма обучения.

Итоговая точность нейросетевой классификации составила 80.49%. Для анализа качества обученной модели были построены графики точности.

На рисунке 3 представлен ход обучения модели.

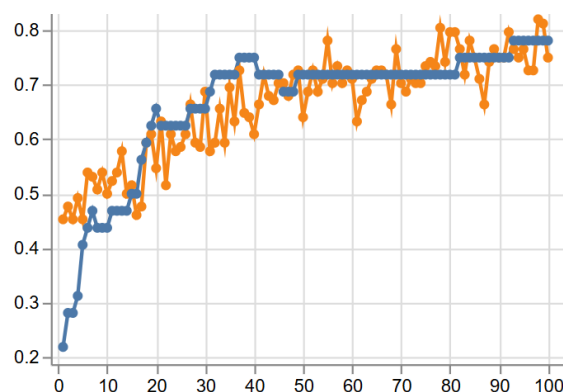


Рис. 3 – График изменения точности при обучении нейросетевой модели

Fig. 3 – Graph of accuracy change during training of neural network model

Здесь верхний график характеризует изменение точности нейросетевой модели на обучающей выборке данных, а нижний – на тестовой.

Полученные результаты показали, что при применении методов регуляризации и ранней остановки нейросетевая модель демонстрирует устойчивую работу без признаков переобучения. Таким образом, числовые данные, извлекаемые из видеопотока с помощью разработанной программы, являются информативными и позволяют строить адекватные модели для определения состояния сонливости человека. Использование таких параметров, как EAR, MAR, частота морганий и их длительность, обеспе-

чивает надежное определение сонливости человека по динамике выражения лица.

Заключение

Разработанная программа продемонстрировала свою эффективность и пригодность для извлечения числовых данных из видеопотока и определения состояния сонливости человека по динамике выражения лица. Применение современных методов компьютерного зрения и возможностей библиотеки MediaPipe, реализованных в программе, позволило отслеживать ключевые точки лица и рук, что положено в основу вычисления информативных признаков сонливости человека. Таким образом, программа представляет собой эффективный инструмент для получения данных, обучения интеллектуальных моделей [41, 42] и разработки систем мониторинга состояния сонливости человека.

Литература

1. Е.В. Воронцова, А.Л. Воронцов, *Государственная служба и кадры*, 5, 31-33 (2021).
2. З.М. Гизатуллин, М.Г. Нуриев, Р.М. Гизатуллин, *Радиотехника и электроника*, **63**, 1, 97-102 (2018).
3. Ю.А. Тунакова, С.В. Новикова, *Безопасность жизнедеятельности*, 10, 40-45 (2006).
4. Катасёв А.С., Курбанов Б., *Вестник Технологического университета*, **26**, 3, 67-71 (2023).
5. В.А. Демарева, В.В. Вяхирева, И.А. Исакова, М.В. Жукова, *Вестник психофизиологии*, 4, 73-77 (2023).
6. А.Р. Шошин, *Транспортное дело России*, 3, 142-146 (2023).
7. Р.С. Мусалимова, А.С. Янбарисова, *Вестник современных исследований*, 12, 105-109 (2018).
8. А.И. Мирошниченко, *Терапия*, **9**, S3 (65), 279-280 (2023).
9. Д.С. Полтарейко, М.Б. Паценко, Н.И. Гуляев, *Военно-медицинский журнал*, **345**, 12, 32-41 (2024).
10. В. Домбровская, *Актуальные исследования*, 18-1 (200), 47-55 (2024).
11. А.Е. Бубнова, *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета*, 3 (71), 91-95 (2019).
12. Б. Курбанов, А.С. Катасёв, Д.В. Катасёва, Б.Р. Зиннуров, *Вестник Технологического университета*, **27**, 12, 158-164 (2024).
13. В.А. Барабанщиков, *Психологический журнал*, **39**, 1, 46-56 (2018).
14. А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина, *Проблемы управления*, 1, 31-39 (2017).
15. Д.А. Набиуллин, В.В. Кононова, С.В. Новикова, *Вестник Технологического университета*, **24**, 6, 103-107 (2021).
16. М.В. Дагаева, Д.В. Катасёва, А.С. Катасёв, *Информация и безопасность*, **21**, 3, 366-371 (2018).
17. М.В. Дагаева, Д.В. Катасёва, А.С. Катасёв, А.П. Кирпичников, *Вестник Технологического университета*, **21**, 2, 148-154 (2018).
18. А.С. Катасёв, А.Р. Абдулхаков, *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*, 3, 110-115 (2012).
19. Л.Ю. Емалетдинова, С.В. Новикова, *Программные системы и вычислительные методы*, 2, 151-159 (2013).
20. Д.В. Катасёва, А.И. Баринов, *Вестник Технологического университета*, **25**, 1, 69-72 (2022).
21. С.В. Новикова, Ю.А. Тунакова, Э.Ш. Кремлева, *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 17, 262-264 (2013).
22. А.С. Катасёв, *Кибернетика и программирование*, 6, 110-122 (2018).
23. В.Я. Kolegaev, *Innovation & Investment*, 8, 196-198 (2023).
24. Н.А. Максимов, К.И. Прибытков, *Научно-технический вестник Поволжья*, 11, 231-235 (2023).
25. Б. Курбанов, А.С. Катасёв, *Научно-технический вестник Поволжья*, 7, 70-73 (2023).
26. Б.Х. Нургалиев, Д.В. Катасёва, А.С. Катасёв, *Вестник Технологического университета*, **24**, 1, 104-107 (2021).
27. Ю.Н. Воробьева, Д.В. Катасёва, А.С. Катасёв, А.П. Кирпичников, *Вестник Технологического университета*, **21**, 2, 94-98 (2018).
28. А.С. Катасёв, Н.И. Фаттахов, *Вестник Технологического университета*, **26**, 3, 79-84 (2023).
29. R.J. Herath, P. Ishanka, *Lecture Notes in Networks and Systems*, **454**, 449-459 (2022).
30. Sh. Hangaragi, T. Singh, *Procedia Computer Science*, **218**, 741-749 (2023).
31. R. Florez, F. Palomino-Quispe, A.B. Alvarez, R.J. Coaquira-Castillo, Ju.C. Herrera-Levano, *Sensors*, **24**, 19, 6261 (2024).
32. С.В. Новикова, Ю.А. Тунакова, *Безопасность жизнедеятельности*, 1 (121), 21-28 (2011).
33. Д.В. Катасёва, Д.Д. Лосева, *Вестник Технологического университета*, **25**, 1, 77-80 (2022).
34. А.С. Катасёв, *Автоматизация процессов управления*, 1 (55), 21-29 (2019).
35. E. Kavalci, M.A. Akcayol, *Conference of Open Innovations Association*, 31, 416-421 (2022).
36. А.Е. Карпова, *Вестник магистратуры*, 12-4 (87), 48-49 (2018).
37. О.А. Пырнова, Р.С. Зарипова, *International Journal of Advanced Studies*, **12**, 3-2, 46-51 (2022).
38. А.С. Катасёв, Д.В. Катасёва, Ю.Н. Смирнов, Л.Н. Кунафина, *Вестник Технологического университета*, **27**, 10, 101-105 (2024).
39. Д.В. Катасёва, А.С. Катасёв, *Информация и безопасность*, **19**, 4, 551-554 (2016).
40. О.А. Пырнова, Р.С. Зарипова, *Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах*, 2 (20), 101-102 (2020).
41. G.M. Ostrovsky, N.N. Ziyatdinov, T.V. Lapteva, I.V. Zaitsev, *Chemical Engineering Science*, **83**, 119-127 (2012).
42. G.M. Ostrovsky, N.N. Ziyatdinov, T.V. Lapteva, I.V. Zaitsev, *Chemical Engineering Science*, **66**, 17, 3815-3828 (2011).

References

1. E.V. Vorontsova, A.L. Vorontsov, *Civil Service and Personnel*, 5, 31-33 (2021).
2. Z.M. Gizatullin, M.G. Nuriev, R.M. Gizatullin, *Radio engineering and electronics*, **63**, 1, 97-102 (2018).
3. Yu.A. Tunakova, S.V. Novikova, *Life Safety*, 10, 40-45 (2006).
4. Katasev A.S., Kurbanov B., *Herald of Technological University*, **26**, 3, 67-71 (2023).
5. V.A. Demareva, V.V. Vyakhireva, I.A. Isakova, M.V. Zhukova, *Bulletin of Psychophysiology*, 4, 73-77 (2023).
6. A.R. Shoshin, *Transport Affairs of Russia*, 3, 142-146 (2023).
7. R.S. Musalimov, A.S. Yanbarisova, *Bulletin of modern research*, 12, 105-109 (2018).
8. A.I. Miroshnichenko, *Therapy*, **9**, S3 (65), 279-280 (2023).
9. D.S. Poltareiko, M.B. Patsenko, N.I. Gulyaev, *Military Medical Journal*, **345**, 12, 32-41 (2024).
10. V. Dombrovskaya, *Current Research*, 18-1 (200), 47-55 (2024).
11. A.E. Bubnova, *Bulletin of the Volgograd State Medical University*, 3 (71), 91-95 (2019).

12. B. Kurbanov, A.S. Katasev, D.V. Kataseva, B.R. Zinnurov, *Herald of Technological University*, **27**, 12, 158-164 (2024).
13. V.A. Barabanshchikov, *Psychological Journal*, **39**, 1, 46-56 (2018).
14. A.Z. Asanov, I.Yu. Myshkina, *Problems of Management*, **1**, 31-39 (2017).
15. D.A. Nabiullin, V.V. Kononova, S.V. Novikova, *Herald of Technological University*, **24**, 6, 103-107 (2021).
16. M.V. Dagaeva, D.V. Kataseva, A.S. Katasev, *Information and Security*, **21**, 3, 366-371 (2018).
17. M.V. Dagaeva, D.V. Kataseva, A.S. Katasev, A.P. Kirpichnikov, *Herald of Technological University*, **21**, 2, 148-154 (2018).
18. A.S. Katasev, A.R. Abdulhakov, *Bulletin of the Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*, **3**, 110-115 (2012).
19. L.Yu. Emaletdinova, S.V. Novikova, *Software systems and computational methods*, **2**, 151-159 (2013).
20. D.V. Kataseva, A.I. Barinov, *Herald of Technological University*, **25**, 1, 69-72 (2022).
21. S.V. Novikova, Yu.A. Tunakova, E.Sh. Kremleva, *Herald of Kazan Technological University*, **16**, 17, 262-264 (2013).
22. A.S. Katasev, *Cybernetics and programming*, **6**, 110-122 (2018).
23. B.Ya. Kolegaev, *Innovation & Investment*, **8**, 196-198 (2023).
24. N.A. Maksimov, K.I. Pribytkov, *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, **11**, 231-235 (2023).
25. B. Kurbanov, A.S. Katasev, *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, **7**, 70-73 (2023).
26. B.Kh. Nurgaliev, D.V. Kataseva, A.S. Katasev, *Herald of Technological University*, **24**, 1, 104-107 (2021).
27. Yu.N. Vorobyeva, D.V. Kataseva, A.S. Katasev, A.P. Kirpichnikov, *Herald of Technological University*, **21**, 2, 94-98 (2018).
28. A.S. Katasev, N.I. Fattakhov, *Herald of Technological University*, **26**, 3, 79-84 (2023).
29. R.J. Herath, P. Ishanka, *Lecture Notes in Networks and Systems*, **454**, 449-459 (2022).
30. Sh. Hangaragi, T. Singh, *Procedia Computer Science*, **218**, 741-749 (2023).
31. R. Florez, F. Palomino-Quispe, A.B. Alvarez, R.J. Coaquira-Castillo, Ju.C. Herrera-Levano, *Sensors*, **24**, 19, 6261 (2024).
32. S.V. Novikova, Yu.A. Tunakova, *Life Safety*, **1** (121), 21-28 (2011).
33. D.V. Kataseva, D.D. Loseva, *Herald of Technological University*, **25**, 1, 77-80 (2022).
34. A.S. Katasev, *Automation of control processes*, **1** (55), 21-29 (2019).
35. E. Kavalci, M.A. Akcayol, *Conference of Open Innovations Association*, **31**, 416-421 (2022).
36. A.E. Karpova, *Bulletin of the Magistracy*, **12-4** (87), 48-49 (2018).
37. O.A. Purnova, R.S. Zaripova, *International Journal of Advanced Studies*, **12**, 3-2, 46-51 (2022).
38. A.S. Katasev, D.V. Kataseva, Yu.N. Smirnov, L.N. Kunafina, *Herald of Technological University*, **27**, 10, 101-105 (2024).
39. D.V. Kataseva, A.S. Katasev, *Information and Security*, **19**, 4, 551-554 (2016).
40. O.A. Purnova, R.S. Zaripova, *Information technologies in construction, social and economic systems*, **2** (20), 101-102 (2020).
41. G.M. Ostrovsky, N.N. Ziyatdinov, T.V. Lapteva, I.V. Zaitsev, *Chemical Engineering Science*, **83**, 119-127 (2012).
42. G.M. Ostrovsky, N.N. Ziyatdinov, T.V. Lapteva, I.V. Zaitsev, *Chemical Engineering Science*, **66**, 17, 3815-3828 (2011).

© **Б. Курбанов** – аспирант кафедры Систем информационной безопасности (СИБ), Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ им. А.Н. Туполева), Казань, Россия, babahan-98@mail.ru; **А. С. Катасёв** – д-р техн. наук, профессор кафедры СИБ, КНИТУ им. А.Н. Туполева ASKatasev@kai.ru.

© **В. Курбанов** – PhD-student of the Information Security Systems (ISS) department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KNRTU named after A.N. Tupolev), Kazan, Russia, babahan-98@mail.ru; **A. S. Katasev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, the ISS department, KNRTU named after A.N. Tupolev, ASKatasev@kai.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 04.04.25.

Дата принятия рукописи в печать – 23.04.25.