

УДК: 623.746.-519

EDN: UMJKSY

DOI: <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2024-4-1-0110-0121>

## Методика управления автономной группой многороторных летательных аппаратов

Д. В. Старов, В. А. Корякова

*Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, Астрахань, Россия*

**Аннотация.** Целью данной статьи является повышение эффективности управления и мониторинга автономной группой многороторных летательных аппаратов путем разработки программно-аппаратного комплекса. Исследование направлено на создание интеллектуальной системы, которая позволит управлять группой дронов для базирования, резервирования данных, заряда бортовых аккумуляторных батарей, оценки работоспособности. Простота, многообразие, хорошая масштабируемость конструкции, простота управления, высокая манёвренность, мультироторных систем привели к их широкому использованию. Однако, данная разновидность конструкции не является аэродинамически устойчивой и по этой причине нуждается в активной системе стабилизации, которая бы в реальном времени корректировала скорости вращения винтов. Разработанный программно-аппаратный комплекс позволит управлять группой многороторных летательных аппаратов путём отправки различных команд. Разработанная система позволит осуществлять автоматическую посадку мультироторного коптера на движущуюся платформу. В ходе работы описана общая методика управления автономной группой многороторных летательных аппаратов, разработана структурно-графическая схема системы стабилизации беспилотного летательного аппарата. Разработана структура информационных потоков в системе управления беспилотных летательных аппаратов. Разработанные модели будут использованы для построения имитационной модели, а также при непосредственной разработке системы управления.

**Ключевые слова:** система управления, беспилотные летательные аппараты, группа роботов, мониторинг.

**Для цитирования:** Старов, Д. В., & Корякова, В. А. (2024). Методика управления автономной группой многороторных летательных аппаратов. *Современные инновации, системы и технологии* - Modern Innovations, Systems and Technologies, 4(1), 0110–0121. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2024-4-1-0110-0121>

---

## Control method for an autonomous group of multi-rotor aircraft

D. V. Starov, V. A. Koryakova

*Astrakhan State University named of V.N. Tatishcheva, Astrakhan, Russian Federation*

**Abstract.** The purpose of this article is to improve the efficiency of control and monitoring of an autonomous group of multi-rotor aircraft by developing a hardware and software complex. The research is aimed at creating an intelligent system that will allow managing a group of drones for basing, data backup, charging on-board batteries, and assessing performance. The simplicity, diversity, good scalability of the design, ease of control, high maneuverability of multi-rotor systems have led to their widespread use. However, this type of design is not aerodynamically stable and for this reason requires an active stabilization system that would adjust the rotor speeds in real time. The developed software and hardware complex will allow you to control a group of multi-rotor aircraft by sending various commands. The developed system will allow automatic landing of a multi-rotor copter on a moving platform. In the course of the work, a general technique for controlling an autonomous group of multi-rotor aircraft was described, and a structural and graphic diagram of the stabilization system for an unmanned aerial vehicle was developed. The structure of information flows in the control system of unmanned aerial vehicles has been developed. The developed models will be used to build a simulation model, as well as in the direct development of the control system.

**Keywords:** control system, unmanned aerial vehicles, group of robots, monitoring.

**For citation:** Starov, D. V., & Koryakova, V. A. (2024). Control method for an autonomous group of multi-rotor aircraft. *Modern Innovations, Systems and Technologies*, 4(1), 0110–0121. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2024-4-1-0110-0121>

---

## ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие электроники привело к возможности создания недорогих и компактных беспилотных мультироторных летательных аппаратов. Простота, многообразие, хорошая масштабируемость конструкции, простота управления, высокая манёвренность мультироторных систем привели к их широкому использованию: мультикоптеры используются для съёмки массовых мероприятий, пейзажей, зданий и земельных участков, доставки небольших грузов, разведки, развлечения. На сегодняшний день возможности летающих дронов могут быть реализованы в большом количестве разных сфер деятельности: агропромышленность, техническое обслуживание, строительство, кино и фото индустрия, охрана, информационные технологии, спорт и развлечения, транспорт и логистика [1, 2]. Сельское хозяйство является одной из основных отраслей, в которой используются как наземные, так и воздушные дроны для оценки состояния растений, орошения, мониторинга посевов, опрыскивания, посева, анализа почвы и полей.

При использовании беспилотного летательного аппарата особенно остро встаёт вопрос безопасности и надёжности. С одной стороны, беспилотный летательный аппарат может использоваться в непосредственной близости от людей (аэрофотосъёмка различных мероприятий, доставка грузов в черте города и т. д.), с другой стороны, сам по себе БПЛА профессионального уровня имеет достаточно высокую стоимость, что

приведёт к значительным расходам в случае выхода его из строя. Следует учитывать, что при крушении БПЛА получит повреждение не только он, но и установленное на нём дополнительное оборудование, а также строения и оборудование на земле. Всё это создаёт серьёзный запрос на адаптивные системы управления, способные адекватно среагировать на различные нештатные ситуации [3,4]. Например, мультикоптер с 6 несущими винтами при отсутствии излишней нагрузки способен сохранить стабильность при повреждении одного из двигателей, однако при ручном управлении это требует оперативного вмешательства опытного пилота. В то же время, программная реализация обработки такого рода ситуаций позволяет исключить необходимость столь оперативной реакции, снизить требования к квалификации оператора. В отличие от самолётов данная разновидность конструкции не является аэродинамически устойчивой и по этой причине нуждается в активной системе стабилизации, которая бы в реальном времени корректировала скорости вращения винтов. Это требует применения высокопроизводительных микроконтроллеров, а также твердотельных акселерометров и гироскопов [5-8]. Несмотря на актуальность тематики, на сегодняшний день не существует доступной коммерческой системы управления БПЛА, способной скорректировать алгоритм управления дроном в нештатной ситуации.

## **ОБЩАЯ МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ГРУППОЙ МНОГОРОТОРНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

При групповом использовании роботов различного назначения возникает ряд весьма сложных задач, в первую очередь, связанных с проблемой управления ими и организацией взаимодействия роботов группы между собой для наиболее эффективного достижения цели, поставленной перед группой. В особенности эта проблема относится к интеллектуальным мобильным роботам с автономной системой передвижения и навигации.

Управление группой разнородных роботов преследует ряд целей:

1. Обеспечение согласованных действий внутри группы дронов для решений общей задачи. Разнородные дроны могут «передавать эстафету» в задаче доставки груза, при этом каждый дрон выполняет транспортировку груза на том участке пути, для преодоления которого она лучше всего подходит. Разнородные дроны могут дополнять сенсорные данные друг друга для более успешного функционирования. Например,

БПЛА может иметь большую площадь обзора, и информация, полученная им будет полезна наземной станции.

2. Применение множества дронов может обеспечивать резервирование системы. Например, одна и та же задача может быть выполнена несколькими различными способами с применениями различных конфигураций дронов. Управляющая система может выбрать из всех конфигураций выполнения операции наиболее эффективную с точки зрения времени, затрат энергии, задействованного количества роботов или ещё по каким-либо другим характеристикам. Таким образом в случае, если один из путей решения проблемы оказывается нереализуемым из-за выхода из строя одного или нескольких дронов, или их систем, то общая управляющая система может перейти к альтернативному варианту действий.

Общую схему управления автономной группой многороторных летательных аппаратов можно представить в следующем виде (см. рисунок 1):

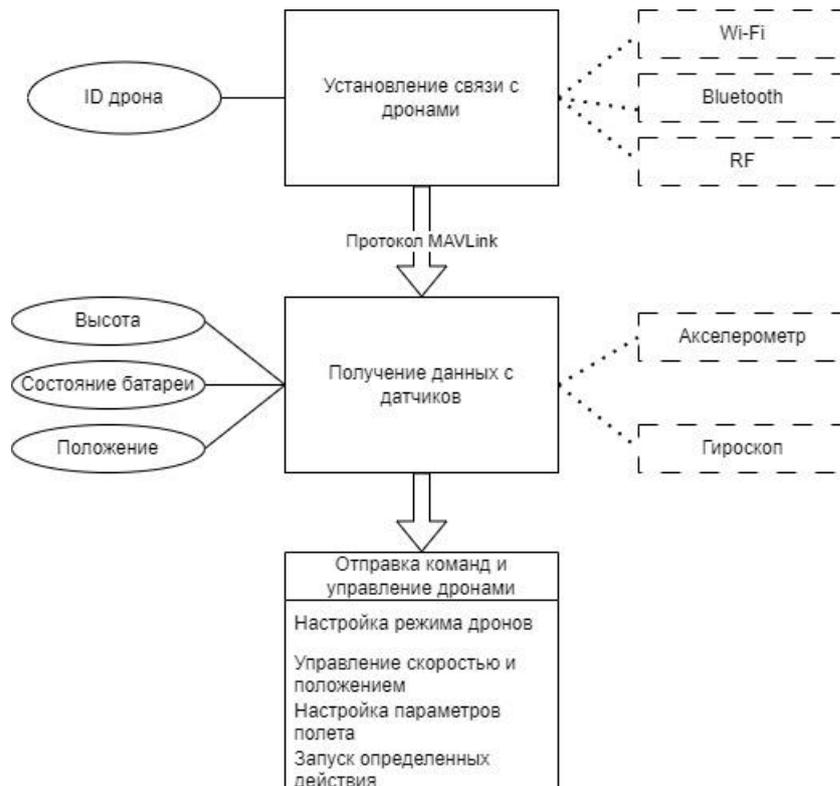


Рисунок 1. Схема управления автономной группой многороторных летательных аппаратов.

Figure 1. Control diagram for an autonomous group of multi-rotor aircraft.

Mavros и Malink – это две программные среды, обычно используемые для одновременного контроля и управления несколькими дронами. В то время как Mavros

фокусируется на связи и взаимодействии между дронами и наземной станцией управления (GCS) с использованием протокола MAVLink, Malink предоставляет высокоуровневый интерфейс для управления дронами на основе сообщений MAVLink.

На первом этапе Mavros устанавливает связь между GCS и дронами. Он связывается с каждым дроном по надежной линии телеметрии, такой как Wi-Fi, Bluetooth или радиочастота (RF). Каждый дрон должен иметь свой уникальный идентификатор. Далее Mavros реализует протокол MAVLink, который представляет собой упрощенный протокол обмена сообщениями, предназначенный для связи между беспилотными системами и GCS. Он использует набор predefined сообщений для обмена информацией о телеметрии, командах управления, планировании миссии. Mavros обрабатывает сериализацию и десериализацию сообщений MAVLink, обеспечивая бесперебойную связь между GCS и дронами. Затем происходит получение данных с датчиков: Mavros собирает данные датчиков с каждого дрона, включая координаты GPS, высоту, состояние батареи, положение и показания датчиков (акселерометр, гироскоп и т. д.). Эта информация имеет решающее значение для мониторинга состояния дронов и принятия обоснованных решений во время автономных операций. На последнем этапе осуществляется отправка команд и управления группой дронов. Эти команды могут включать в себя настройку режима дронов (например, взлет, посадка, управляемый, автономный), управление их скоростью или положением, настройку параметров полета (усиление ПИД-регулятора) и запуск определенных действий (например, захват изображений, сброс полезной нагрузки). Mavros переводит эти высокоуровневые команды в сообщения MAVLink и передает их соответствующим дронам.

## ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Важным аспектом является выбор самих средств связи для взаимодействия между роботами, так как в случае использования разных типов роботов каждый из них обладает индивидуальными особенностями (собственным энергозапасом, грузоподъемностью, наличием возможности подзарядки от других систем, условиями окружающей среды, удаленностью от других роботов и т.д.). Возможно, как использование одного вида приемо-передающей системы, так и комбинирование нескольких различных систем. Поскольку данные роботы позволяют применять воздушную среду распространения

сигнала, принято решение использовать беспроводной канал связи для управления ими [1].

Каждый дрон может быть оборудован различными наборами сенсоров, которые обеспечивают измерение характеристик внешней среды, чтобы в последствии управляющая система могла обеспечить реакцию на них.

В зависимости от задач дроны могут быть оборудованы:

- датчиками температуры, давления, скорости ветра;
- датчиками радиации;
- системами технического зрения;
- датчиками ориентации (гироскоп, акселерометр, компас);
- приёмниками глобальной и/или локальной навигационной системы;
- различными типами дальномеров (ультразвуковые, инфракрасные, лазерные и т. д.);
- другими сенсорами, специфическими для задачи.

Управляющая система каждого отдельного робота должна обеспечивать передачу собранных данных в общую сеть, делая её доступной для других роботов и центра управления.

Все реакции на собранные данные можно разделить на две группы:

- реакции, которые задействуют только одного дрона (например, уклонение от препятствия). Это обеспечивает разгрузку других дронов от обработки ненужной информации, а также уменьшает задержку реакции.
- реакции, которые задействуют сразу нескольких дронов. В этом случае необходим плотный обмен информацией между дронами.

Специфика робототехнических систем такова, что их испытание в реальных условиях несёт значительные затраты времени и финансов. Неудачные проектные решения имеют слишком высокую цену при необходимости внесения существенных изменений в конструкцию. Также многие дроны в случае некорректной работы могут представлять угрозу как повреждения дорогостоящего имущества, так и человеческих жертв. Всё это делает весьма оправданным применение различных методов моделирования. Современные программные продукты (например, Matlab, AnyLogic и др.) способны заменить часть испытаний дронов компьютерным моделированием. На основании построенных ранее математических и физических моделей возможно предсказание поведения системы в реальности. Разумеется, в силу ограниченности

знаний о реальных условиях использования и конечных вычислительных ресурсах, на окончательных этапах проектирование почти всегда необходимо проведение ряда экспериментов в реальности, однако современные средства моделирования позволяют значительно уменьшить их количество.

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ И СХЕМАТИЗАЦИЯ ЗАДАЧ

Задача управления автономной группой многороторных летательных аппаратов фактически может быть разбита на несколько относительно независимых подзадач.

Во-первых, это независимо рассмотренное управление каждым из дронов в группе. Например, БПЛА может нуждаться в весьма нетривиальном алгоритме стабилизации, который с одной стороны не требует согласования с другими дронами (поскольку этому процессу подлежат управляющие системы более высокого уровня), а с другой стороны требует максимальной скорости реакции, а поэтому не может зависеть от стабильности работы систем связи, которые имеют переменную задержку.

Во-вторых, все управляющие воздействия на такие системы нижнего уровня объединяются в единую систему верхнего уровня, рассматривающую все БПЛА как единую группу. В этом случае на передний план выходят особенности взаимодействия дронов между друг другом, а не их индивидуальные системы управления.

Была разработана структурно-логическая схема управления наземной платформой (см. рисунок 2).

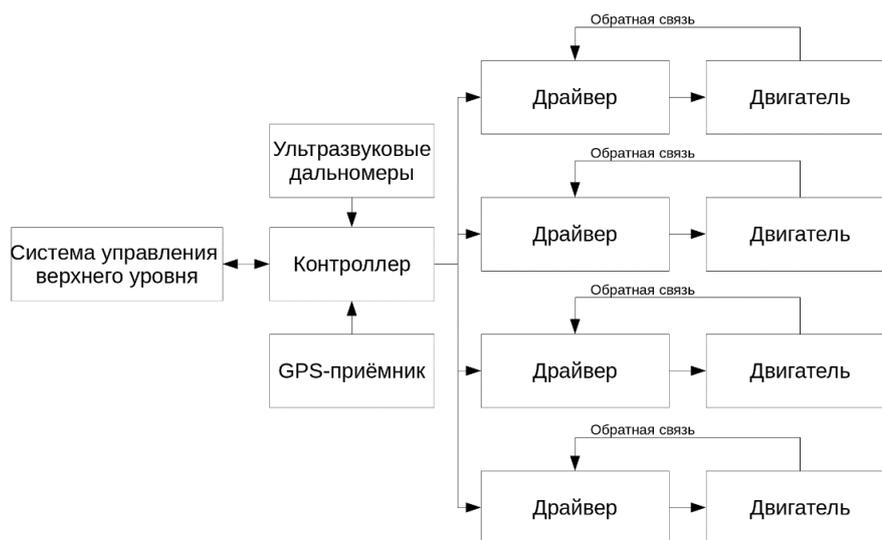


Рисунок 2. Структурно-графическая модель.

Figure 2. Structural-graphical model.

Система управления верхнего уровня подаёт на вход контроллера управления низкого уровня требуемые параметры управления (целевые координаты и ориентацию, параметры объезда препятствий). Контроллер опрашивает приёмник глобальной навигационной системы, а также набор ультразвуковых дальномеров, и с учётом управляющих команд системы управления верхнего уровня, формирует управляющие сигналы для драйверов двигателей, согласно математической модели движения платформы на всенаправленных колёсах. Драйвера двигателей принимают целевую скорость вращения и определяют степень её расхождения с фактической скоростью вращения двигателей по энкодерам. На основании этих данных драйвера выдают управляющие сигналы на двигатели. Вращение двигателей приводит к смещению дронов и изменению её глобальных координат, а также положения относительно препятствий.

Разработана схема информационных потоков в системе автономной группы многороторных летательных аппаратов, наземной РТС, а также центра управления (см. рисунок 3).

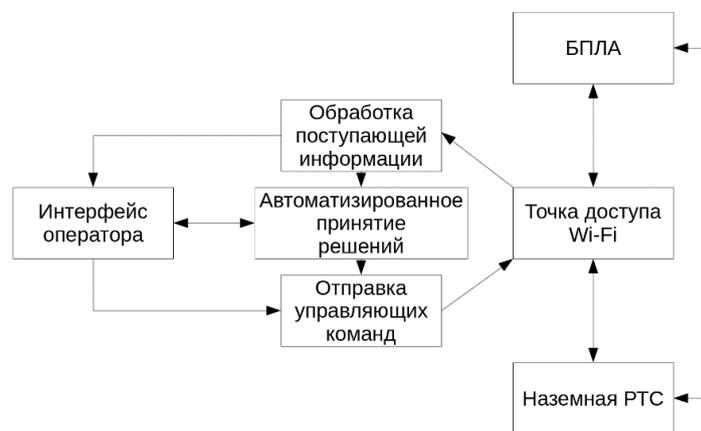


Рисунок 3. Функционально-логическая модель группы дронов.

Figure 3. Functional and logical model of a group of drones.

Обе робототехнические системы находятся в общей беспроводной сети и могут общаться как друг с другом, так и с центром управления. Центр управления консолидирует поступающую от РТС информацию и отображает её с помощью интерфейса оператора. Также возможно автоматизированное принятие решение на основании поступающей информации. Режим работы механизма принятия решения выбирается через интерфейс оператора. Оттуда же может быть получена информация о причинах выбора того или иного решения автоматизированной системой на основании

выбранного режима. Обычно команды роботам отправляет система управления сама на основе высокоуровневых указаний оператора, однако оператор через свой интерфейс управления может отдавать низкоуровневые приказы отдельным роботам.

ПИД-регулятор является наиболее часто используемой структурой на нижнем уровне системы управления многих роботов. Например, в наземной платформе он позволяет поддерживать постоянные скорости вращения колёс при движении, а в БПЛА является ядром системы стабилизации ориентации. На рисунке 4 приведена структура ПИД-регулятора и его схема использования в общем виде.



Рисунок 4. Функционально-логическая модель использования ПИД-регулятора.

Figure 4. Functional-logical model of using a PID controller.

Управляющая система верхнего уровня задаёт требуемое значение отслеживаемого сенсорами показателя (данные сенсоров могут проходить различную предобработку, например, фильтрацию или нормирование). Данная модель демонстрирует взаимосвязь основных элементов управляющей системы и исполнительных механизмов наземной платформы, которая является одной из RTC рассматриваемой разнородной группы.

Величина ошибки определяется как разность между требуемым и текущим значением показателя. Величина ошибки одновременно поступает на вход трёх компонентов ПИД-регулятора – интегратора, дифференциатора и умножителя. Результат поступает на вход сумматора, который выдаёт вычисленную регулятором величину управляющего воздействия для уменьшения ошибки. Оно может пройти

постобработку и быть поданным на исполнительные механизмы, оказывающих непосредственное воздействие на объект управления и тем самым изменения показания сенсоров. Эффективность ПИД-регулятора обеспечивается тем, что интегратор позволяет компенсировать длительную ошибку, а дифференциатор реагировать на резкие изменения.

Данная модель будет использована в дальнейшем для построения имитационной модели, а также при непосредственной разработке системы управления.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, создание программно-аппаратного комплекса на основе разработанной методики, позволит управлять автономной группой многороторных беспилотных летательных аппаратов для выполнения конкретной задачи, включая также в себя наземную мехатронную платформу для базирования БПЛА, с целью осуществления резервирования данных накопленных на БПЛА, заряда бортовых аккумуляторных батарей БПЛА, оценки работоспособности БПЛА.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. Москва: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература»; 2009. 280.

[2] Калмурзаева Д.К., Багинова В.В. Беспилотные летающие аппараты как инструмент микрологистики нового поколения. European research. 2017; 1(24): 12-14.

[3] Chen Y., Zhang G., Zhuang Y., Hu H. Autonomous Flight Control for Multi-Rotor UAVs Flying at Low Altitude. IEEE Access. 2019; 7: 42614-42625.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908205>

[4] Thanh H., Hong S. Quadcopter Robust Adaptive Second Order Sliding Mode Control Based on PID Sliding Surface. IEEE Access. 2018: 1-1.

[5] Mogili U., Deepak B. Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture. Procedia Computer Science. 2018; 133: 502-509.  
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.063>

[6] Dong T., Zhang Y., Xiao Q., Huang Y. The Control Method of Autonomous Flight Avoidance Barriers of UAVs in Confined Environments. *Sensors*. 2023; 23: 5896. <https://doi.org/10.3390/s23135896>

[7] Boucher P. Domesticating the Drone: The Demilitarisation of Unmanned Aircraft for Civil Markets. *Science and Engineering Ethics*. 2015; 21: 1393-1412. <https://doi.org/10.1007/s11948-014-9603-3>

[8] Xue R., Cai G. Formation Flight Control of Multi-UAV System with Communication Constraints. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2016; 8(2): 203-210. <https://doi.org/10.5028/jatm.v8i2.608>

## REFERENCES

[1] Kalyaev I.A., Gajduk A.R., Kapustyan S.G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppah robotov*. Moskva: OOO Izdatel'skaya firma «Fiziko-matematicheskaya literatura»; 2009. 280. (in Russian)

[2] Kalmurzaeva D.K., Baginova V.V. *Bespilotnye letayushchie apparaty kak instrument mikrologistiki novogo pokoleniya*. *European research*. 2017; 1(24): 12-14. (in Russian)

[3] Chen Y., Zhang G., Zhuang Y., Hu H. Autonomous Flight Control for Multi-Rotor UAVs Flying at Low Altitude. *IEEE Access*. 2019; 7: 42614-42625. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908205>

[4] Thanh H., Hong S. Quadcopter Robust Adaptive Second Order Sliding Mode Control Based on PID Sliding Surface. *IEEE Access*. 2018: 1-1.

[5] Mogili U., Deepak B. Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture. *Procedia Computer Science*. 2018; 133: 502-509. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.063>

[6] Dong T., Zhang Y., Xiao Q., Huang Y. The Control Method of Autonomous Flight Avoidance Barriers of UAVs in Confined Environments. *Sensors*. 2023; 23: 5896. <https://doi.org/10.3390/s23135896>

[7] Boucher P. Domesticating the Drone: The Demilitarisation of Unmanned Aircraft for Civil Markets. *Science and Engineering Ethics*. 2015; 21: 1393-1412. <https://doi.org/10.1007/s11948-014-9603-3>

[8] Xue R., Cai G. Formation Flight Control of Multi-UAV System with Communication Constraints. Journal of Aerospace Technology and Management. 2016; 8(2): 203-210. <https://doi.org/10.5028/jatm.v8i2.608>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Старов Дмитрий Владимирович**, старший преподаватель кафедры технологии материалов и промышленной инженерии, АГУ им. В.Н. Татищева, Астрахань, Россия  
ORCID: 0009-0002-0377-3044

**Dmitriy Starov**, Senior Lecturer, Department of Materials Technology and Industrial Engineering, Astrakhan State University named of V.N. Tatishcheva, Astrakhan, Russian Federation  
ORCID: 0009-0002-0377-3044

**Корякова Виктория Андреевна**, ассистент кафедры информационной безопасности, АГУ им. В.Н. Татищева, Астрахань, Россия  
ORCID: 0000-0002-2472-9248

**Victoria Koryakova**, assistant, Department of Information Security, Astrakhan State University named of V.N. Tatishcheva, Astrakhan, Russian Federation  
ORCID: 0000-0002-2472-9248

*Статья поступила в редакцию 17.02.2024; одобрена после рецензирования 06.03.2024; принята к публикации 07.03.2024.*

*The article was submitted 17.02.2024; approved after reviewing 06.03.2024; accepted for publication 07.03.2024.*