УДК 004.5
doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-3

СТАНДАРТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РОБОТОВ

Д. Е. Чикрин¹, К. Р. Смольникова², И. Г. Галиуллин³

^{1,2,3} Казанский федеральный университет, Казань, Россия
¹Dmitry.kfu@ya.ru, ²krsmolnikova@mail.ru, ³isgaluillin@email.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Коллаборативные роботы являются главным трендом в различных секторах промышленности, коботы позволяют трансформировать рабочие пространства и увеличивать производительность. Обеспечение безопасности при взаимодействии оператора и кобота является одним из ключевых вопросов при внедрении коботов в производство. *Материалы и методы.* Рассматриваются основные технические стандарты безопасности, регулирующие проектирование, установку и эксплуатацию коботов, такие как: ГОСТ Р 60.1.2.1-2016/ИСО 10218-1:2011; ГОСТ Р 60.1.2.3–2021/ISO/TS 15066:2016; ГОСТ Р 60.1.2.2–2016/ИСО 10218-2:2011. В основной части статьи анализируются ключевые аспекты безопасности коллаборативной робототехники, включая оценку рисков сценариев взаимодействия оператора и кобота в совместном рабочем пространстве; принципы проектирования безопасного рабочего пространства; технические средства обеспечения безопасности (датчики, системы аварийного останова, ограничение силы и скорости); методы валидации и верификации безопасности коботов. Анализируются технологические проблемы, которые определяет кобототехника, а также описываются возможные решения в целях оптимизации взаимодействия кобота и оператора в целом. *Результаты и выводы.* Соблюдение представленных рекомендаций позволит не только минимизировать риски, связанные с использованием коботов, но и раскрыть весь потенциал коллаборативной робототехники для создания эргономичных, безопасных и высокопроизводительных рабочих мест будущего.

Ключевые слова: коллаборативные роботы, безопасность, взаимодействие человека и робота

Финансирование: работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Для цитирования: Чикрин Д. Е., Смольникова К. Р., Галиуллин И. Г. Стандарты безопасности для коллаборативных роботов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 20–27. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-3

SAFETY STANDARDS FOR COLLABORATIVE ROBOTS

D.E. Chikrin¹, K.R. Smolnikova², I.G. Galiullin³

^{1,2,3} Kazan Federal University, Kazan, Russia
¹Dmitry.kfu@ya.ru, ²krsmolnikova@mail.ru, ³isgaluillin@email.com

Abstract. *Background.* Collaborative robots are a major trend in various industry sectors as cobots transform workspaces and increase productivity. Ensuring safety in operator-cobot interactions is one of the key issues when introducing cobots into manufacturing. *Materials and methods.* This article reviews the main technical safety standards governing the design, installation and operation of cobots, such as: ISO 10218-1:2011; ISO/TS 15066:2016; ISO 10218-2:2011. The main part of the article analyses key aspects of collaborative robotics safety, including: risk assessment of scenarios of operator-cobot interaction in a collaborative workspace; principles of safe workspace design; technical means of safety (sensors, emergency stop systems, force and speed limitation); methods of validation and verification of cobot safety. The paper also analyses technological problems that cobotics defines and describes possible solutions in order to optimise the interaction between cobots and the operator as a whole. *Results and conclusions.* Compliance with the presented recommendations will not only minimize the risks associated with the use of cobots, but also unlock the full potential of collaborative robotics to create economical, safe and high-performance workplaces of the future.

Keywords: collaborative robots, safety, human-robot interaction

Financing: the work was carried out at the expense of the Strategic Academic Leadership Program of the Kazan (Volga Region) Federal University (PRIORITY 2030).

For citation: Chikrin D.E., Smolnikova K.R., Galiullin I.G. Safety standards for collaborative robots. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):20–27. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-3

Введение

Коботы динамично внедряются на промышленных предприятиях, поскольку отличаются легкостью, компактностью, а также низкой стоимостью на фоне стоимости промышленных роботов. Производственные процессы требуют гибкости, эффективности, безопасности. При проектировании коботов безопасности уделяется особое внимание, так как коботы работают во взаимодействии с операторами, распределяя функции между собой в целях эффективного взаимодействия и повышения производительности.

Традиционные промышленные роботы имеют высокую значимость как эффективное дополнение к крупносерийным, высокоскоростным производствам. Так, например, станки ЧПУ непрерывно выполняют высокоточные задачи долгие годы, периодически останавливаясь на техобслуживание.

В свою очередь коботы сочетают в себе преимущества промышленных роботов одновременно с навыками и способностями людей, иными словами – комплекс умственного и физического труда. Однако поскольку коботы делят совместное рабочее пространство с операторами, требуются сложные инженерные решения для повышения производительности при одновременном обеспечении безопасности операторов при совместной работе.

Скорость, сила и точность остаются важными функциональными характеристиками кобота, но для наиболее эффективного использования преимуществ совместной работы оператору и роботу необходимо работать в должной согласованности. Одновременно с этим для обеспечения безопасной совместной работы принципиально важно осознание коботами, где находятся операторы, как двигаются, в том числе какую силу прикладывают при намеренном либо непреднамеренном физическом контакте во время совместной работы [1].

Коллаборативный робот предусматривает два вида остановок, каждая из которых имеет свои особенности. Защитная остановка предназначена для включения либо выключения во время совместной работы, в частности в сценариях контролируемой остановки с расчетной безопасностью и контроль скорости и разделения. В данных сценариях необходимо связать защитную остановку кобота с программой, управляющей захватом, для того, чтобы после остановки захват возобновил свое движение с той же скоростью, силой и положением, которые были заданы до остановки.

Аварийная остановка используется после потери питания, в частности в аварийных ситуациях. После такой остановки необходимо перезагрузить кобота, чтобы продолжить работу. Однако функция аварийной остановки представляет собой потенциально опасную ситуацию, так как возможна потеря деталей в захвате кобота. Поэтому необходимо питание захвата кобота также связывать с аварийной остановкой, т.е. внедрять функцию самоблокировки захвата.

Таким образом, ключевые задачи при проектировании коботов заключаются в следующем:

- 1) безопасное взаимодействие с операторами и осторожная работа со сборочным оборудованием;
- 2) скорость кобота во время работы должна быть совместимой с возможностями оператора;
- 3) компактные и легкие форм-факторы кобота.

Проектирование, установка и эксплуатация коллаборативных роботов: проблемы безопасности, оценка рисков, проектирование рабочего пространства, технические средства обеспечения безопасности, методы валидации и верификации, рекомендации

Ключевой фактор при разработке коллаборативных роботов, в отличие от промышленных, заключается в том, что оператор и робот делят одно и то же совместное рабочее пространство. Коботы специально проектируются для совместной работы с оператором для решения различных задач, которые невозможно полностью автоматизировать.

В соответствии с техническим стандартом промышленный робот – это автоматически управляемый, перепрограммируемый, многоцелевой манипулятор, программируемый по трем или более степеням подвижности, который может либо быть установлен стационарно на рабочем месте, либо может иметь возможность передвижения для использования в системах промышленной автоматизации¹.

¹ ГОСТ Р 60.1.2.1–2016/ИСО 10218-1:2011. Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Часть 1. Роботы.

Данная характеристика промышленного робота соответствует роботу, который проектируется для самостоятельной работы, т.е. без участия человека. Такие роботы выполняют задачи в соответствии с заданной программой без прямого взаимодействия с оператором в рабочем пространстве. В данном случае пользователи находятся на значительном расстоянии, а в целях исключения повреждений – роботы находятся в защищенных пространствах, которые ограждаются специальными защитными ограждениями. Внешние защитные устройства вызывают остановку промышленного робота, а в случае преднамеренного входа пользователем в зону работы робота для технического обслуживания или перепрограммирования робот отключается, а манипуляторы фиксируются в безопасном положении¹.

В случае с коботом производителю необходимо учитывать несколько ключевых факторов: непредсказуемость движений оператора, безопасное реагирование, не применение чрезмерной силы при намеренном либо непреднамеренном физическом контакте. Следовательно, в части должного уровня безопасности вышеперечисленные факторы усложняют задачу при разработке и производстве коботов, поскольку в отличие от промышленных роботов, системы безопасности в коботах обычно интегрированы в структуру и управляются системами кобота.

В настоящее время коботы проектируются в соответствии с техническим стандартом, в котором подчеркивается важность целостности системы управления, связанной с безопасностью, реализуемой системой управления, особенно в отношении контроля таких параметров технологического режима, как скорость и сила².

Также указанный стандарт описывает общую информацию, на которую необходимо ориентироваться разработчикам для безопасной организации совместной работы с коботами, например, информацию о необходимости и важности проведения оценки рисков. Так как никакая конструкция кобота не может считаться максимально безопасной, если кобот будет размахивать острым предметом с помощью манипулятора [2].

Необходимо уделять особе внимание не только конструкции кобота, но и окружающей среде, например, если совместное рабочее пространство заблокировано препятствиями, оператор может оказаться в зоне защемления и быть поврежден коботом. Именно поэтому ключевые разделы стандарта описывают требования к организации совместных рабочих пространств, проектированию совместной работы и переходов между коллаборативными и неколлаборативными операциями.

В частности, подробно описывается реализация следующих требований к совместной работе в целях соблюдения безопасности оператора и эффективного выполнения задач:

1. Контролируемая остановка с расчетной безопасностью.

Данный метод совместной работы подразумевает гарантированную остановку кобота без отключения питания прежде, чем оператор войдет в совместное рабочее пространство. В данном методе нет одновременной работы, кобот работает самостоятельно, когда оператор отсутствует в совместном рабочем пространстве, как только оператор входит в совместное рабочее пространство, например, для погрузки деталей в манипулятор, то в таком случае срабатывает контролируемая остановка с расчетной безопасностью и кобот останавливается.

Данный сценарий применяется в ситуациях, когда полное прекращение движения кобота не требуется, однако требуется обеспечить безопасность оператора при его приближении. Система безопасности кобота непрерывно отслеживает присутствие оператора в совместном рабочем пространстве, используя датчики (лазерные сканеры, системы машинного зрения, датчики приближения) [3].

Контролируемая остановка с расчетной безопасностью также в целях устранения различных опасностей и снижение рисков при проектировании рабочего пространства предусматривает специальные зоны безопасности, например, при обнаружении оператора в опасной близости кобот плавно снижает скорость и останавливается в заранее рассчитанной точке, обеспечивая безопасное расстояние до оператора. Движение кобота не возобновляется до тех пор, пока оператор не покинет опасную зону [4].

В настоящее время контролируемая остановка с расчетной безопасностью является устоявшейся технологией для промышленных роботов, использующая защитные ограждения для осуществления аварийной остановки, когда пользователь входит в зону работы робота.

¹ ГОСТ Р 60.1.2.2–2016/ИСО 10218-2:2011. Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Часть 2. Робототехнические системы и их интеграция.

² ГОСТ Р 60.1.2.3–2021/ISO/TS 15066:2016. Роботы и робототехнические устройства. Требования безопасности для роботов, работающих совместно с человеком.

Преимущество контролируемой остановки с расчетной безопасностью заключается в увеличении производительности, плавности движений и гибкости. В данном методе робот при каждом приближении оператора полностью не останавливается, остановка происходит плавно, а также имеется возможность гибко настраивать зоны безопасности и параметры остановки в зависимости от конкретной задачи и условий работы [5].

Вместе с тем необходимо отметить, что технические стандарты предъявляют требования к контролируемой остановке с расчетной безопасностью. Так, используемые датчики, системы управления и торможения, которые обнаруживают оператора в совместном рабочем пространстве, должны удовлетворять требованиям подраздела 5.12 и требованиям пункта 5.5.3. ИСО 10218-1:2011 [1]. Также требуется провести детальную оценку рисков для всех сценариев взаимодействия и настроить контролируемую остановку с расчетной безопасностью с учетом выявленных рисков.

Совместное рабочее пространство необходимо проектировать в соответствии с требованиями технического стандарта¹. Одновременно с этим система контролируемой остановки с расчетной безопасностью должна пройти процедуры валидации и верификации, чтобы подтвердить безопасность и надежность, в том числе все ли предсказуемые опасности были выявлены и корректирующие действия предприняты при оценке рисков².

2. Ручное управление.

Данный метод подразумевает совместную работу оператора и робота, однако перед началом совместной работы роботу необходимо перейти в состояние контролируемой остановки с расчетной безопасностью.

Во время совместной работы оператор находится в прямом контакте с манипулятором робота для передачи команд. Оператор непосредственно управляет движениями робота, физически перемещая манипулятор. В данном методе безопасность оператора зависит от следующих факторов:

2.1. Необходимо предусмотреть программное ограничение степеней подвижности и пространства с расчетной безопасностью, если у оператора ограничен диапазон перемещений робота.

2.2. Необходимо оснащение робота задающим устройством, обеспечивающим возможность активации аварийной остановки. Например, если оператор вошел в совместное рабочее пространство прежде, чем робот был подготовлен для выполнения задач в режиме ручного управления.

2.3. Необходимо оснащение робота деблокирующим устройством для возможности переключения между ручным управлением и неколлаборативной работой.

Метод ручного управления имеет несколько преимуществ, таких как интуитивность и простота, гибкость и адаптивность, упрощенные настройки. Метод ручного управления не требует сложного программирования, так как оператор обучает робота, управляя им по необходимой траектории. Такой сценарий идеально подходит для задач с переменными параметрами, где требуется неоднократная смена траектории или корректировка движений [6].

Впрочем, режим ручного управления имеет некоторые недостатки, в частности: низкая точность, опыт оператора, ограниченность применения и снижение производительности во время ручного управления. При использовании метода ручного управления требуется уделять особое внимание безопасности оператора, обеспечивая надежную обратную связь между оператором и роботом, в том числе внедряя системы аварийной остановки.

3. Контроль скорости и разделения.

Данный метод предусматривает коллаборативную работу, поскольку позволяет оператору и роботу одновременно перемещаться по рабочему совместному пространству посредством постоянного поддержания защитного расстояния.

В целях поддержания защитного расстояния в роботе необходимо предусмотреть функцию контролируемой скорости с расчетной безопасностью и функцию контролируемой остановки с расчетной безопасностью. Такие системы контроля скорости и разделения позволяют оператору работать «рука об руку» с роботом, а в случае близкого сближения – робот останавливается.

¹ ГОСТ ИСО 13855–2006. Безопасность оборудования. Расположение защитных устройств с учетом скоростей приближения частей тела человека.

² ГОСТ Р 60.1.2.2–2016/ИСО 10218-2:2011. Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Часть 2. Робототехнические системы и их интеграция.

Контроль скорости и разделения основан на принципе поддержания безопасного расстояния между оператором и роботом: чем ближе оператор, тем медленнее движется робот. В данном методе робот может работать с оптимальной скоростью, замедляясь только при приближении оператора, что позволяет достигнуть большей производительности по сравнению с методами, требующими полной остановки.

Контроль скорости и разделения требует точной и надежной системы отслеживания расстояния и скорости с использованием датчиков, камер и программного обеспечения. Эффективность данного метода может снижаться в условиях плохой видимости, при наличии препятствий или отражающих поверхностей в рабочей зоне. В том числе время реакции на приближение оператора должно быть минимальным в целях избежания столкновения [7].

4. Ограничение мощности и силы.

Данный метод предусматривает намеренный либо непреднамеренный физический контакт во время совместной работы.

В целях минимизации рисков необходимо эксплуатировать робота, который специально предназначен для этого типа работы. Тем не менее при проектировании роботов предусмотреть в совместной работе метод «ограничение мощности и силы» является одной из самых сложных задач.

Ограничение мощности и силы подразумевает, что робот спроектирован и настроен таким образом, чтобы сила и энергия, прилагаемые им при контакте с человеком, оставались ниже опасного для человека уровня [8].

Для совместной работы в данном сценарии принципиально необходимо ограничить мощность, силу и скорость, чтобы предотвратить травмы оператора. В приложении к техническому стандарту представлены рекомендации по определению пороговых значений таких параметров на основе данных о болевой чувствительности человека¹.

При проектировании робота, который не причинит вреда оператору, даже при ограничении мощности и силы требуется комплексный подход. Необходимо проведение тщательного анализа рисков, связанных с конкретными задачами и средой его работы, в том числе глубокое понимание порогов болевой чувствительности человека при различных типах контактов с учетом разных частей тела. Конструктивные решения по снижению рисков для предотвращения квазистатического и кратковременного контактов:

- 1) использование приводов с контролируемым крутящим моментом, ограничивающим силу, прилагаемую роботом;
- 2) внедрение механических ограничителей диапазона движения для предотвращения столкновения с высокой энергией;
- 3) использование мягких материалов, поглощающих энергию удара;
- 4) использование пружин или других элементов, смягчающих удар в случае столкновения;
- 5) использование конструкции робота без острых краев и углов с минимальной площадью поверхности, контактирующей с оператором.

Кроме того, необходимо тщательное тестирование робота в различных сценариях для проверки эффективности мер безопасности, а также подтверждение того, что остаточный риск после внедрения мер безопасности является приемлемым.

Заключение

Промышленный робот и робот имеют схожие задачи. Однако промышленные роботы, имея высокую производительность, сложны в настройке, а роботы, в свою очередь, имея более низкую производительность, доступны в простой настройке, поскольку для программирования робота не требуется дополнительный специально обученный персонал. Также промышленные роботы имеют ряд отличий, такие как:

- 1) не могут находиться в одном рабочем пространстве с пользователями;
- 2) сложность в программировании и настройке;
- 3) частая переналадка в случае частой смены выпускаемой продукции;
- 4) долгая окупаемость.

¹ ГОСТ Р 60.1.2.3–2021/ISO/TS 15066:2016. Роботы и робототехнические устройства. Требования безопасности для роботов, работающих совместно с человеком.

Внедрение роботов на производстве открывает широкие перспективы для повышения эффективности и безопасности операторов во время совместной работы. Однако успешная интеграция роботов требует комплексного подхода к вопросам безопасности, начиная с этапа проектирования и заканчивая эксплуатацией. Какие риски возникают при взаимодействии оператора и робота, как создать безопасную среду для совместного взаимодействия? Как убедиться в безопасности системы робот-оператор?

Понимание вышеперечисленных аспектов критически важно для успешного внедрения роботов на производство и создание безопасной и эффективной совместной работы оператора и робота.

Проектирование роботов в соответствии с техническими стандартами имеет решающее значение для обеспечения безопасности оператора, в том числе необходимо учитывать такие факторы, как расстояние между оператором и роботом, планирование траектории и скорость движения.

В данной статье были рассмотрены ключевые аспекты обеспечения безопасности при совместной работе с роботами, включая:

- 1) необходимость в оценке рисков на всех этапах жизненного цикла системы робота;
- 2) проектирование рабочего пространства с учетом специфики совместной работы оператора и робота;
- 3) применение технических средств обеспечения безопасности, таких как системы ограничения скорости и усилия, датчики приближения, системы машинного зрения;
- 4) внедрение надежных методов валидации и верификации для подтверждения соответствия системы требованиям безопасности.

Соблюдение представленных рекомендаций позволит не только минимизировать риски, связанные с использованием роботов, но и раскрыть весь потенциал коллаборативной робототехники для создания эргономичных, безопасных и высокопроизводительных рабочих мест будущего.

Нормативное регулирование в части безопасного взаимодействия оператора и робота должно развиваться и непрерывно совершенствоваться по мере развития технологий и соблюдать баланс интересов всех субъектов.

Список литературы

1. Review on Human–Robot Interaction During Collaboration in a Shared Workspace. URL: https://www.researchgate.net/publication/335113271_Review_on_Human-Robot_Interaction_During_Collaboration_in_a_Shared_Workspace (дата обращения: 08.05.2024).
2. When is a robot a cobot? Moving beyond manufacturing and arm-based cobot manipulators. URL: https://www.researchgate.net/publication/371694537_WHEN_IS_A_ROBOT_A_COBOT_MOVING_BEYOND_MANUFACTURING_AND_ARM-BASED_COBOT_MANIPULATORS (дата обращения: 08.05.2024).
3. A review of external sensors for human detection in a human robot collaborative environment. URL: https://www.researchgate.net/publication/379567349_A_review_of_external_sensors_for_human_detection_in_a_human_robot_collaborative_environment (дата обращения: 08.05.2024).
4. Fast and Safe Trajectory Planning: Solving the Cobot Performance/Safety Trade-Off in Human-Robot Shared Environments. URL: https://www.researchgate.net/publication/351303372_Fast_and_Safe_Trajectory_Planning_Solving_the_Cobot_PerformanceSafety_Trade-Off_in_Human-Robot_Shared_Environments (дата обращения: 08.05.2024).
5. Application of Dynamically Scaled Safety Zones Based on the ISO/TS 15066:2016 for Collaborative Robotics. URL: https://www.researchgate.net/publication/342008998_Application_of_Dynamically_Scaled_Safety_Zones_Based_on_the_ISOTS_150662016_for_Collaborative_Robotics (дата обращения: 08.05.2024).
6. Manual Control Approach to the Teaching of a Robot Task. URL: https://www.researchgate.net/publication/3114436_Manual_Control_Approach_to_the_Teaching_of_a_Robot_Task (дата обращения: 08.05.2024).
7. Optimization of the Speed & Separation Monitoring Protective Separation Distance in Human-Robot Collaboration Safety Systems. URL: https://www.researchgate.net/publication/369995431_Optimization_of_the_Speed_Separation_Monitoring_Protective_Separation_Distance_in_Human-Robot_Collaboration_Safety_Systems (дата обращения: 08.05.2024).
8. Power and force limiting on industrial robots for human-robot collaboration. URL: https://www.researchgate.net/publication/333510361_Power_and_force_limiting_on_industrial_robots_for_human-robot_collaboration (дата обращения: 08.05.2024).

References

1. *Review on Human–Robot Interaction During Collaboration in a Shared Workspace*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/335113271_Review_on_Human-Robot_Interaction_During_Collaboration_in_a_Shared_Workspace (accessed 08.05.2024).
2. *When is a robot a cobot? Moving beyond manufacturing and arm-based cobot manipulators*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/371694537_WHEN_IS_A_ROBOT_A_COBOT_MOVING_BEYOND_MANUFACTURING_AND_ARM-BASED_COBOT_MANIPULATORS (accessed 08.05.2024).
3. *A review of external sensors for human detection in a human robot collaborative environment*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/379567349_A_review_of_external_sensors_for_human_detection_in_a_human_robot_collaborative_environment (accessed 08.05.2024).
4. *Fast and Safe Trajectory Planning: Solving the Cobot Performance/Safety Trade-Off in Human-Robot Shared Environments*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/351303372_Fast_and_Safe_Trajectory_Planning_Solving_the_Cobot_PerformanceSafety_Trade-Off_in_Human-Robot_Shared_Environments (accessed 08.05.2024).
5. *Application of Dynamically Scaled Safety Zones Based on the ISO/TS 15066:2016 for Collaborative Robotics*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/342008998_Application_of_Dynamically_Scaled_Safety_Zones_Based_on_the_ISOTS_150662016_for_Collaborative_Robotics (accessed 08.05.2024).
6. *Manual Control Approach to the Teaching of a Robot Task*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/3114436_Manual_Control_Approach_to_the_Teaching_of_a_Robot_Task (accessed 08.05.2024).
7. *Optimization of the Speed & Separation Monitoring Protective Separation Distance in Human-Robot Collaboration Safety Systems*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/369995431_Optimization_of_the_Speed_Separation_Monitoring_Protective_Separation_Distance_in_Human-Robot_Collaboration_Safety_Systems (accessed 08.05.2024).
8. *Power and force limiting on industrial robots for human-robot collaboration*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/333510361_Power_and_force_limiting_on_industrial_robots_for_human-robot_collaboration (accessed 08.05.2024).

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Евгеньевич Чикрин

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры анализа данных
и технологий программирования,
директор Института вычислительной математики
и информационных технологий,
Казанский федеральный университет
(Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18)
E-mail: Dmitry.kfu@ya.ru

Dmitriy E. Chikrin

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of data analysis
and programming technologies,
director of the Institute of Computational Mathematics
and Information Technology,
Kazan Federal University
(18 Kremlevskaya street, Kazan, Russia)

Камилла Рустемовна Смольникова

аспирант,
Институт вычислительной математики
и информационных технологий,
Казанский федеральный университет
(Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18)
E-mail: krsmolnikova@mail.ru

Kamilla R. Smolnikova

Postgraduate student,
Institute of Computational Mathematics
and Information Technology,
Kazan Federal University
(18 Kremlevskaya street, Kazan, Russia)

Искандер Гаязович Галиуллин

соискатель,
Институт вычислительной математики
и информационных технологий,
Казанский федеральный университет
(Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18)
E-mail: isgaluillin@email.com

Iskander G. Galiullin

Applicant,
Institute of Computational Mathematics
and Information Technology,
Kazan Federal University
(18 Kremlevskaya street, Kazan, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 28.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 20.11.2024

Принята к публикации/Accepted 18.12.2024