

Научная статья
Статья в открытом доступе

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ГРУНТА РАБОЧИМ ОРГАНОМ ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА С ВЫДВИГАЮЩИМИСЯ СЕКЦИЯМИ

Любовь Александровна Сладкова^{1✉}, Даниил Евгеньевич Щепалин², Николай Николаевич Воронин³

^{1,2,3} Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

¹ rich.cat2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6786-0386>

² dany.shepalin2014@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-1447-4616>

³ profvnn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-1547-4217>

Аннотация

Задача интенсификации разработки грунта путем модернизации рабочих органов землеройных машин связана с изменениями углов резания, углов установки отвала. Усилия, развиваемые на рабочем оборудовании бульдозера, зависят от кинематики движения их подвижных элементов (штоков гидроцилиндров), так как в рассматриваемой конструкции отвала интенсификация разработки грунта достигается при изменении положений каждой из секций путем выдвигания секций гидроцилиндрами, что оказывает влияние на изменение развиваемых в них усилий.

Цель работы. Обоснование автоматизации рабочего процесса разработки грунта рабочим органом отвала бульдозера с выдвигающимися секциями.

Задача, решению которой посвящена статья. Рассмотрены автоматического изменения положений штоков гидроцилиндров при выполнении операций рабочим органом бульдозера с выдвигающимися секциями в зависимости от изменения углов резания и углов установки секции отвала в направлении движения машины.

Методы исследования базируются на основных положениях теории разработки грунта рабочими органами землеройных машин, системном анализе автоматизации рабочих процессов машин основного технологического назначения.

Новизна работы. Предложен вариант автоматизации рабочего процесса бульдозера с выдвигающимися секциями.

Результаты исследования. Суть исследования заключается в обосновании автоматизации процесса разработки грунта исходя из характера изменения параметров штоков гидроцилиндров, углов между ними для усовершенствованной конструкции отвала бульдозера при изменении углов резания, углов установки в направлении движения машины или при выдвигании секций при установленном положении отвала.

Выводы. Рассмотрена возможность развития автоматизации рабочего процесса разработки грунта рабочими органами землеройных машин в режиме копания, который является наиболее энергоемким, от него зависит производительность и эффективность работы техники при изменении положений рабочего органа относительно поверхности разрабатываемого грунта с учетом усилий разработки грунта, глубины резания, которая должна оставаться постоянной для установившегося режима работы машины.

Ключевые слова: отвал, выдвигающиеся секции, оборудование, автоматизация, процесс, грунт, разработка.

Благодарности: Авторы выражают искреннюю благодарность членам редакционной коллегии журнала, рецензентам.

Ссылка для цитирования:

Сладкова Л.А. Моделирование автоматизации рабочего процесса разработки грунта рабочим органом отвала бульдозера с выдвигающимися секциями / Л.А. Сладкова, Д.Е. Щепалин, Н.Н. Воронин // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 4. – С. 40 - 48. doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-40-48.

Original article
Open Access Article

MODELING OF THE OPERATION AUTOMATION OF SOIL DEVELOPMENT BY THE WORK MEMBER OF THE BULLDOZER BLADE WITH EXTENDABLE SECTIONS

Lyubov Aleksandrovna Sladkova^{1✉}, Daniil Evgenievich Shchepalin², Nikolay Nikolaevich Voronin³

^{1,2,3} Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation.

¹ rich.cat2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6786-0386>

² dany.shepalin2014@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-1447-4616>

³ profvnn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-1547-4217>

Abstract

The problem of intensifying soil development by modernizing work members of earthmoving machines is associated with changes in cutting angles and blade installation angles. The forces developed on the working equipment of a bulldozer depend on the kinematics of their moving elements (hydraulic cylinder rods), since in the considered blade design, the intensification of soil development is achieved by changing the positions of each section by extending sections with hydraulic cylinders, which affects the change in the forces developed in them.

The study objective is to justify operation automation of soil development by the work member of a bulldozer blade with extendable sections.

The problem that the paper is dedicated to. Automatic changes in the positions of hydraulic cylinder rods during operations by the work member of a bulldozer with extendable sections are considered, depending on changes in cutting angles and installation angles of the blade section in the direction of the machine movement.

The research methods are based on the basic principles of the theory of soil development by the work members of earthmoving machines, and on a sys-

tematic analysis of operation automation of machines for basic technological purposes.

The novelty of the work. An option for automating the operation of a bulldozer with extendable sections is proposed.

The study results. The study is aimed at substantiating the automation of the soil development based on the nature of changes in the parameters of the hydraulic cylinder rods, the angles between them for the improved design of the bulldozer blade when changing cutting angles, installation angles in the direction of the machine movement or when extending sections with a straight blade position.

Conclusions. The possibility of developing operation automation of soil development by the work members of earthmoving machines in the digging mode, which is the most energy-intensive, depends on the productivity and efficiency of the equipment when changing the positions of the work member relative to the surface of the developed soil, taking into account the efforts of soil development, cutting depth, which must remain constant for the steady operation of the machine.

Keywords: blade, extendable sections, equipment, automation, process, soil, development.

Acknowledgements: The authors acknowledge the members of the editorial board of the journal and the reviewers.

Reference for citing:

Sladkova LA, Shchepalin DE, Voronin NN. Modeling of the operation automation of soil development by the work member of the bulldozer blade with extendable sections. *Transport Engineering*. 2026;4:40-48. doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-40-48.

Введение

С развитием электроники и появлением на рынке средств электроники [1] возникло новое направление в машиностроении – беспилотные транспортные системы, которые постепенно занимают свою нишу среди наземных транспортно-технологических средств. Востребованность таких систем будет постоянно возрастать [2].

Отметим, что современные системы управления бульдозерами – это необходимость для повышения производительности в строительной отрасли. Благодаря автоматизации процесса, работа становится быстрее, точнее и безопаснее, что позволяет значительно снизить затраты и улучшить качество выполненных работ [3].

Обоснования проведения исследований

Автоматизация управления рабочими органами отвала, равно как и других рабочих органов землеройных машин связана со сложностью и специфичностью процессов разработки грунта из-за самих физико-механических свойств грунта. Поэтому, в настоящее время автоматизированы операции и рабочие процессы этих машин, которые в наибольшей мере определяют производительность труда и эффективность их использования, так как в системах автоматического управления процессом разработки грунта обычно используют дискретные электронные системы на основе полупроводниковых элементов, обеспечивающих надежность работы системы за

счет применения бесконтактных элементов. Поэтому автоматическое управление рабочим процессом землеройных машин нашло применение на автогрейдерах, выпущенных в последние годы.

Необходимость проведения исследований обусловлена возможностью автоматизации процесса разработки грунта при минимальных усилиях копания грунта. Определение закономерностей изменения длины штоков гидроцилиндров при выполнении работ выдвижными секциями отвала (рис. 1) является необходимым условием для обеспечения работы контроллеров, устанавливаемых на рабочем оборудовании.

Иерархия процесса разработки грунта рабочими органами землеройных машин

Процесс разработки грунта рабочими органами землеройных машин [4] показал, что связан с отделением грунта от массива посредством воздействия на него усилия, передаваемого от базовой машины. Другими словами, рабочий процесс транспортного средства основного технологического назначения, например, бульдозера, являющегося техникой циклического действия, состоит из операций копания грунта, транспортировки его к месту назначения, возвращения к месту работы с учетом технологических операций на разворот, переключение передач и т.п.

Предлагается рассмотреть работу машин основного технологического назначения, начиная от объекта воздействия рабочим органом рассматриваемой машины (грунт, поднимаемый или перемещаемый груз и т.п.). Развиваемые при этом усилия передаются на рабочее оборудование, состоящее из металлоконструкций (рис. 1) и приводных системам, состоящих из силовой установки и трансмиссии (механическая, гидравлическая, пневматическая, комбинированная). В свою очередь усилия с рабочего оборудования передаются на базовую машину, создающую тяговое усилие и, связанную непосредственно с объектом воздействия.

Используя предлагаемую схему, рассмотрим возможность процесса автомати-

зации разработки грунта рабочими органами землеройных машин в режиме копания грунта, который является наиболее энергоемким, от которого зависит производительность и эффективность работы техники. Положение рабочего органа относительно поверхности разрабатываемого грунта определяет глубину резания, изменение которой должно оставаться постоянной для установившегося режима работы машины. В противном случае произойдет изменение сопротивления грунта копанию, что может оказать негативное воздействие на энергодбаланс машины. В свою очередь, изменение усилий копания в процессе взаимодействия рабочего органа с грунтом передается на рабочее оборудование, усилия в котором зависят от кинематических характеристик, то есть от изменения скорости его выходного звена. Входным звеном здесь является поршни гидроцилиндров, а выходным – рабочий орган бульдозера (секция отвала). Автоматизация строительного производства - оснащение машин, технологических процессов и различной деятельности человека техническими средствами автоматизации и автоматизированными системами управления для высвобождения человека от непосредственного участия в строительном производстве (в технологическом процессе, в работе машин).

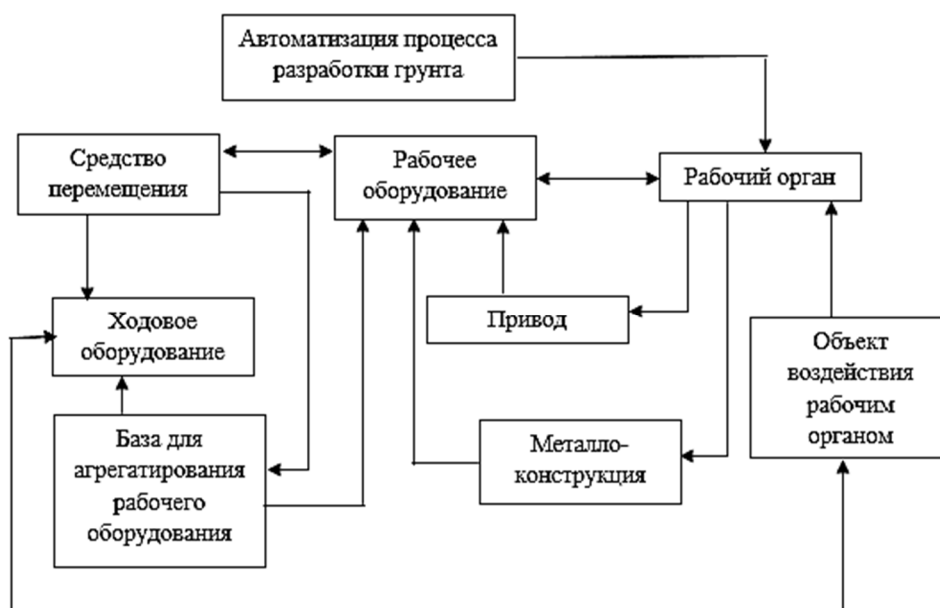


Рис.1. Схема рабочего процесса машин основного технологического назначения
 Fig. 1. Scheme of the working process of machines for the main technological purpose

Системы управления в машинах основного технологического назначения предназначены для включения и выключения различных механизмов машин, основными классификационными признаками которых являются:

- назначению (управление двигателем; управление муфтами и тормозами; рулевое управление; управление рабочим органом при подъеме-опускании отвала бульдозера, изменении угла установки или угла резания);

- принципу действия (гидравлические, пневматические и электрические).

При этом управляющие устройства могут быть снабжены системами следящего действия [5]. Исходя из этого, введен еще один классификационный признак по способу управления: с механизированным и с автоматизированным управлением. При этом автоматизированное управление и контроль рабочего процесса могут осуществляться на базе микропроцессорной техники. Применяются автоматизированное управление на расстоянии, автоматическое управление на базе микропроцессоров и мини-ЭВМ, а также роботизированные машины и комплексы.

Автоматизированное управление рабочим органом отвального типа с выдвигающимися секциями является задачей,

позволяющей снизить энергоемкость процесса разработки грунта и осуществить беспилотное управление этим процессом.

Первые попытки автоматизации рабочего процесса бульдозеров были сделаны в 70-е годы прошлого столетия и достаточно полно освещены в работе Б.Д. Кононыхина [6] на примере автономной системы автоматического управления рабочим органом бульдозера типа «Автоплан-10», состоящей из блоков управления и передатчиков контроля за всеми системами машины (углового положения отвала, числа оборотов двигателя, практически всех элементов гидропривода), которые установлены в кабине машиниста. Пульт управления служит для обеспечения дистанционного управления подъемом и опусканием отвала бульдозера. При работе бульдозера с автоматическим управлением на пульте управления задается необходимый угол наклона толкающего бруса, который соответствует положению режущей кромки ножа отвала относительно опорной поверхности гусениц.

Недостатком данной системы является обеспечение постоянной частоты вращения вала двигателя. При снижении частоты вращения вала двигателя, возникающей с увеличением усилий на отвале, механизм контроля системы отключает

автомат стабилизации, подавая сигнал на выглубление отвала.

Система «Копир-Автоплан», используемая в работе бульдозеров, позволяет контролировать положение рабочего органа по внешним жестким направляющим (трос, бордюр и т. п.) [6].

Система автоматического управления бульдозеров «Комбиплан 10ЛП» с лазерными приборами позволяет изменять и стабилизировать угловое положение отвала в продольной и поперечной плоскостях с помощью датчиков, установленных на отвале и раме машины, а также защищать двигатель от перегрузок.

В патенте RU2016172С1 [7] рекомендуется для автоматизации бульдозерных

агрегатов к тыльной части толкающего бруса бульдозерного агрегата шарнирно прикреплен сглаживающий следовой шуп, снабженный датчиком углового положения, включенный в схему сравнения системы автоматического управления отвалом, состоящую из мостового элемента сравнения, предварительного усилителя и усилителя мощности. Достоинством данного устройства является то, что оно позволяет отслеживать положение отвальной поверхности.

По утверждению разработчиков, система управления бульдозером *CHCNAV* строит и эффективность профилировочных работ.



Рис. 2. Бульдозер *CHCNAV TD63* с автоматизированной системой управления [8]

Fig. 2. CHCNAV TD63 Bulldozer with Automated Control System [8]

Высокоточная двух антенная ГНСС-система и инерциальный датчик, объединенные технологией *DO-Tech*, обеспечивают надежное 3D-позиционирование для определения положения отвала в режиме реального времени относительно проектной поверхности. Использование системы позволяет достичь требуемой точности за меньшее время, повышая эффективность и производительность путем устранения необходимости в постоянном контроле со стороны геодезиста.

Сенсорная панель с экраном в 10 дюймов позволяет отображать всю необходимую информацию на одном экране. Про-

граммное обеспечение *GradeNav TD63* предлагает простой, но в то же время мощный инструмент для выполнения всех задач точного профилирования. На экран выводится информация о проекте, информация по выемке/насыпи, проектная поверхность.

О перспективах автоматизации процесса копания грунта бульдозером выполнена работа [9].

Проведенный анализ позволил сделать вывод о неизбежности автоматизации процессов управления рабочим оборудованием бульдозера, продиктованного временем.

Предлагаемая система автоматизированного управления отвалом бульдозера показана на рис. 3.

В процессе работы гусеницы базовой машины встречаются с неровностями площадки, что ведет к изменению углов резания и установки отвала. При этом происходит изменение наклона элементов металлоконструкций толкающих брусьев, шарнирно соединенных с рамой базовой машины. Это изменение на толкающих брусьях происходит в горизонтальной и вертикальной плоскостях, затем передается на балку, расположенную перпендикулярно направлению движения машины и закрепленную неподвижно на толкающих брусьях. В свою очередь эти усилия пере-

распределяются между гидроцилиндрами управления выдвигными секциями отвала. Маятниковый датчик Д1, закрепленный на рабочем оборудовании (толкающих брусьях) посылает в блок управления электрические сигналы об изменении углов наклона толкающих брусьев. Преобразованные в электрический ток импульсы, направляются в гидропривод (например, золотник, обеспечивающий подачу рабочей жидкости гидросистемы в соответствующую полость рабочего гидроцилиндра), где также может быть установлен датчик Д2. При этом шток гидроцилиндра перемещается, устанавливая отвал бульдозера в заданное для работы положение.

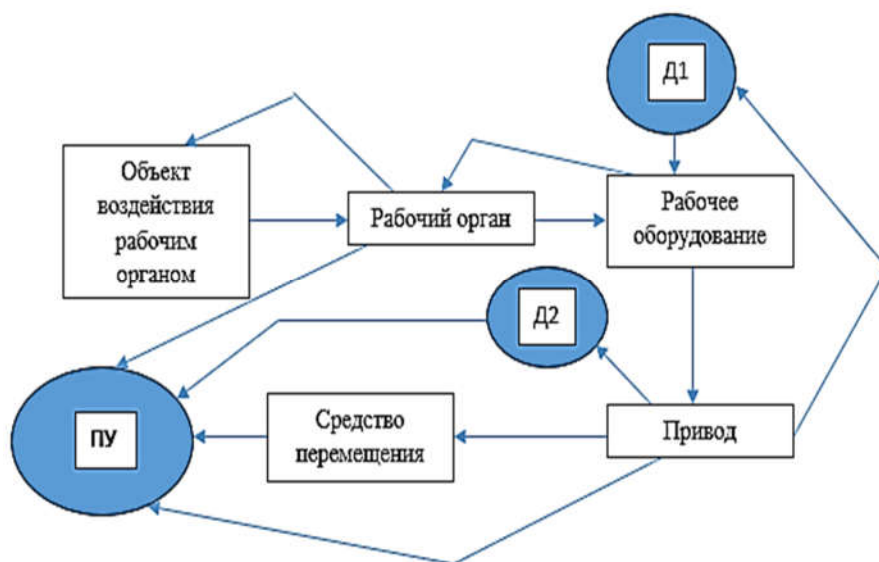


Рис. 3. Схема автоматизированной системы управления бульдозером
Fig. 3. Diagram of the automated bulldozer control system

Вопросы применения систем автоматизированного управления дорожно-строительными машинами для повышения эффективности работ на различных объектах строительства рассматриваются в статье автора [10], который рассматривает ее как технологическую систему САУ ДСМ. Предлагаемая система является ничем другим, как (*machine control*) или система управления техникой, представляющая собой программно-аппаратный комплекс, устанавливаемый на строительной технике для постоянного контроля текущего положения рабочего органа машины. Системы

управления могут быть установлены на различные дорожно-строительные машины: бульдозеры, грейдеры, экскаваторы, грунтовые и асфальтовые катки, дорожные фрезы, укладчики асфальта и бетона.

Задача оснащения транспортных средств основного технологического назначения системой автоматизации при условии дистанционного управления является на данном этапе более перспективной, в отличие от создания беспилотных систем, что продиктовано, во-первых, экономической целесообразностью в опреде-

лении стоимости рассматриваемых вариантов.

Во-первых, роботизированные системы отличаются сложностью их позиционирования в пространстве путем использования лидаров, радаров, которые имеют определенные недостатки, связанные с невозможностью, например, отличать твердое препятствие (камень, валун) от обычной картонной коробки, что неизбежно приведет к поломке рабочего оборудования. Также беспилотные системы должны обеспечиваться надежной компьютерной техникой, имеющей скоростные вычислительные качества.

В-третьих, с учетом рельефа местности, на котором используется бульдозерная техника, основное его назначение – работа с учетом рельефа, что требует постоянной оценки окружающей обстановки и мгновенной реакции со стороны системы управления. Например, при работе на неустойчивых или переувлажненных грунтах не исключена возможность проседания транспортного средства основного технологического назначения в грунт, выбраться из которой сам он не может.

В-четвертых, с учетом перебазировки с одного места на другое необходима корректировка маршрутной карты машины.

В-пятых сам процесс разработки грунта требует постоянного контроля оператора, связанный с самими физико-механическими свойствами грунта, влияющими на работу машины. Например, встреча отвалом непреодолимого препятствия, налипание грунта на поверхности рабочего органа, что не может предусмотреть роботизированная система управления. Далее, система роботизированного управления требует особой квалификации оператора, и не может быть использована водителем-машинистом без специальной подготовки. Для формирования рабочей карты необходима цифровизация рельефа местности и устойчивый беспроводной канал связи с трактором.

Из сказанного выше, очевидно, что оснащение наземных транспортно-технологических систем системой дистанционного управления является наиболее

эффективным решением, чем использование беспилотных машин.

Для реализации систем дистанционного управления лежит принцип передачи данных по радиоканалу с использованием радиомодемов, приемопередатчиков со стандартными помехоустойчивыми устройствами.

На сегодняшний день перспективными считаются беспроводные сети 5G, обеспечивающие высокую скорость приема данных. Одними из первых серийных тракторов, имеющих в качестве опции систему дистанционного управления, стали машины *Caterpillar* [11], объединяющий торговой маркой *Cat Command*. Управление бульдозером осуществляется как с помощью переносного пульта, так и с рабочего места оператора, оснащенного системой видеонаблюдения. На пульте дистанционного управления расположены джойстики управления движением, навесным оборудованием, кнопка глушения двигателя.

Ниже приведем некоторые виды систем автоматизации управления бульдозером:

- системы позиционирования и навигации (мультисигнатурные ГНСС-приёмники, работающие с сигналами *GPS*, *ГЛОНАСС*, *GALILEO* и *BEIDOU*. Две ГНСС-антенны позволяют системе отслеживать положение машины в пространстве и её курс в реальном времени с точностью до 2...3 см);

- системы автоматического управления отвалом, которые работают по загруженным 3D-моделям проектной поверхности. Алгоритмы машинного обучения анализируют текущий рельеф, сравнивают его с проектными данными и автоматически корректируют положение отвала для достижения заданных отметок;

- системы дистанционного управления. Обеспечивают удалённому оператору возможность полноценного управления машиной с помощью беспроводной передачи команд от пульта управления к приёмному устройству, установленному на машине.

Выводы

Предложен вариант автоматизации рабочего процесса бульдозера с выдвигающимися секциями, базирующийся на основных положениях теории разработки грунта рабочими органами землеройных машин, системном анализе автоматизации рабочих процессов машин основного технологического назначения. Используя предлагаемую схему, рассмотрена возможность процесса автоматизации рабочего процесса разработки грунта рабочими органами землеройных машин в режиме копания грунта, который является

наиболее энергоемким, от которого зависит производительность и эффективность работы техники при изменении положений рабочего органа относительно поверхности разрабатываемого грунта с учетом усилий разработки грунта, глубины резания, которая должна оставаться постоянной для установившегося режима работы машины. Востребованным решением при организации беспроводного управления могут быть сети 5G, обеспечивающие высокую скорость и объем передачи информации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Национальный стандарт Российской Федерации "ГОСТ Р ИСО 8373- 2014. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения" от 26 ноября 2014г. № 1863-ст. – Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2015. 19 с.
2. Щипцов М.А. Общие тенденции развития систем дистанционного управления промышленным трактором (бульдозером) //МАИР. 2022. №9. С. 88-92.
3. Системы инновации / URL: <https://uckadru.ru/sovremennii-sistemi-upravleniya-buldozerom-povishenie-effektivnosti-raboti>.
4. Ветров Ю.А., Баладинский В.Л. «Машины для земляных работ» учебное пособие для ВУЗов-Киев: Вища школа. Головное изд., 1980. 192 стр.
5. Автоматизация бульдозеров / URL: <https://studfile.net/preview/1864862>.
6. Кононыхин, Б. Д. Лазерные системы управления машинами дорожного строительства / Б.

- Д. Кононыхин. М. : Машиностроение, 1990. 304 с.
7. Пат. RU2016172C1 Российская Федерация. Лазерная система автоматического управления бульдозеров. / Б.Д. Кононыхин, В.П. Еремин, В.И. Кулешов, А.А. Парой, О.А. Волгарев. Патентообладатель: Войсковая часть 12093; заявл. № 4944060, 07.06.1991; опубл. 15.07.1994.
8. 3D-система управления бульдозером. системы управления строительной техникой / URL: https://td63_ds_rus_2022 .
9. Асмолов С.Г. Автоматизация процесса копания грунта бульдозером / Дисс. канд. техн. наук по специальности 05.13.06. Москва, 2004. 139 с.
10. Гулин В.Н. Цифровые модели для систем управления дорожно-строительными машинами // САПР и ГИС автомобильных дорог | №1(4), 2015. С. 56-59.
11. COMMAND // Cat.com URL: https://www.cat.com/en_US/products/new/technology/command.html.

REFERENCES

1. GOST R ISO 8373- 2014. Robots and robotic devices. Vocabulary. Moscow: Standartinform; 2015.
2. Shchiptsov MA. General trends in the development of remote control systems for industrial tractors (bulldozers). *Mechatronics, Automation and Robotics*. 2022;9:88-92.
3. Innovation systems [Internet]. Available from: <https://uckadru.ru/sovremennii-sistemi-upravleniya-buldozerom-povishenie-effektivnosti-raboti>.
4. Vetrov YuA, Baladinsky VL. Machines for earthworks: textbook for universities. Kiev: Vishcha Shkola; 1980.

5. Automation of bulldozers [Internet]. Available from: <https://studfile.net/preview/1864862>.
6. Kononykhin BD. Laser control systems for road construction machines. Moscow: Mashinostroenie; 1990.
7. Kononykhin BD, Eremin VP, Kuleshov VI, Paroy AA, Volgarev OA. Laser automatic control system for bulldozers. RF Patent RU2016172C1. 15 Jul 1994.
8. 3D bulldozer control system. Construction machinery management systems [Internet]. Available from: https://td63_ds_rus_2022.
9. Asmolov SG. Automation of the soil digging process with a [dissertation]. [Moscow (RF)]; 2004.

10. Gulin VN. Digital models for control systems of road-building machines. CAD and GIS for Roads. | 2015;1(4):56-59.

11. COMMAND [Internet]. Available from: https://www.cat.com/en_US/products/new/technology/command.html.

Информация об авторах:

Сладкова Любовь Александровна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», тел.+7(964789-56-63.

Щепалин Даниил Евгеньевич – аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», тел.+7(920) 622-18-43.

Sladkova Lyubov Aleksandrovna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Ground Transportation and Technological Facilities, Russian University of Transport, phone: +7(965) 377-93-89.

Shchepalin Daniil Evgenievich – Postgraduate Student of the Department of Ground Transport and Tech-

Воронин Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и ремонт подвижного состава», тел.+7(903) 118-15-47.

nological Facilities, Russian University of Transport, phone: +7(920) 622-18-43.

Voronin Nikolay Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Repair of Rolling Stock, phone: +7(903) 118-15-47.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

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

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 17.10.2025; одобрена после рецензирования 11.03.2026; принята к публикации 27.03.2026. Рецензент – Петрешин Д.И., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 17.10.2025; approved after review on 11.03.2026; accepted for publication on 27.03.2026. The reviewer is Petreshin D.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.