

УДК 004.9; 631.372 JEL Q16; C63

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

СИМУЛЯТОР ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ТРЁХЗВЕННОЙ УБОРКИ С БУНКЕРАМИ-ПЕРЕГРУЗЧИКАМИ

Гончаров Роман Дмитриевич
канд. технич. наук, доцент
<https://orcid.org/0009-0005-9717-4764>
professor6666@gmail.com
ФГБОУ ВО Вавиловский университет, Саратов, Саратовская область

Статья посвящена особенностям и перспективам симулятора виртуальной реальности трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками. Цель исследования – охарактеризовать разработанный симулятор виртуальной реальности, оценить его функциональные преимущества и оптимизационные эффекты. Актуальность разработки симулятора виртуальной реальности трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками обусловлена растущей ролью задач автоматизации и повышения эффективности сельскохозяйственных процессов при уборке урожая зерновых. Рассматривается способ трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками и отмечаются возможности его совершенствования посредством применения симулятора виртуальной реальности. Выявляются преимущества обучения, автоматизации, вариативности сценариев и возможности передачи реальных ощущений оператору для повышения подготовленности к синхронной параллельной работе на специальной сельскохозяйственной технике. Представлено разработанное решение на базе движка Unity, функционально упрощающего подготовку операторов к выполнению сложного способа уборки зерновых с использованием трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками. Симулятор виртуальной реальности оснащен функциями передвижения, наблюдения за процессами «со стороны», работы в кабине от первого лица, посадки, а также многопользовательского сетевого взаимодействия. Уточнены общие способы применения симулятора и продемонстрированы отдельные функции, которые выполняются в виртуальной среде. Выявлены причины, актуализирующие необходимость массового перехода на трёхзвенную уборку с бункерами-перегрузчиками. Таким образом, представленный симулятор виртуальной реальности трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками рассматривается в качестве способа преодоления

UDC 004.9; 631.372 JEL Q16; C63

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

VIRTUAL REALITY SIMULATOR FOR THREE-LINK HARVESTING WITH GRAIN OVERLOAD CARTS

Goncharov Roman Dmitrievich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
<https://orcid.org/0009-0005-9717-4764>
professor6666@gmail.com
Vavilovsky University, Saratov, Saratov region

This article explores the features and prospects of a virtual reality (VR) simulator for three-link grain harvesting with the use of grain overload carts. The aim of the study is to characterize the developed VR simulator, evaluate its functional advantages, and assess its optimization potential. The relevance of creating a VR simulator for three-link harvesting lies in the growing importance of automation and efficiency in agricultural processes during grain harvesting. The paper examines the structure of the three-link harvesting system and highlights opportunities for its enhancement through the use of virtual simulation. Advantages of the simulator include immersive training, automation, scenario variability, and the transfer of realistic sensations to the operator, improving preparedness for synchronized parallel work with specialized agricultural machinery. The developed solution, based on the Unity engine, functionally simplifies the training process for operators preparing to work with the complex grain harvesting system involving overload carts. The VR simulator includes movement functionality, third-person process observation, first-person in-cabin interaction, boarding mechanics, and multiplayer networked cooperation. General use cases of the simulator are defined, and specific in-simulator functions are demonstrated. The paper also identifies key factors that emphasize the need for a wider transition to the three-link grain harvesting system. Thus, the presented VR simulator is considered as a tool for overcoming the challenges of operator training and for promoting a more efficient "on-the-go" grain harvesting method

проблем подготовки специалистов и
популяризации более эффективного способа
уборки урожая «на ходу»

Ключевые слова: ВИРТУАЛЬНАЯ
РЕАЛЬНОСТЬ, ВИРТУАЛЬНЫЙ СИМУЛЯТОР
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОПЕРАЦИЙ,
ТРЕХЗВЕННАЯ СИСТЕМА УБОРКИ УРОЖАЯ,
БУНКЕР-ПЕРЕГРУЗЧИК ЗЕРНА,
ИММЕРСИВНОЕ ОБУЧЕНИЕ ОПЕРАТОРОВ
СЕЛЬХОЗТЕХНИКИ, АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПРОЦЕССОВ УБОРКИ ЗЕРНОВЫХ,
ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ
УБОРКИ

Keywords: VIRTUAL REALITY, VIRTUAL
SIMULATOR OF AGRICULTURAL
OPERATIONS, THREE-LINK GRAIN
HARVESTING SYSTEM, GRAIN OVERLOAD
CART, IMMERSIVE TRAINING OF
AGRICULTURAL MACHINERY OPERATORS,
AUTOMATION OF GRAIN HARVESTING
PROCESSES, IMPROVING ECONOMIC
EFFICIENCY OF MECHANIZED HARVESTING

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-209-013>

Введение.

Активная цифровизация сельского хозяйства определяет растущее значение и интерес к внедрению ведущих цифровых технологий, позволяющих осуществлять управление процессами и совершенствовать работу сельскохозяйственных организаций. В частности, все больший интерес представляют идеи оптимизации, которая достигается посредством использования новых решений как непосредственно для перестройки основной работы, так и поддержки работников, что позволяет вносить существенные изменения и увеличивать эффективность сельского хозяйства. При сборе урожая – зерновых культур, указанные процессы также сохраняют свое значение; как отмечается в работе Г.Г. Маслова и В.Т. Ткаченко, преимущественная доля операций в поле производится механизированным образом, что закономерно определяет необходимость совершенствования процессов сбора урожая с использованием специальной техники. В качестве одной из составляющих совершенствования авторы видят переход от традиционных способов сбора урожая к новым, основанным на исключении простоев, а также внедрении дополнительных единиц техники, которые позволяют собирать зерновые с меньшими потерями как самого урожая, так и времени, прочих ресурсов [1]. Аналогичные тезисы прослеживаются и в работе А.А.

<http://ej.kubagro.ru/2025/05/pdf/13.pdf>

Васильева, С.В. Ковалева и С.Ю. Серкова, которыми выделяется перспективность использования технологий выгрузки зерна на ходу для повышения производительности и совершенствования процессов сбора урожая. Признается, что основу повышения эффективности составляет использование усовершенствованной техники или преодоление адресных проблем, которые возникают на участках при сборе урожая [2]. При этом внедрение специальной техники и её эксплуатация не могут происходить случайным образом, о чем свидетельствует исследование А.А. Попова и И.В. Бумабара. Авторы выделяют факт того, что число транспортных средств и порядок их работы при сборе зерна нуждаются в оптимизации, которая позволит обеспечить экономическую целесообразность и слаженность работы специальной техники [3]. Таким образом, задачи использования трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками приобретают особую актуальность по причине их влияния на производительность и качество сельскохозяйственных процессов, связанных со сбором урожая зерновых культур; вместе с тем, открытыми остаются вопросы совершенствования трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками, в чем особый потенциал видится в использовании современных возможностей, предоставляемых цифровыми технологиями.

Актуальность исследования симулятора виртуальной реальности трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками определяется тем, что моделирование и симуляции становятся все более распространенными в современном сельском хозяйстве. Симуляции и модели активно применяются в проектировании сельскохозяйственной техники, в обучении операторов машин, а также прогнозировании и моделировании копий реальных процессов (двойников) в целях поиска оптимальных способов реализации производственных сценариев. Применение трёхзвенной системы уборки урожая предполагает задействование трех единиц сельскохозяйственной техники – зерноуборочных комбайнов,

бункеров-перегрузчиков и автозерновозов, спланированная, отлаженная и координированная работа которых позволяет повысить эффективность и производительность сбора урожая. Именно здесь проявляются преимущества симулятора виртуальной реальности, который позволяет воспроизводить сложные механизированные операции в виртуальном пространстве. Вместе с тем вопросы применения таких симуляторов, их перспективы и целесообразность разработки и внедрения решения до сих пор не были освещены в отечественной научной литературе применительно к трёхзвенной уборке с бункерами-перегрузчиками, что определяет не только теоретическую, но и научно-практическую значимость заявленной проблематики исследования.

Цель исследования – охарактеризовать особенности и перспективы симулятора виртуальной реальности трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками.

Материалы и методы.

Исследование основано на открытых материалах – преимущественно задействовались публикационные источники, а именно научные статьи российских и зарубежных ученых, в которых раскрывались отдельные вопросы, проблемы или особенности совершенствования процессов в сельском хозяйстве с использованием симуляторов виртуальной реальности. На основании анализа и систематизации литературы были уточнены теоретические аспекты симулятора виртуальной реальности трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками, которые впоследствии позволили раскрыть особенности решения и принципы его действия. Также источником материалов послужили данные, предоставленные компанией Liliani (Лиляни) – производителем сельскохозяйственной техники для агрологистики. Методическую основу исследования составили методы библиографического описания, сравнительного и обобщающего анализа.

Результаты.

Как было отмечено нами ранее, ключевой предпосылкой разработки симулятора виртуальной реальности трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками выступила необходимость совершенствования и оптимизации сельскохозяйственных процессов, которые происходят при сборе урожая зерновых культур.

На текущем этапе сельскохозяйственные организации во всем мире постепенно переходят на автоматизированные решения, применяют последовательные, параллельные или гибридные машины, которые позволяют собирать урожай. Как отмечается в работе A. Zahedi, A.M. Shafei и M. Shamsi, ключевым обоснованием использования специальной техники становится повышение скорости сбора урожая, снижение возникающих потерь, а также замещение человеческого труда машинами для обеспечения большей автономии. На примере использования гибридных роботов авторы показывают целесообразность их применения для повышения точности, скорости работы, а также снижения затрат на сбор урожая [4]. В работе Z. Zhang, C. Igathinathane, J. Li, H. Cen, Y. Lu, P. Flores приводятся аналогичные тезисы, однако справедливо замечается, что использование машин для улучшения сельскохозяйственных процессов – это результат подготовки оптимальных решений; на примере сбора яблок с использованием механизации авторы показывают нежизнеспособность многих существующих способов сбора урожая (как с функционально-качественной, так и с экономической точки зрения) [5].

Основываясь на приведенных исследованиях, заметим, что поиск оптимального решения и способа применения специальной техники остается задачей актуальной, которая не может осуществляться стихийно. При этом основу совершенствования в соответствии с позицией Н.В. Бышова и соавторов составляет интеллектуализация машин, т.к. такой подход позволяет улучшить эксплуатацию сельскохозяйственной техники

и обеспечить прирост производительности, комфорта и безопасности [6]. Вместе с тем, Г.Г. Маслова и С.А. Малышева считают, что производимые оптимизации должны иметь не частный, а именно многоуровневый характер. При сборе урожая, как справедливо отмечают авторы, необходимо формировать систему оптимизации, в которой обосновывается несколько компонент: метод уборки урожая, способы транспортировки зерна, его очистки и т. д. Оценка в таком случае проводится как для каждого элемента оптимизации, так и в ракурсе их совместного действия [7]. На практике согласовать указанные оценки и процессы оказывается затруднительным; поэтому переход на новые способы сбора урожая целесообразно производить с принятием во внимание возможностей оптимизации применяемых решений средствами симуляций и виртуальной реальности.

Использование симуляторов и виртуальной реальности в сельском хозяйстве – направление, активная разработка которого ведется с 2018 года и продолжается по сей день. А.С. Дорохова, Д.Ю. Палкина, С.С. Юрочки отмечают, что перспективы использования симуляторов и виртуальной реальности достаточно многосторонни – позволяют создавать точные копии физических объектов и имитировать их работу (технология цифровых двойников). Цифровые двойники используются для создания имитационной среды в целях отказа от апробации решений в реальных условиях, что на перспективу позволяет быстрее, проще и экономически эффективнее проводить испытания и выбирать оптимальные вариации исполнения процессов [8]. Помимо представленного, потенциал симуляторов виртуальной реальности в сельском хозяйстве достаточно обширен при проведении обучения. В работе M. Pagnussat, T. Nauge, E.S. Lopes, R.M.M. de Almeida, A. Naldony выявляется, что симуляторы виртуальной реальности позволяют совершенствовать и ускоренно развивать навыки операторов; однако к таким симуляторам предъявляются

закономерные требования – важно не предоставление схожего или идентичного визуального представления объекта и рабочей среды, сколько полное соответствие «ловкости», координации, синхронности и пространственной точности. Особенно важными данные критерии называются при создании симуляторов для управления огромной тяжеловесной техникой [9]. Аналогичные выводы приводятся и в работе С. Meusel и соавторов, которыми отмечается необходимость поддержки обучения с использованием валидных симуляторов, в полной мере отражающих поведение машины в реальных условиях [10]. Причем обучение может быть организовано как для отдельных пространств – кабин машин, ситуаций в поле (и т. д.), так и при работе с полной виртуальной реконструкцией, точно повторяющей сцены из сельского хозяйства. Последние описываются в работе Y. Chen, B. Zhang, J. Zhou, K. Wang с точки зрения организации работы в режиме реального времени, когда виртуальный симулятор (виртуальной реальности) отражает реальную сцену в 3D-исполнении оператору. Оператор, в свою очередь, работает со сценой, управляет машиной от первого лица и выполняет необходимые действия. Потенциал таких систем, основанных на симуляторах виртуальной реальности, раскрывается авторами также с позиции обучения операторов, проведения удаленной диагностики, обхода опасных участков, автоматизации трудоемких операций и др. [11].

На примере организации трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками, отметим, что применение симуляторов виртуальной реальности обеспечивает улучшение процессов подготовки, планирования и, в конечном счете, непосредственной организации трёхзвенной уборки. Сам процесс трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками представляется в виде схемы уборки, в ходе которой бункер-перегрузчик, выполняет роль «буфера» между уборочной техникой и транспортом. Тем самым обеспечивается бесперебойная работа комбайнов и оптимизация

логистики; система работает по принципам непрерывного намола зерна комбайнами и его забора бункером-перегрузчиком «на ходу», что исключает остановку техники. Затем бункер выезжает на край поля и в течение 5 минут передаёт зерно в автозерновоз; последний, в свою очередь, осуществляет доставку урожая к точке хранения [12]. Схематически процесс трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками в виртуальной среде отражен на рис. 1:

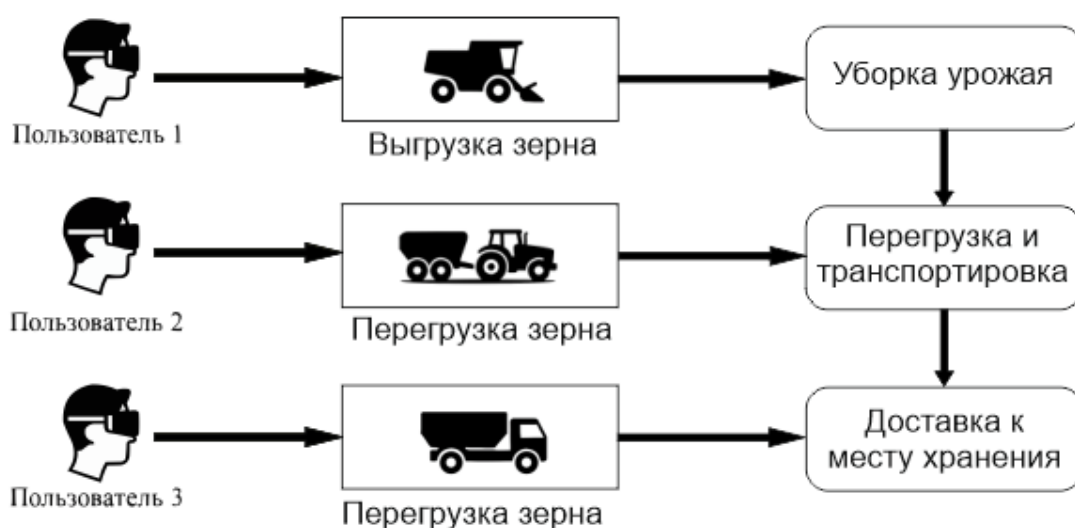


Рисунок 1 – Процесс трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками в виртуальной среде

Опираясь на рис. 1, отметим, что в симуляторе виртуальной реальности реализована возможность многопользовательского взаимодействия, в рамках которого каждый участник выполняет отдельную роль в процессе трёхзвенной уборки урожая. Пользователь 1 управляет зерноуборочным комбайном и осуществляет непосредственный сбор зерновых культур с поля. Пользователь 2 управляет трактором с прицепленным бункером-перегрузчиком и выполняет задачу промежуточной приемки и транспортировки зерна от комбайна. Пользователь 3, в свою очередь, управляет автозерновозом и завершает цикл – вывозит собранное зерно к месту хранения и возвращает его на

поле. Таким образом, основу составляет синхронная многопользовательская симуляция, которая обеспечивает готовность к слаженному выполнению операций.

Так, сформированное решение (симулятор виртуальной реальности трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками) предназначено для обучения будущих операторов выполнению трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками в полевых условиях. Симулятор функционирует на основе технологий виртуальной реальности и реализован на базе Unity. Примеры из виртуальной среды представлены на рис. 2-4:



Рисунок 2 – Вид комбайна от лица оператора при обучении в симуляторе

Например, как показано на рис. 2, при изучении процесса трёхзвенной уборки с выгрузкой зерна в бункер-перегрузчик у оператора появляется возможность наблюдения со стороны. Также в симуляторе реализована возможность передвижения (рис. 3), что осуществляется посредством интерфейса виртуальной реальности, для чего в реальной жизни используются специальные контроллеры. Визуализирована техника,

которая задействуется в процессе трёхзвенной уборки урожая, при этом особое внимание уделено её детализации.



Рисунок 3 – Передвижение оператора в виртуальной среде

Аналогично, имеется функционал посадки в необходимый транспорт (рис. 4); причем обучение происходит в групповой форме по 3 человека в режиме совместной деятельности, т.е. каждый может управлять собственной единицей техники и координировать действия относительно других участников трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками.



Рисунок 4 – Функционал посадки в транспортное средство в виртуальной среде

В реальной среде для управления техникой и обеспечения полного погружения используется шлем виртуальной реальности и упомянутые ранее контроллеры (рис. 5):



Рисунок 5 – Процесс обучения операторов сельскохозяйственной техники трёхзвенной уборке с выгрузкой зерна в бункер-перегрузчик

Также стоит подчеркнуть, что в процессе разработки симулятора виртуальной реальности особое внимание уделено визуальной точности, т.е. соответствию симуляционных моделей реальным, в целях чего они моделируются с учетом реальных чертежей, схем, вида из кабины и т. д.; помимо визуальной составляющей, важной частью эффективного симулятора является достоверная демонстрация работы самой сельскохозяйственной техники и «перенос» реальных ощущений от управления ею в виртуальную среду.

Актуальность обучения трёхзвенной уборке с выгрузкой зерна в бункер-перегрузчик определена тем, что данный способ уборки зерна отличается повышенной производительностью – весь цикл уборки улучшается до 20%, при этом снижается потребность в использовании

множества транспортных средств [13]. Тем не менее, до сих пор подобная схема уборки зерна не реализуется повсеместно, как минимум, по причине сложности. Поэтому разработанное решение рассматривается в качестве альтернативного способа популяризации и обеспечения готовности операторов сельскохозяйственной техники к применению трёхзвенной уборки с выгрузкой зерна в бункер-перегрузчик. Здесь также стоит отметить, что во многих странах Европейского Союза бункер-перегрузчик – это обязательный участник уборочного процесса, т.к. выезд тяжелой техники в поле чреват ухудшению плодородия почвы (из-за повышенного уплотнения почвенного слоя, снижения воздухо- и водопроницаемости, ухудшения условий для роста корневой системы растений и, как следствие, снижения урожайности на последующие сезоны).

Обсуждения.

Итак, основываясь на приведенном обзоре литературы, а также представленном решении, потенциал и обоснованность разработки виртуального симулятора, основанного на технологии виртуальной реальности, определяется возможностью его использования для воспроизводства сложных механизированных операций и выполнения поставленных задач в имитируемых условиях, которые практически идентичны реальным. Относительно выполнения в полевых испытаниях очевидными функциональными преимуществами подобного подхода становятся:

- во-первых, крайне высокая вариативность возможных сценариев применения и работы со специальной сельскохозяйственной техникой, машинами и оборудованием, в том числе при осуществлении трёхзвенной уборки урожая зерновых с бункерами-перегрузчиками;
- во-вторых, возможность задавать контролируемые приближенные к естественным условиям использования машины обстоятельства –

погодную среду, работу на полях определенной формы, количественные характеристики и т. д.;

- в-третьих, исключение рисков и угроз здоровью оператора машины в процессе обучения и освоения техники, новых способов сбора урожая;

- в-четвертых, оптимизация затрат времени и финансов при исполнении процессов, исключение дорогостоящего обучения в реальных условиях и его замещение на полностью альтернативное симуляционное;

- в-пятых, обеспечение удобного инструмента обучения и экспериментирования, фактически отличающегося эффективностью, крайне высокой степенью автоматизации, возможностями рационализации.

Соответственно, потенциал симулятора виртуальной реальности трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками определяется его перспективностью при проведении научных исследований, при оптимизации маршрутов и графиков движения, а также в ходе тренировки операторов. Основным условием достижения указанных эффектов стоит признать соответствие техническим требованиям, т.к. сам симулятор и создаваемая виртуальная реальность должны отличаться высокой реалистичностью, иммерсивностью (погружением), а также обязательной передачей реальных «ощущений» конечному пользователю. Также важно учитывать и запросы сельскохозяйственной организации, которая испытывает потребность в оценке экономических эффектов, оптимизационных возможностей и функциональных отличий. По данным производителя, использование технологии трёхзвенной уборки урожая с применением бункеров-перегрузчиков в целом позволяет сократить парк зерновозов вдвое, ускорить темпы уборки зерна до 40%, а также обеспечить окупаемость вложений за один сезон [12]. Причем разработанное решение соответствует современным идеям и представлениям о процессах трёхзвенной уборки с выгрузкой зерна в

бункер-перегрузчик – выгрузка на ходу признается «желательной» во время сбора урожая, однако не может быть реализована в отсутствие высокой квалификации оператора; сам процесс – изнурительный поскольку оператор комбайна должен выполнять несколько задач одновременно [14]. При этом поиск наиболее оптимального способа организации трёхзвенной уборки с выгрузкой зерна в бункер-перегрузчик остается вопросом открытым и строится по принципам математического моделирования сценариев работы; также интересны идеи автоматизации трёхзвенной уборки [15], которые представляют перспективы для дальнейших исследований.

Заключение.

Таким образом, проведенное исследование доказывает перспективность и преимущества использования симулятора виртуальной реальности трёхзвенной уборки с бункерами-перегрузчиками в целях обучения операторов сельскохозяйственной техники. Разработанное решение, представленное в виде симулятора виртуальной реальности на движке Unity, обеспечивает подготовку высококвалифицированных специалистов к изнурительному и достаточно сложному труду в полностью имитируемых условиях, что позволяет повысить экономическую эффективность, рационализировать и в целом обеспечить совершенство подготовки операторов к дальнейшему выполнению задач в полевых условиях. При этом возможным видится использование подобного симулятора при найме сотрудников в сельскохозяйственную организацию, а также в ходе апробации разных сценариев осуществления уборки зерновых с привлечением реальных операторов машин, что позволит принимать наиболее оптимальные решения. В дальнейшем особый интерес представляют расширение функционала разработанного симулятора виртуальной реальности и его апробация.

Список использованных источников

1. Маслов Г.Г., Ткаченко В.Т. Проблемы повышения качества механизированных работ // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 107. С. 318–332.
2. Васильев А.А., Ковалев С.В., Серков С.Ю. Безостановочная уборка зерновых культур // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2020. № 1 (37). С. 116–122.
3. Попов А.А., Бумбар И.В. Определение оптимального числа транспортных средств в уборочно-транспортном комплексе // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. № 3 (59). С. 99–105. <https://doi.org/10.24412/1999-6837-2021-3-99-105>
4. Zahedi A., Shafei A.M., Shamsi M. Application of hybrid robotic systems in crop harvesting: Kinematic and dynamic analysis // Computers and Electronics in Agriculture. 2023. Vol. 209. 107724. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107724>
5. Zhang Z., Igathinathane C., Li J., Cen H., Lu Y., Flores P. Technology progress in mechanical harvest of fresh market apples // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 175. 105606. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105606>
6. Бышов Н.В., Борычев С.Н., Успенский И.А., Юхин И.А., Кокорев Г.Д., Костенко М.Ю., Рембалович Г.К., Колотов А.С., Колупаев С.В. Особенности применения современного тракторного транспорта в технологических процессах по возделыванию сельскохозяйственных культур // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 126. С. 180–198.
7. Маслов Г.Г., Малышев С.А. Многоуровневый системный подход к комплексной оптимизации процессов уборки, транспортировки и очистки зерна // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 124. С. 1123–1146.
8. Дорохов А.С., Павкин Д.Ю., Юрочка С.С. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения // Агроинженерия. 2023. Т. 25. № 4. С. 14–25. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-14-25>
9. Pagnussat M.B., Hauge T., Lopes E.S., de Almeida R.M.M., Naldony A. Bimanual motor skill in recruitment of forest harvest machine operators // Croatian Journal of Forest Engineering. 2020. Vol. 41. № 1. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.623>
10. Meusel C., Grimm C., Starkey J., Gilbert S.B., Gilmore B., Luecke G., Kieu D., Hunt T. The importance of operator knowledge in evaluating virtual reality cue fidelity // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 160. P. 179–187. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.026>
11. Chen Y., Zhang B., Zhou J., Wang K. Real-time 3D unstructured environment reconstruction utilizing VR and Kinect-based immersive teleoperation for agricultural field robots // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 175. 105579. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105579>
12. Трѣхзвенная уборка урожая с бункерами-перегрузчиками // Liliani.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://liliani.ru/technologies/trehzvennaya-uborka-s-ispolzovaniem-bunkerov-peregruzchikov/> (дата обращения: 28.03.2025).

13. Уборка без простоев. Приживется ли в России технология выгрузки зерна на ходу// Agroinvestor.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://www.agroinvestor.ru/technologies/article/24757-uborka-bez-prostoev/> (дата обращения: 04.04.2025).

14. Liu Z., Dhamankar S., Evans J.T., Allen C.M., Jiang C., Shaver G.M., Etienne A., Vyn T.J., Puryk C.M., McDonald B.M. Development and experimental validation of a system for agricultural grain unloading-on-the-go // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 198. 107005. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107005>

15. Liu Z., Dhamankar S., Evans J.T., Allen C.M., Jiang C., Shaver G.M., Etienne A., Vyn T.J., Puryk C.M., McDonald B.M. Automation of Agricultural Grain Unloading-on-the-go // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, Issue 24. P. 248–253. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.292>

References

1. Maslov G.G., Tkachenko V.T. Problemy povysheniya kachestva mehanizirovannyh rabot // Politematicheskij setевой jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2015. № 107. S. 318–332.

2. Vasil'ev A.A., Kovalev S.V., Serkov S.Ju. Bezostanovochnaja uborka zernovyh kul'tur // Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020. № 1 (37). S. 116–122.

3. Popov A.A., Bumbar I.V. Opredelenie optimal'nogo chisla transportnyh sredstv v uborochno-transportnom komplekse // Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik. 2021. № 3 (59). S. 99–105. <https://doi.org/10.24412/1999-6837-2021-3-99-105>

4. Zahedi A., Shafei A.M., Shamsi M. Application of hybrid robotic systems in crop harvesting: Kinematic and dynamic analysis // Computers and Electronics in Agriculture. 2023. Vol. 209. 107724. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107724>

5. Zhang Z., Igathinathane C., Li J., Cen H., Lu Y., Flores P. Technology progress in mechanical harvest of fresh market apples // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 175. 105606. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105606>

6. Byshov N.V., Borychev S.N., Uspenskij I.A., Juhin I.A., Kokorev G.D., Kostenko M.Ju., Rembalovich G.K., Kolotov A.S., Kolupaev S.V. Osobennosti primeneniya sovremennogo traktornogo transporta v tehnologicheskikh processah po vozdeystviyu sel'skohozjajstvennyh kul'tur // Politematicheskij setевой jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017. № 126. S. 180–198.

7. Maslov G.G., Malyshev S.A. Mnogourovnevnyj sistemnyj podhod k kompleksnoj optimizacii processov uborki, transportirovki i ochistki zerna // Politematicheskij setевой jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016. № 124. S. 1123–1146.

8. Dorohov A.S., Pavkin D.Ju., Jurochka S.S. Tehnologija cifrovyyh dvoynikov v sel'skom hozjajstve: perspektivy primeneniya // Agrozhennerija. 2023. T. 25. № 4. S. 14–25. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-14-25>

9. Pagnussat M.B., Hauge T., Lopes E.S., de Almeida R.M.M., Naldony A. Bimanual motor skill in recruitment of forest harvest machine operators // Croatian Journal of Forest Engineering. 2020. Vol. 41. № 1. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.623>

10. Meusel C., Grimm C., Starkey J., Gilbert S.B., Gilmore B., Luecke G., Kieu D., Hunt T. The importance of operator knowledge in evaluating virtual reality cue fidelity // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 160. P. 179–187. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.026>
11. Chen Y., Zhang B., Zhou J., Wang K. Real-time 3D unstructured environment reconstruction utilizing VR and Kinect-based immersive teleoperation for agricultural field robots // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 175. 105579. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105579>
12. Trjohzvennaja uborka urozhaja s bunkerami-peregruzchikami // Liliani.ru [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://liliani.ru/technologies/trehzvennaya-uborka-s-ispolzovaniem-bunkerov-peregruzchikov/> (data obrashhenija: 28.03.2025).
13. Uborka bez prostoev. Prizhivetsja li v Rossii tehnologija vygruzki zerna na hodu// Agroinvestor.ru [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://www.agroinvestor.ru/technologies/article/24757-uborka-bez-prostoev/> (data obrashhenija: 04.04.2025).
14. Liu Z., Dhamankar S., Evans J.T., Allen C.M., Jiang C., Shaver G.M., Etienne A., Vyn T.J., Puryk C.M., McDonald B.M. Development and experimental validation of a system for agricultural grain unloading-on-the-go // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 198. 107005. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107005>
15. Liu Z., Dhamankar S., Evans J.T., Allen C.M., Jiang C., Shaver G.M., Etienne A., Vyn T.J., Puryk C.M., McDonald B.M. Automation of Agricultural Grain Unloading-on-the-go // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, Issue 24. P. 248–253. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.292>