
ЭКОНОМИКА

**Проектирование цифрового двойника Тимирязевской сыроварни
с использованием технологии виртуальной реальности**

**Анастасия Валентиновна Бабкина[✉], Василий Владимирович Торопцев,
Александр Николаевич Мартеха, Ольга Сергеевна Пучкова**

Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

[✉]Автор, ответственный за переписку: babkina@rgau-msha.ru

Аннотация

Технология цифрового двойника в агропромышленном комплексе на сегодняшний день недостаточно распространена. Поэтому внедрение адекватной модели цифрового двойника позволит уменьшить затраты на проектирование производственных линий, а также выявить уязвимые места, которые могут возникнуть в процессе производства. Таким образом, целью научных исследований являлась разработка методики создания цифрового двойника линии по производству сыров на основе технологии виртуальной реальности. В соответствии с поставленной целью была предложена методика по проектированию линии с использованием технологии виртуальной реальности, представленная в виде трехступенчатой стратегии: распределение ролей для пользователей виртуальной реальности; распределение задач; проектирование системы (проектирование 3D-моделей оборудования, импорт модели, создание сцены, тестирование системы). Описаны объект исследований, имеющееся оборудование и используемое программное обеспечение. Представлены этапы 3D-моделирования, заключающиеся в создании геометрической модели, текстуры и 3D-визуализации. Отображены параметры, которые можно настроить за счет встроенных в платформу виртуальной реальности методов редактирования. На стадии создания сцены представлены задачи взаимодействия, которые выполняются во время обзора виртуальной реальности: «Смотреть и ходить», «Прикасаться и телепортироваться», «Захват», а также три дополнительные специфические функции: «Виртуальное меню», «Обучение с помощью озвучивания», «Анимация производственного процесса». Для оценки предлагаемого подхода проведено анкетирование пользователей, которое доказало необходимость применения цифрового двойника, созданного на основе технологии виртуальной реальности для проектирования линии по производству сыров. По результатам проведенных исследований были сделаны выводы, а также предложены дальнейшие направления развития.

Ключевые слова

Цифровой двойник, Индустрия 4.0, агропромышленный комплекс, виртуальная реальность, бизнес-процессы, 3D-моделирование

Благодарности

Проект выполнен в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (соглашение № 075–15–2024–198 от 8 марта 2024 г.).

Для цитирования

Бабкина А.В., Торопцев В.В., Мартеха А.Н., Пучкова О.С. Проектирование цифрового двойника Тимирязевской сыроварни с использованием технологии виртуальной реальности // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 6. С. 209–220.

**Designing a digital twin of the Timiryazev Cheese Dairy
using virtual reality technology**

**Anastasia V. Babkina[✉], Vasily V. Toroptsev,
Alexander N. Martekha, Olga S. Puchkova**

Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

[✉]**Corresponding author:** babkina@rgau-msha.ru

Abstract

Digital twin technology is currently underutilized in the agro-industrial sector. Therefore, implementing an adequate digital twin model will enable a reduction in production line design costs and facilitate the identification of potential vulnerabilities that may arise during the manufacturing process. Consequently, the aim of this research is to develop a methodology for creating a digital twin of a cheese production line based on virtual reality technology. In alignment with the stated goal, the paper proposes a methodology for designing the production line using virtual reality technology, presented as a three-stage strategy: allocation of roles for virtual reality users, task assignment, and system design. The system design stage encompasses 3D equipment model design, model import, scene creation, and system testing. The object of the study, existing equipment, and utilized software are described. The stages of 3D modeling are presented, involving the creation of a geometric model, texture application, and 3D visualization. Parameters adjustable through the virtual reality platform's integrated editing methods are outlined. During the scene creation stage, interaction tasks performed during the virtual reality walkthrough are presented: “look and walk”, “touch and teleport”, and “grab”. Furthermore, three additional specific functions are introduced: “virtual menu”, “voice-over training”, and “production process animation”. To evaluate the proposed approach, a user survey was conducted, which confirmed the necessity of applying a digital twin, developed using virtual reality technology, for the design of cheese production lines. Conclusions were drawn from the conducted research, and further directions for development are proposed.

Keywords

Digital twin, Industry 4.0, agro-industrial sector, virtual reality, business processes, 3D modeling

Acknowledgments

This research was conducted within the framework of the Strategic Academic Leadership Program “Priority 2030” (agreement No. 075–15–2024–198 dated March 08, 2024).

For citation

Babkina A.V., Toroptsev V.V., Martekha A.N., Puchkova O.S. Designing a digital twin of the Timiryazev Cheese Dairy using virtual reality technology. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 6. P. 209–220.

Введение

Introduction

Современная эпоха Индустрии 4.0 стимулирует создание «фабрик будущего», где физические объекты и цифровые технологии неразрывно связаны между собой для достижения поставленных целей: улучшения качества и производства новых видов продукции, изменения упаковки для быстрой адаптации к рыночным требованиям

в условиях растущей конкуренции. Это обеспечивает ускоренный вывод готовой продукции на рынок и гарантирует ее соответствие критериям качества. В решении этих сложных задач ключевую роль играют интегрированные производственные системы – совокупность машин и механизмов, специализированных для преобразования сырья в конечную продукцию с повышенной добавленной стоимостью [1]. Такие системы должны обеспечивать тесное взаимодействие физического и цифрового мира, демонстрируя при этом высокую производительность и экономическую эффективность с учетом ресурсоемкости (времени, пространства) и затрат на организационном уровне. Сложность данных систем обусловлена их многоуровневой структурой, гибкой конфигурацией, трудностями в эксплуатации и управлении, а также наличием множественных компонентов с разнообразными функциями, взаимосвязями и зависимостями [2]. Решить представленные проблемы можно за счет применения инновационного подхода – концепции цифрового двойника, базирующегося на технологии виртуальной реальности. Этот метод позволит осуществить полное моделирование и проверку производственной линии с помощью 3D-визуализации, комплексную валидацию всех компонентов системы, существенно сократить временные и материальные затраты на производство готовой продукции.

В последние годы наблюдается бурное развитие использования цифровых двойников на основе технологии виртуальной реальности (VR) для оптимизации производственных процессов [3, 4]. Данный подход позволяет пользователям полностью погружаться в искусственно созданные среды и манипулировать объектами так, будто они существуют в реальном мире. Широкое применение VR-технологии отмечается в автомобилестроении, биоинженерии, строительстве, пищевой промышленности [5, 6]. Особенно актуальными являются следующие направления исследования: обучение персонала, где VR обеспечивает интерактивное погружение в производственный процесс; техническое обслуживание, позволяющее проводить виртуальные тренировки без риска для оборудования; проектирование новых производственных линий, когда изменения в VR требуют меньших материальных затрат по сравнению с корректировками в реальной среде.

Внедрением технологии цифровых двойников в сельское хозяйство активно занимаются ученые и компании во всем мире. Например, компания Delaval представила цифровую систему для оценки состояния здоровья молочного скота, а греческая компания BeeZon разработала цифровой двойник пасеки, позволяющий отслеживать влияние климатических изменений на пчеловодство. Компания из Словении Narpha-Sea создала цифровой двойник урожая оливок, основанный на оптической технологии. Крупнейший американский производитель потребительской упаковки Aptar Group использует виртуальную реальность для обучения персонала решению задач производственного процесса – таким, как сборка, оптимизация рабочих зон и выявление потенциальных опасностей. В свою очередь, американская компания Northrop Grumman, специализирующаяся на производстве аэрокосмического и оборонного оборудования, применила виртуальное моделирование для разработки новых изделий, что позволило ускорить производственный процесс и уменьшить расходы на производство [7].

Таким образом, применение цифрового двойника с использованием технологии виртуальной реальности радикально трансформирует подходы к проектированию и управлению сложными производственными системами. Однако существуют барьеры, препятствующие внедрению VR-технологий в производственный процесс: нехватка высококвалифицированных ИТ-специалистов, а также отсутствие адекватных стандартов и процедур применения виртуальной реальности в пищевой промышленности.

Цель исследований: разработка цифрового двойника линии по переработке молочного сырья с использованием технологии виртуальной реальности.

Методика исследований Research method

Для оптимизации процесса разработки и внедрения виртуальной реальности в производственный процесс необходимо применить трехступенчатую стратегию проектирования, которая включает в себя:

1. Распределение ролей для пользователей виртуальной реальности, как внутренних, так и внешних специалистов.
2. Распределение задач с целью создания точного и функционального цифрового двойника (табл.).
3. Реализацию трех этапов проектирования системы: создание 3D-моделей оборудования и интеграция их в программную среду виртуальной реальности; создание виртуальной сцены – разработка окружения, учитывающего все необходимые элементы и условия для взаимодействия пользователей; тестирование программного продукта с целью возможности погружения и активного использования двойника для обучения, проектирования или контроля производственных процессов [8, 9].

Таблица

**Специалисты, участвующие в проектировании цифрового двойника
с использованием технологии виртуальной реальности**
(составлено авторами)

Table

Specialists involved in designing the digital twin using virtual reality technology
[compiled by the authors]

Роль	Задачи
Эксперт в области компетенций	Управление персоналом, определение целей в качестве руководителя отдела
Руководитель проекта	Управление ресурсами, временем, затратами, необходимыми для завершения проекта
Инженер-проектировщик	Принятие всех технических решений, обеспечение безопасного и эффективного выполнения работ
Менеджер по продажам	Подготовка и доработка коммерческих предложений о приобретении проекта
Технический эксперт	Координация работ проектировщиков с технической стороны проекта
Дизайнеры	Разработка 3D-моделей оборудования, отладка их представления в виртуальной реальности
Специалист по виртуальной реальности	Проектирование виртуальной среды с взаимодействием объектов, анимацией в соответствии с поставленными целями
Руководитель сборочного производства	Устранение неполадок при сборке проекта на этапе проектирования

На этапе проектирования САД-моделей необходимо решить следующие задачи: спроектировать 3D-модели и экспортировать данные модели в требуемый формат (STL, FBX, OBJ).

Далее переходим к созданию виртуальной сцены, которая включает в себя: настройку параметров модели виртуальной среды; импортирование САД-моделей в виртуальную среду; настройку цвета, текстуры и свойств материалов, а также их освещение; настройку кинематической анимации; назначение объектов взаимодействия и установление их взаимосвязей с контроллером.

После создания цифрового двойника проводим его тестирование: подготавливаем помещение и устройство для сеанса виртуальной реальности; выполняем VR-анализ проекта; выявляем возможные проблемы дизайна; анализируем результаты обзора виртуальной реальности.

В качестве объекта исследований была выбрана Тимирязевская сыроварня, которая занимает 3 помещения общей площадью в 95 м² и имеет следующее оборудование: котел для пастеризации; ванна для подогрева молока; сыроварня (пастеризатор); стол дренажный; стол для формирования сыра; весы; стеллажи (2 шт.); рефрижераторы (4 шт.); мойка двухсекционная; мойка трехсекционная; стол технологический; пресс пневматический; упаковщик сыра.

Для реализации проекта по проектированию цифрового двойника сыроварни с использованием технологии виртуальной реальности использовалось следующее программное обеспечение:

- 3D-моделирование – КОМПАС-3D;
- платформа виртуальной реальности – Unity3D.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Создание трехмерных моделей – процесс, который выполняется с помощью специального программного обеспечения [10]. Он нашел широкое применение в киноиндустрии, при разработке компьютерных игр, архитектурном проектировании, в инженерном деле и сфере здравоохранения. Следует отметить, что 3D-моделирование – это не только визуальное представление объектов, но и учет всех технических требований к деталям включая характеристики материалов и их поведение в среде виртуальной реальности.

В результате реализации проекта было спроектировано 15 моделей оборудования сыроварни: ванна для подогрева молока, сыроварня (пастеризатор) на 120 л, стол дренажный, стол для формирования сыра, весы, стеллажи (2 шт.), рефрижератор, мойка двухсекционная, мойка трехсекционная, стол технологический, пресс пневматический, упаковщик сыра, лира вертикальная, лира горизонтальная. Пример 3D-моделей пресса пневматического и сыроварни представлен на рисунке 1.

Разработанные модели были экспортированы в двух форматах (FBX и OBJ). Формат FBX использовался для САД-моделей с анимацией, поскольку он сохраняет конфигурацию компонентов при наличии различных изменений объектов в процессе сеансов виртуальной реальности. Формат OBJ имеет относительно небольшие размеры файлов благодаря использованию двоичного кодирования, что положительно сказывается на скорости работы разрабатываемой системы [11].

При импорте моделей в среду виртуальной реальности потребовалась ручная настройка всех основных геометрических параметров (материалы, размер, положение, анимация, свет и камера) за счет встроенных в настройки платформы методов редактирования [12].

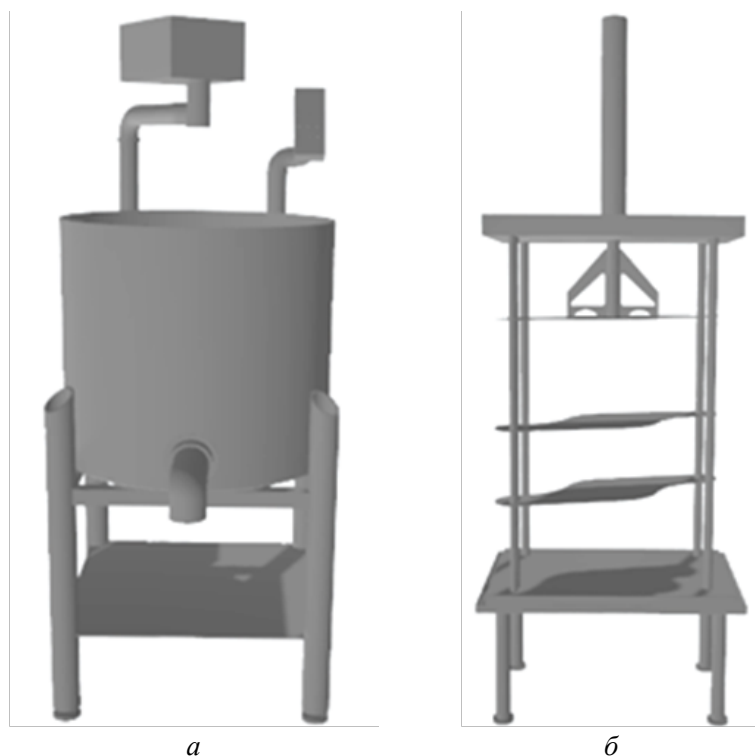


Рис. 1. Примеры 3D-моделей оборудования для Тимирязевской сыроварни (составлено авторами): а – сыроварня 120 л; б – пресс пневматический

Figure 1. Examples of 3D equipment models for the Timiryazev Cheese Dairy [compiled by the authors]: a – 120 L cheese dairy; b – pneumatic press

На первом этапе проектирования сцены цифрового двойника необходимо было сосредоточиться на передаче реалистичных ощущений, установив текстуру, материал, цвет и освещение в соответствии со спецификациями дизайна сыроварни. Необходимые материалы были размещены вручную по месту требования с помощью библиотек. В основном использовались отражающие металлические материалы (сталь, алюминий, медь и цинк) для оборудования, различные виды плитки для стен и пола, бетон для потолка, стекло для окон. На рисунке 2 представлен пример реализации сцены с материалами, тенями и искусственным освещением.

Далее специалист по виртуальной реальности определил основные взаимодействия: «Смотреть и ходить», «Прикасаться и телепортироваться», «Захват». С учетом сложности производственной линии особое внимание было уделено команде «Захват», которая позволяет пользователю воспринимать взаимосвязь с окружающей средой так, как если бы она была реальной. Взаимодействие захвата было основано на зоне столкновения, созданной на объекте. Как только контроллер входит в зону коллайдера, инструмент виртуальной реальности меняет свой цвет, что является знаком для осуществления команды «Захват». Все детали были сгруппированы таким образом, что ими можно манипулировать как единым объектом для упрощения физического моделирования и создания требуемых кинематических анимаций.

Также в виртуальную сцену включены 3 дополнительных специфических взаимодействия: виртуальное меню (рис. 3); обучение с помощью озвучивания; анимация производственного процесса.



Рис. 2. Реализация материалов, теней и искусственного освещения в VR-сцене сыроварни (составлено авторами)

Figure 2. Implementation of materials, shadows and artificial lighting in the VR scene of the cheese dairy [compiled by the authors]

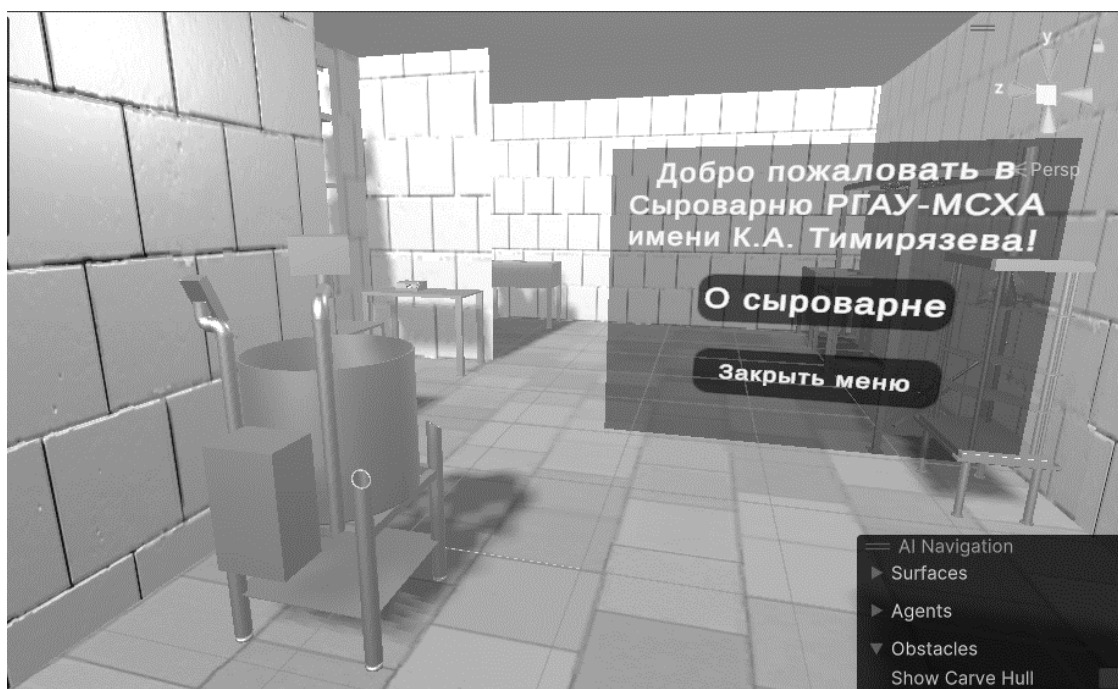


Рис. 3. Реализация функции виртуального меню в VR-сцене сыроварни (составлено авторами)

Figure 3. Implementation of the virtual menu function in the VR scene of the cheese dairy [compiled by the authors]

При запуске сеанса виртуальной реальности пользователь попадает в сыроварню, где на первом плане представлено виртуальное меню, благодаря которому он может познакомиться с историей создания сыроварни, а также закрыть главное меню и продолжить знакомство с производственным процессом.

Все оборудование, участвующее в цикле производства сыров, оснащено голосовым сопровождением, которое позволяет пользователю узнать о специфике оборудования и его роли в производственном процессе. Для реализации данной функции предварительно были записаны аудиофайлы в формате MP3 и импортированы в среду виртуальной реальности. Для воспроизведения файла необходимо объекту добавить компонент AudioManager, а также записать скрипт для событий, которые могут вызывать воспроизведение файла, описание логики и остановку воспроизведения.

Погрузить пользователя в процесс производства сыров позволяет функция анимации, которая была осуществлена с учетом физических законов: формы, размера и особенностей пастеризатора; скорости и распределения частиц жидкости с использованием различных цветов и прозрачности.

Полный функционал цифрового двойника линии по производству сыров представлен в работе [13].

После завершения VR-сцены нужно провести виртуальный обзор. Сначала необходимо подготовить помещение, предназначенное для сеансов виртуальной реальности, с большим пространством без препятствий (столы, стулья) для безопасности пользователя. Далее специалист по виртуальной реальности настраивает устройство виртуальной реальности. В нашем случае использовалось PICO 4 Ultra – автономное устройство, которое может запускать проекты в беспроводном режиме под управлением операционной системы Android. В нем используются внутренний датчик и камера на передней панели гарнитуры, благодаря чему можно определить границы зоны для сеанса. В сеансах виртуальной реальности участвовали около 25 чел. Средний возраст участников составил 35 лет и варьировал от 25 до 45 лет. Согласно результатам опроса участники выразили полное одобрение влияния виртуальной реальности на взаимодействие работников сыроварни. Подобное согласие наблюдалось и в отношении способности виртуальной реальности обнаруживать эргономические, логические и дизайнерские недочеты в процессе оценки проекта с использованием VR-оборудования. Более того, 75% респондентов отметили простоту взаимодействия с элементами системы в виртуальном пространстве, удобство использования устройства и понятность пользовательского интерфейса. В то же время большинство опрошенных не подтвердили головокружения после использования гарнитуры и ощущения дискомфорта при работе с виртуальной реальностью. Подробно с результатами анкетирования можно ознакомиться в работе [14].

Таким образом, опрос продемонстрировал, что технология виртуальной реальности является важным дополнением в процессе разработки новых продуктов, позволяет находить и эффективно решать проблемы, которые могут возникнуть в существующих производственных линиях. Следовательно, использование цифровых двойников в сельском хозяйстве и перерабатывающей промышленности может значительно улучшить работу организаций, снижая затраты и повышая надежность производственной системы благодаря применению методов численного и системного моделирования.

Развитие цифровой экономики стимулирует внедрение цифровых бизнес-моделей, создавая условия для конкуренции, основанной на технических принципах и смарт-индустрии. Внедрение информационно-коммуникационных и передовых производственных технологий, соответствующих принципам Индустрии 4.0, устраняет необходимость длительных и затратных физических испытаний при реализации проектов, обеспечивает быструю перестройку объектов в соответствии с новыми

требованиями, сокращает количество расчетных ошибок, в том числе связанных с человеческим фактором, и позволяет увеличить долю отечественного производства, сохраняя при этом высокотехнологические, эксплуатационные и другие параметры [15].

Выводы

Conclusions

Проектирование сложных производственных систем для агропромышленного комплекса все чаще требует использования инструментов для совместной работы, которые позволяют создавать инновационную продукцию и повышать эффективность производства при одновременном снижении рисков и повышении производительности.

Таким образом, в статье представлена методика создания цифрового двойника Тимирязевской сыроварни с применением технологии виртуальной реальности, доказавшая свою результативность с точки зрения эргономики и визуализации. По сравнению с традиционными 2D-методами виртуальная реальность способствовала оптимизации расположения оборудования, ускорению принятия проектных решений и улучшению взаимодействия сотрудников.

Исследования были дополнены тестированием системы, направленным на оценку нагрузки пользователей во время работы в виртуальной реальности и их отношения к данной технологии. Результаты опроса продемонстрировали положительную оценку виртуальной реальности, незначительную рабочую нагрузку даже для новых пользователей, удобство использования и простоту получения обратной связи. Это подтверждает целесообразность интеграции инструментов виртуальной реальности как в производственный процесс, так и в качестве образовательной технологии.

Полученные результаты нельзя считать окончательными – данная работа открывает перспективы для дальнейших исследований. С учетом того, что виртуальная реальность обеспечивает техническую поддержку при проектировании сложных производственных систем, есть интерес изучить возможность ее применения на этапах коммерческого предложения – например, для создания предварительных моделей, позволяющих на ранних стадиях визуализировать ожидаемые результаты и принимать ключевые решения. Другим важным аспектом является применение виртуальной реальности на таких этапах жизненного цикла системы, как обучение персонала и техническое обслуживание, а также интеграция с процессами оптимизации производства (компоновка оборудования и повышение производительности линии).

Список источников

1. Мартеха А.Н., Бабкина А.В., Торопцев В.В. и др. Цифровые двойники на основе виртуальной реальности как инструмент компоновки технологических комплексов // *XI Международная научно-техническая конференция «Новое в технологии и технике функциональных продуктов питания на основе медико-биологических воззрений» (Воронеж, 4-5 июля 2024 г.)*. Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2024. С. 288–291. EDN: EPJKVM
2. Филюшина Е.В., Васильева В.А., Болдырев В.В., Тихоненко Д.В. Инструменты и методы управления ИТ-проектами для успешности их реализации // *Наука и бизнес: пути развития*. 2023. № 9 (147). С. 26–28. EDN: RUSCZP
3. Akpan I., Offodile O. The Role of Virtual Reality Simulation in Manufacturing in Industry 4.0. *Systems*. 2024;12(1):26. <https://doi.org/10.3390/systems12010026>

4. Ашмарина Т.И., Бирюкова Т.В., Водяников В.Т. и др. *Цифровая трансформация агропромышленного комплекса*: Монография. Москва: Мегapolis, 2022. 160 с. EDN: NQIZTT
5. Кислицкий М.М., Миронов Д.А., Лылов А.С. Цифровые двойники сельскохозяйственных машин и оборудования в системе обеспечения продовольственной безопасности: значение и перспективы // *Теория и практика мировой науки*. 2022. № 12. С. 27–29. EDN: NHXIAW
6. Konstantinova A., Ivchenko V., Bakhonka V. et al. Methodological Basis of Virtual Reality Technology Application in Industrial Design. *Science & Technique*. 2021;20:465-475. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-465-475>
7. Жолобова А.И., Ергунова О.Т. Использование цифровых двойников в сельском хозяйстве // *Вопросы отраслевой экономики*. 2023. № 2 (2). С. 31–39. <https://doi.org/10.24888/2949-2793-2023-2-31-39>
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. Martínez-Gutiérrez A., Díez-González J., Verde P. et al. Convergence of Virtual Reality and Digital Twin Technologies to Enhance Digital Operators' Training in Industry 4.0. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2023;180:103136. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2023.103136>
10. Землянов Г.С., Ермолаева В.В. 3D-моделирование // *Молодой ученый*. 2015. № 11 (91). С. 186–189. URL: <https://moluch.ru/archive/91/18642/> (дата обращения: 21.06.2025)
11. Завистовский Д.Н., Суханцов А.М., Чубаров Ф.Л. Применение технологий компьютерного проектирования и 3D-моделирования в сельском хозяйстве // *Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция с международным участием, посвященная 110-летию со дня рождения И.С. Кауричева (Москва, 14 декабря 2023 г.)*. Москва: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. С. 52–56. EDN: RMADKD
12. Mahmood K., Otto T., Chakraborty A. Layout Planning and Analysis of a Flexible Manufacturing System Based on 3D Simulation and Virtual Reality. *Procedia CIRP*. 2023;120:201-206. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2023.103136>
13. Цифровой двойник линии по производству сыров на основе технологии виртуальной реальности: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025617417 Российская Федерация / А.В. Бабкина, А.Н. Мартеха, О.С. Пучкова, В.В. Торопцев. 2025. EDN: RGINQZ
14. Бабкина А.В., Мартеха А.Н., Торопцев В.В. и др. Создание цифрового двойника линии по производству сыров на основе технологии виртуальной реальности // *Техника и оборудование для села*. 2024. № 11 (329). С. 33–36. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2024-11-33-36>
15. Абрамов В.И., Кашироков А.С. Перспективы развития управления регионом с использованием цифровых двойников // *11-я Международная научно-практическая конференция «Управление социально-экономическим развитием регионов: проблемы и пути их решения» (Курск, 24-25 июня 2021 г.)*. Курск: Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Курский филиал, 2021. Т. 1. С. 11–19. EDN: CYYVOR

References

1. Martekha A.N., Babkina A.V., Toroptsev V.V. et al. Digital twins based on virtual reality as a tool for the layout of technological complexes. *XI Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya 'Novoe v tekhnologii i tekhnike funktsionalnykh*

produktov pitaniya na osnove mediko-biologicheskikh vozzreniy.' July 04-05, 2024. Voronezh, Russia: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2024:288-291. (In Russ.)

2. Filyushina E.V., Vasileva V.A., Boldyrev V.V., Tikhonenko D.V. IT project management tools and techniques for successful project implementation. *Science and Business: Ways of Development*. 2023;(9(147)):26-28. (In Russ.)

3. Akpan I., Offodile O. The Role of Virtual Reality Simulation in Manu-facturing in Industry 4.0. *Systems*. 2024;12(1):26. <https://doi.org/10.3390/systems12010026>

4. Ashmarina T.I., Biryukova T.V., Vodyannikov V.T. et al. *Digital transformation of the agro-industrial sector: a monograph*. Moscow, Russia: Megapolis, 2022:160. (In Russ.)

5. Kislitsky M.M., Mironov D.A., Lylov A.S. Digital twins of agricultural machinery and equipment in the food security system: significance and prospects. *Theory and Practice of the World Science*. 2022;(12):27-29. (In Russ.)

6. Konstantinova A., Ivchenko V., Bakhonka V. et al. Methodological Basis of Virtual Reality Technology Application in Industrial Design. *Science & Technique*. 2021;20:465-475. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-465-475>

7. Zholobova A.I., Ergunova O.T. The usage of digital twins in agriculture. *Voprosy otraslevoy ekonomiki*. 2023;(2(2)):31-39. (In Russ.) <https://doi.org/10.24888/2949-2793-2023-2-31-39>

8. Dorokhov A.S., Pavkin D.Yu., Yurochka S.S. Digital twin technology in agriculture: prospects for use. *Agricultural Engineering*. 2023;25(4):14-25. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-14-25>

9. Martínez-Gutiérrez A., Díez-González J., Verde P. et al. Convergence of Virtual Reality and Digital Twin Technologies to Enhance Digital Operators' Training in Industry 4.0. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2023;180:103136. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2023.103136>

10. Zemlyanov G.S., Ermolaeva, V.V. 3D modeling. *Molodoy Ucheniy*. 2015;(11(91)):186-189. (In Russ.) URL: <https://moluch.ru/archive/91/18642/> (accessed: June 21, 2025).

11. Zavistovskiy D.N., Sukhantsov A.M., Chubarov F.L. Application of computer-aided design and 3D modeling technologies in agriculture. *Vserossiyskaya (natsionalnaya) nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennaya 110-letiyu so dnya rozhdeniya I.S. Kauricheva. December 14, 2023*. Moscow, Russia: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2024:52-56. (In Russ.)

12. Mahmood K., Otto T., Chakraborty A. Layout Planning and Analysis of a Flexible Manufacturing System Based on 3D Simulation and Virtual Reality. *Procedia CIRP*. 2023;120:201-206. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2023.103136>

13. Certificate of state registration of a computer program No. 2025617417 (Russian Federation). Digital twin of a cheese production line based on virtual reality technology. Babkina A.V., Martekha A.N., Puchkova O.S., Toroptsev V.V., 2025. (In Russ.)

14. Babkina A.V., Martekha A.N., Toroptsev V.V. et al. Creating digital twin of the cheese production line using virtual reality technology. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;(11(329)):33-36. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2024-11-33-36>

15. Abramov V.I., Kashirokov A.S. Prospects for the development of regional management using digital twins. *11-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya 'Upravleniye sotsialno-ekonomicheskim razvitiyem regionov: problemy i puti ikh resheniya.'* June 24-25, 2021. Kursk, Russia: Financial University under the Government of the Russian Federation, Kursk Branch, 2021;1:11-19. (In Russ.)

Сведения об авторах

Анастасия Валентиновна Бабкина, канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры прикладной информатики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: babkina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5436-7348>

Василий Владимирович Торопцев, канд. техн. наук, доцент кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: toroptsev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6448-5586>

Александр Николаевич Мартеха, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: man6630@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

Ольга Сергеевна Пучкова, канд. экон. наук, доцент кафедры прикладной информатики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: puchkova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0405-6082>

Information about the authors

Anastasia V. Babkina, CSc (Econ), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Informatics, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: babkina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5436-7348>

Vasily V. Toroptsev, CSc (Eng), Associate Professor at the Department of Processes and Apparatus for Processing Industries, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: toroptsev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6448-5586>

Alexander N. Martekha, CSc (Eng), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Processes and Apparatus for Processing Industries, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: man6630@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

Olga S. Puchkova, CSc (Econ), Associate Professor at the Department of Applied Informatics, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: puchkova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0405-6082>