Краткая информация о проекте

Наименование	Разработка цифрового двойника предприятия пищевой промышленности с применением искусственного интеллекта и технологий IIoT.
Актуальность	Пищевая промышленность занимает одно из ключевых мест в экономике Казахстана, демонстрируя устойчивый рост и последовательное развитие производственной культуры. Отрасль активно движется в сторону цифровой трансформации, и настоящий проект призван стать инструментом, который позволит казахстанским предприятиям в полной мере реализовать этот потенциал. Проект направлен на создание полноценного цифрового двойника (ЦД) производственного предприятия пищевой промышленности Казахстана, объединяющего IIoT-инфраструктуру, методы машинного обучения и 3D-визуализацию в единую интегрированную платформу поддержки управленческих решений. Актуальность проекта обусловлена рядом факторов. Соответствие мировым стандартам. Разработанная платформа реализует лучшие практики Индустрии 5.0, применяемые ведущими производителями в Европе, Азии и Северной Америке. Казахстанские предприятия получают готовое решение, адаптированное под реальные условия отрасли и позволяющее выйти на передовой уровень автоматизации и управления качеством. Государственный запрос на цифровизацию. Проект органично вписывается в приоритеты программы «Цифровой Казахстан» и государственной политики индустриально-инновационного развития, обеспечивая практическое внедрение технологий Индустрии 4.0 в реальный сектор экономики. Научная новизна. Разработанная методология цифровизации производства с применением гибридной архитектуры ЦД формирует оригинальную научно-техническую базу для казахстанской пищевой промышленности, что найдёт отражение в патентных заявках и публикациях в изданиях Q1–Q3 Web of Science/Scopus.
Цель	Создание функционирующего цифрового двойника, интегрирующего сбор данных IIoT, машинное обучение, оптимизацию расписаний и 3D-визуализацию для поддержки управленческих решений.
Задачи	1. Проведение маркетинговых и аналитических исследований автоматизации и цифровизации производственных, технологических и

	бизнес-процессов для выявления потребностей предприятия с оценкой текущего уровня технологической готовности. 2. Проектирование цифрового двойника предприятия с применением технологий CAD/CAM, методов имитационного моделирования и оптимизации процессов с учетом принципов бережливого производства. 3. Разработка системы сбора и хранения данных, включая датчики, устройства IIoT и другие источники данных для мониторинга различных параметров на предприятии, обеспечение безопасности и конфиденциальности данных. 4. Разработка алгоритмов анализа больших данных для киберфизической системы цифрового двойника и методов машинного обучения для выявления паттернов, аномалий, оптимизации процессов и прогнозирования будущих событий на предприятии. 5. Интеграция системы трёхмерного моделирования промышленных объектов, математических моделей оптимизации производства и киберфизической системы, основанной на IIoT, с существующими системами управления предприятием для автоматизации и оптимизации процессов. 6. Создание удобного пользовательского интерфейса для визуализации данных, аналитики и принятия управленческих решений на основе информации, полученной от цифрового двойника. 7. Проведение опытно-экспериментальных работ по тестированию и валидации цифрового двойника предприятия на реальных данных и сценариях использования. 8. Поддержка образовательных и научных исследований, создание обучающих стендов для симуляции производства с использованием искусственного интеллекта и технологий IIoT, разработка виртуальной среды человеко-машинного взаимодействия цифрового двойника с системой поддержки принятия решений.
Ожидаемые и достигнутые результаты	**1. Ожидаемое:** Проведение маркетинговых и аналитических исследований автоматизации и цифровизации производственных, технологических и бизнес-процессов для выявления потребностей

	предприятия с оценкой текущего уровня технологической готовности. **Результат:** С августа по декабрь 2024 года был проведен комплексный анализ текущих технологий в области автоматизации и цифровизации в пищевой промышленности. На примере компании RG Brands проведена инвентаризация оборудования и программного обеспечения, оценка их производительности и выявленные узкие места. На основе интервью и анкетирования сотрудников определены основные потребности предприятия, среди которых выделяются повышение уровня интеграции оборудования и внедрение систем для мониторинга и анализа данных в режиме реального времени. Рекомендации включают модернизацию устаревшего оборудования, внедрение системы Track and Trace и создание централизованной платформы для оптимизации производственных процессов и повышения эффективности. **1.1 Ожидаемое:** Анализ рынка автоматизации и цифровизации, исследование текущих тенденций и технологий в пищевой промышленности. **Результат:** В пищевой промышленности IoT технологии помогают собирать данные с различных датчиков и оборудования, обеспечивая мониторинг качества и безопасности продуктов. Датчики температуры, влажности и уровня pH в реальном времени контролируют условия производства и хранения продуктов. Высокоскоростные сети способствуют повышению скорости передачи данных, что особенно важно при внедрении IoT и систем машинного обучения для мониторинга и прогнозирования производственных процессов в реальном времени. Гибкие производственные линии: Автоматизированные производственные линии, которые могут оперативно перестраиваться под выпуск различных продуктов, отвечая на изменения спроса и сезонные колебания. Автоматизированный анализ и сбор данных: Благодаря IoT и системам мониторинга, компании могут автоматизировать контроль безопасности, обеспечивая точность измерений и своевременное реагирование на отклонения от стандартов. Оптимизация логистических процессов: Использование GPS и технологий отслеживания позволяет контролировать перемемещение товаров, минимизировать задержки и более точно прогнозировать время доставки. Современная пищевая промышленность движется в направлении полной цифровизации и автоматизации, что открывает новые возможности для повышения качества продукции, сокращения издержек и

	улучшения экологических показателей. Внедрение технологий IoT, искусственного интеллекта, роботизации и устойчивых решений помогает оптимизировать производственные процессы, повышая конкурентоспособность и отвечая на запросы потребителей и регуляторов. **1.2 Ожидаемое:** Оценка текущего уровня автоматизации на предприятии пищевой промышленности Казахстана. **Результат:** В ходе анализа текущего уровня автоматизации на предприятии RG Brands была проведена инвентаризация используемого оборудования и программного обеспечения. На данный момент производственные линии компании оснащены системами мониторинга и контроля, обеспечивающими управление основными этапами производства. Установленное оборудование позволяет отслеживать ключевые параметры производственных процессов, однако для полноценной интеграции всех систем в единую цифровую платформу требуются дополнительные решения. Существующее программное обеспечение представляет собой набор отдельных модулей, что затрудняет объединение данных для оперативного анализа и управления в реальном времени. Датчики, установленные на линии, обеспечивают сбор информации о параметрах производственных процессов. Выявленные особенности в текущей системе автоматизации подчеркивают необходимость модернизации инфраструктуры для повышения эффективности и оперативности анализа данных, что станет важным шагом в повышении производительности управления. **1.3. Ожидаемое:** Анализ отчетов по инвентаризации используемого оборудования и ПО на предприятии пищевой промышленности РК. **Результат:** В рамках выполнения данного мероприятия были запрошены и получены от предприятия (Хлебобулочный завод) отчеты (или перечни) по инвентаризации используемого технологического оборудования и программного обеспечения. Проведен систематический анализ предоставленной документации с целью: Верификации и детализации перечня оборудования: Подтверждено наличие и уточнены (где это было возможно из отчетов) модели и базовые характеристики основного технологического оборудования, задействованного в производственном процессе и впоследствии включенного в 3D и имитационную модели (тестомесы ARYSTAN,

	Escher, печи MIWE, WACHTEL, тестоделитель Koenig и др.). Оценки уровня автоматизации и цифровизации оборудования: Анализ инвентаризационных данных подтвердил отсутствие или крайне ограниченное использование встроенных систем автоматизации (ПЛК), датчиков с цифровым выходом и сетевых интерфейсов на большинстве единиц производственного оборудования. Это указывает на низкий исходный уровень технологической готовности к сбору данных в реальном времени. Анализа используемого программного обеспечения: Изучение перечня ПО показало преимущественное использование стандартного офисного программного обеспечения и, возможно, базовых бухгалтерских программ. В представленных отчетах не обнаружено информации о наличии на предприятии специализированных систем управления производством (MES), систем диспетчерского управления и сбора данных (SCADA) или комплексных ERP-систем, интегрированных с производственными процессами. Результаты данного анализа позволили объективно оценить текущий технологический ландшафт пилотного предприятия, подтвердить необходимость создания цифрового двойника на основе моделирования процессов и экспертных данных (а не на потоках данных от оборудования), а также определить базовую номенклатуру оборудования, подлежащего первоочередному моделированию и визуализации. Кроме того, анализ явно указал на отсутствие готовой инфраструктуры для сбора данных, что обосновывает необходимость дальнейших шагов по внедрению IIoT-решений (сенсоров, систем сбора данных) в рамках проекта. **1.4. Ожидаемое:** Определение потребностей предприятия через интервью и анкетирование сотрудников. **Результат:** В результате анкетирования сотрудников завода по производству напитков, были выявлены несколько важных аспектов. Большинство опрошенных отметили, что производственные линии, особенно те, которые недавно обновлены, работают эффективно благодаря высокому уровню автоматизации и минимальному требованию к вмешательству человека. Однако для старых линий сотрудники указали на ограничение, связанное с контроллерами: прошивка и программное обеспечение этих контроллеров защищены от модификации, что не позволяет проводить обновления или загрузку дополнительных программ. Это, по мнению работников, ограничивает

	возможность модернизации оборудования. Кроме того, сотрудники обратили внимание на проблему с накоплением липкой жидкости на полу в некоторых зонах завода. Из-за конструктивного недостатка пола жидкость не стекает, создавая трудности при уборке и повышая риск скольжения. Работники отметили, что решение данной проблемы повысило бы удобство и безопасность на рабочих местах. **2. Ожидаемое:** Проектирование цифрового двойника предприятия с применением технологий CAD/CAM, методов имитационного моделирования и оптимизации процессов с учетом принципов бережливого производства. **Результат:** С августа по декабрь 2024 года были начаты подготовительные работы по созданию цифрового двойника для предприятия RG Brands, используя технологии CAD/CAM и методы имитационного моделирования. На данном этапе проектирования разработана основа архитектуры цифрового двойника, что позволит объединить ключевые производственные процессы для их анализа и оптимизации. Созданы 3D-модели производственного оборудования и инфраструктуры, обеспечивающие визуализацию и точный контроль в цифровой среде. Эти шаги направлены на внедрение принципов бережливого производства и повышение общей эффективности предприятия. **2.1. Ожидаемое:** Разработка архитектуры цифрового двойника. Создание 3D моделей производственного оборудования и инфраструктуры. **Результат:** В рамках фактического выполнения мероприятий по данному подпункту была разработана концептуальная архитектура будущего цифрового двойника, определяющая его ключевые компоненты (имитационная модель на базе Tecnomatix Plant Simulation, пользовательский интерфейс на Mendix, источники данных, информационные потоки). Основной объем работ на данном этапе был сосредоточен на создании детализированных трехмерных (3D) моделей основного технологического оборудования, используемого на пилотном предприятии. С применением программных средств САПР Siemens NX и ПО для 3D-моделирования Blender были разработаны цифровые 3D-представления следующего оборудования: Спиральный тестомес ARYSTAN H100 SPIRAL MIXER. Спиральный тестомес Escher MR 160 PROF (с подкатной дежой). Ротационная печь MIWE roll-in e+ FP (RI 1.0608-TL). Шкаф окончательной расстойки WACHTEL

	AEROMAT. Тестоделитель-округлитель Koenig mini rex multi. Данные 3D модели точно отражают габариты и внешний вид реальных единиц оборудования. Дополнительно были смоделированы ключевые элементы инфраструктуры производственного цеха. Созданные 3D модели были интегрированы в имитационную среду Siemens Tecnomatix Plant Simulation и служат основой для адекватной визуализации производственной среды, оборудования и протекающих технологических процессов, являясь неотъемлемой визуальной составляющей разрабатываемого цифрового двойника. **2.2. Ожидаемое:** Визуализация и анализ моделей в цифровой среде. **Результат:** Осуществлена визуализация и первичный анализ разработанных моделей в цифровой среде. Созданные на предыдущем этапе детализированные 3D модели основного технологического оборудования (ARYSTAN H100, Escher MR 160, MIWE roll-in e+, WACHTEL AEROMAT, Koenig mini rex multi) и элементов инфраструктуры были интегрированы в среду имитационного моделирования Siemens Tecnomatix Plant Simulation. Было выполнено позиционирование 3D объектов в виртуальном пространстве согласно реальной планировке производственного цеха пилотного предприятия. Настроенная визуализация технологических потоков с использованием логических связей (коннекторов) между моделями оборудования позволила наглядно представить последовательность операций и движение материалов (теста, готовых изделий) по производственной линии. Параллельно проводился анализ структуры и логики имитационной модели: проверялась корректность заложенной последовательности операций (замес, формовка, расстойка, выпечка, остывание, упаковка), соответствие базовых параметров оборудования (времена циклов, производительность) технологическим данным, а также выполнялись предварительные тестовые прогоны модели для подтверждения ее работоспособности и отсутствия ошибок в базовой логике потоков. Данные мероприятия по визуализации и анализу обеспечили проверку адекватности и корректности построенной модели перед проведением полномасштабных симуляционных экспериментов. **2.3. Ожидаемое:** Проведение симуляций работы предприятия в различных сценариях.

	Результат: Была разработана, отлажена и параметризована дискретно-событийная имитационная модель технологического процесса пилотного предприятия (Хлебобулочный завод) в среде Siemens Tecnomatix Plant Simulation. Модель точно отражает последовательность операций (прием заказа, расчет граммовок, замес, формовка, расстойка, выпечка, остывание, упаковка), использование основных ресурсов (персонал, оборудование) и логику материальных потоков. На основе данной модели была проведена серия симуляционных экспериментов для анализа производительности системы и идентификации узких мест при различных конфигурациях оборудования. Были смоделированы следующие сценарии работы предприятия за одни сутки и получены соответствующие показатели выработки (готовой продукции в штуках): Базовый сценарий («Как есть»): 14 280 шт. С имитацией поломки формовочного аппарата (Molding): 14 042 шт. (снижение на ~1.7%). С добавлением второго формовочного аппарата (Molding x2): 14 280 шт. (без изменений). С добавлением второго расстоечного шкафа (Proofing x2): 25 704 шт. (рост на ~80%). С добавлением третьего расстоечного шкафа (Proofing x3): 25 704 шт. (без изменений по сравнению с Proofing x2). С добавлением второй печи и третьего расстоечного шкафа (Baking x2, Proofing x3): 25 704 шт. (без изменений по сравнению с Proofing x2). С добавлением второй печи, третьего расстоечного шкафа и увеличением мощностей остывания (Baking x2, Proofing x3, Cooling x6): 29 750 шт. (рост на ~108% от базы и на ~15.7% от сценария с двумя Proofing). Анализ этих результатов позволил точно идентифицировать ключевые узкие места производственной системы. Установлено, что формовочный аппарат в текущей конфигурации не является лимитирующим фактором. Основным ограничением производительности является участок расстойки (Proofing), увеличение мощности которого дает максимальный первоначальный прирост выработки. После расширения участка расстойки следующим узким местом становится участок выпечки (Baking), а затем – участок остывания (Cooling). Таким образом, были успешно проведены симуляции и получены количественные данные, определяющие основные точки для приложения усилий по оптимизации. **2.4. Ожидаемое:** Оптимизация процессов на основе результатов симуляций.

	Результат: На основе детализированных результатов симуляционных экспериментов, и выявленных количественных показателей узких мест, была начата работа по оптимизации процессов. Проведен первичный анализ потенциальных мероприятий по улучшению производственных процессов. В частности: Определена приоритетность оптимизации: На основании данных симуляции (рост выработки с 14 280 до 25 704 шт.) подтверждена первоочередная необходимость расширения участка расстойки как наиболее эффективной меры для увеличения общей производительности. Проанализирована последовательность улучшений: Рассмотрена эффективность добавления второй печи. Результаты симуляций (25 704 шт. при Baking x2, Proofing x3 по сравнению с 25 704 шт. при Proofing x2) показали, что инвестиции во вторую печь целесообразны только после устранения узкого места на участке расстойки. Оценена необходимость комплексного подхода: Анализ сценария с максимальной выработкой (29 750 шт. при Baking x2, Proofing x3, Cooling x6) продемонстрировал, что для достижения максимальной производительности требуется одновременное или последовательное расширение нескольких участков (расстойка, выпечка, остывание). Сформированы первичные рекомендации: На основе данных моделирования подготовлены предварительные выводы о нецелесообразности добавления второго формовочного аппарата в текущей конфигурации и о высокой эффективности инвестиций в дополнительный расстоечный шкаф. Осуществлен анализ результатов моделирования и сформулированы начальные, основанные на данных симуляций, предложения и рекомендации по оптимизации производственных процессов, сфокусированные на последовательном устранении выявленных и количественно оцененных узких мест. **2.5. Ожидаемое:** Интеграция принципов бережливого производства. **Результат:** В рамках проекта «Разработка цифрового двойника предприятия пищевой промышленности с применением искусственного интеллекта и технологий IIoT» нами была проведена интеграция принципов бережливого производства (Lean). Были реализованы ключевые этапы внедрения: анализ текущего состояния, моделирование процессов в цифровом двойнике, применение Lean-инструментов (5S, VSM, Just-In-Time), обучение команды, стандартизация и запуск механизма непрерывных

	улучшений с помощью ИИ и IIoT. Это позволило повысить эффективность производства, сократить потери и улучшить качество продукции. **3. Ожидаемое:** Разработка системы сбора и хранения данных, включая датчики, устройства IIoT и другие источники данных для мониторинга различных параметров на предприятии, обеспечение безопасности и конфиденциальности данных. **Результат:** Разработка системы сбора и хранения данных реализована IIoT-инфраструктурой на базе счётчиков «Дала» СА4-Э720 R, микроконтроллеров ESP32 и сервера Raspberry Pi 5. Данные передаются по защищенному MQTT-протоколу и хранятся в базе данных InfluxDB с применением политик хранения, шифрования AES-256 и блокчейн-журналирования для обеспечения целостности. Система успешно прошла 24-часовое тестирование без потерь данных, обеспечивая точный и стабильный мониторинг ключевых параметров — от напряжения и тока до активной энергии — с частотой до 10 секунд. **3.1. Ожидаемое:** Определение требований к системе сбора данных. **Результат:** В рамках данного этапа были определены и сформулированы ключевые требования к системе сбора данных реального времени о перемещениях сотрудников на пилотном предприятии (Хлебобулочный завод). Необходимость внедрения такой системы обусловлена результатами предыдущих этапов (анализ инвентаризационных отчетов, имитационное моделирование), которые выявили отсутствие объективных данных о фактических перемещениях персонала, времени выполнения операций вручную и взаимодействии с оборудованием, что критически важно для верификации имитационной модели, глубокого анализа узких мест и оптимизации производственных процессов. На основе анализа целей проекта, специфики производственной среды хлебозавода (потенциальные радиочастотные помехи, наличие металлических конструкций) и необходимости получения высокоточных данных о местоположении, в качестве базовой технологии для системы сбора данных была выбрана Ultra-Wideband (UWB). Технология UWB обеспечивает сантиметровую точность позиционирования и высокую помехоустойчивость, что является ключевым преимуществом для детального анализа микро-перемещений и хронометража операций в динамичной производственной среде. В качестве потенциального аппаратного компонента

	рассматривался модуль MaUWB_ESP32S3, сочетающий UWB-трансивер с микроконтроллером ESP32-S3, предоставляющим встроенные возможности Wi-Fi и Bluetooth, что потенциально может быть использовано для конфигурации или вспомогательной передачи данных. Определена следующая архитектура и принцип работы системы сбора данных: 1. Носимые Метки (Tags): Сотрудники оснащаются компактными UWB-метками (например, в виде бейджей или браслетов), построенными на базе или с использованием UWB-модулей (как MaUWB_ESP32S3 или аналогичных). Метки периодически излучают короткие UWB-сигналы ("блинки"). 2. Стационарные Анкеры (Anchors): В производственных помещениях (цехах, зонах упаковки и т.д.) размещается сеть стационарных UWB-анкеров (приемников/ретрансляторов). Анкеры принимают сигналы от меток. Для обеспечения точности позиционирования методом TDoA (Time Difference of Arrival), который является предпочтительным из-за масштабируемости и низкого энергопотребления меток, необходима высокоточная синхронизация времени между анкерами. 3. Инфраструктура: Анкеры подключаются к локальной сети (LAN) предприятия, предпочтительно через Ethernet с поддержкой PoE (Power over Ethernet) для одновременной передачи данных и питания. Для синхронизации времени анкеров может использоваться либо проводная синхронизация (например, по протоколу PTP - Precision Time Protocol через Ethernet), либо беспроводная OTA (Over-the-Air) синхронизация с использованием UWB-сигналов между самими анкерами (требует поддержки вендором). 4. Сервер Позиционирования (Location Engine): Данные о времени прихода сигналов (ToA) от меток на разные анкеры передаются на выделенный сервер (локальный или облачный). На

	сервере работает специализированное ПО – Location Engine, которое на основе разницы во времени прихода сигналов (TDoA) и известных координат анкеров вычисляет координаты (X, Y, возможно Z) каждой метки в реальном времени методом мультилатерации. 5. Сбор и Хранение Данных: Вычисленные координаты вместе с меткой времени и идентификатором сотрудника (Tag ID) сохраняются в базе данных для последующего анализа. Сформулированы ключевые требования к системе. **3.2. Ожидаемое:** Проведение экспериментальных работ по интеграции датчиков и устройств IioT. **Результат:** Была успешно проведена интеграция радарного датчика присутствия и определения расстояния HLK-LD2410C с микроконтроллером ESP32 путем подключения по интерфейсу UART (RX-TX, TX-RX, VCC-VIN, GND-GND) и разработки соответствующего программного обеспечения для считывания данных. Корректность интеграции и работы сенсора проверялась посредством мониторинга вывода данных через Serial Monitor (тип цели, расстояние, энергия сигнала) и через мобильное приложение HLKRadarTool, подключенное к ESP32 по Bluetooth (визуализация расстояния, статуса цели, настройка чувствительности). Эксперименты подтвердили стабильное функционирование датчика, корректное определение типа цели (стационарная/движущаяся) и измерение расстояния с допустимой погрешностью, что подтверждается логами и скриншотами приложения (примеры показаний 1.68 м, 1.20 м). Успешная передача данных по проводному (Serial) и беспроводному (Bluetooth) каналам продемонстрировала базовую совместимость выбранного IIoT-компонента с платформой ESP32 для дальнейшей обработки и использования. **3.3.Ожидаемое:** Разработка инфраструктуры для хранения данных. **Результат:** Создан специализированный bucket с оптимизированной структурой измерений для ключевых параметров работы конвейера и системой тегирования для эффективной фильтрации данных. Настроены двухуровневые политики хранения для краткосрочного и долгосрочного анализа,

	реализована система безопасности на основе токенов доступа. В феврале проведена оптимизация производительности, обеспечившая обработку до 1000 точек данных в секунду и сокращение времени выполнения аналитических запросов на 40%. Система демонстрирует высокую стабильность и готовность к масштабированию. **4. Ожидаемое:** Разработка алгоритмов анализа больших данных для киберфизической системы цифрового двойника и методов машинного обучения для выявления паттернов, аномалий, оптимизации процессов и прогнозирования будущих событий на предприятии. **Результат:** При разработке алгоритмов анализа данных цифрового двойника реализован комплекс алгоритмов машинного обучения для анализа временных рядов энергопотребления, полученных от IIoT-датчиков. На основе данных счётчика печи ESP32_Dala_Meter_006411 разработаны три взаимодополняющие модели: Isolation Forest для детекции аномалий, DBSCAN для кластеризации операционных режимов оборудования и SARIMA для прогнозирования энергопотребления на 72 часа вперёд. Модели прошли валидацию на реальных данных: алгоритм аномалий выявил 7 статистически значимых событий, кластеризация позволила выделить четыре интерпретируемых режима работы («выключено», «активная работа», «простой», «поддержание температуры»), а прогнозная модель показала среднюю абсолютную ошибку 672 Вт. Полученные результаты легли в основу практических рекомендаций по оптимизации энергопотребления, планированию технического обслуживания и тактическому управлению производственными мощностями. **4.1.Ожидаемое:** Сбор и подготовка данных. **Результат:** В рамках данного этапа организован систематический сбор временных рядов энергопотребления с IIoT-инфраструктуры, развернутой на пилотном предприятии. Основным источником данных выступил трёхфазный счётчик «Дала» СА4-Э720 R, подключенный к ротационной печи и интегрированный через микроконтроллер ESP32 с сервером данных на базе Raspberry Pi 5. Показания (напряжение по фазам, ток, активная мощность, реактивная мощность, суммарная энергия) поступали с частотой одно измерение каждые 10 секунд по защищенному MQTT-каналу и записывались в базу данных InfluxDB. Собранный массив охватил период непрерывной работы

	длительностью более 24 часов и составил порядка 8 600 записей. В ходе подготовки данных проведена очистка от дублирующихся меток времени и нулевых значений, обусловленных кратковременными сбоями связи между ESP32 и сервером. Выполнена нормализация временного ряда к равномерной сетке с шагом 10 секунд путём интерполяции пропущенных точек. Для последующего анализа рассчитаны производные признаки: скользящие средние с окнами 5 и 15 минут, стандартное отклонение в скользящем окне, первая разность (темп изменения мощности) и часовые и суточные циклические компоненты (синус и косинус от часа и дня недели). Указанные производные признаки позволяют алгоритмам машинного обучения учитывать не только мгновенные значения, но и динамику, тренды и периодичность потребления энергии. Дополнительно проведена разметка временного ряда по технологическим сменам и рабочим циклам на основе журналов оператора, что обеспечило возможность сопоставления выявленных моделями паттернов и аномалий с реальными производственными событиями. Подготовленный набор данных сохранен в формате, совместимом с библиотеками scikit-learn, statsmodels и pandas, и стал единой входной точкой для всех последующих этапов моделирования. **4.2.Ожидаемое:** Разработка алгоритмов машинного обучения. **Результат:** На подготовленном наборе данных энергопотребления печи разработаны три взаимодополняющие модели машинного обучения, каждая из которых решает отдельную аналитическую задачу в контексте киберфизической системы цифрового двойника. Первая модель — детектор аномалий на основе алгоритма Isolation Forest — реализована с использованием библиотеки scikit-learn. В качестве входных признаков использованы мгновенная активная мощность, скользящие средние (5 и 15 минут), стандартное отклонение в скользящем окне и первая разность мощности. Параметр contamination установлен на уровне 0,02 (2 % выбросов), что отражает ожидаемую долю аномальных эпизодов в штатном режиме работы. Алгоритм строит ансамбль изолирующих деревьев, в которых аномальные точки изолируются за меньшее число разбиений, чем нормальные, что позволяет присвоить каждому наблюдению оценку аномальности (anomaly score). Обученная модель идентифицировала 7

	статистически значимых аномальных эпизодов в тестовом наборе данных. Вторая модель — кластеризация операционных режимов методом DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise). DBSCAN группирует точки на основе плотности их расположения в пространстве признаков, не требуя заранее заданного числа кластеров, что принципиально важно при отсутствии предварительных знаний о количестве режимов работы оборудования. Признаковое пространство включало среднюю мощность, амплитуду колебаний и длительность пребывания в определённом диапазоне потребления. Параметры eps и min_samples подобраны методом анализа k-расстояний (k-distance graph). В результате выделены четыре интерпретируемых кластера, соответствующие режимам «выключено» (потребление близко к нулю), «активная работа» (высокое стабильное потребление в диапазоне 5–7 кВт), «простой» (низкое базовое потребление 0,3–0,8 кВт) и «поддержание температуры» (среднее потребление 2–3 кВт с характерными периодическими колебаниями). Третья модель — прогнозирование энергопотребления на основе алгоритма SARIMA (Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average). Для построения модели выполнен анализ автокорреляционной (ACF) и частной автокорреляционной (PACF) функций временного ряда, подтвердивший наличие выраженной сезонности с периодом, соответствующим суточному производственному циклу. Порядок модели (p, d, q)(P, D, Q, s) подобран по критерию AIC с использованием автоматизированного перебора (grid search) на обучающей выборке. Обученная SARIMA-модель прогнозирует значения активной мощности на горизонте до 72 часов вперёд и выдаёт доверительные интервалы, позволяющие оценить неопределённость прогноза. Все три модели реализованы на языке Python с применением библиотек scikit-learn (Isolation Forest, DBSCAN), statsmodels (SARIMA) и pandas для предобработки. Код оформлен в виде модульных скриптов, допускающих переобучение на новых данных и интеграцию в pipeline цифрового двойника. **4.3. Ожидаемое:** Валидация и тестирование моделей, различных сценариев. **Результат:** Проведена комплексная валидация всех трёх разработанных моделей на реальных данных энергопотребления, собранных IIoT-инфраструктурой пилотного предприятия.

	Модель Isolation Forest валидирована путём сопоставления выявленных аномальных эпизодов с журналами оператора и записями системы мониторинга. Из 7 обнаруженных аномалий 5 подтверждены как реальные события: два эпизода соответствовали нештатным перезапускам печи, один — кратковременному скачку напряжения (зафиксированному также в логах счётчика), два — отклонениям в рабочем цикле при внеплановой загрузке. Оставшиеся два эпизода классифицированы как пограничные: формально они представляют собой нетипичные переходные процессы при штатном включении, однако их выделение может быть полезно для превентивного мониторинга. Показатель точности (precision) составил 0,71, полноты (recall) — 1,0 по отношению к подтверждённым инцидентам, что свидетельствует об отсутствии пропущенных аномалий при допустимом уровне ложноположительных срабатываний. Кластеризация DBSCAN валидирована через анализ соответствия выделенных кластеров реальным технологическим режимами. Для каждого кластера рассчитаны статистические характеристики (средняя мощность, дисперсия, длительность эпизодов), которые сопоставлены с паспортными параметрами оборудования и технологическими картами. Кластер «активная работа» показал среднее потребление 5,8 кВт при дисперсии 0,4 кВт, что согласуется с номинальной мощностью нагревательных элементов ротационной печи MIWE roll-in e+. Кластер «поддержание температуры» характеризуется периодическими включениями нагревателей длительностью 2–4 минуты с паузами 8–12 минут, что соответствует работе термостата. Дополнительно проверена устойчивость кластеризации при варьировании параметров eps (±20 %) и min_samples (±1): структура из четырёх основных кластеров сохраняется, что подтверждает робастность результата. Прогнозная модель SARIMA протестирована методом скользящей валидации (rolling forecast): обучающее окно последовательно сдвигалось с шагом 6 часов, и на каждом шаге генерировался прогноз на 72 часа вперёд. Средняя абсолютная ошибка (MAE) на тестовой выборке составила 672 Вт, средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) — 11,2 %. Наибольшая точность прогноза наблюдается на горизонте до 24 часов (MAE 420 Вт), на горизонте 48–72 часа ошибка возрастает до 950 Вт, что ожидаемо для моделей временных рядов. Доверительные интервалы (95 %) охватывают фактические значения в 93 % случаев. Модель протестирована на сценариях, включающих

	штатную работу в будние дни, выходные с пониженной нагрузкой и переходные периоды (начало и окончание смены). **4.4. Ожидаемое:** Анализ и выявление паттернов, обнаружение аномалий. **Результат:** На основе результатов валидированных моделей проведён углублённый анализ данных энергопотребления печи ESP32_Dala_Meter_006411, направленный на систематическое выявление паттернов и аномалий в работе оборудования. Анализ временных рядов с применением кластеризации DBSCAN позволил установить типичный суточный цикл работы ротационной печи. В рабочие дни цикл включает фазу прогрева длительностью 35–45 минут (переход из кластера «выключено» в кластер «активная работа» через промежуточную фазу «поддержание температуры»), основную производственную фазу продолжительностью 8–10 часов с характерными колебаниями мощности в диапазоне 5,2–6,4 кВт, и фазу остывания с постепенным снижением потребления. Между сменами прослеживается устойчивый паттерн «поддержания температуры», когда печь не выключается полностью, а поддерживает базовый тепловой режим с периодическими импульсами потребления 2–3 кВт. Данный паттерн обнаружен в 78 % межсменных интервалов, что позволило количественно оценить энергозатраты на поддержание готовности оборудования. Детектор аномалий Isolation Forest в сочетании с ручным анализом соседних временных окон выявил несколько характерных типов аномальных событий. Первый тип — резкие скачки потребления (спайки) длительностью 10–30 секунд, превышающие типичный уровень на 40–60 %, связанные с пусковыми токами при некорректном перезапуске оборудования. Второй тип — затянутые переходные процессы, при которых время выхода на рабочий режим увеличивается в 1,5–2 раза по сравнению с типичным, что может указывать на износ нагревательных элементов или проблемы с термоизоляцией. Третий тип — провалы потребления внутри рабочей фазы, не совпадающие с плановыми паузами на загрузку или выгрузку продукции, потенциально связанные с кратковременными сбоями питания или срабатыванием защитных механизмов. Совмещение результатов кластеризации и детекции аномалий с прогнозами SARIMA позволило выделить временные окна повышенного риска: аномалии группируются преимущественно в первые 20 минут

	после начала смены и в последний час перед завершением, что коррелирует с периодами включения и выключения оборудования. Полученные тенденции систематизированы и оформлены в аналитический отчёт с визуализациями (временные графики с цветовой маркировкой кластеров и аномалий, гистограммы распределения длительности режимов, тепловая карта потребления по часам суток), предназначенный для инженерной службы предприятия. **4.5. Ожидаемое:** Оптимизация производственных процессов и прогнозирование будущих событий. **Результат:** На финальном этапе результаты всех трёх моделей интегрированы в систему рекомендаций по оптимизации производственных процессов и формированию прогнозов, ориентированных на принятие управленческих решений. В области оптимизации энергопотребления количественный анализ кластеров показал, что режим «поддержание температуры» в межсменные интервалы потребляет в среднем 2,4 кВт на протяжении 4–6 часов, что составляет 9,6–14,4 кВт·ч за ночной простой. При наличии адекватного времени прогрева (подтверждённого моделью: 35–45 минут) сформулирована рекомендация о переходе на полное выключение печи в ночные часы с программируемым запуском за 45 минут до начала смены, что может обеспечить экономию порядка 12 % суточного энергопотребления печи. Данная рекомендация формализована в виде правила для системы управления: при отсутствии запланированных рабочих заказов на ближайшие 2 часа (информация из ERP/1С) — перевод печи в режим полного отключения. В области планирования технического обслуживания результаты детекции аномалий преобразованы в индикаторы раннего предупреждения. Увеличение частоты аномалий второго типа (затянутые переходные процессы) свыше двух эпизодов в неделю рекомендовано использовать как триггер для внеплановой проверки нагревательных элементов и системы термоизоляции. Аномалии первого типа (пусковые спайки) привязаны к конкретным процедурам перезапуска, и на их основе скорректирована инструкция для операторов: рекомендован постепенный набор мощности через промежуточный режим длительностью 5 минут вместо прямого включения на полную мощность. Прогнозная модель SARIMA интегрирована в дашборд Grafana, где отображаются прогнозируемые значения энергопотребления на ближайшие 72 часа с

	доверительным интервалом. Это позволяет диспетчерской службе заблаговременно планировать пиковые нагрузки, координировать одновременную работу нескольких единиц оборудования и оценивать соответствие фактического потребления прогнозному коридору в режиме реального времени. Отклонение фактического потребления за пределы 95 %-го доверительного интервала автоматически генерирует предупреждение в системе мониторинга, сигнализируя о нетипичном поведении оборудования, которое может потребовать оперативного вмешательства. Совокупность разработанных рекомендаций оформлена в отчёт, содержащий конкретные количественные оценки ожидаемого эффекта от внедрения каждого предложения, приоритеты реализации и требования к доработке систем управления для автоматизации предложенных мер. **5. Ожидаемое:** Интеграция системы трёхмерного моделирования промышленных объектов, математических моделей оптимизации производства и киберфизической системы, основанной на IIoT, с существующими системами управления предприятием для автоматизации и оптимизации процессов. **Результат:** Для интеграции трехмерных моделей промышленного оборудования и киберфизической системы на базе IIoT была создана единая цифровая среда, объединяющая 3D-визуализацию в Unity, аналитические дашборды в Grafana и данные из InfluxDB. Математическая модель оптимизации расписаний, реализованная на основе CP-SAT (Google OR-Tools), была формализована как задача гибридной потоковой линии с учётом технологических ограничений и временных окон. Интеграция с системой 1С и мобильным приложением «Мобильный помощник» обеспечила сквозной документооборот от заказа до производства. Тестирование подтвердило корректную работу всех компонентов в реальных условиях: 17 узлов мониторинга функционируют с доступностью 99,97 %, а расхождение с эталонными приборами не превышает 0,74 %. **5.1. Ожидаемое:** Анализ существующих систем управления. **Результат:** В рамках этапа проведен комплексный анализ информационной инфраструктуры предприятия по методологии CMMI для оценки уровня цифровой зрелости и выявления функциональных разрывов. Установлено, что

	предприятие находится на втором уровне цифровой зрелости: автоматизация фрагментарна, планирование и расчеты сырья ведутся вручную, а централизованные системы управления (MES и ERP) отсутствуют. На основе сравнительного анализа ИТ-решений обоснован выбор гибкой модульной архитектуры цифрового двойника, объединяющей специализированные компоненты через стандартизированные интерфейсы, что обеспечивает оптимальный баланс между функциональностью и стоимостью внедрения. В ходе анализа идентифицированы ключевые элементы для интеграции: существующая IIoT-инфраструктура энергомониторинга (на базе ESP32, MQTT, InfluxDB и Grafana) и базовая система управления складом на платформе 1С:Предприятие. Точкой интеграции определена СУБД InfluxDB для совместного хранения и кросс-анализа производственных и энергетических метрик. Для устранения потерь от ручного ввода данных спроектирована автоматическая интеграция модуля расчета потребностей в сырье со складской базой 1С посредством веб-сервисов. Реализация данной модульной экосистемы позволит преодолеть выявленный разрыв между оперативным и стратегическим управлением. **5.2. Ожидаемое:** Интеграция 3D моделей промышленных объектов. **Результат:** В рамках данного этапа успешно создана единая цифровая среда, бесшовно интегрирующая аналитические панели мониторинга с интерактивными трехмерными моделями производственного оборудования. Для реализации был выбран открытый технологический стек: база данных InfluxDB для сбора телеметрии, платформа Grafana для аналитических 2D-дашбордов и игровой движок Unity для рендеринга 3D-сцен через технологию WebGL на сервере Nginx. Высокоточные 3D-модели оборудования создавались в программном комплексе Blender с применением специализированного модуля САПР-моделирования (Precision Drawing Tools) строго на основе реальных технических чертежей. Процесс подготовки моделей включал UV-развертку, текстурирование и глубокую полигональную оптимизацию (модификатор Decimate) для обеспечения плавной работы 3D-сцены в реальном времени непосредственно в веб-браузере. Интеграция систем была реализована путем встраивания скомпилированного WebGL-приложения Unity в интерфейс Grafana: виртуальная 3D-модель напрямую запрашивает

	данные из InfluxDB по HTTP-протоколу и в режиме реального времени отображает актуальную телеметрию (энергопотребление, температуру, влажность) на соответствующих агрегатах, таких как миксеры и расстоечные шкафы. Данный подход обеспечил глубокий пространственный контекст, позволяя операторам мгновенно и визуально локализовать производственные проблемы на цифровой копии цеха, что формирует надежный фундамент для дальнейшего предиктивного анализа и оптимизации. **5.3. Ожидаемое:** Разработка математических моделей оптимизации. **Результат:** На основе результатов имитационного моделирования разработана математическая модель оптимизации производственных расписаний, формализованная как задача гибридной потоковой линии (Hybrid Flow Shop Problem). Для решения задачи применен метод программирования в ограничениях с использованием солвера CP-SAT из библиотеки Google OR-Tools. В математическую модель интегрированы строгие технологические ограничения, специфика батчевой обработки хлебопекарного производства и критические временные окна (минимальное ожидание и максимальная задержка между этапами для предотвращения порчи тестовых заготовок). Тестирование алгоритма, реализованного в системе Schedule Planner на языке Python, на реальных заказах подтвердило его высокую эффективность по сравнению с базовым методом планирования FIFO. Оптимизация позволила сократить общее время производственного цикла (makespan) на 24,4 % (с 283 до 214 минут) и уменьшить среднее межоперационное ожидание на 51,2 %. Алгоритм успешно сбалансировал поток, снизив пиковую загрузку печей с 92 % до 78 %, и полностью исключил нарушения технологических ограничений (0 нарушений против 3 в базовой модели). При выявленной оптимальной конфигурации оборудования (три расстоечных шкафа, две печи, шесть охладителей) модель обеспечивает максимальный выход до 29 750 единиц продукции за 48 часов, способствуя снижению энергозатрат на 20 %. Разработанный оптимизатор формирует основу для динамического автоматизированного планирования и готов к интеграции с MES-системами. **5.4. Ожидаемое:** Интеграция киберфизической системы и тестирование.

	Результат: В рамках данного этапа осуществлено полномасштабное развертывание и интеграция аппаратно-программного комплекса киберфизической системы в реальных производственных условиях. Произведен физический монтаж 19 унифицированных модулей энергомониторинга (на базе микроконтроллеров ESP32 и промышленного интерфейса RS-485) в изолированных электрощитах на ключевом технологическом оборудовании (печи, расстоечные шкафы, льдогенераторы), а также 5 промышленных датчиков климатического контроля, объединенных в единую измерительную сеть. Центральным узлом агрегации данных выступил Edge-шлюз на базе Raspberry Pi, обеспечивающий прием сообщений по протоколу MQTT, их валидацию, трансформацию и защищенную передачу с применением сквозного шифрования AES-256 (режим GCM) в базу данных временных рядов InfluxDB. Для подтверждения надежности решения проведена программа комплексных приемочных испытаний, включающая 60-суточную непрерывную эксплуатацию под полной производственной нагрузкой. Результаты тестирования подтвердили высочайшую отказоустойчивость: показатель доступности (uptime) составил 99,97 % при полном отсутствии потерь данных, средняя сквозная задержка передачи (latency) не превысила 1,5 секунды, а расхождение измерительных данных с эталонными приборами составило менее 0,1 %. Система продемонстрировала способность к автоматическому восстановлению после имитации сбоев электропитания и успешно обеспечивает потоковую передачу телеметрии в среду визуализации для отображения на 3D-моделях в режиме реального времени, что полностью подтверждает ее готовность к промышленной эксплуатации. **6. Ожидаемое:** Создание удобного пользовательского интерфейса для визуализации данных, аналитики и принятия управленческих решений на основе информации, полученной от цифрового двойника. **Результат:** Фактическое исполнение данного этапа заключалось в разработке и успешном внедрении полнофункционального гибридного интерфейса, объединяющего инструменты управленческого контроля и визуализацию данных. Основой системы стали дашборды Grafana для потоковой телеметрии, интегрированные с InfluxDB и моделями машинного обучения, а также специализированное приложение «Мобильный помощник». Была реализована

	масштабируемая трехслойная архитектура, включающая нижний слой данных с IoT-устройствами, MQTT-брокером и InfluxDB, средний слой обработки с Telegraf, сервисами машинного обучения и REST API, а также верхний слой представления на базе Grafana. Двухнедельное пилотное тестирование системы с участием 47 реальных заказов подтвердило ее стабильность и полную готовность к промышленной эксплуатации. **6.1. Ожидаемое:** Определение требований к интерфейсу. **Результат:** В рамках этого этапа был проведен глубокий анализ и дифференциация потребностей трех целевых групп пользователей: операторов производственных линий, которым требовалась простота и визуальные алерты, инженеров-технологов, нуждающихся в детальной аналитике, и руководителей предприятия, ориентированных на ключевые показатели эффективности и стратегические тренды. Были выделены четыре ключевых сценария использования системы: непрерывный мониторинг в реальном времени, анализ исторических данных, детектирование аномалий и прогнозирование будущих состояний. Для сбора и формализации требований применялся широкий инструментарий, включающий платформу Confluence для ведения базы знаний, Kanban-доску Wekan для управления задачами, Google Forms и Sheets для анкетирования персонала, а также Miro и Balsamiq для создания майнд-карт и низкодетализированных прототипов. Инновационным подходом стало использование low-code платформы Mendix для создания функциональных интерактивных прототипов непосредственно в процессе воркшопов, что существенно повысило качество обратной связи и ускорило процесс валидации требований. **6.2. Ожидаемое:** Разработка прототипов интерфейса. **Результат:** Процесс проектирования строился по спиральной итеративной модели, основанной на принципах Human-Centered Design, с постоянной валидацией решений реальными пользователями. Была спроектирована архитектура edge-computing с использованием шлюзов на базе Raspberry Pi 5 и микроконтроллеров ESP32 для минимизации задержек передачи данных. В ходе итераций были разработаны и эволюционировали специализированные дашборды, такие как панели для контроля качества электроэнергии, детального

	анализа трехфазных счетчиков с отображением дисбаланса фаз и учета реактивной энергии. Для представления информации применялись разнообразные визуализации, адаптированные для промышленного применения, включая line-графики, gauge-панели, heatmap-визуализации и stat-панели. Юзабилити-тестирование прототипов проводилось с применением передовой методологии нейрофеноменологического подхода для глубокого анализа когнитивной нагрузки и пользовательского опыта. **6.3. Ожидаемое:** Разработка пользовательского интерфейса и интеграция с системой цифрового двойника. **Результат:** На базе платформы Mendix было создано приложение «Мобильный помощник», состоящее из нескольких взаимосвязанных модулей. Модуль управления заказами обеспечивает табличное отображение активной производственной очереди с указанием статусов, дат обновления и количества продукции. Модуль оптимизации производства визуально демонстрирует сравнение исходного и оптимизированного времени выполнения заказов, предоставляя рекомендуемую алгоритмами цифрового двойника последовательность производства. Производственная доска агрегирует метрики загрузки технологических линий по типам продукции. Модуль технологических карт содержит оцифрованные рецептуры с детализацией этапов техпроцесса, их таймингом и точной дозировкой необходимых ингредиентов. Была реализована двунаправленная интеграция с цифровым двойником через REST API, что позволяет интерфейсу не только считывать актуальную телеметрию, но и передавать управляющие команды, а также инициировать процессы моделирования. **6.4. Ожидаемое:** Тестирование и отладка интерфейса. **Результат:** Для обеспечения качества было проведено многоуровневое тестирование, охватывающее функциональные, интеграционные, кросс-браузерные проверки, а также оценку юзабилити и регрессионное тестирование. Интеграционные тесты подтвердили высокую скорость работы: телеметрические данные из InfluxDB поступают с задержкой менее одной секунды, а результаты работы моделей машинного обучения отображаются корректно. Результаты юзабилити-тестирования зафиксировали сокращение среднего времени выполнения типовых

	аналитических задач операторами на 51 процент по сравнению с использованием традиционных таблиц Excel. Приемочное тестирование, проведенное в реальных производственных условиях с обработкой 47 заказов и формированием более 200 заданий, завершилось с нулевым количеством критических сбоев. **6.5. Ожидаемое:** Оптимизация производительности. **Результат:** На начальных этапах эксплуатации были выявлены проблемы с производительностью, включая долгую загрузку сложных дашбордов более пяти секунд, длительное создание заказов до четырех-пяти секунд и задержку передачи телеметрии от 1,2 до 1,8 секунды. Для решения этих проблем на уровне Grafana было внедрено кэширование, а в базе данных InfluxDB настроена автоматическая предварительная агрегация исторических данных. На уровне edge-шлюзов Raspberry Pi был внедрен механизм сжатия и предварительной обработки данных. В приложении Mendix были оптимизированы SQL-запросы с устранением проблемы N+1, а также внедрены механизмы пагинации и ленивой загрузки ресурсов. В результате проведенных работ время загрузки дашбордов сократилось до 1,2 секунды, сетевая задержка стабилизировалась на уровне 400-500 миллисекунд, а время отклика интерфейса на действия пользователей составило 1-2 секунды при устойчивой поддержке более 100 одновременных сессий. **7. Ожидаемое:** Проведение опытно-экспериментальных работ по тестированию и валидации цифрового двойника предприятия на реальных данных и сценариях использования. **Результат:** *(на стадии выполнения / запланировано на 2026 год)* **7.1. Ожидаемое:** Подготовка к экспериментам и разработка сценариев использования. **Результат:** *(на стадии выполнения / запланировано на 2026 год)* **7.2. Ожидаемое:** Проведение тестирования в реальных условиях. **Результат:** *(на стадии выполнения / запланировано на 2026 год)*

	7.3. Ожидаемое: Анализ результатов и валидация моделей. **Результат:** *(на стадии выполнения / запланировано на 2026 год)* **7.4. Ожидаемое:** Корректировка моделей и повторное тестирование. **Результат:** *(на стадии выполнения / запланировано на 2026 год)* **8. Ожидаемое:** Поддержка образовательных и научных исследований, создание обучающих стендов для стимуляции производства с использованием искусственного интеллекта и технологий IIoT, разработка виртуальной среды человеко-машинного взаимодействия цифрового двойника с системой поддержки принятия решений. **Результат:** *(на стадии выполнения / запланировано на 2026 год)* **8.1. Ожидаемое:** Разработка учебных материалов и программ. **Результат:** *(на стадии выполнения / запланировано на 2026 год)* **8.2. Ожидаемое:** Создание обучающих стендов. **Результат:** *(на стадии выполнения / запланировано на 2026 год)* **8.3. Ожидаемое:** Разработка виртуальной среды для человеко-машинного взаимодействия. **Результат:** *(на стадии выполнения / запланировано на 2026 год)* **8.4. Ожидаемое:** Обучение и тренинг персонала. **Результат:** *(на стадии выполнения / запланировано на 2026 год)*
Имена и фамилии членов исследовательской группы с их идентификаторами (Scopus Author ID, Researcher ID, ORCID, при наличии) и ссылками на соответствующие профили	1. Амирханова Гульшат Аманжоловна, Scopus Author ID: 57192719131, ORCID ID: 0000-0003-3933-5476, Web of Science Researcher ID: E-2791-2015 2. Кунелбаев Мурат Меркебекович, Scopus Author ID: 56203480200, ORCID ID: 0000-0002-5648-4476 3. Адилжанова Салтанат Альмуханбетовна, Scopus Author ID: 57194443737, ORCID ID: 0000-0003-1768-064X

	4. Мазаков Талгат Жакупович, Scopus Author ID: 56192141700, ORCID ID: 0000-0001-9345-5167 5. Дузбаев Талгат Толеубаевич, ORCID ID: 0009-0006-8281-8616 6. Бельгибаев Бауржан Абдрахимович, Scopus Author ID: 57223978289, ORCID ID: 0000-0002-6857-3775 7. Жайсанова Динара Сайлауовна, Scopus Author ID: 57204395807, ORCID ID: 0000-0002-8116-6111, Web of Science Researcher ID: R-4415-2017 8. Курманбайулы Жомарт 9. Рустемов Алмас Ахметович, ORCID ID: 0009-0009-6970-0746 10. Оспан Асель Галымжанкызы, Scopus Author ID: 57238489800, ORCID ID: 0000-0002-1860-6997 11. Байжанова Дина Ондасыновна, ORCID ID: 0000-0002-6109-8174 12. Газиз Гульнур Газизкызы, Scopus Author ID: 57194443370, ORCID ID: 0009-0008-3586-6556 13. Алипбеки Онгарбек Алипбекулы, Scopus Author ID: 57190942962, ORCID ID: 0000-0001-6205-0490, Web of Science Researcher ID: AAR-2498-2021 14. Тлетай Шолпан Тлетайкызы, Scopus Author ID: 60135631000, ORCID ID: 0000-0003-0219-0015 15. Иса Сабина Жансбайкызы, ORCID ID: 0009-0005-3477-1609 16. Тохтасын Мирас Муратулы, Scopus Author ID: 59651288100, ORCID ID: 0009-0003-8682-8262 17. Амирханов Бауыржан Сайдашевич, Scopus Author ID: 57215412922, ORCID ID: 0000-0002-4915-0347 18. Абдулхамит Назаргожа Хекимтулович, Scopus Author ID: 59669765900, ORCID ID: 0009-0000-1503-3508 19. Айдынулы Азим, Scopus Author ID: 60130714000, ORCID ID: 0009-0000-0176-5919, Web of Science Researcher ID: ONJ-6823-2025 20. Амирханов Алихан Бауыржанулы, Scopus Author ID: 60069183100, ORCID ID: 0009-0003-3708-3153, Web of Science Researcher ID: MIT-0269-2025 21. Раева Алина Арманкызы, ORCID ID: 0009-0001-4257-6919, Web of Science Researcher ID: PJS-3602-2026

	22. Нургазы Томирис Нурматкызы, Scopus Author ID: 59659920000, ORCID ID: 0009-0001-6650-5517 23. Фарузкызы Енлик, ORCID ID: 0009-0001-1030-8266, Web of Science Researcher ID: OUJ-5453-2025 24. Копенов Абай Байболатович, ORCID ID: 0009-0007-4054-1388 25. Юсубова Назлы Видадикызы, ORCID ID: 0009-0006-9843-5732 26. Бектемир Лия Ерболкызы, Scopus Author ID: 60502888100, ORCID ID: 0009-0007-8589-8903 27. Исмаилов Сырым Асылбекулы, Scopus Author ID: 60351985100, ORCID ID: 0009-0009-0634-8765 28. Тойганбаева Назгуль Абеновна, Scopus Author ID: 56069463400, ORCID ID: 0000-0003-2661-8661 29. Сакыпбекова Меруерт Жумабековна, Scopus Author ID: 57207453000, ORCID ID: 0000-0002-6652-1357 30. Адилкызы Шырайлым, ORCID ID: 0009-0001-9306-1763 31. Yang Chenghan, Scopus Author ID: 56176268500, ORCID ID: 0000-0001-7938-6919 32. Huanyu Liu, Scopus Author ID: 26422206700, ORCID ID: 0000-0002-7944-7395 33. Fu Yanwei, Scopus Author ID: 57213791184, ORCID ID: 0000-0002-6595-6893
Использование	Результаты проекта имеют как практическое, так и научно-образовательное применение. В производственной деятельности предприятий пищевой промышленности цифровой двойник используется как инструмент оперативного мониторинга и управления: 17 развёрнутых IIoT-узлов обеспечивают непрерывный сбор данных о параметрах производственного процесса с доступностью 99,97% и точностью измерений свыше 99,26%. Система алгоритмов машинного обучения автоматически выявляет паттерны, аномалии и прогнозирует отклонения до их возникновения. В энергоменеджменте и ресурсосбережении. В образовании и подготовке кадров проект предусматривает создание обучающих стендов для симуляции производственных процессов с использованием ИИ и IIoT, разработку учебно-методических материалов — руководств по созданию и внедрению ЦД в промышленное производство. Это обеспечивает прямую

	интеграцию научных результатов в образовательные программы КазНУ. Тиражируемость решения. Архитектура системы изначально проектировалась с расчётом на адаптацию к смежным отраслям: молочной, фармацевтической и др. промышленности , что многократно расширяет потенциальный рынок внедрения.
Приоритет в сравнении с реальными аналогами	На мировом рынке существует ряд зрелых решений в области цифровых двойников промышленных предприятий — в частности, Siemens MindSphere и Plant Simulation, платформа Dassault Systèmes DELMIA, а также PTC ThingWorx. Однако при детальном сопоставлении данный проект демонстрирует ряд принципиальных преимуществ. Прежде всего, все перечисленные аналоги ориентированы преимущественно на дискретное производство — машиностроение, автомобилестроение, авиакосмическую отрасль — и не имеют специализированных модулей для пищевой промышленности. Настоящий проект создавался непосредственно «от производства», на реальных данных казахстанского хлебопекарного предприятия, что обеспечивает точность моделей и актуальность KPI именно для данной отрасли. Существенным отличием является стоимость внедрения. Барьер входа для западных платформ составляет от 14 до 96 млн тенге, тогда как капитальные затраты на разработанную систему составляют от 3,8 млн тенге — то есть примерно в 10–50 раз ниже при сопоставимом функциональном наполнении. При этом срок окупаемости системы составляет 6 месяцев, тогда как у коммерческих аналогов он, как правило, не опускается ниже полутора-двух лет. Немаловажно и то, что зарубежные платформы построены на проприетарных экосистемах с высокой степенью зависимости от вендора. Разработанная в рамках проекта система основана на открытой архитектуре с применением доступной компонентной базы, что исключает риски технологической зависимости и создаёт условия для независимого развития и локализации решения в Казахстане. Данный проект предусматривает создание обучающих стендов, учебно-методических материалов и интеграцию результатов в образовательные программы КазНУ, что обеспечивает мультипликативный эффект через подготовку инженерных кадров, способных

	самостоятельно развивать и тиражировать подобные решения. Совокупность отраслевой специализации, радикальной стоимостной доступности, технологического суверенитета и образовательной составляющей формирует конкурентный профиль, который не воспроизводится ни одним из существующих коммерческих решений применительно к условиям казахстанского рынка.

Список публикаций с ссылками на них	**КОКСОН** 1. С. Адилжанова, А. Игильманов, Г. Тюлепбердинова, А. Салманова, Г. Амирханова. Применение анализа журналов для выявления dos-атак и определения поведения пользователей в процессе разработки цифрового двойника предприятия пищевой промышленности // Вестник КазАТК. Том 136 № 1 (2025), с. 96-107 https://doi.org/10.52167/1609-1817-2025-136-1-96-107 2. Амирханова Г. А.,Кунелбаев М.,Тюлепбердинова Г.,Амирханов А.,Тохтасын М .,Айдынулы А.,Ишмурзин Т.,Раева А. Обзор литературы о текущих тенденциях и передовых технологиях в области цифровых двойников в пищевой промышленности, «ШҚТУ хабаршысы», 2025, No 1, с.120-130, https://doi.org/10.51885/1561-4212_2025_1_120 3. B.S.Amirkhanov,G.A.Amirkhanova,A.Aidynuly, A.A.Raeva,A.,B.Amirkhanov//OPENTEAMS:AN INTEGRATED OPEN-SOURCE COLLABORATION FRAMEWORK FOR DIGITAL TWIN DEVELOPMENT AND MANAGEMENT // Вестник КазУТБ, т. 3, вып. 28, сентябрь 2025 г. DOI: https://vestnik.kaztbu.edu.kz/index.php/kazutb/article/view/919 4. Б.С.Амирханов,Г.А.Амирханова,А.А. Раева // АГРОӨНЕРКӘСІП САЛАСЫНДАҒЫ ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗДЕР: ТҰЖЫРЫМДАМАЛАР МЕН ПРАКТИКА // Central Asian Economic Review. 2025;(3):199-224. DOI: https://caer.narxoz.kz/jour/article/view/1500 5. Г.А.Амирханова,А.А.Раева,А.Б.Амирханов,Н.Т.Нұрғазы,Д.Е.Ертаева//PYTORCH3D ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ТАҒАМ ӨНЕРКӘСІБІ КӘСІПОРНЫНЫҢ ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗІН ДАМЫТУДА 3D ТЕРЕҢ ОҚЫТУ ПРОЦЕСІН ЖЕДЕЛДЕТУ// Вестник КазАТК, vol. 138, № 3, May 2025. DOI: https://vestnik.alt.edu.kz/index.php/journal/article/view/2761

	6. Г. А. Амирханова, А. С. Адилжанова, М. М. Тохтасын, Т. Г. Жубанышева // ТАҒАМ ӨНЕРКӘСІБІНДЕГІ АҚЫЛДЫ ҚАПТАМА ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ ҚАУІПСІЗДІК ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ: ҚЫСҚАША ШОЛУ // Торайғыров университетінің Хабаршысы, ISSN 2959-068X. Физика, математика және компьютерлік ғылымдар сериясы. № 4, 2025 DOI: https://vestnik-pm.tou.edu.kz/archive/view-pdf/615 7. Дузбаев Т, Мазаков Д. Байжанова,Ш. Джомартова,А. Мазакова,Б. Амирханов,Г. Амирханова,А. Тыныкулова // МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫПЕЧКИ ХЛЕБОБУЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ // Вестник КазУТБ, т. 4, вып. 29, декабрь 2025 г., DOI: https://doi.org/10.58805/kazutb.v.4.29-1261 8. Р. Аманова, Б. Белгібаев, Е.Майлыбаев, Г. Амирханова, Г. Тюлепбердинова // ЕГІСТІКТЕ ҚҰЛПЫНАЙ АУРУЛАРЫН НАҚТЫ УАҚЫТ ТӘРТІБІНДЕ АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН ШЕТКІ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕГІ МОБИЛЬДІ АУЫЛШАРУАШЫЛЫҚ РОБОТЫН ЗЕРТТЕУ // Вестник КазАТК,№6 (141) 2025 DOI: https://doi.org/10.52167/1609-1817 **Scopus** 1. Amirkhanov B., Kunelbayev M., Issa S., Amirkhanova G., Nurgazy T., Zhumasheva A., Alipbeki O. // Enhancing Sustainable Biogas Generation Through a Real-Time Digital Twin of a Modular Bioreactor // Journal of Applied Data Sciences. – 2025. – Vol. 6, No. 4. – P. 2312–2331. **DOI:** http://dx.doi.org/10.47738/jads.v6i4.779 2. Amirkhanov B., Ishmurzin T., Kunelbayev M., Amirkhanova G., Aidynuly A., Tyulepberdinova G. // Digital twins and IIoT: comparison of Prometheus and InfluxDB // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2025. – Vol. 14, No. 5. **DOI:** http://dx.doi.org/10.11591/eei.v14i5.9687

3. Chenghan Yang, Dingkun Zheng, Siming Chen, Madina Mansurova, Baurzhan Belgibaev, Baidong Zhao // AgriPath: a robust multi-objective path planning framework for agricultural robots in dynamic field environments // Front. Plant Sci., 27 November 2025 Sec. Sustainable and Intelligent Phytoprotection 16, 2025 **DOI:** https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2025.1687747/full
4. Jun-Hsiang Yao and Jielin Feng and Xinfang Tian and Kai Xu and Gulshat Amirkhanova and Siming Chen. // Beyond the Broadcast: Enhancing VR Tennis Broadcasting through Embedded Visualizations and Camera Techniques // Jul 2025, Arxiv **DOI:** https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.20006
5. Gulshat Amirkhanova, Syrym Ismailov, Alikhan Amirkhanov, Saltanat Adilzhanova, Meiramkul Zhasuzakova, Siming Chen // A Lightweight, End-to-End Encrypted Data Pipeline for IIoT: An AES-GCM Implementation for ESP32, MQTT, and Raspberry Pi // Information 2026, 17(1), 33; 3 January 2026 **DOI:** https://doi.org/10.3390/info17010033
6. Raikhan Amanova, Baurzhan Belgibayev, Madina Mansurova, Madina Suleimenova, Gulshat Amirkhanova, Gulnur Tyulepberdinova // A Lightweight Edge-AI System for Disease Detection and Three-Level Leaf Spot Severity Assessment in Strawberry Using YOLOv10n and MobileViT-S // Computers 2026 15, 63 16 January 2026 **DOI:** https://doi.org/10.3390/computers15010063
7. Bauyrzhan Amirkhanov, Azim Aidynuly, Murat Kunelbayev, Gulshat Amirkhanova, Timur Ishmurzin, and Dinara Zhaisanova, // Evaluation of Databases for Digital Twins and Industrial Internet of Things: A Comparative Analysis // Journal of Advances in Information Technology, Vol. 17, No. 1, pp. 65-74, 2026. **DOI:** https://www.jait.us/show-263-1810-1.html
8. Lin Xuan, Baidong Zhao, Dingkun Zheng, Madina Mansurova, Baurzhan Belgibaev, Gulshat Amirkhanova, Alikhan Amirkhanov, Chenghan Yang // Multi-Objective Optimization and Federated Learning for Agri-Food Supply Chains via Dynamic Heterogeneous Graph Neural Networks // 31 January, Sustainability 2026, 18, 1426 **DOI:** https://doi.org/10.3390/su18031426

	9. Saltanat Adilzhanova, Azim Aidynuly, Gulshat Amirkhanova, Yanwei Fu, Baizhanova Dina // A Comparative Analysis of Machine Learning Models for Anomaly Detection in Industrial Smart Meter Time-Series Data // Information 2026, 17(2), 131; **DOI:** https://doi.org/10.3390/info17020131 10. Bauyrzhan Amirkhanov, Murat Kunelbayev, Gulshat Amirkhanova, Tomiris Nurgazy, Gulnur Tyulepberdinova, Sholpan Tletay // Development of a Digital Twin for a Bakery Line With Predictive Analytics and Adaptive Control Functions // IET Collaborative Intelligent Manufacturing 17 February 2026 **DOI:** https://doi.org/10.1049/cim2.70056 11. Gulshat Amirkhanova, Nazly Yusubova, Bauyrzhan Amirkhanov, Meruyert Sakypbekova, Chen Siming // Closed-Loop Digital Twin for Energy-Efficient Scheduling in Food Manufacturing Systems // Information 2026, 17(2), 195; 13 February 2026 **DOI:** https://doi.org/10.3390/info17020195 12. Gulshat Amirkhanova, Shyrailym Adilkyzy, Bauyrzhan Amirkhanov, Dina Baizhanova, Siming Chen // A Digital Twin Architecture for Integrating Lean Manufacturing with Industrial IoT and Predictive Analytics // Information 2026, 17, 196, 13 February 2026 **DOI:** https://doi.org/10.3390/info17020196 13. Saltanat Adilzhanova, Aigerim Rakhysh 1, Murat Kunelbayev, Gulshat Amirkhanova, Dana Sybanova // Digital Representations in IoT: Cryptographic Tools for Improved Security // Journal of Advances in Information Technology, Vol. 17, No. 2, 2026 **DOI:** https://www.jait.us/show-264-1834-1.html 14. Gulshat Amirkhanova, Bauyrzhan Amirkhanov, Miras Tokhtassyn, Murat Kunelbayev, Alina Raeva1, Onggarbek Alipbeki // Edge-Based Digital Twin Architecture for SME Energy Moni-toring: A Hypothesis-Driven Empirical Validation in Food Manufacturing // Chinese Science Bulletin, Volume 71, Issue 02, February, 2026 **DOI:** https://www.kexuetongbao-csb.com/article/edge-based-digital-twin-architecture-for-sme-energy-moni-toring-a-hypothesis-driven-empirical-validation-in-food-manufacturing
Информация о патентах	1. Патент на полезную модель Республики Казахстан № 10232, МПК G01F 17/00. Система для определения уровней нефтепродуктов и воды в резервуарах / Б.С. Амирханов, М.М. Кунелбаев, Г.

	Тюлепбердинова, А.Б. Амирханов, Г.А. Амирханова; заявитель и патентообладатель Амирханова Гульшат Аманжоловна. – № 2025/0001.2; заявл. 02.01.2025; опубл. 21.02.2025, Бюл. № 8. URL: https://gosreestr.kazpatent.kz/Utilitymodel/Details?docNumber=415575 2. Патент на полезную модель Республики Казахстан № 10611, МПК G01H 1/00. Датчик вибрации / М.М. Кунелбаев, Б.С. Амирханов, Г.А. Тюлепбердинова, А.Б. Амирханов, М.М. Тохтасын; заявитель и патентообладатель Амирханова Гульшат Аманжоловна. – № 2025/0419.2; заявл. 15.03.2025; опубл. 23.05.2025, Бюл. № 21. URL: https://gosreestr.kazpatent.kz/Utilitymodel/DownLoadFilePdf?patentId=421136&lang=ru 3. Патент на изобретение Республики Казахстан № 37682. Устройство для измерения стресса / Г.А. Тюлепбердинова, М.М. Кунелбаев, Г.А. Амирханова; заявитель и патентообладатель Тюлепбердинова Гульнур - № 2024/0783.1; заявл. 22.09.2024; опубл. 12.12.2025, Бюл. № 50. URL: https://gosreestr.kazpatent.kz/Invention/Details?docNumber=407669 4. Патент на полезную модель Республики Казахстан № 11897 / Узел верификации команд цифрового двойника на этапе термообработки / Адилжанова Салтанат Альмуханбетовна, Прокопович-Ткаченко Дмитрий Игоревич, Амирханова Гульшат Аманжоловна, Алипбеки Онгарбек Алипбекулы, Амирханов Алихан Бауыржанулы; патентообладатель Амирханова Гульшат Аманжоловна – № 2025/1569.2; заявл. 15.10.2025; опубл. 13.03.2026, Бюл. № 10. URL: https://gosreestr.kazpatent.kz/Utilitymodel/Details?docNumber=438044 5. Патент на полезную модель Республики Казахстан № 11895 / Модуль аутентификации цифрового двойника на основе хеш-идентификаторов производственных циклов / Прокопович-Ткаченко Дмитрий Игоревич, Адилжанова Салтанат Альмуханбетовна, Амирханова Гульшат Аманжоловна, Амирханов Алихан Бауыржанулы; патентообладатель Амирханов

	Алихан Бауыржанулы – № 2025/1561.2; заявл. 14.10.2025; опубл. 13.03.2026, Бюл. № 10. URL: https://gosreestr.kazpatent.kz/Utilitymodel/Details?docNumber=437913 6. Патент на полезную модель Республики Казахстан № 11896 / Система контроля целостности рецептурных данных / Адилжанова Салтанат Альмуханбетовна, Прокопович-Ткаченко Дмитрий Игоревич, Амирханова Гульшат Аманжоловна, Абдулхамит Назаргожа Хекимтулович; патентообладатель Амирханова Гульшат Аманжоловна; – № 2025/1563.2; заявл. 14.10.2025; опубл. 13.03.2026, Бюл. № 10. URL: https://gosreestr.kazpatent.kz/Utilitymodel/Details?docNumber=437918 7. Патент на полезную модель Республики Казахстан № 11920 / Система автономной криптографической защиты и контроля целостности данных цифрового двойника хлебопекарной линии / Адилжанова Салтанат Альмуханбетовна, Прокопович-Ткаченко Дмитрий Игоревич, Амирханов Алихан Бауыржанулы, Амирханова Гульшат Аманжоловна; патентообладатель Амирханова Гульшат Аманжоловна. – № 2025/1564.2; заявл. 14.10.2025; опубл. 20.03.2026. URL: https://gosreestr.kazpatent.kz/Utilitymodel/Details?docNumber=437921