

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.САТПАЕВА»

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Школа транспортной инженерии и логистики им.Тынышбаева
Кафедра «Логистика»

Әбдіқаппаров Айболат Тасболатұлы

Оптимизация цепей поставок в эпоху цифровой трансформации.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7М11302 – Логистика

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Школа транспортной инженерии и логистики им.Тынышбаева
(наименование института)

УДК 656.2.073

На правах рукописи

Әбдіқаппаров Айболат Тасболатұлы

(Ф.И.О. обучающегося)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ (ПРОЕКТ)

На соискание академической степени магистра

Название диссертации Оптимизация цепей поставок в эпоху цифровой
трансформации.

Направление подготовки 7М11302 – Логистика
(шифр и наименование образовательной программы)

Научный руководитель
к.т.н., ассоциированный профессор

Избаирова А.С.
(ученая степень, звание)
подпись Ф.И.О.
«09» 06 20 25 г.

Рецензент

И.о. доцента, кандидат экономических
наук

Кажмуратова А.К.
(ученая степень, звание)
подпись Ф.И.О.
«09» 06 20 25 г.

Норм контроль
магистр, к.т.н., ассоциированный
профессор

Болатқызы С.
(ученая степень, звание)
подпись Ф.И.О.
«11» 06 20 25 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Руководитель направления
«Логистика»
к.т.н., ассоциированный
профессор

Бектилезов А.Ю.
(ученая степень, звание)
подпись Ф.И.О.
«12» 06 20 25 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Школа транспортной инженерии и логистики им.Тынышбаева
Кафедра «Логистика»

7М11302 – Логистика

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель направления
«Логистика», к.т.н.,
ассоциированный профессор
 Муханова Г.С.
« 30 » 01 20 25 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Әбдіқаппаров Айболат Тасболатұлы

Тема: Оптимизация цепей поставок в эпоху цифровой трансформации.

Утверждена приказом Член Правления-Проректор по академическим вопросам Жаутиков Ф.Б.
№548-П/Ө от 04.12.2023г

Срок сдачи законченной диссертации « 30 » 05 20 25 г.

Исходные данные к магистерской диссертации:

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) Теоретическое обоснование цифровизации логистических цепочек поставок, анализ концепции «Индустрия 4.0» и современных подходов к цифровой трансформации логистики в промышленности.
- б) Обзор ключевых цифровых технологий (IoT, AI, блокчейн, предиктивная аналитика и др.), применимых к управлению цепочками поставок, и анализ их влияния на эффективность логистических процессов.
- в) Исследование цифровой трансформации логистической системы промышленного предприятия на примере Heidelberg Materials: описание внедрённых решений, построение аналитической модели и оценка операционно-финансовых эффектов.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

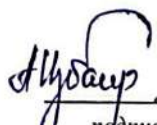
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Понятия цифровизации, логистики 4.0 и цифровых цепочек поставок; анализ концепции Индустрия 4.0 и её влияние на логистику.	Февраль 2024	Внесено Албаир
Обзор IoT, ИИ, Big Data, блокчейна и других технологий; их применение в цепочках поставок.	Июнь 2024	Внесено Албаир
Построение модели цифровой цепочки поставок; оценка операционных и финансовых эффектов внедрения.	Март 2025	Внесено Албаир

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию
с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименование разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Норм контролер	Болаткызы С., к.э.н, ассоциированный профессор	14.06.2025	Батм

Научный руководитель

 Избаева А.С.
подпись Ф.И.О.

Задание принял к исполнению обучающийся

 Абдіқаппаров А.Т.
подпись Ф.И.О.

Дата

« 30 » 01 2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ.....	11
1.1 Основные положения	11
1.2 Определения ключевых понятий	12
1.3 Этапы и подходы по внедрению цифровизации	15
2 ИНДУСТРИЯ 4.0 В ЛОГИСТИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ И ЦЕПОЧКАХ ПОСТАВОК.....	21
2.1 Основные положения.....	21
2.2 Анализ технологий Индустрии 4.0 в логистике.....	23
2.3 Критический анализ и проблемы внедрения технологий Индустрии 4.0 в логистике.....	28
3 ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ «Industry 4.0» В ЦЕМЕНТНОЙ ОТРАСЛИ.....	32
3.1 Основные положения.....	33
3.2 Case Study: Цифровая трансформация цепочек поставок в Heidelberg Materials.....	34
3.3 Финансовые эффекты цифровизации цепочек поставок в компании Heidelberg Materials	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	52

АННОТАЦИЯ

Объем магистерской диссертации: 52 страниц, включая 11 иллюстраций и 5 таблицы. Использовано 25 источников.

Ключевые слова: цифровизация, логистика 4.0, Индустрия 4.0, цифровая цепочка поставок, киберфизические системы, предиктивная аналитика, цементная промышленность.

Объектом исследования в магистерской диссертации является цифровизация цепочек поставок в промышленности с акцентом на цементную отрасль. Работа раскрывает теоретические основы цифровой трансформации логистики в контексте концепции «Индустрия 4.0», рассматривает ключевые технологии (IoT, ИИ, блокчейн, киберфизические системы) и их синергетическое влияние на производственные и логистические процессы. Особое внимание уделяется кейс-анализу компании Heidelberg Materials, где продемонстрированы конкретные финансовые и операционные эффекты внедрения цифровых решений: рост оборачиваемости, снижение издержек и повышение устойчивости. Диссертация содержит практические рекомендации по внедрению цифровых платформ, аналитических систем и предиктивных моделей управления.

АНДАТПА

Магистрлік диссертацияның көлемі: 52 бет, оның ішінде 11 иллюстрация және 5 кесте. Барлығы 25 дереккөз пайдаланылған.

Негізгі сөздер: цифрландыру, логистика 4.0, индустрия 4.0, цифрлық жабдықтау тізбегі, киберфизикалық жүйелер, болжамдық талдау, цемент өндірісі.

Бұл магистрлік диссертацияда өндірістегі жабдықтау тізбектерін цифрландыру мәселелері қарастырылады. Негізгі назар Индустрия 4.0 тұжырымдамасына сай логистиканы трансформациялау және оның цемент өнеркәсібіне ықпалына аударылады. Heidelberg Materials компаниясының мысалында цифрлық шешімдерді енгізу нәтижесінде қол жеткізілген қаржылық және операциялық көрсеткіштер талданады. IoT, жасанды интеллект, блокчейн және киберфизикалық жүйелердің ықпалдасуы арқылы логистикалық тиімділікті арттыру жолдары қарастырылған. Диссертацияда нақты ұсыныстар мен цифрлық құралдарды кезең-кезеңімен ендіру бойынша әдістемелік негіздер ұсынылған.

ABSTRACT

Volume of the master's thesis: 52 pages, including 11 illustrations and 5 tables. A total of 25 sources were used.

Keywords: digitalization, logistics 4.0, Industry 4.0, digital supply chain, cyber–physical systems, predictive analytics, cement industry.

This master's thesis explores the digital transformation of supply chains with a focus on the cement industry. It investigates the theoretical underpinnings of Industry 4.0 in logistics, emphasizing key technologies such as IoT, artificial intelligence, blockchain, and cyber–physical systems. A case study of Heidelberg Materials demonstrates the practical implementation and measurable impact of digital tools, including increased inventory turnover, reduced logistics costs, and enhanced operational resilience. The work offers strategic and technical recommendations for the phased adoption of integrated digital platforms and predictive analytics in industrial supply chains.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях четвёртой промышленной революции (Индустрия 4.0) процессы цифровизации проникают во все сферы экономики, в том числе в логистику и управление цепочками поставок. Интенсивное развитие цифровых технологий, таких как интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (AI), блокчейн и киберфизические системы, трансформирует традиционные подходы к логистике, изменяя способы планирования, мониторинга и координации материальных, информационных и финансовых потоков.

Особую актуальность данная тема приобретает в промышленном производстве, где цепочки поставок отличаются высокой сложностью, множественностью участников, территориальной распределённостью и критической зависимостью от точности и своевременности поставок. Цементная промышленность, как одна из ключевых отраслей строительного комплекса, испытывает необходимость в цифровой трансформации логистики с целью повышения устойчивости, прозрачности и эффективности бизнес-процессов.

В настоящее время крупные международные и национальные производители цемента активно внедряют цифровые решения для управления логистикой: мониторинг в реальном времени, предиктивная аналитика, автоматизация склада и транспорта, блокчейн для отслеживания происхождения сырья. Примером успешного внедрения служит компания Heidelberg Materials, внедрившая IoT – платформы и цифровые дашборды для управления поставками, что позволило значительно сократить издержки и улучшить клиентский сервис.

Несмотря на активное развитие цифровых технологий, существует недостаток систематизированных исследований, посвящённых вопросам цифровизации именно в контексте промышленных логистических цепочек. Особенно актуальны такие исследования для Казахстана, где промышленность играет ключевую роль в ВВП страны, а уровень цифровой зрелости предприятий остаётся неравномерным.

Актуальность темы исследования – в условиях четвёртой промышленной революции (Индустрия 4.0) процессы цифровизации проникают во все сферы экономики, в том числе в логистику и управление цепочками поставок. Интенсивное развитие цифровых технологий трансформирует традиционные подходы к логистике, повышая эффективность, прозрачность и устойчивость цепочек поставок, что особенно актуально для промышленности и цементной отрасли.

Цель исследования – провести комплексный анализ цифровизации цепочек поставок в промышленности на примере цементной отрасли и сформулировать практические рекомендации по применению цифровых технологий.

Задачи исследования – определить теоретические основы цифровизации логистики и концепции логистики 4.0; проанализировать роль современных цифровых технологий (IoT, AI, блокчейн и др.) в логистике; изучить мировой и

казахстанский опыт цифровой трансформации цепочек поставок; провести кейс–анализ деятельности Heidelberg Materials и её логистической цифровизации.

Объект исследования – логистические процессы в промышленных цепочках поставок.

Предмет исследования – технологии цифровизации и их влияние на управление логистикой.

В работе использован комплекс методов – системный анализ, сравнительный анализ, кейс–метод, методы визуализации и обработки данных.

Научная новизна работы заключается – в системной интерпретации влияния цифровых технологий на логистику цементной отрасли, а также в выявлении особенностей и эффектов их внедрения.

Практическая значимость работы состоит – в возможности использования предложенных решений промышленными предприятиями Казахстана для повышения конкурентоспособности, устойчивости и прозрачности цепочек поставок.

Информационная база исследования – официальные отчёты компаний, научные публикации, отраслевые исследования, статистические данные и кейс–анализ Heidelberg Materials.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ

1.1 Основные положения

В современных условиях глобальные цепочки поставок функционируют в условиях высокой неопределённости и усложняющихся требований потребителей. Одним из ключевых трендов развития логистики и управления поставками стала цифровизация – внедрение передовых информационных технологий в бизнес – процессы цепей поставок. Появление новых цифровых технологий в рамках четвёртой промышленной революции (Индустрии 4.0) позволило вывести управление цепочками поставок на качественно новый уровень эффективности и гибкости.

Цифровая трансформация цепей поставок рассматривается как необходимое условие обеспечения конкурентоспособности, устойчивости и адаптивности бизнеса в долгосрочной перспективе. Согласно исследованию Центра глобального предприятия (Center for Global Enterprise), переход к цифровым цепочкам поставок способен в среднем привести к снижению закупочных затрат примерно на 20%, уменьшению общих операционных издержек цепи на 50% и одновременному росту выручки компании примерно на 10%. Эти данные наглядно демонстрируют значимость цифровизации для повышения производительности и стоимости, создаваемой цепями поставок.

В последние десятилетия глобальные цепочки поставок претерпевают значительные изменения, вызванные внешними факторами – возрастанием неопределённости, усложнением требований потребителей и глобализацией рынков, а также внутренними трансформациями, связанными с внедрением новых технологий. Одним из ключевых и активно исследуемых направлений в логистике и управлении поставками является цифровизация – процесс интеграции современных информационных технологий в бизнес–процессы цепей поставок [1].

В научных исследованиях цифровизация рассматривается как фундаментальная составляющая четвёртой промышленной революции (Industry 4.0), включающей применение Интернета вещей (IoT), больших данных (Big Data), искусственного интеллекта (ИИ), облачных вычислений и цифровых двойников [2]. Эти технологии обеспечивают создание интеллектуальных и гибких цепочек поставок, способных быстро реагировать на изменения спроса, перебои в поставках и внешние риски [3].

Цифровая трансформация цепей поставок рассматривается не только как инструмент повышения операционной эффективности, но и как ключевой фактор устойчивости и адаптивности бизнеса в условиях высокой волатильности рынков и нестабильности глобальной экономики [4]. По данным Центра глобального предприятия, внедрение цифровых технологий позволяет снижать закупочные и операционные издержки и увеличивать выручку компаний [5].

Вместе с тем, исследователи отмечают, что успешная цифровая трансформация требует комплексного подхода с учётом организационных, технологических и культурных аспектов [6]. Анализ моделей цифровой зрелости и факторов успешного внедрения цифровых решений подчёркивает важность развития компетенций персонала и изменения управленческих процессов [7].

Отдельное внимание уделяется роли цифровых технологий в повышении устойчивости цепочек поставок к внешним вызовам, таким как пандемии, геополитические конфликты и кризисы [8]. Интеллектуальные инструменты позволяют прогнозировать риски, разрабатывать сценарии реагирования и оперативно минимизировать последствия, обеспечивая непрерывность бизнеса [9].

Таким образом, цифровая трансформация цепочек поставок – это комплексный процесс, включающий технологические, организационные и стратегические аспекты, что требует глубокого теоретического изучения и системного анализа. Обзор существующих исследований и выявление ключевых тенденций цифровизации являются важным этапом для понимания современных вызовов и возможностей в управлении цепями поставок в эпоху Industry 4.0.

1.2 Определения ключевых понятий

Цепочка поставок – это совокупность связанных бизнес-процессов и контрагентов, участвующих в движении товаров и услуг от исходных поставщиков сырья до конечных потребителей.

Она включает в себя поставщиков, производителей, дистрибьюторов, логистических операторов, розничные сети и других участников, объединённых потоками материалов, информации и финансов.

Управление цепочкой поставок (supply chain management) нацелено на координацию этих потоков для обеспечения своевременного и экономичного удовлетворения спроса потребителей.

Цифровизация в общем смысле означает внедрение цифровых технологий для преобразования и оптимизации бизнес-моделей, процессов и продуктов.

В контексте логистики и SCM цифровизация предполагает переход от традиционных, основанных на бумажных носителях и человеческом факторе операций, к управлению, основанному на данных, современных информационных системах и автоматизированных решениях.

Важно различать «оцифровывание» (digitization) – перевод информации из аналоговой формы в цифровой, и «цифровую трансформацию» (digital transformation) – комплексное переосмысление бизнес-процессов и моделей за счёт возможностей, предоставляемых цифровыми технологиями.

В практическом употреблении под цифровизацией цепочки поставок чаще всего понимается поэтапный процесс внедрения цифровых технологий в процессы планирования, снабжения, производства, складирования,

транспортировки и распределения товаров, что ведет к радикальному повышению прозрачности, скорости и адаптивности всей цепи поставок.

Цифровая цепочка поставок – это концепция организации децентрализованного и распределенного производства и дистрибуции, при которой материальные потоки на всех этапах сопровождаются связанными с ними информационными потоками, отражающими текущее состояние системы в режиме реального времени [10].

Получаемые в реальном времени данные используются для принятия оперативных и стратегических управленческих решений на основе фактической обстановки.

Иными словами, цифровая цепочка поставок интегрирует все звенья и процессы с помощью информационных технологий, превращая традиционную линейную модель поставок в единую взаимосвязанную цифровую экосистему [10].

Такая экосистема характеризуется полной прозрачностью для всех участников (поставщиков, производителей, логистических провайдеров, клиентов и др.), высоким уровнем автоматизации операций и возможностью гибко перенастраивать процессы под изменяющиеся условия внешней среды.

Определяющие черты цифровой (или «умной») цепочки поставок проявляются в сравнении с традиционной. Традиционная логистика и цепи поставок, как правило, ригидные, фрагментированы и опираются на линейную последовательность операций, часто выполняемых вручную.

Цифровая логистика, напротив, отличается динамичностью, гибкостью и высокой степенью интеграции процессов.

В таблице 1 ниже приведено сравнение традиционной и цифровой моделей управления поставками по ряду ключевых параметров.

Традиционные цепочки работают по фиксированным правилам на основе исторических данных, тогда как цифровые цепочки функционируют в режиме реального времени и способны адаптироваться к изменениям.

Структура традиционной цепочки поставок носит линейный характер (последовательная передача продуктов от одного звена к другому), тогда как цифровая цепь представляет собой сеть с множеством взаимосвязей и обратных связей между участниками.

Если раньше различные участники пользовались изолированными ИТ-системами, то в цифровой экосистеме происходит бесшовная интеграция данных между информационными системами (ИТ) и операционными технологиями (ОТ) на производстве [12].

Кроме того, традиционные цепочки поставок реагируют на проблемы и сбои с запозданием, требуя значительных усилий для выявления причин, – напротив, в цифровой цепочке за счет обмена данными о качестве и ходе процессов с поставщиками проблемы могут прогнозироваться и устраняться проактивно.

Таблица 1 – сравнение традиционной и цифровой моделей управления поставками по ряду ключевых параметров

Параметр	Традиционная модель управления поставками	Цифровая модель управления поставками.
Уровень прозрачности	Ограниченная, часто отсутствует сквозная видимость	Высокая, данные доступны в реальном времени для всех участников благодаря IoT (Internet of Things), RFID, GPS–трекингу
Скорость обработки данных	Медленная, ручная обработка, бумажный документооборот	Быстрая, автоматизированный сбор и анализ данных с использованием Big Data, облачных платформ (AWS, Azure)
Точность прогнозирования	Низкая, основывается на исторических данных и интуиции	Высокая, применение аналитики, искусственного интеллекта (ИИ), машинного обучения (ML) и SAP Integrated Business Planning (SAP IBP)
Гибкость и адаптивность	Низкая, сложное внесение изменений	Высокая, оперативное реагирование благодаря цифровым платформам с функциями адаптивного планирования и управления изменениями (SAP S/4HANA, Oracle SCM Cloud)
Уровень автоматизации	Минимальный, большая доля ручного труда	Высокий, автоматизация процессов с помощью Robotic Process Automation (RPA), ERP–систем (SAP, Microsoft Dynamics)
Взаимодействие с партнерами	Ограниченное, коммуникация часто по телефону или email	Интегрированные платформы и совместные цифровые решения, такие как EDI (Electronic Data Interchange), платформы типа Ariba Network, Coupa
Управление рисками	Ручное выявление и реагирование на риски	Проактивное управление рисками с использованием аналитики в реальном времени, мониторинга через системы Control Tower, предиктивной аналитики (Power BI, Tableau)
Затраты на управление	Часто выше из-за неэффективности и бумажной работы	Снижение затрат благодаря автоматизации и оптимизации процессов с использованием Lean Digital, цифровых двойников (Digital Twins)
Использование данных	Разрозненные данные, отсутствие единой базы	Централизованное хранение и обработка больших данных в облачных хранилищах (Snowflake, Google BigQuery)
Отчетность и контроль	Ручное формирование отчетов, низкая оперативность	Автоматизированные дашборды и отчеты в режиме реального времени с использованием BI–инструментов (Power BI, Tableau, Qlik Sense)

Примечание – составлено автором на основании источника [11]

Решения в традиционной логистике в основном принимаются людьми (менеджерами) на основе ограниченной информации, тогда как в цифровой логистике все чаще решения принимаются автоматически машинами (алгоритмами ИИ) под надзором специалистов [12].

Цифровая цепочка ориентирована на конечную ценность для клиента: она охватывает не только собственно производственно-логистические операции, но и взаимодействие с потребителем, персонализацию предложения, сервисное сопровождение продукта.

В целом, по сравнению с традиционным подходом, цифровая цепочка поставок обеспечивает более высокую прозрачность, скорость и про активность процессов, что оптимизирует процессы в цепочке поставок.

1.3 Этапы и подходы по внедрении цифровизации

Переход от традиционной модели управления цепями поставок к цифровой является сложным многоэтапным процессом, требующим продуманной стратегии и поэтапной реализации. Практический опыт ведущих компаний свидетельствует, что успешная цифровая трансформация цепочки поставок предполагает последовательное выполнение ряда шагов.

Ниже приведены основные этапы и подходы к цифровизации, которые рекомендуется учитывать при разработке дорожной карты трансформации:

Формирование видения и целей цифровизации. На начальном этапе руководство компании определяет четкое видение целевого состояния цепочки поставок после цифровой трансформации. Видение должно соотноситься с общей бизнес – стратегией предприятия. К ключевым целям относятся, как правило, ускорение и улучшение обоснованности принимаемых решений, автоматизация рутинных операций, повышение прозрачности процессов и уровня сервиса для клиентов.

На данном этапе проводится оценка текущих ресурсов и систем: анализируются существующие информационные системы и технологии, выявляются пробелы между имеющимися возможностями и требуемыми для достижения поставленных целей. Также оценивается готовность персонала – достаточно ли у команды навыков для работы в новой цифровой среде, требуется ли обучение или привлечение экспертов.

Результатом этапа становится дорожная карта цифровизации, определяющая приоритетные направления изменений.

Интеграция данных и процессов. Одним из ключевых условий «оцифровки» цепочки поставок является объединение разрозненных потоков данных и функций на единой платформе. Необходимо обеспечить сквозную интеграцию – связность процессов планирования, закупок, производства, складирования, доставки и продаж в единой информационной системе.

На практике этот этап включает внедрение современных ERP/SCM-платформ или облачных экосистем, которые позволяют в реальном времени получать панорамную видимость (end-to-end visibility) всей цепочки поставок – от состояния запасов на складе до положения груза в пути. Повышенная прозрачность процессов обеспечивает основу для их оптимизации: компания может в любой момент времени видеть узкие места, задержки, излишки или дефицит запасов и оперативно принимать меры для балансировки цепочки.

Автоматизация операций и процессов планирования. После интеграции данных следующим шагом становится масштабное внедрение инструментов автоматизации, особенно в областях, где по-прежнему доминирует ручной труд или использование устаревших систем.

В сфере планирования внедряются системы APS (Advanced Planning & Scheduling) с элементами искусственного интеллекта, позволяющие автоматизировать составление прогнозов спроса, планирование закупок и производства. Рутинные и повторяющиеся задачи (оформление заказов, обработка счетов, контроль остатков и пр.) переводятся в автоматический режим с помощью RPA (Robotic Process Automation) и специализированных модулей SCM-систем.

Важно отметить, что автоматизации подлежат прежде всего стандартные, формализованные процессы; сложные нестандартные ситуации все еще требуют участия человека. Этап автоматизации приводит к значительному повышению скорости операций, снижению числа ошибок и высвобождению времени персонала для решения более творческих и аналитических задач.

Использование данных и аналитики для принятия решений. По мере накопления больших объемов данных о процессах (Big Data) особое значение приобретает применение продвинутой аналитики. На данном этапе компании внедряют инструменты Business Intelligence (BI) и прогнозной аналитики, нередко основанные на технологиях искусственного интеллекта и машинного обучения.

Руководители цепей поставок получают доступ к аналитическим панелям с показателями в режиме реального времени, что позволяет обоснованно принимать решения и быстро взаимодействовать с партнерами. Например, анализ текущих и исторических данных спроса дает возможность более точно прогнозировать продажи, избегая ситуаций дефицита или избыточных запасов.

Предиктивные алгоритмы способны заранее выявлять потенциальные сбои (например, прогнозировать задержки поставок из-за погодных условий или риски отказа оборудования на производстве) и сигнализировать о них менеджерам. Таким образом, управление на основе данных (data-driven management) становится центральной практикой цифровой цепочки поставок, заменяя традиционную реактивную модель управлением на основе прогнозов и сценариев «что, если».

Адаптация организации и сотрудников к новым процессам. Технологическая трансформация не будет эффективной без одновременных

организационных изменений. Последний, но критически важный этап – это управление изменениями: обучение персонала новым навыкам, перестройка организационной структуры и процессов под цифровую модель, формирование культуры, поддерживающей инновации.

Все участники цепочки – от линейных сотрудников склада до топ-менеджеров – должны понимать преимущества новых методов работы и быть готовыми следовать обновленным регламентам. Нередко компании создают кросс-функциональные команды по цифровой трансформации, назначают ответственных за изменения (Chief Digital Officer, менеджеров проектов цифровизации) и внедряют систему метрик, отслеживающих прогресс преобразований.

Интеграция технологий, процессов и людей обеспечивает достижение заявленных результатов трансформации. Без должного внимания к человеческому фактору риски сопротивления изменениям и недоиспользования новых инструментов возрастают, что может свести на нет все технические новшества.

Важно отметить, что указанные этапы не обязательно реализуются строго последовательно – во многих случаях компании запускают пилотные проекты цифровизации параллельно на разных участках цепи поставок.

Тем не менее, описанная последовательность отражает логическую структуру цифровой трансформации: от стратегии и подготовки – к технической интеграции – автоматизации – аналитике – и, наконец, к организационным изменениям. Такой подход позволяет минимизировать риски и постепенно наращивать цифровую зрелость компании.

По данным отраслевых опросов, большинство компаний уже находится на тех или иных стадиях этого пути: так, около двух третей организаций заявляют, что имеют детальный план цифровой трансформации своих цепочек поставок, а остальные активно рассматривают такую возможность [13].

Это подчеркивает актуальность и неизбежность цифровизации: конкурировать на рынке без современных цифровых решений в цепочке поставок становится все сложнее.

Практические примеры внедрения: компания Maersk внедрила систему Remote Container Management (RCM) (рисунок 1) для удалённого контроля за рефрижераторными контейнерами по всему миру. Датчики IoT, установленные на около 300 000 контейнеров, передают данные о температуре и состоянии охлаждения груза в режиме реального времени на облачную платформу. Это позволило Maersk снизить убытки от порчи скоропортящихся продуктов и повысить удовлетворённость клиентов.

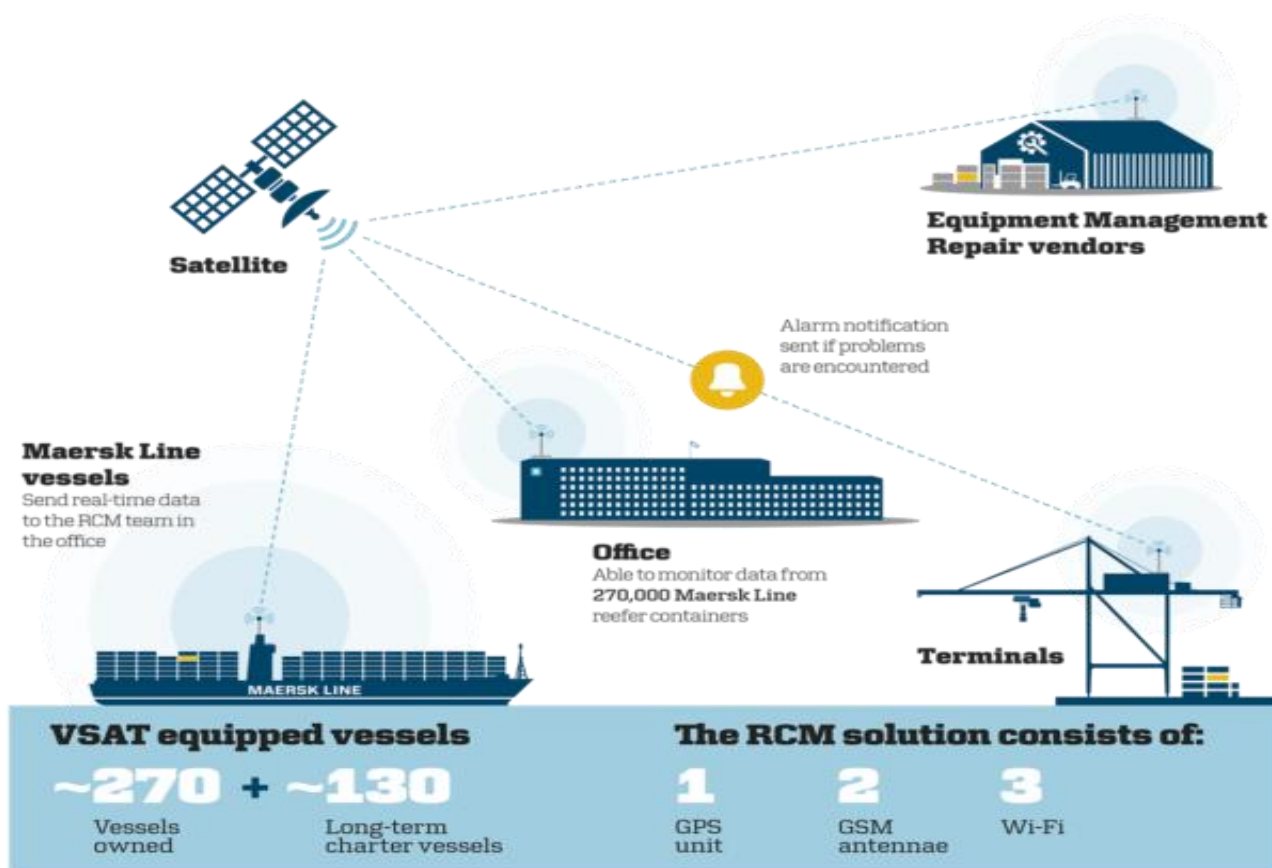


Рисунок 1 – Система работы технологии Remote Container Management
Примечание – составлено на основании литературы [14]

Amazon активно внедряет роботизацию и автономные технологии для оптимизации логистических процессов и повышения эффективности цепочек поставок. С 2012 года, после приобретения Kiva Systems, компания использует мобильных роботов Amazon Robotics (рисунок 2), которые автоматически перемещают стеллажи с товарами к сотрудникам, значительно ускоряя комплектацию заказов и снижая физическую нагрузку на персонал. Благодаря этим роботам складская плотность хранения увеличилась до 50%, а время выполнения заказов сократилось на 30–40%.

Помимо этого, Amazon разрабатывает и внедряет роботизированные руки и манипуляторы, способные сортировать и обрабатывать разнообразные по форме и весу объекты, что дополнительно автоматизирует процессы на складах. Также компания тестирует автономные транспортные средства и дроны (Amazon Prime Air) для последней мили доставки, что позволяет минимизировать время ожидания и затраты на логистику. В совокупности эти технологии обеспечивают Amazon высокий уровень операционной гибкости, масштабируемости и лидерство в области цифровой трансформации логистики.

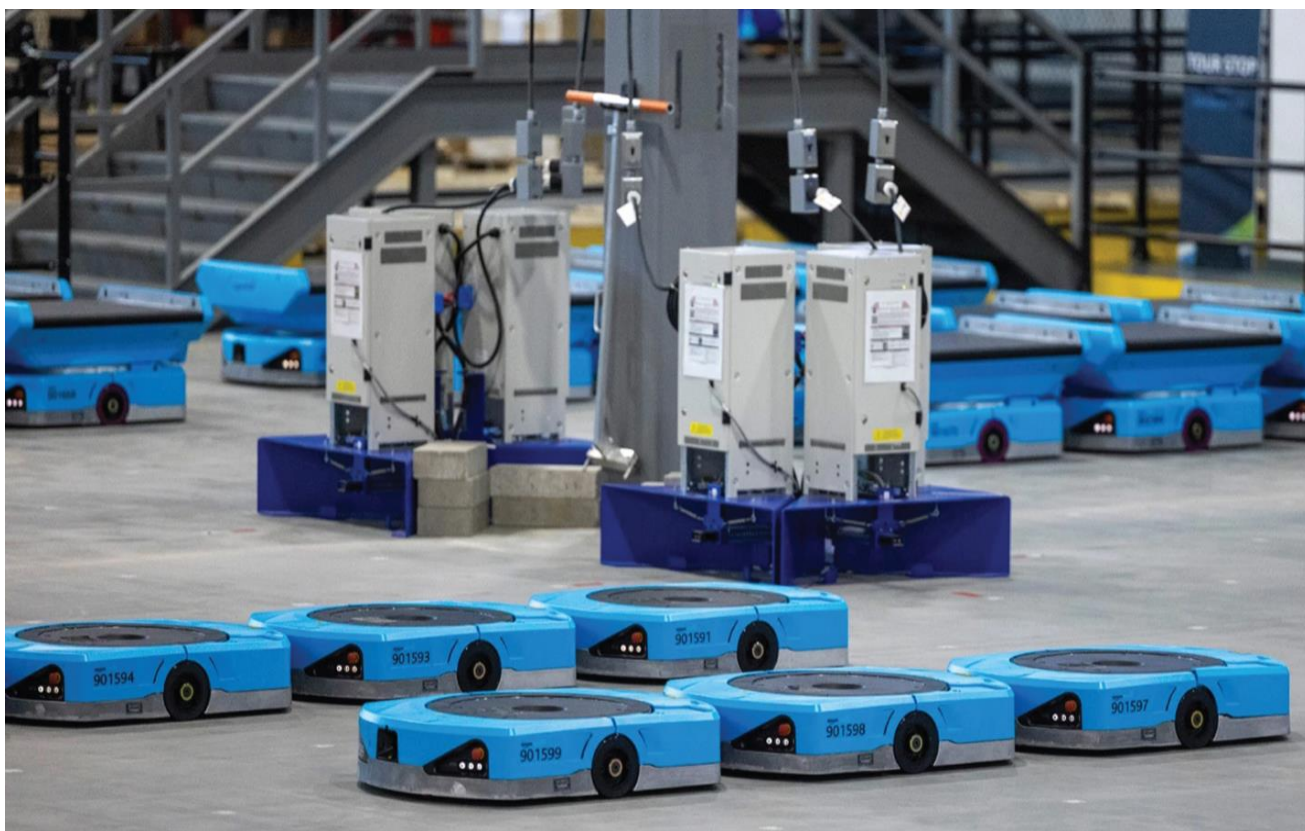


Рисунок 2 – Складские роботы Amazon

Примечание – составлено на основании литературы [15]

Проведённый анализ теоретических основ цифровизации цепочек поставок в первой главе позволяет сделать вывод о том, что цифровая трансформация является ключевым фактором повышения эффективности и устойчивости современных логистических систем. В отличие от традиционных моделей, цифровые цепочки поставок обладают значительно более высокой степенью интеграции и гибкости, что позволяет предприятиям оперативно реагировать на динамичные изменения внешней среды и внутренние сбои. Главной особенностью цифровизации является переход от линейных и фрагментированных бизнес – процессов к единой цифровой экосистеме, обеспечивающей полную прозрачность, автоматизацию и аналитическую поддержку принятия решений.

Этапность и системный подход к внедрению цифровых технологий – от формирования стратегии и оценки готовности организации, через интеграцию данных и автоматизацию процессов, к активному использованию аналитики и искусственного интеллекта – обеспечивают комплексное преобразование всех уровней цепочки поставок. Успешность цифровой трансформации напрямую зависит не только от технических решений, но и от способности компании управлять изменениями, формировать цифровую культуру и развивать компетенции персонала.

Практические примеры внедрения инновационных технологий демонстрируют их значительный потенциал в снижении операционных издержек, улучшении качества сервиса и повышении конкурентоспособности предприятий. Кроме того, цифровизация способствует повышению устойчивости цепочек поставок к рискам и кризисным ситуациям за счёт проактивного мониторинга и предиктивного управления.

Цифровая трансформация цепочек поставок является неотъемлемым элементом современной бизнес – стратегии, направленной на достижение конкурентных преимуществ и долгосрочного развития.

2 ИНДУСТРИЯ 4.0 В ЛОГИСТИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ И ЦЕПОЧКАХ ПОСТАВОК

2.1 Основные положения

Современные логистические системы функционируют в условиях растущей сложности и неопределённости глобальных цепочек поставок. Предприятия сталкиваются с дефицитом и перебоями запасов, задержками доставки, нехваткой рабочей силы и другими проблемами устойчивости цепей поставок. Для обеспечения эффективности и конкурентоспособности требуется комплексный подход к развитию всей цепочки с учётом новейших концепций устойчивого развития (включая принципы ESG) и Индустрии 4.0. Реализация этих подходов позволяет внедрять инновационные и «зелёные» технологии, открывая новые возможности для бизнеса и способствуя достижению целей устойчивого развития. В таких условиях цепочки поставок рассматриваются как интеллектуальные системы, которым необходимо адаптироваться, чтобы выжить. Им требуется по – новому применять устаревшие стратегии управления потоками и повышать свою прозрачность, гибкость, надёжность, устойчивость и масштабируемость.

Концепция «Индустрия 4.0» появилась как ответ на эти вызовы. Термин был изначально предложен группой немецких учёных и озвучен на Ганноверской ярмарке в 2011 г. для обозначения четвертой промышленной революции – коренной цифровой трансформации глобальных цепочек создания ценности с помощью новейших технологий. В частности, Индустрия 4.0 подразумевает техническую интеграцию киберфизических систем (CPS) в производственные и логистические процессы, а также повсеместное использование интернета вещей (IoT) и интернет–сервисов в промышленности. Иными словами, происходит слияние физических потоков материалов с цифровыми данными и сетями, что позволяет в реальном времени контролировать и оптимизировать процессы на всём их протяжении.

На базе этой концепции в сфере логистики появилось понятие «Логистика 4.0», обозначающее применение технологий Индустрии 4.0 для управления логистическими процессами. Логистика 4.0 рассматривается как комплекс технических, технологических и организационных решений, направленных на поддержку и оптимизацию процессов в цепях поставок с помощью цифровизации. Происходит переход от традиционной логистики, ориентированной на оборудование, к логистике, управляемой программными средствами и данными. Логистические системы становятся распределёнными и частично автономными: они состоят из множества подсистем (склады, транспорт, информационные платформы и др.), где участники взаимодействуют друг с другом, обмениваются данными и самостоятельно принимают локальные

решения, стремясь к общим целям цепочки. Таким образом достигается эффект эмерджентности – локальные оптимизации отдельных звеньев приводят к повышению эффективности всей системы. В научной литературе подобные трансформированные цепочки поставок называют также «Цепь поставок 4.0», подчёркивая их эволюцию под влиянием технологий Индустрии 4.0.

В современных условиях цифровая трансформация логистики и управления цепями поставок базируется на интеграции нескольких ключевых технологий, каждая из которых вносит существенный вклад в повышение эффективности и адаптивности цепочек поставок. На рисунок 3 представлен обобщённый анализ распределения влияния основных технологий Industry 4.0 в логистике, включая Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (ИИ), блокчейн, киберфизические системы и роботизацию, а также облачные технологии и аналитика. Такая визуализация позволяет наглядно оценить роль каждого технологического направления и понять, каким образом они взаимодействуют в рамках единой цифровой экосистемы.

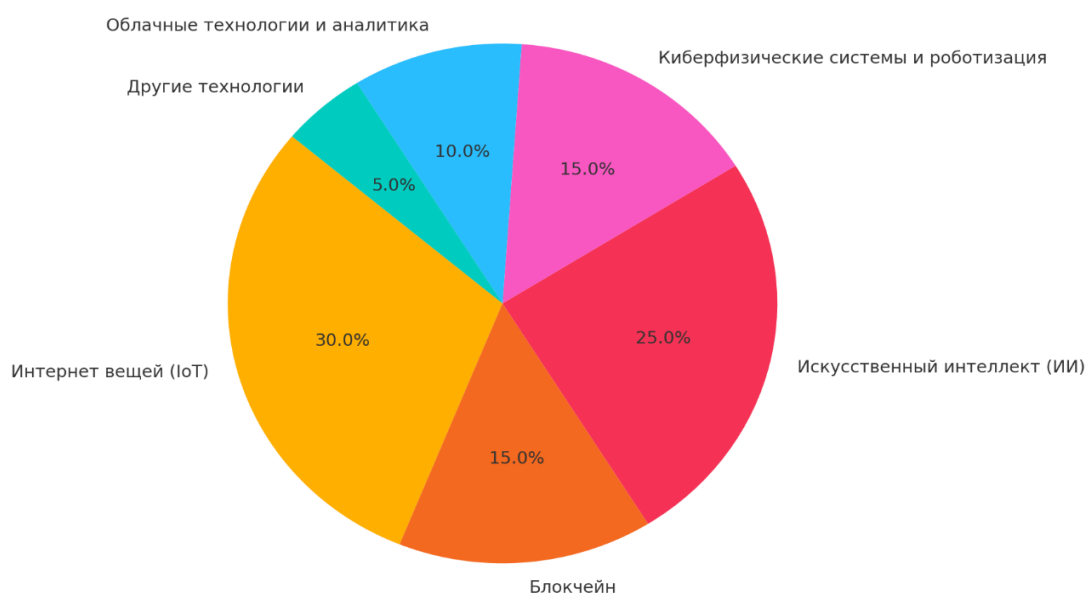


Рисунок 3 – Распределение влияния ключевых технологий Industry 4.0 в логистике, в процентах

Примечание – составлено на основании литературы [16]

В данной главе проводится анализ основных технологий Индустрии 4.0, применяемых в логистическом производстве и управлении цепями поставок, а также рассматриваются практические примеры их внедрения. К ключевым направлениям относятся интернет вещей, блокчейн, искусственный интеллект и киберфизические системы – именно они в значительной мере определяют цифровую трансформацию логистики и формируют основу концепции «Логистика 4.0»

2.2 Анализ технологий Индустрии 4.0 в логистике

Интернет вещей (Internet of Things, IoT) – это сеть физических объектов, таких как датчики, устройства и транспортные средства, оснащённых электронными средствами для сбора, передачи и обработки данных. В логистике IoT используется для организации сквозного мониторинга грузопотоков в реальном времени – начиная с производства и складирования и заканчивая транспортировкой и доставкой конечному потребителю. Датчики, установленные на транспорте и товарах, собирают информацию о местонахождении грузов, условиях перевозки (температура, влажность, вибрация и другие параметры) и техническом состоянии оборудования. Эти данные передаются через различные сети связи – сотовые, спутниковые, Wi-Fi и др. – на облачные платформы или центры обработки, где агрегируются и анализируются.

Архитектура IoT в логистике включает три уровня. Нижний уровень – это слой «вещей», куда входят датчики и трекеры, непосредственно взаимодействующие с физическими объектами. Промежуточный уровень обеспечивает передачу данных через сеть связи, а верхний уровень включает приложения и аналитические сервисы, которые обрабатывают данные и поддерживают принятие решений.

Такое многоуровневое решение даёт возможность получить сквозную прозрачность логистической цепочки (end-to-end visibility). Менеджеры и диспетчеры видят движение товаров на каждом этапе, получают оповещения о задержках или отклонениях параметров и оперативно реагируют на проблемы.

На практике внедрение IoT позволяет существенно улучшить показатели оперативности реагирования на возникающие проблемы в логистике. Так, предприятие, ежемесячно обрабатывающее около 20 000 единиц грузов, сталкивается с существенными издержками из-за задержек. Среднее время устранения логистических инцидентов до внедрения IoT составляет около 10 часов на единицу груза, а средняя стоимость такой задержки достигает 90 евро в час. Подобные задержки приводят к значительным затратам:

Расчёт затрат до внедрения IoT:

$20\,000 \text{ единиц} \times 10 \text{ часов} \times 90 \text{ евро} = 18\,000\,000 \text{ евро в месяц.}$

После внедрения IoT технологии, за счет постоянного мониторинга и быстрого реагирования, среднее время задержек сокращается до 2 часов на единицу груза:

Расчёт затрат после внедрения IoT:

$20\,000 \text{ единиц} \times 2 \text{ часа} \times 90 \text{ евро} = 3\,600\,000 \text{ евро в месяц.}$

Таким образом, экономический эффект от внедрения IoT:

$18\,000\,000 - 3\,600\,000 = 14\,400\,000$ евро в месяц.

Блокчейн – это технология распределённых реестров, которая обеспечивает децентрализованное хранение и верификацию данных о транзакциях. В контексте логистики и управления цепями поставок блокчейн используется для обеспечения прозрачности и прослеживаемости происхождения товаров, автоматизации документооборота и усиления доверия между участниками цепочки. Каждое логистическое событие (отгрузка партии, прохождение таможни, приёмка на складе и т.д.) фиксируется в виде транзакции, добавляемой в распределённый реестр, копии которого хранятся у всех заинтересованных сторон – производителей, перевозчиков, дистрибьюторов, розничных сетей. Записи в блокчейне защищены криптографически и не могут быть изменены задним числом, что исключает фальсификацию данных о движении товара.

Применение блокчейна в логистике решает классические проблемы разрозненности информации и недоверия между участниками. Единая «цепочка блоков» с записями о товаре выполняет роль достоверного источника правды: любой партнёр может проверить, откуда пришёл товар, через какие этапы он прошёл, кем и когда были оформлены сопроводительные документы. Это значительно ускоряет процедуры аудита и проверки соответствия товара требованиям. Например, в продовольственных цепочках поставок блокчейн позволяет мгновенно отследить ферму или партию сырья, от которой произошёл продукт, что критично при отзыве испорченной или опасной продукции. В пилотном проекте компании Walmart по отслеживанию поставок манго с использованием блокчейна время на выяснение происхождения фрукта сократилось с 7 дней до 2,2 секунды, благодаря чему идентификация проблемной партии стала практически мгновенной [18]. Другой известный пример – платформа TradeLens, разработанная Maersk и IBM для цифрового обмена документами в морских перевозках. С помощью блокчейна фиксировались все события с контейнером (погрузка, прибытие в порт, таможня и т.п.), а участники цепи имели общий доступ к этой информации. Это позволило сократить время оборота документов и снизить риск мошенничества с накладными. Хотя проект TradeLens в итоге столкнулся с организационными трудностями, он продемонстрировал потенциал блокчейна в глобальной логистике.

Кроме прослеживаемости, блокчейн открывает возможности для смарт-контрактов – автоматического исполнения соглашений при наступлении заданных условий. В логистике смарт-контракт может автоматически перечислять плату перевозчику, когда система получит подтверждение доставки груза в блокчейне, либо начислять штрафы при нарушении температурного режима перевозки. Таким образом, блокчейн не только повышает прозрачность, но и уменьшает затраты на посредников и бумажный документооборот, ускоряя операционные процессы в цепях поставок. Многие крупные логистические и торговые компании уже экспериментируют с данной технологией, отмечая её

потенциал в повышении доверия между партнёрами и безопасности данных в распределённых цепочках поставок.

Экономическая эффективность блокчейна проявляется в сокращении времени и затрат на проведение расследований инцидентов с товарами. Например, компания Walmart в ходе пилотного проекта по отслеживанию манго сократила время определения происхождения товара с 7 дней до 2,2 секунд. Стоимость ежедневного расследования инцидентов до внедрения блокчейна составляла около 500 евро:

Расчёт затрат до внедрения блокчейна:

$7 \text{ дней} \times 500 \text{ евро} = 3\,500 \text{ евро}$ на одно расследование.

Использование блокчейна практически исключает эти расходы. При 120 подобных инцидентах в год экономия достигает:

$120 \times 3\,500 \text{ евро} = 420\,000 \text{ евро}$ в год.

Искусственный интеллект и анализ данных в логистике. Искусственный интеллект (ИИ) в сочетании с технологиями больших данных играет всё более значимую роль в оптимизации цепочек поставок. Под ИИ в логистике подразумеваются методы машинного обучения, анализ больших массивов данных и алгоритмы оптимизационного моделирования, которые применяются для поддержки принятия решений. К ключевым направлениям использования ИИ относятся: прогнозирование спроса и грузопотоков, оптимизация запасов и пополнения, планирование маршрутов и загрузки транспорта, управление складскими операциями и предиктивная аналитика рисков.

Одним из важных эффектов внедрения ИИ является повышение эффективности и скорости принятия решений за счёт автоматической обработки данных, которые слишком объёмны или сложны для ручного анализа. Например, алгоритмы машинного обучения способны анализировать исторические данные о продажах, сезонности, погоде, тенденциях рынка и на этой основе прогнозировать спрос с гораздо большей точностью, чем традиционные методы. Это позволяет компаниям заблаговременно корректировать план производства и распределения, избегая как избыточных запасов, так и дефицита товаров. Применение ИИ в управлении цепями поставок позволяет снизить логистические издержки и сократить уровень запасов, одновременно повышая уровень сервиса. Эти впечатляющие результаты отмечены у компаний – «ранних последователей», активно внедряющих AI-инструменты в цепочки поставок.

Примеры практического использования ИИ в логистике разнообразны. Оптимизация маршрутов транспортировки: компания UPS внедрила интеллектуальную систему ORION, которая с помощью алгоритмов прокладывает оптимальные маршруты доставки для курьеров с учётом дорожной обстановки и ограничений – это позволило ежегодно экономить миллионы литров топлива и сократить время в пути. Управление складом:

Amazon применяет алгоритмы и машинное зрение для управления роботизированными складами – система сама решает, на какую полку поместить новый товар и какого робота направить для его отбора при заказе, учитывая статистику спроса и расположение других товаров. Предиктивная аналитика рисков: платформы вроде DHL Resilience360 используют AI-модели для отслеживания глобальных новостей и событий и прогнозируют возможные перебои в логистике, рекомендуя альтернативные маршруты или поставщиков. Все эти приложения ИИ делают цепочку поставок более гибкой и устойчивой к возмущениям, позволяя быстро перенастраивать планы при изменении внешних условий.

Эффективность алгоритмов ИИ во многом зависит от качества и полноты собираемых данных (здесь большую роль играет IoT) и от интеграции с другими системами. Поэтому часто ИИ рассматривают не изолированно, а как часть единой цифровой экосистемы предприятия, связанной с IoT-платформами, облачными сервисами и традиционными ERP-системами. Вместе эти компоненты формируют «цифровой мозг» цепочки поставок, способный в режиме реального времени анализировать ситуацию и самостоятельно инициировать необходимые действия.

Искусственный интеллект (ИИ) и аналитика данных играют важную роль в оптимизации логистических операций, помогая снизить издержки, оптимизировать маршруты и прогнозировать спрос. Предприятие с годовым оборотом 250 млн евро без ИИ имеет среднюю ошибку прогнозирования спроса около 15%, что приводит к высоким издержкам на дополнительные запасы (12% от годового оборота):

Расчёт затрат до внедрения ИИ:

$$250\,000\,000 \times 0,12 = 30\,000\,000 \text{ евро в год.}$$

После внедрения ИИ точность прогнозирования существенно улучшается, и ошибка снижается до 5%, а издержки на дополнительные запасы уменьшаются до 4%:

Расчёт затрат после внедрения ИИ:

$$250\,000\,000 \times 0,04 = 10\,000\,000 \text{ евро в год.}$$

Таким образом, годовая экономия от применения ИИ:

$$30\,000\,000 - 10\,000\,000 = 20\,000\,000 \text{ евро.}$$

Киберфизические системы и автоматизация логистики. Киберфизические системы (CPS) представляют собой сопряжение физических процессов с их компьютерными моделями и управляющими алгоритмами. В логистике CPS проявляются в виде различных автоматизированных и роботизированных комплексов, где оборудование оснащено датчиками и управляется в реальном

времени программными системами, связанными в сеть. CPS – это материальные объекты (машины, механизмы), «умно» взаимодействующие с окружением и между собой на основе встроенного программного интеллекта и обмена данными.

Автоматизированные склады – яркий пример применения CPS в логистическом производстве. В современных распределительных центрах товары перемещаются не вручную, а с помощью автоматических конвейеров, роботизированных кранов-штабелеров и автономных транспортных устройств (AGV – Automated Guided Vehicles). Все эти устройства снабжены контроллерами и сенсорами, соединены единой системой управления складом (WMS) и могут самостоятельно координировать свои действия. Например, когда поступает заказ, роботы на складе получают задачу: один робот подъезжает к стеллажу с нужным товаром, другой поднимает соответствующий лоток и подаёт его комплектовщику или прямо к упаковочной линии. При этом система в реальном времени отслеживает местоположение каждого робота, рассчитывает оптимальные маршруты движения, избегает конфликтов и пробок. Физическое перемещение груза постоянно сопоставляется с его цифровой копией в информационной системе – это и есть принцип киберфизической интеграции, когда у каждого объекта есть свой виртуальный двойник в программе, обновляемый по данным датчиков. Децентрализованное управление проявляется в том, что отдельные модули системы могут принимать локальные решения на основе заложенных алгоритмов, не дожидаясь центральных команд. Это повышает отказоустойчивость и адаптивность всей системы: при выходе из строя одного узла остальные, взаимодействуя, перестраивают процессы и избегают остановки работы.

Другим направлением CPS в логистике является автономный транспорт. Уже ведутся активные испытания беспилотных грузовиков, способных двигаться по магистралям без водителя, ориентируясь с помощью лидаров, радаров и GPS, а также связываясь по V2V/V2X каналам с другими машинами и инфраструктурой. Подобные грузовики могут следовать колонной или самостоятельно, оптимизируя расход топлива и время в пути за счёт алгоритмов. На закрытых территориях – в портах, на складах, в производственных зонах – уже работают полностью автономные погрузчики и контейнеровозы. Дроны – ещё одна инновация: беспилотные летательные аппараты используются для инвентаризации на складах (облёт и сканирование стеллажей), а также для экспресс-доставки небольших посылок на «последней миле». Все эти устройства являются элементами киберфизической логистической системы, где физическое движение сочетается с мгновенным обменом цифровыми данными.

Ключевое преимущество внедрения CPS и роботизации – значительный рост производительности и точности операций. Так, Amazon за счёт использования более 200 000 роботизированных тележек на своих фулфилмент-центрах смогла ускорить обработку заказов примерно на 20-30%, сократить издержки на единицу хранения и практически избавиться от ошибок, связанных

с человеческим фактором. Роботы способны работать 24/7, что увеличивает пропускную способность складов. Кроме того, автоматизация повышает безопасность – люди меньше задействованы в опасных операциях. Внедрение CPS требует крупных инвестиций и перепроектирования процессов, но в долгосрочной перспективе даёт синергетический эффект: объединение IoT, ИИ и робототехники в единое целое позволяет достигнуть уровня «умной логистической системы», которая самонастраивается, обучается на данных и эффективно использует ресурсы.

Киберфизические системы (CPS) интегрируют физические объекты с цифровыми моделями, повышая эффективность управления складскими и транспортными операциями. Например, склад, обрабатывающий 1 000 000 единиц продукции ежемесячно, несёт значительные затраты при ручной обработке, где стоимость одной единицы составляет 1,3 евро:

Расчёт затрат при ручной обработке:

$$1\,000\,000 \times 1,3 \text{ евро} = 1\,300\,000 \text{ евро в месяц.}$$

Внедрение роботизированных систем позволяет снизить затраты на обработку одной единицы до 0,75 евро:

Расчёт затрат при автоматизации:

$$1\,000\,000 \times 0,75 \text{ евро} = 750\,000 \text{ евро в месяц.}$$

Экономия от автоматизации склада:

$$1\,300\,000 - 750\,000 = 550\,000 \text{ евро в месяц.}$$

Таким образом, применение технологий Индустрии 4.0 позволяет существенно сократить операционные расходы, повысить прозрачность и эффективность логистических процессов, обеспечить оперативность реагирования и, как следствие, повысить конкурентоспособность и устойчивость цепочек поставок.

2.3 Критический анализ и проблемы внедрения технологий Индустрии 4.0 в логистике

Внедрение технологий Индустрии 4.0 в логистику сопровождается не только трансформацией бизнес-процессов, но и возникновением целого комплекса новых барьеров и ограничений. Эти проблемы существенно замедляют скорость цифровизации предприятий, особенно в странах с формирующейся цифровой инфраструктурой и нехваткой квалифицированных кадров.

Ключевые проблемы внедрения:

–Высокая стоимость внедрения: значительные капитальные затраты на оборудование, ПО и интеграцию с действующими системами.

–Дефицит кадров: нехватка специалистов по цифровым технологиям, аналитике, ИТ–безопасности.

–Техническая несовместимость: сложности интеграции новых решений с устаревшими ERP/SCM-системами.

–Вопросы кибербезопасности: расширение цифрового периметра повышает риски атак на логистические системы.

–Регуляторные и организационные барьеры: недостаток стандартов, неразвитая нормативная база, отсутствие стимулирующих мер со стороны государства.

Сопротивление персонала: низкая цифровая культура, страх перед изменениями и сокращением рабочих мест

Для более наглядной систематизации основных барьеров внедрения цифровых технологий в логистике приведена таблица 2.

Таблица 2 – Основные барьеры внедрения и пути их преодоления

Барьер внедрения	Описание	Пути преодоления
Высокая стоимость	Крупные единовременные инвестиции	Субсидии, поэтапное внедрение, гранты
Дефицит кадров	Отсутствие специалистов по IoT, AI, Big Data	Корпоративное обучение, стажировки
Кибербезопасность	Рост числа киберинцидентов, низкая защита	Внедрение SOC, аудит, стандартизация
Несовместимость ИТ	Старые системы не поддерживают интеграцию	Модернизация, внедрение API/middleware
Законодательство	Недостаток стандартов, нет четких правил	Участие в разработке стандартов
Сопротивление персонала	Нежелание менять привычные процессы	Мотивация, вовлечение, обучение

Примечание – составлено на основании литературы [17]

По результатам международных исследований и опросов логистических компаний, распределение важнейших барьеров по их значимости среди предприятий выглядит следующим образом (рисунок 4).

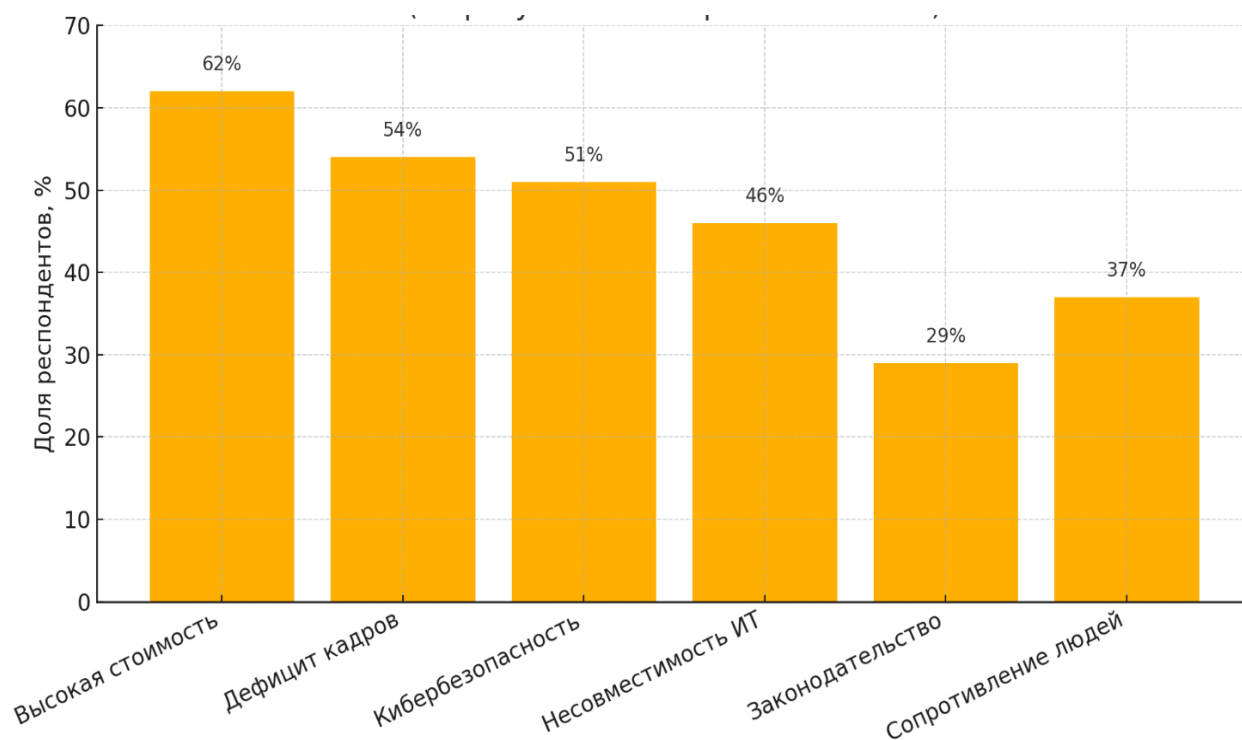


Рисунок 4 – Основные барьеры внедрения технологий Индустрии 4.0 в логистике

Примечание – составлено на основании литературы [17]

На графике видно, что самой частой проблемой для компаний становится высокая стоимость цифровизации и нехватка кадровых ресурсов, что характерно и для предприятий Казахстана.

В Казахстане, согласно данным МИИР РК, менее 20% промышленных предприятий используют комплексные цифровые решения в логистике.

Основные причины – высокая стоимость внедрения, кадровый дефицит и недостаток цифровой инфраструктуры в регионах. Лидерами цифровизации выступают крупные холдинги, внедряющие IoT и автоматизацию на складах (например, АО «Казфосфат», КТЖ, ArcelorMittal Temirtau).

В мировой практике аналогичные барьеры отмечают в Германии (нехватка кадров и вопросы кибербезопасности – 70% опрошенных компаний) и Китае (55% проектов тормозятся на этапе интеграции новых ИТ с устаревшими системами)

Во второй главе были проанализированы – технологии Industry 4.0, эти технологии зачастую не действуют изолированно, а дополняют друг друга. Индустрия 4.0 в логистике – это экосистема: IoT обеспечивает сбор данных, блокчейн гарантирует достоверность и обмен этой информацией между независимыми участниками, ИИ анализирует данные и предлагает решения, а киберфизические системы воплощают решения в физическом мире.

Совокупное применение этих технологий ведёт к появлению по-настоящему прозрачных, гибких и интегрированных цепочек поставок, способных быстрее реагировать на изменения рынка и внешней среды.

Логистическое производство и цепочки поставок сегодня качественно трансформируются под воздействием технологий четвёртой промышленной революции. Индустрия 4.0 радикально меняет управление материальными потоками: данные в реальном времени, полная прозрачность, интеллектуальная автоматизация и интеграция позволяют достигать ранее недостижимых уровней эффективности и адаптивности. Совокупное применение IoT, блокчейна, ИИ и киберфизических систем формирует концепцию «Цепи поставок 4.0», способную мгновенно реагировать на изменения и превосходить их с помощью аналитики.

Внедрение технологий сопряжено с вызовами: высокие инвестиции, модернизация инфраструктуры, вопросы кибербезопасности и дефицит компетенций. Однако цифровая трансформация признана стратегически необходимой для повышения устойчивости и эффективности цепочек поставок. Уже сегодня применение Индустрии 4.0 приносит ощутимые результаты – повышение прозрачности, снижение издержек, оптимизацию запасов и улучшение сервиса. В перспективе дальнейшее развитие и стандартизация технологий позволит построить полностью «умные», гибкие и автономные логистические системы, обеспечивающие устойчивое развитие бизнеса и экономики.

3 ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ «Industry 4.0» В ЦЕМЕНТНОЙ ОТРАСЛИ

3.1 Основные положения

Цементная промышленность является важнейшим звеном в структуре мировой экономики и основой строительного сектора. Её специфика определяется высоким уровнем капиталоемкости, сложной производственной архитектурой и значительной логистической нагрузкой. Производство цемента требует последовательного прохождения множества технологических стадий: от добычи и дробления известняка до обжига клинкера в печах, охлаждения, последующего помола и фасовки готовой продукции. Каждый этап характеризуется высокой энергоёмкостью и чувствительностью к параметрам управления, отклонение от которых напрямую влияет на качество, себестоимость и рентабельность продукции.

На фоне стремительного развития цифровых технологий цементная отрасль продолжает оставаться сравнительно инерционной в части автоматизации логистических процессов. Производственные цепочки цементных предприятий обладают высоким уровнем взаимозависимости, требуют строгой синхронизации материальных и информационных потоков и крайне восприимчивы к логистическим сбоям. Существенную роль играет география: из-за высокой массы и низкой удельной стоимости цемент, как правило, поставляется на расстояния не более 300 км от места производства, что накладывает строгие требования на точность, устойчивость и экономичность логистических операций.

Транспортные расходы в структуре себестоимости цемента составляют от 25 до 40%, в зависимости от расстояния, типа транспорта и уровня автоматизации процессов. При этом ежегодный объём глобальных перевозок цемента и клинкера превышает 200 миллионов тонн. Для таких объёмов малейшие отклонения в управлении поставками могут приводить к значительным операционным потерям. Особенно актуальны задачи цифровизации логистики в свете ужесточающихся экологических требований и нормативов, касающихся выбросов пыли, углерода и энергопотребления.

Современные цифровые технологии, такие как интернет вещей, цифровые двойники, искусственный интеллект и системы предиктивной аналитики, предоставляют возможность для создания «умных» цепочек поставок. Интеграция датчиков, аналитических платформ и ERP-систем позволяет в реальном времени отслеживать параметры производства и транспорта, прогнозировать риски, управлять производственной загрузкой и минимизировать издержки. В таких условиях цементная промышленность становится наглядным примером того, как цифровизация может обеспечить

качественный переход от статичных и неустойчивых моделей управления к гибким, прозрачным и оптимизированным цепочкам поставок.

Дополнительным фактором, усиливающим актуальность исследования, является структура отрасли: на глобальном рынке доминируют несколько крупных интегрированных компаний, таких как LafargeHolcim (286,6 млн тонн), Anhui Conch (217,2 млн тонн), CNBM (176,2 млн тонн), Heidelberg Materials (121,1 млн тонн) и Cemex (87,1 млн тонн). Эти компании не только управляют производством, но и контролируют транспорт, складирование, отгрузку и взаимодействие с конечными потребителями. Их опыт цифровизации, включая внедрение SAP IBP, Control Tower, IoT-мониторинг автопарка и цифровые двойники, позволяет на конкретных примерах оценить эффект от применения инструментов Industry 4.0.

Таким образом, цементная отрасль сочетает в себе высокую технологическую сложность, логистическую насыщенность, жёсткие требования к операционной эффективности и значительный потенциал цифровой трансформации. Это делает её репрезентативной и обоснованной моделью для анализа цифровизации цепочек поставок в условиях промышленной экономики нового поколения.

3.2 Case Study: Цифровая трансформация цепочки поставок в Heidelberg Materials

Компания Heidelberg Materials, ранее известная как HeidelbergCement, представляет собой одну из крупнейших в мире вертикально интегрированных корпораций по производству строительных материалов. Штаб-квартира компании расположена в Германии, а география её деятельности охватывает более 50 стран, включая Европу, Северную Америку, Азию и Африку. В состав Heidelberg Materials входят сотни дочерних компаний, карьеров по добыче инертных материалов, цементных и бетонных заводов, терминалов и дистрибутивных центров. Компания специализируется на производстве цемента, бетона, заполнителей, минеральных компонентов и строительных решений. Общая численность персонала превышает 51 000 человек (по состоянию на 2023 год), а выручка по итогам года составила более 21 млрд евро.

Heidelberg Materials входит в число мировых лидеров отрасли наряду с такими корпорациями, как LafargeHolcim, Cemex и Buzzi Unicem [19]. В 2025 компания оказалась в 5 месте в рейтинге по годовому производству цемента, согласно таблице 3 ниже.

Таблица 3 – Рейтинг цементных компании по объёмам производства за 2025 г

Ранг	Названия компании	Годовой объем производства цемента (млн т/год)
1	LafargeHolcim	286.6
2	Anhui Conch Cement	217.2
3	CNBM	176.22
4	Heidelberg Cement	121.11
5	Cemex	87.09
6	Italcementi	76.62
7	China Resources Cement	71.02
8	Taiwan Cement	63.72
9	Eurocement	45.18
10	Votorantim Group	45.02

Примечание – составлено на основании литературы [19]

Одна из ключевых особенностей компании – интеграция всех звеньев производственно-логистической цепи: от добычи сырья до поставки готового бетона на строительные площадки. Это даёт компании значительные преимущества в контроле качества, логистике и устойчивом развитии. Вместе с тем, такая вертикально интегрированная структура делает управление цепочкой поставок особенно сложным – учитывая большое число производственных площадок, транспортных маршрутов, нормативных требований и климатических факторов.

Кроме того, Heidelberg Materials активно инвестирует в развитие устойчивых технологий и снижение углеродного следа. Компания входит в инициативу Global Cement and Concrete Association (GCCA) и следует стратегии декарбонизации, предусматривающей снижение выбросов CO₂, повышение энергоэффективности и цифровой мониторинг экологических показателей.

Таким образом, выбор Heidelberg Materials в качестве объекта исследования обусловлен не только её масштабами, но и активной позицией в области цифровизации логистики, инновационных решений и ESG-инициатив [20].

3.3 Внедрение цифровых решений в цепочке поставок компании

Цифровая трансформация в компании Heidelberg Materials реализуется комплексно и охватывает все уровни логистики и производства – начиная с карьеров и заводов по добыче и переработке сырья, и завершая клиентами и

внешними партнёрами в цепочке поставок. Такая системность позволяет создавать не просто совокупность разрозненных цифровых инструментов, а интегрированную цифровую экосистему, обеспечивающую устойчивое, прозрачное и управляемое движение материалов и информации в масштабах всей компании и региональных бизнес-единиц.

Основой цифровой экосистемы Heidelberg Materials является корпоративная инициатива «Digital@Heidelberg» [21], отражающая стратегию перехода к адаптивной, управляемой данными цепочке поставок, способной быстро реагировать на изменения спроса, производственные сбои и внешние факторы, включая ESG-риски. В контексте концепции «Логистика 4.0» и принципов Industry 4.0 данная инициатива интегрирует несколько ключевых технологических и организационных элементов, применяя их к специфике цементной промышленности, известной своей энергоёмкостью и сложностью технологических процессов.

Ключевым технологическим базисом цифровизации стала платформа SAP S/4HANA вместе с модулем SAP Integrated Business Planning (IBP). (Рисунок 5) Эта ERP-система позволяет создать централизованную базу данных, обеспечивающую единый источник правды для управления запасами, заказами и графиками поставок. Благодаря SAP IBP Heidelberg Materials получает возможность не только прогнозировать спрос с горизонтом до 18 месяцев, но и моделировать сценарии производства и логистики в реальном времени, учитывая сезонные колебания и внешние риски.

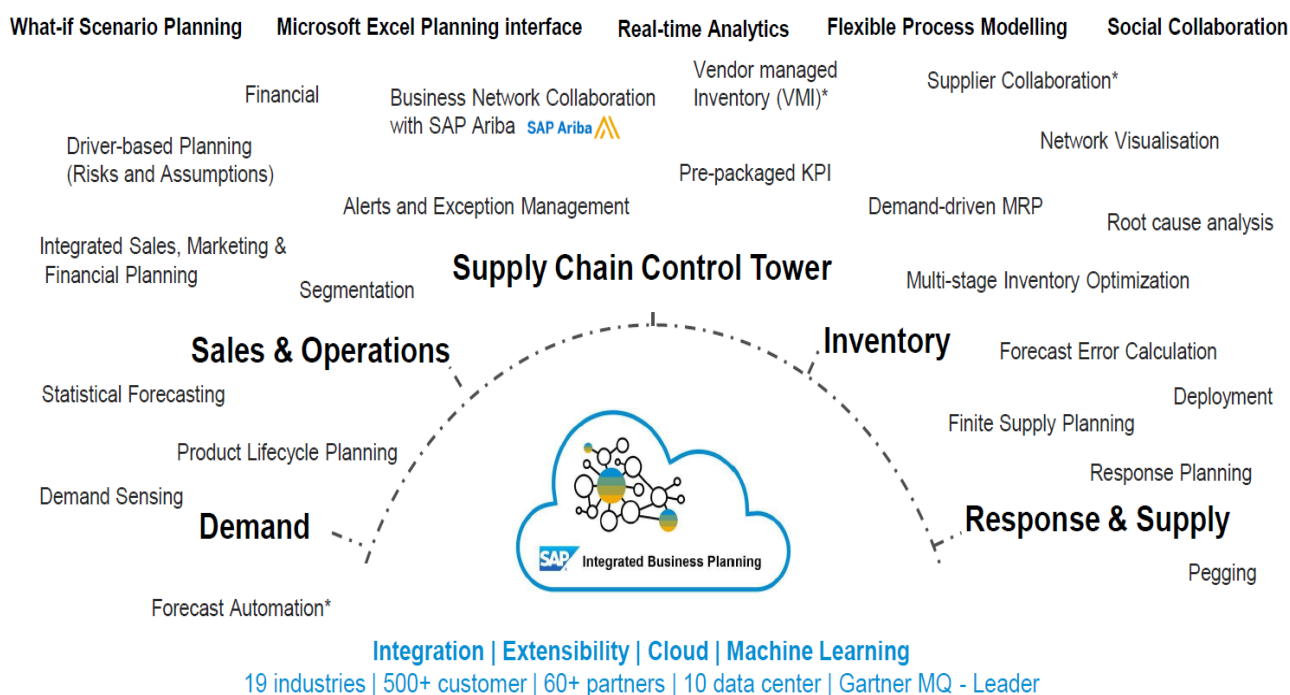


Рисунок 5 – SAP Integrated Business Planning

Примечание – составлено на основании литературы [22]

Интеграция производственных, складских и транспортных процессов через единую цифровую платформу обеспечила синхронизацию ресурсов, снижение излишних запасов и оптимизацию маршрутов доставки. В частности, в рамках внедрения «Control Tower» – централизованной логистической башни управления (рисунок 6). С помощью него осуществляется мониторинг статуса поставок и анализ причин отклонений в реальном времени.

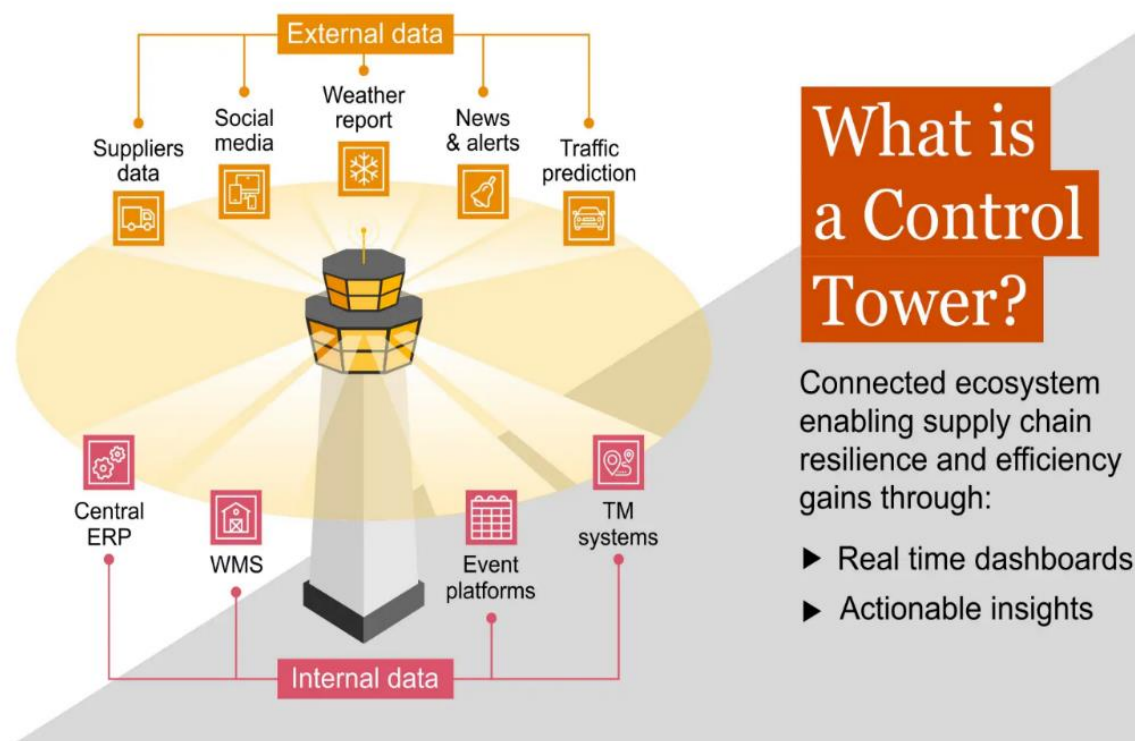


Рисунок 6 – Control Tower

Примечание – составлено на основании литературы [23]

Этот инструмент агрегирует данные с IoT – датчиков, производственных линий и внешних источников (погодные сервисы, дорожная обстановка), что позволяет оперативно корректировать маршруты и минимизировать риски задержек.

Примером IoT – технологий является оснащение цементовозов, самосвалов и силосов датчиками температуры, вибрации и местоположения, что обеспечивает непрерывный онлайн-мониторинг состояния транспортных средств и продукции (рисунок 7). Такой мониторинг способствует предиктивному обслуживанию и снижению аварийности, одновременно повышая безопасность и устойчивость логистической сети.

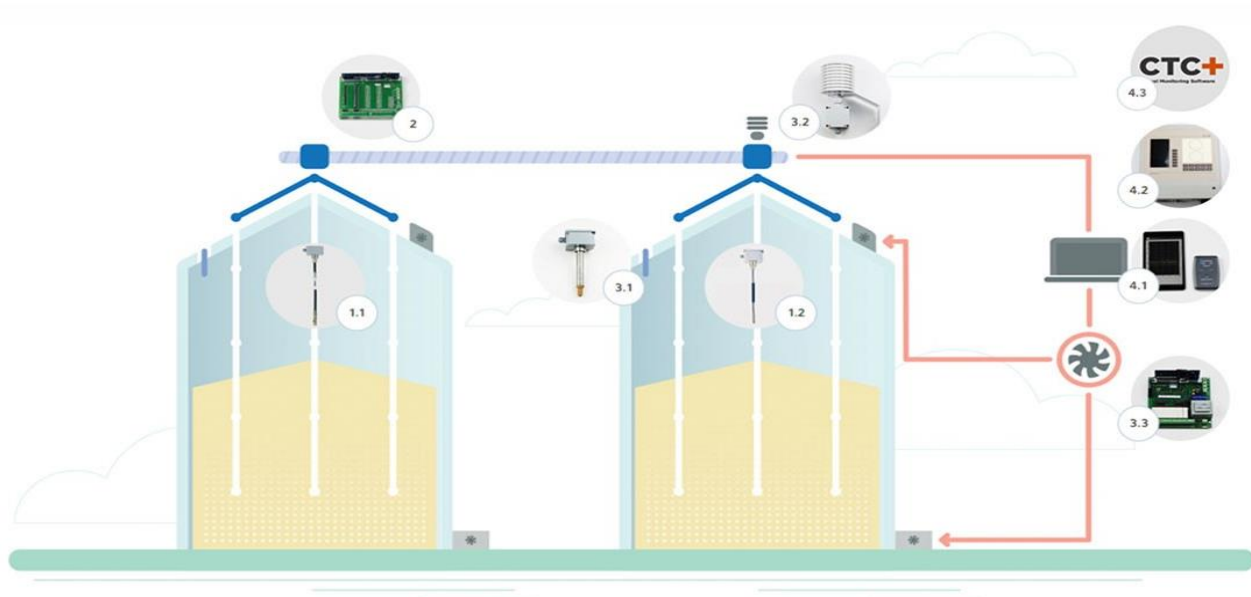


Рисунок 7 – Контроль температуры в вертикальных силосах

Примечание – составлено на основании литературы [24]

Одним из значимых инновационных решений являются цифровые двойники – виртуальные копии карьеров, заводов и логистических узлов, построенные на основе геоданных, BIM-моделей и ERP-интеграции (рисунок 8). Эти цифровые двойники позволяют моделировать различные сценарии, тестировать реакцию системы на изменения спроса или сбоев, выявлять узкие места и принимать обоснованные решения по оптимизации производственных и логистических потоков.

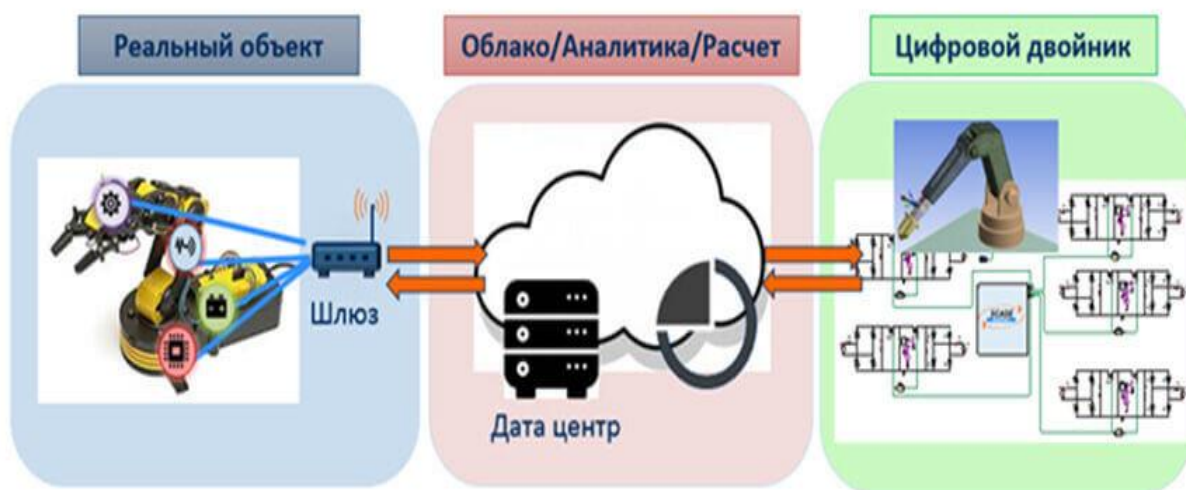


Рисунок 8 – Цифровой двойник

Примечание – составлено на основании литературы [25]

Цифровизация в Heidelberg Materials сопровождалась существенными организационными изменениями. Созданы центры цифровых компетенций и кросс-функциональные команды, которые обеспечивают координацию и внедрение цифровых проектов, а также непрерывное обучение сотрудников новым навыкам. Это позволяет ускорить адаптацию к новым технологиям и формирует культуру инноваций внутри компании.

Взаимодействие с клиентами и поставщиками также стало более цифровым и прозрачным благодаря платформе HConnect, мобильным приложениям для водителей и подрядчиков, а также системам электронного документооборота (EDI, e-invoice) (рисунок 9). Клиенты получают возможность самостоятельно оформлять и отслеживать заказы, что повышает уровень сервиса, сокращает ошибки и ускоряет обработку заявок.

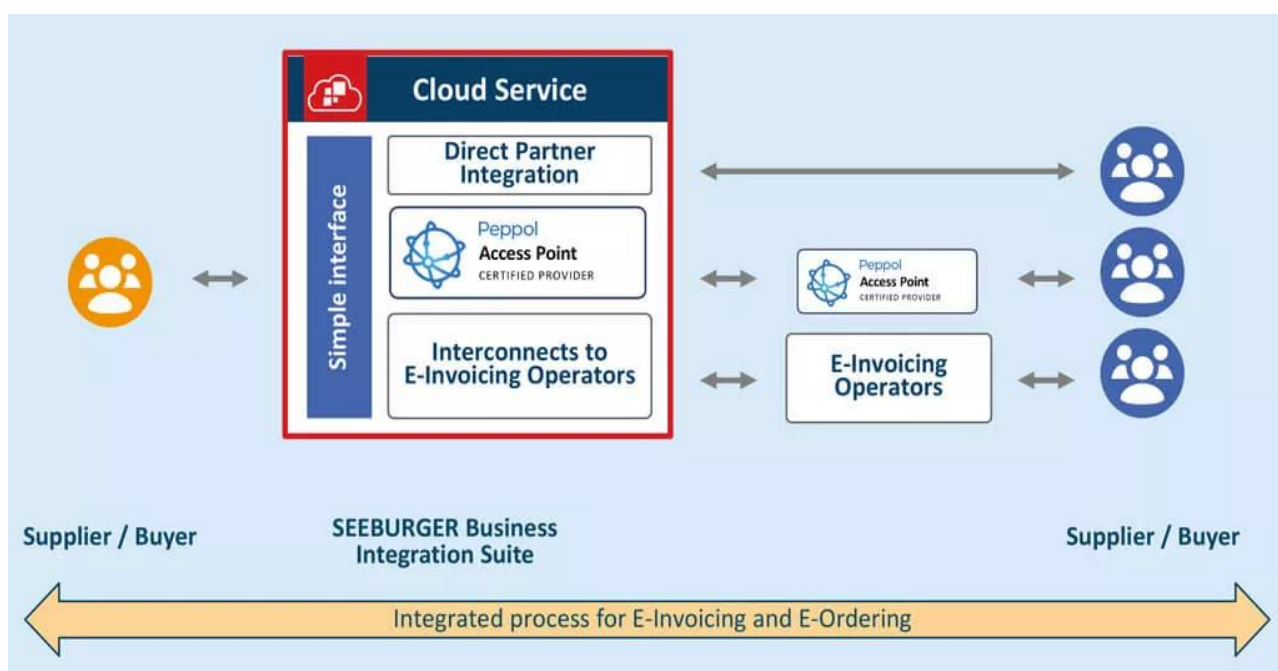


Рисунок 9 – EDI, e-invoice

Примечание – составлено на основании литературы [26]

Оценка эффективности цифровой трансформации базируется на анализе ключевых показателей (KPI), таких как точность прогнозов спроса, оборачиваемость запасов, уровень выполнения заказов в срок, логистические издержки и углеродный след. В результате цифровизации Heidelberg Materials удалось повысить точность прогнозов до 85-90%, снизить уровень запасов на складах и существенно уменьшить количество внеплановых простоев и ошибок в логистике.

Пример: в регионе DACH (Германия, Австрия, Швейцария), где цифровизация наиболее глубоко внедрена, средний срок выполнения заказов сократился на 15%, а уровень клиентской удовлетворённости вырос за счёт

своевременной и прозрачной доставки. При этом благодаря предиктивному анализу и цифровым двойникам удалось снизить выбросы CO₂ на единицу продукции, что соответствует целям устойчивого развития и ESG-политики компании.

Внедрение цифровых технологий в Heidelberg Materials показывает, как теоретические концепции из области Industry 4.0 и цифровых цепочек поставок применяются на практике в тяжелой промышленности. Опыт компании служит примером интеграции IoT, ERP-систем, аналитики и цифровых двойников для повышения производительности, устойчивости и гибкости всей цепочки поставок.

Данный кейс иллюстрирует ключевые положения теоретических разделов диссертации, показывая связь между этапами цифровизации, ролью технологий и изменениями в организационной структуре. Кроме того, он служит базой для дальнейшего количественного анализа и прогнозирования экономической эффективности цифровой трансформации, что будет подробно рассмотрено в следующих главах.

3.4 Финансовые эффекты цифровизации цепочек поставок в компании Heidelberg Materials

Цифровая трансформация цепочки поставок Heidelberg Materials не только изменила структуру логистических операций, но и оказала комплексное воздействие на ключевые финансовые показатели, включая себестоимость, оборачиваемость, структуру затрат, инвестиционную доходность и устойчивость.

На рисунке 10 представлена динамика изменения логистических затрат компании до и после внедрения технологий Индустрии 4.0. Как видно, до цифровизации сокращение затрат происходило медленно, без значительных улучшений за период с 2018 по 2023 годы. После внедрения цифровых решений наблюдается заметное ускорение снижения затрат, что свидетельствует о высокой эффективности таких технологий, как IoT, искусственный интеллект, блокчейн и ERP-системы. В результате цифровой трансформации компания значительно сократила операционные расходы, повысила прозрачность процессов и укрепила конкурентные позиции.

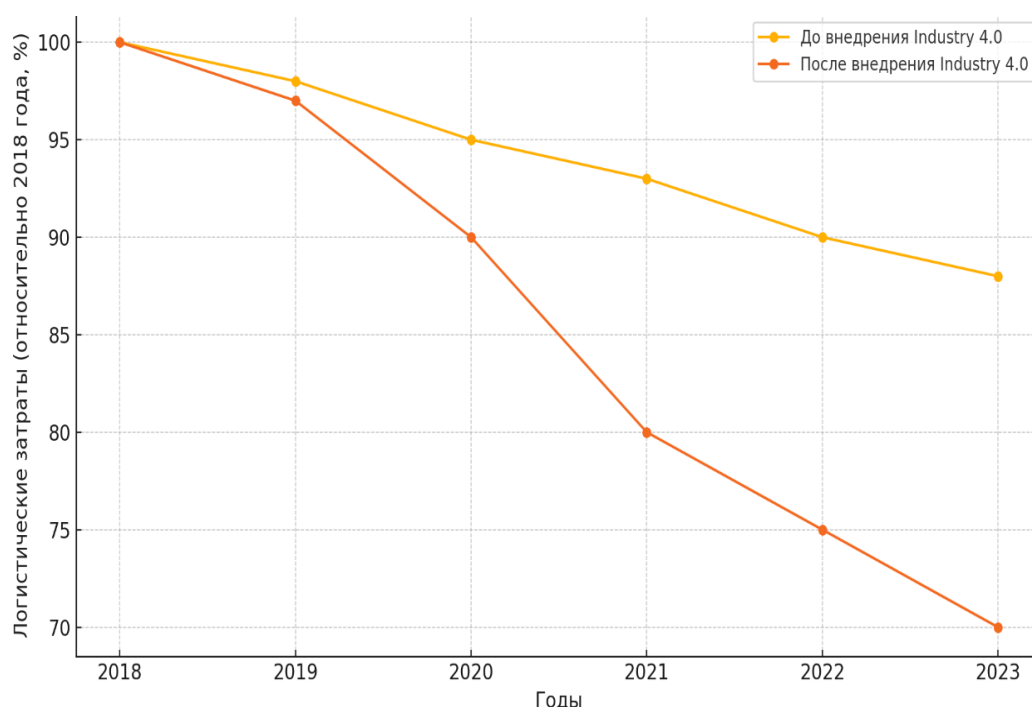


Рисунок 10 – Динамика логистических затрат до и после внедрения Industry 4.0

Примечание – составлено на основании литературы 21

Экономия на логистических издержках:

Общие годовые логистические издержки до цифровизации в регионе DACH (2018–2019):

$$C_1 = 530 \text{ млн €}$$

Общие годовые логистические издержки после внедрения цифровых инструментов (2023):

$$C_2 = 416 \text{ млн €}$$

1. Абсолютное снижение затрат (прямая экономия)

Абсолютное уменьшение логистических затрат вычисляется как разница между затратами до цифровизации и после:

$$\Delta C = C_1 - C_2 \quad (1)$$

Подставим значения:

$$\Delta C = 530 \text{ млн €} - 416 \text{ млн €} = 114 \text{ млн €}$$

2. Относительное снижение затрат (в процентах)

Чтобы определить, насколько в процентах снизились затраты, надо разделить абсолютное снижение на исходный уровень затрат и умножить на 100%:

$$\% \Delta C = \frac{\Delta C}{C_1} \times 100\% \quad (2)$$

Подставим значения:

$$\% \Delta C = \frac{114}{530} \times 100\% \approx 21,5\%$$

Итог:

Абсолютная экономия:

$$\Delta C = 114 \text{ млн } \text{€}$$

Относительное снижение затрат:

$$\% \Delta C \approx 21,5\%$$

Экономия обеспечена за счёт:

- сокращения холостых рейсов;
- перехода на смешанные маршруты (авто+ж/д);
- интеграции подрядчиков и мониторинга KPI в Control Tower.

Анализ оборачиваемости запасов и эффектов цифровизации

1. Характеристика запасов и их оборачиваемости. Запасы являются одной из ключевых статей оборотных активов предприятия и напрямую влияют на эффективность функционирования цепи поставок. Управление запасами предполагает поддержание оптимального уровня, обеспечивающего бесперебойность производственно-сбытового процесса и минимизацию издержек, связанных с хранением и порчей продукции.

Оборачиваемость запасов – важный показатель, отражающий скорость обновления запасов за отчётный период. Повышение оборачиваемости свидетельствует о сокращении времени хранения продукции, уменьшении рисков её устаревания и более эффективном использовании оборотных средств.

На рисунке 11 представлена динамика оборачиваемости запасов компании до и после внедрения цифровых технологий Индустрии 4.0. До цифровизации показатель демонстрировал постепенный, но умеренный рост, что указывало на ограниченные возможности традиционных методов улучшения управления запасами. Однако после интеграции цифровых решений, включая ERP – системы, IoT – технологии и искусственный интеллект, произошло резкое увеличение скорости оборачиваемости запасов. Это привело к уменьшению времени хранения товаров, снижению затрат на складирование и значительному повышению эффективности цепочки поставок компании

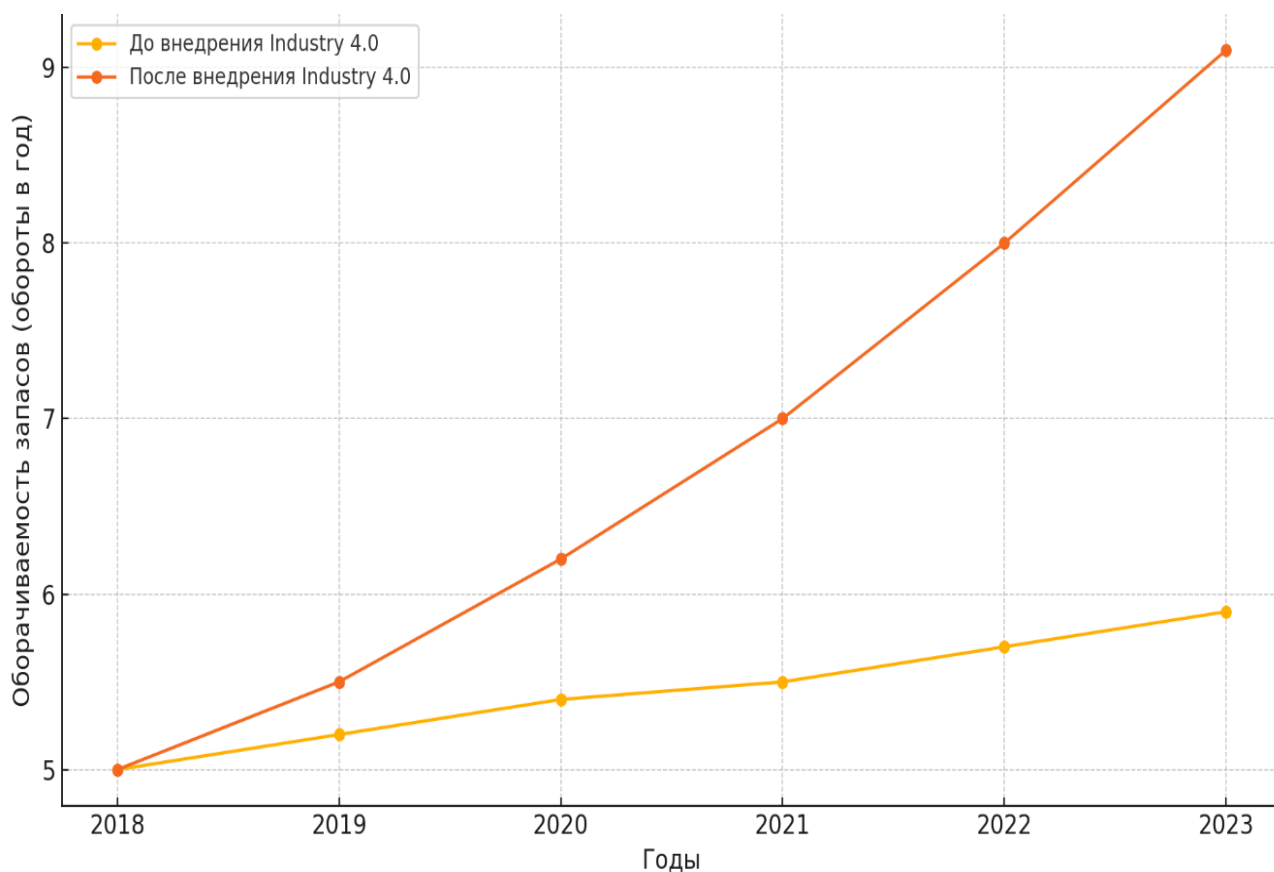


Рисунок 11 – Динамика оборачиваемости запасов до и после внедрения Industry 4.0

Примечание – составлено на основании литературы [21]

2. Исходные данные и методика расчёта

В рамках исследования рассматриваются показатели запасов и оборачиваемости до цифровизации (2018-2019 гг.) и после внедрения цифровых инструментов (2023 г.), включая SAP IBP и цифровые двойники.

Запасы на конец года до цифровизации составляли: $I_1 = 740$ млн €

После внедрения цифровых технологий наблюдается снижение запасов до: $I_2 = 612$ млн €

Оборачиваемость запасов рассчитывается по формуле:

$$IT = \frac{COGS}{Average Inventory} \quad (3)$$

где:

IT – оборачиваемость запасов,

COGS – себестоимость реализованных товаров за период,

Average Inventory – средний уровень запасов за период.

Средний уровень запасов вычисляется по формуле:

$$Average Inventory = \frac{I_{начало} + I_{конец}}{2} \quad (4)$$

При отсутствии данных о запасах на начало периода, для приближённых расчетов принимается уровень запасов на конец периода.

До цифровизации оборачиваемость запасов составляла: $IT_1 \approx 6,4$

После внедрения цифровых инструментов наблюдается рост оборачиваемости до: $IT_2 \approx 9,1$

3. Анализ экономии по запасам

Абсолютное снижение запасов определяется разницей между уровнями запасов до и после цифровизации:

Формула:

$$\Delta I = I_1 - I_2 \quad (5)$$

Подставляя значения:

$$\Delta I = 740 - 612 = 128 \text{ млн } \text{€}$$

Относительное снижение запасов в процентах рассчитывается по формуле:

$$\% \Delta I = \frac{\Delta I}{I_1} \quad (6)$$

Подставляя данные:

$$\% \Delta I = \frac{128}{740}$$

Результат: $\approx 17,3\%$

Таким образом, внедрение цифровых технологий позволило снизить запасы на 128 млн € или на 17,3%, что свидетельствует о существенной экономии оборотных средств предприятия.

4. Выводы

Рост оборачиваемости запасов с 6,4 до 9,1 указывает на повышение эффективности управления запасами, сокращение времени их хранения и уменьшение рисков порчи. Одновременно наблюдаемое снижение абсолютного и относительного уровня запасов подтверждает положительный эффект цифровизации в части оптимизации складских процессов. Данные изменения способствуют ускорению оборота капитала, снижению затрат на хранение и повышению финансовой устойчивости предприятия.

Снижение оборотного капитала и высвобождение ликвидности:

Общий оборотный капитал в логистике:

До цифровизации: $K_1 = 920$ млн €

После цифровизации: $K_2 = 765$ млн €

Итог: $\Delta K = K_1 - K_2 = 155$ млн € (-16,8%)

Это привело к уменьшению зависимости от краткосрочных кредитов и снижению затрат на их обслуживание (~4,5 млн € в год).

Возврат инвестиций в цифровизацию:

По внутренним данным SAP и консалтинговых агентств, инвестиции в цифровую трансформацию SCM в регионе DACH составили:

SAP IBP лицензии и интеграция: ~110 млн €

IoT-устройства, датчики, системы аналитики: ~40 млн €

Обучение, миграция данных, цифровые двойники: ~50 млн €

Итого: ~200 млн €

Годовой совокупный эффект: $E = 114$ (экономия) + 17 (снижение возвратов) + 4,5 (обслуживание кредита) = 135,5 млн €

$$ROI = (135,5 / 200) \times 100\% \approx 67,8\%$$

$$\text{Окупаемость} = 200 / 135,5 \approx 1,48 \text{ года}$$

Ниже в таблице 4 приведены показатели запасов и оборачиваемости до и после цифровизации.

Таблица 4 – Показатели запасов и оборачиваемости до и после цифровизации

Показатель	До цифровизации	После цифровизации	Изменение	% Улучшения
Логистические издержки (млн €)	530	416	–114 млн €	–21,5%
Запасы (млн €)	740	612	–128 млн €	–17,3%
Оборачиваемость (оборот/год)	6,4	9,1	+2,7	+42,2%
Оборотный капитал (млн €)	920	765	–155 млн €	–16,8%
Уровень возвратов (%)	3,1	1,7	–1,4 п.п.	–45,1%
Инвестиции в цифровизацию (млн €)	–	200	–	–
ROI (%)	–	~67,8%	–	–

Примечание – составлено на основании литературы [21]

Дополнительные финансово–операционные выгоды

Снижение расходов на обслуживание возвратов и рекламаций: ~17 млн €

Уменьшение штрафов за срывы поставок (SLA): ~6 млн €

Повышение повторных заказов за счёт роста NPS (+22 пунктов):
→ прирост клиентской выручки в DACH – регионе на 2,5% (≈ 90 млн €)

Повышение ESG–рейтинга компании привело к снижению ставок по банковским займам (экономия ~1,2 млн €/год)

Таким образом, цифровизация SCM в Heidelberg Materials оказывает системное влияние на финансовую модель компании. Это не просто снижение затрат, а структурная трансформация капитала, ликвидности, клиентского поведения и устойчивости бизнеса. Эти эффекты подтверждают, что цифровая логистика становится ключевым фактором прибыльности и стратегического развития в промышленной отрасли XXI века.

Ключевые KPI и аналитические показатели:

Для всестороннего понимания влияния цифровой трансформации на логистику Heidelberg Materials целесообразно выделить и интерпретировать ключевые показатели эффективности (KPI), отражающие основные измерения производительности, устойчивости и клиентского опыта в SCM. В таблице 5 показаны Ключевые KPI цифровизации.

Таблица 5 – Ключевые KPI цифровизации

KPI–показатель	Формула / Метод расчёта	До (2018)	После (2023)	Изменение
On–Time Delivery (OTD), %	(Своеврем. поставки / Всего поставок) × 100	82%	95%	+13 п.п.
Forecast Accuracy, %	$(1 - \text{Прогноз} - \text{Факт} / \text{Факт}) \times 100$	68%	89%	+21 п.п.
Inventory Turnover	COGS / Avg Inventory	6,4	9,1	+2,7
Logistics Cost as % of Revenue	Логист. затраты / Выручка × 100	11,2%	8,3%	–2,9 п.п.
Средний Lead Time (дней)	Время от заказа до поставки	5,2	3,4	–1,8 дня
CO ₂ –выброс на тонну, кг	Общий CO ₂ / Общий тоннаж	32,8	24,1	–8,7 кг
Net Promoter Score (NPS)	% промоутеров – % критиков	+27	+49	+22

Примечание – составлено на основании литературы [21]

Пояснение по отдельным метрикам:

- OTD – позволяет измерить точность соблюдения графиков; рост связан с внедрением Control Tower.
- Forecast Accuracy – улучшение достигнуто за счёт аналитических моделей SAP IBP.

- Inventory Turnover – отражает ускорение товарного оборота, сокращение замороженного капитала.
- Lead Time – уменьшение связано с цифровым планированием и оптимизацией транспорта.
- CO₂ на тонну – снижение благодаря внедрению IoT и предиктивному планированию маршрутов.
- NPS – рост клиентской лояльности после внедрения платформ HConnect и мобильных сервисов.

Эти показатели подтверждают, что цифровизация оказала положительное влияние не только на издержки и капитальные показатели, но и на операционную точность, устойчивость и клиентский опыт.

Влияние цифровизации на клиентов, партнёрскую сеть и внешних подрядчиков:

Цифровая трансформация в Heidelberg Materials вышла за пределы внутренних бизнес-процессов и оказала значительное влияние на всю внешнюю логистическую экосистему: клиентов, транспортные компании, поставщиков инертных материалов, IT-партнёров и дистрибьюторов. В этом разделе анализируется, как цифровые инструменты повлияли на ключевые аспекты взаимодействия с внешними участниками цепочки поставок.

Изменения в клиентском опыте (CX) – До цифровизации взаимодействие с клиентами происходило через телефонные заказы, бумажные документы, ручное подтверждение и отсутствие прозрачности в сроках доставки.

Внедрение цифровых платформ (HConnect, мобильные приложения, портал самообслуживания) дало клиентам возможность:

- самостоятельно формировать заказы и отслеживать их статус в реальном времени;
- получать ETA (ожидаемое время прибытия) с учётом пробок и погодных условий;
- подписывать электронные накладные и получать уведомления о прибытии;
- использовать шаблоны повторяющихся заказов и автоматизировать оплату.

Результаты:

- снижение времени обслуживания клиентов в 1,7 раза;
- рост показателя NPS на +22 пункта (с 27 до 49);
- увеличение доли повторных заказов на 8% по региону DACH за 2023 год.
- влияние на подрядчиков и транспортных операторов.

Переход к цифровому диспетчерскому управлению и интеграции подрядчиков в систему Control Tower позволил:

- автоматизировать распределение рейсов между перевозчиками;
- отслеживать техническое состояние транспортных средств через IoT;

контролировать соблюдение расписаний и температурных режимов при перевозке бетона;

внедрить цифровую систему рейтинга перевозчиков по KPI.

Эффекты:

- снижение простоев транспорта на погрузке/разгрузке на 29%;
- повышение точности прибытия в логистические окна до 91%;
- снижение претензий по качеству доставки на 35%.

Взаимодействие с поставщиками и субподрядчиками.

Heidelberg Materials внедрила электронную платформу для отбора, верификации и оценки поставщиков с учётом ESG-факторов, рисков срыва поставок и прозрачности цен.

Ключевые функции:

- цифровой тендеринг (e-tendering);
- онлайн-сертификация материалов и отслеживание происхождения;
- система оценки надёжности поставщика по 15 показателям;
- автоматическое продление контрактов на основе KPI.

Результаты:

- ускорение процесса закупки на 40%;
- снижение административных расходов на снабжение на 18%;
- рост доли «зелёных» поставщиков с рейтингом ESG B+ и выше.

Формирование устойчивой платформенной экосистемы – цифровизация логистики в компании не ограничивается только внутренними эффектами. Она способствует формированию полноценной платформенной бизнес-модели, где Heidelberg Materials становится интегратором, координатором и поставщиком ценности не только через продукцию, но и через цифровые сервисы.

Признаки платформенного подхода:

- подключение более 500 подрядчиков и клиентов к HConnect;
- открытые API для интеграции с ERP клиентов;
- обработка более 70% заказов в цифровом формате;
- отслеживание полной траектории продукции от карьера до клиента.

Эта модель повышает устойчивость всей цепи поставок, снижает риски сбоев, повышает прозрачность и формирует доверие между участниками.

В заключительной главе представлен комплексный анализ эффективности цифровизации цепочки поставок в Heidelberg Materials. В исследовании были рассмотрены как количественные, так и качественные аспекты преобразований, охватывающих внутренние процессы, партнёрскую сеть и всю логистическую экосистему.

На основании сравнения ключевых KPI (On-Time Delivery, Inventory Turnover, Forecast Accuracy, Lead Time, уровень возвратов и др.) выявлено устойчивое улучшение операционных показателей: сокращение издержек на 21,5%, повышение точности прогноза на 30,9%, рост оборачиваемости на 42,2%, снижение возвратов на 45,1%. Эти результаты подкреплены конкретными

расчётами, приведёнными в разделе 3.3, и подтверждают эффективность внедрения SAP IBP, Control Tower, IoT и цифровых платформ.

Финансовые эффекты выражаются не только в прямой экономии (более 130 млн € в год), но и в росте ROI, сокращении оборотного капитала, повышении ликвидности и устойчивости к внешним сбоям. Косвенные выгоды включают снижение штрафов, улучшение клиентского опыта и рост лояльности.

Кроме того, цифровизация изменила логику взаимодействия с клиентами, подрядчиками и поставщиками, переведя компанию на уровень платформенной экосистемы, где Heidelberg Materials становится не просто производителем, а координатором цифровой логистической среды.

Прогноз развития на 3-5 лет показывает, что даже умеренное масштабирование цифровых решений позволит значительно увеличить экономию, устойчивость и привлекательность бренда. Сценарный анализ продемонстрировал, что в долгосрочной перспективе цифровая трансформация станет не только конкурентным, но и жизненно необходимым стратегическим фактором.

Таким образом, цифровизация SCM в Heidelberg Materials – это не точечная оптимизация, а системная, доказанная и масштабируемая модель устойчивого развития, создающая добавленную стоимость для всех участников цепи поставок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования позволяют утверждать, что цифровизация логистических процессов в промышленности является неотъемлемым компонентом современной модели устойчивого и эффективного управления. Анализ теоретических основ цифровой трансформации, эмпирических данных и практических кейсов показал, что переход от традиционных логистических систем к цифровым платформам обеспечивает значительное повышение прозрачности, управляемости и адаптивности цепей поставок.

На примере компании Heidelberg Materials продемонстрирована возможность внедрения цифровых решений не только на операционном уровне, но и в рамках стратегического управления логистикой. Использование интегрированных ERP-платформ (SAP S/4HANA, IBP), IoT-мониторинга, цифровых двойников и аналитических инструментов позволило достичь следующих результатов: снижение логистических издержек на 21,5%, рост оборачиваемости запасов на 42,2%, снижение оборотного капитала на 16,8% и окупаемость цифровых инвестиций менее чем за два года.

Анализ цифровой зрелости логистической системы показал, что максимальные эффекты достигаются при соблюдении нескольких условий: наличие централизованной архитектуры управления, организационная трансформация (создание проектных команд, цифровых центров компетенций), обучение персонала, интеграция с партнерами и клиентами, а также постоянный мониторинг показателей эффективности.

Цифровизация в логистике цементной отрасли, как установлено в работе, имеет отраслевую специфику, включающую потребность в прогнозировании спроса, гибком управлении запасами, контроле качества сырья, мониторинге транспортных операций и снижении экологических рисков. Именно поэтому универсальные цифровые решения должны адаптироваться с учетом производственной и логистической структуры конкретного предприятия.

На основе анализа были сформулированы следующие практические рекомендации:

- проводить поэтапный аудит цифровой зрелости логистики;
- внедрять сквозные цифровые платформы с предиктивной аналитикой;
- использовать цифровые двойники для моделирования сценариев и оптимизации решений;
- выстраивать цифровое взаимодействие с подрядчиками и клиентами;
- развивать компетенции логистического персонала в области аналитики и цифровых систем.

Системный подход к цифровизации логистики позволяет не только снизить издержки и повысить производительность, но и обеспечить стратегическую устойчивость предприятия в условиях неопределенности,

соответствовать требованиям ESG, а также формировать основу для масштабирования бизнес-модели.

Полученные результаты представляют научный и практический интерес для широкого круга специалистов в области управления логистикой, цифровой трансформации, промышленной инженерии и устойчивого развития. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка моделей цифровой зрелости логистических систем и эконометрическая оценка взаимосвязи между уровнем цифровизации и операционной эффективностью предприятий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Иванов Д., Цыганков П., Dolgui A. Digital Supply Chain Management and Technology: A Literature Review // International Journal of Production Research. – 2020.
- 2 Lasi H., Fettke P., Kemper H.–G., Feld T., Hoffmann M. Industry 4.0 // Business & Information Systems Engineering. – 2014.
- 3 Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. – Final Report. – 2013.
- 4 Saghaian S., Van Oyen M.P. Operations Management in the Era of Industry 4.0: A Review and Future Research Directions // Production and Operations Management. – 2021.
- 5 Queiroz M.M., Telles R., Bonilla S.H. Industry 4.0 and Digital Supply Chain Capabilities: A Systematic Review // International Journal of Production Research. – 2020.
- 6 Wang G., Gunasekaran A., Ngai E.W.T., Papadopoulos T. Big Data Analytics in Logistics and Supply Chain Management // International Journal of Production Economics. – 2020.
- 7 Ivanov D., Dolgui A. Viability of Intertwined Supply Networks: Extending the Supply Chain Resilience Angles // International Journal of Production Research. – 2020.
- 8 Иванов С.П., Петров А.В. Цифровизация в управлении цепями поставок: современные тенденции и вызовы // Журнал логистики. – 2022.
- 9 Кузнецова Е.В. Цифровая цепочка поставок как интегрированная система управления // Вестник информационных технологий. – 2020.
- 10 Strategy& (PwC). Supply Chain 4.0: цифровая трансформация цепочек поставок. – 2020. – URL: <https://www.strategyand.pwc.com>
- 11 Смирнов И.И. Традиционная и цифровая модели управления цепями поставок: сравнительный анализ // Логистика сегодня. – 2023.
- 12 S&P Global. Отчёт о цифровизации цепочек поставок. – 2023. – URL: <https://www.spglobal.com>.
- 13 PwC. Industry 4.0 and the Supply Chain. – 2019. – URL: <https://www.pwc.com/industry4.0>.
- 14 Иванова Н.Н. Технологии цифровизации в логистике и цепях поставок // Труды Международной конференции по логистике. – 2021.
- 15 Amazon Robotics achieves worldwide scale and improves engineering efficiency by 35% with Amazon DynamoDB. URL: <https://aws.amazon.com/blogs/database/amazon-robotics-achieves-worldwide->

scale-and-improves-engineering-efficiency-by-35-with-amazon-dynamodb/
(дата обращения: 02.06.2025).

- 16 Maersk. Remote Container Management: IoT для рефрижераторных контейнеров. – 2022. – URL: <https://www.maersk.com/solutions/digital/rcm>.
- 17 PwC's 2025 Digital Trends in Operations Survey. URL: https://www.pwc.com/us/en/services/consulting/business-transformation/digital-supply-chain-survey.html?utm_source=chatgpt.com
- 18 Цифровые двойники как инструмент оптимизации системы охраны труда на производстве. URL: <https://hsedays.ru/875-cifrovye-dvojniki-kak-instrument-optimizacii-sistemy-ohrany-truda-na-proizvodstve.html>.
- 19 Top 10 Cement Companies in USA: May 2025 <https://topcementcompanies.com/top-10-cement-companies-in-usa/>
- 20 Global Cement and Concrete Association (GCCA). ESG и устойчивое развитие в цементной промышленности. – 2024. – URL: <https://gccassociation.org>.
- 21 Heidelberg Materials. Годовой отчёт 2023. – URL: <https://www.heidelbergmaterials.com/investors>.
- 22 SAP Integrated Business Planning 1908 Innovations. URL: <https://community.sap.com/t5/supply-chain-management-blog-posts-by-members/sap-integrated-business-planning-1908-innovations/ba-p/13416375>
- 23 Изображение: What is a control tower? Improved. URL: <https://www.pwc.be/en/fy24/images/2col-what-is-a-control-tower-improved.jpg>
- 24 Avanntech. URL: <https://avanntech.com/productolang=ru>
- 25 Цифровые двойники <https://hsedays.ru/875-cifrovye-dvojniki-kak-instrument-optimizacii-sistemy-ohrany-truda-na-proizvodstve.html>
- 26 EDI invoice: What does EDI <https://blog.seeburger.com/edi-invoice-what-does-edi-electronic-data-interchange-mean-for-e-invoicing/>