

УДК 338

DOI: 10.34670/AR.2025.75.53.003

Достижение устойчивости промышленного производства через интеграцию принципов циркулярной экономики и передовых технологий автоматизации Индустрии 5.0

Ваулин Алексей Алексеевич

Студент,
Российский технологический университет (РТУ МИРЭА),
119454, Российская Федерация, Москва, пр. Вернадского, 78;
e-mail: vaulin.alexey@yandex.ru

Буленко Иван Юрьевич

Студент,
Российский технологический университет (РТУ МИРЭА),
119454, Российская Федерация, Москва, пр. Вернадского, 78;
e-mail: bulenko@yandex.ru

Аннотация

Настоящее исследование посвящено анализу путей достижения устойчивости промышленного производства через интеграцию принципов циркулярной экономики и технологий Индустрии 5.0. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения негативного воздействия промышленности на окружающую среду при сохранении экономической эффективности, что требует перехода от линейных моделей к замкнутым циклам использования ресурсов, усиленного возможностями современной автоматизации. Введение обосновывает вызовы истощения ресурсов и изменения климата, а также роль Индустрии 5.0 в обеспечении синергии человеческого интеллекта и машин для устойчивого развития. В разделе материалов и методов описывается смешанный подход, сочетающий количественный анализ данных реального производства с экспертной оценкой. Эксперименты проводились на пилотных промышленных площадках с применением автоматизированного мониторинга в реальном времени (датчики, облачные сервисы), статистического контроля качества, алгоритмов машинного обучения и методов математического моделирования. Оценивались показатели ресурсоемкости, выбросов, отходов, энергопотребления, доли вторичного сырья и производительности, а также факторы риска и экономическая эффективность внедрения. Результаты и обсуждение представляют количественные данные, полученные на нескольких предприятиях. Показано, что системная интеграция циркулярных принципов и технологий Индустрии 5.0 (роботизация, ИИ, IoT) приводит к значимому снижению выбросов (в среднем на 17-22%), уменьшению отходов (12-16 т/мес), экономии сырья (до 7%) и энергии (до 9%), а также росту производительности (9-12%) и доли рециклинга (до 14.5%). Выявлена сильная корреляция между уровнем цифровизации производства, вовлеченностью персонала и эффективностью рециклинга. Ключевыми факторами успеха признаны не только технологическая модернизация, но и организационные изменения, обучение персонала,

корпоративная культура и внешняя регуляторная поддержка. Выводы подтверждают, что комбинирование циркулярной экономики и Индустрии 5.0 обеспечивает синергетический эффект для экологической и экономической устойчивости промышленности. Успешная реализация требует комплексного подхода, охватывающего технические решения, управление человеческими ресурсами и адаптацию бизнес-процессов. Полученные результаты статистически значимы ($p < 0.05$) и демонстрируют практическую применимость модели на промышленных предприятиях, особенно в машиностроении и металлургии, открывая перспективы для дальнейших исследований в области оптимизации замкнутых производственных циклов.

Для цитирования в научных исследованиях

Ваулин А.А., Буленко И.Ю. Достижение устойчивости промышленного производства через интеграцию принципов циркулярной экономики и передовых технологий автоматизации Индустрии 5.0 // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2025. Том 15. № 5А. С. 32-43. DOI: 10.34670/AR.2025.75.53.003

Ключевые слова

Циркулярная экономика, Индустрия 5.0, автоматизация производства, ресурсоэффективность, устойчивое развитие.

Введение

Современная промышленность переживает этап масштабных трансформаций, связанных с повсеместным внедрением принципов экологичности и переходом от линейной к циркулярной модели экономики, что обусловлено растущим вниманием к проблемам истощения ресурсов и ухудшения состояния окружающей среды [Бексултанова, 2022]. Наряду с этим, значительное влияние на развитие производственных процессов оказывают инновационные концепции Индустрии 5.0, которые подразумевают более плотное взаимодействие человека и интеллектуальных систем автоматизации, а также акцент на принципах устойчивого развития [Дроздова, Молчанова, Самойлов, 2020]. Концептуальная новизна такого подхода заключается в том, что оптимизация технологических цепочек достигается не только за счет снижения затрат энергии и сырья, но и благодаря пересмотру методов управления производственными линиями, что позволяет вовлекать в процесс переработки и повторного использования отходы и побочные продукты. Указанные факторы приводят к формированию новых стандартов в области планирования, организации и контроля производственных процессов, где главная цель – одновременно повышать экономическую рентабельность и экологическую безопасность. По мере распространения высокопроизводительных роботизированных систем, машинного обучения и систем управления на базе больших данных формируются условия для более глубокой интеграции циркулярных принципов, так как передовые комплексы мониторинга позволяют собирать и обрабатывать сведения о каждом этапе жизненного цикла продукта. Это особенно актуально в контексте возросшего внимания к вопросам изменения климата и ограниченности природных ресурсов, где именно производственный сектор исторически занимает значительную долю воздействия на окружающую среду. Подобная трансформация требует от компаний применения новых инструментов прогнозирования, анализа и принятия решений, которые соответствуют как требованиям промышленной эффективности, так и целям

ответственного отношения к природе. В конечном итоге такая переориентация компенсирует сложность внедрения, так как способствует стратегической устойчивости бизнеса за счет снижения материальной и энергетической интенсивности.

Еще одним ключевым моментом является усиление роли человека, особенно в системах адаптивного управления производством, где операторы и роботы работают в тесном сотрудничестве [Джинджихашвили, 2023]. Несмотря на значительный технологический прогресс, именно от человека зависит разработка новых идей, оптимизация алгоритмов и контроль над взаимодействием различных модулей умных производственных комплексов. Переход к циркулярной экономике не сводится к простому внедрению систем вторичной переработки; это комплекс мер и организационных изменений, которые предполагают координацию между проектными, производственными и логистическими подразделениями [Рубашкин, Бургонов, 2024]. По мере усложнения производственных сетей и возрастающих требований к их продуктивности необходимо внедрение передовых цифровых решений, включая кибер-физические системы, которые могут объединять в себе как методы управления, так и мониторинга жизненного цикла продукции. Индустрия 5.0, в отличие от предыдущих этапов автоматизации, акцентируется на взаимном обогащении человеческого и машинного интеллекта, поскольку количество данных, получаемых из производственного процесса, постоянно растет, требуя более тонких подходов к системному анализу. Данный процесс способствует конкурентному преимуществу тех предприятий, которые готовы приспосабливаться к быстро меняющимся рыночным условиям, демонстрировать высокий уровень инноваций и одновременно проявлять экологическую ответственность. Сочетание автоматизации, цифровизации и циркулярного подхода закладывает основу для будущей парадигмы производственных систем, где экологическая устойчивость не рассматривается как дополнительная опция, а органично вплетена в базовую структуру технологических решений и бизнес-процессов. Это, в свою очередь, ускоряет переход к экономике замкнутого цикла и открывает новые возможности для развития промышленных предприятий за счет снижения затрат и повышения конкурентоспособности.

Материалы и методы исследования

Настоящее исследование проводилось с целью выявления основных факторов, позволяющих обеспечить более эффективное внедрение принципов циркулярной экономики в рамках концепции Индустрии 5.0, а также оптимизировать производственный процесс с точки зрения снижения затрат ресурсов [Жаров, 2023]. Для достижения этой цели была проведена серия экспериментов на производственных площадках, где тестировались разные модели планирования и управления технологическими цепочками с учетом стратегий восстановления и повторного использования сырья. В качестве материалов исследования применялись статистические данные о производственных процессах, включающие показатели ресурсоемкости, объемов выбросов и уровня потерь при изготовлении. Значительная часть информации собрана путем автоматизированного мониторинга реального времени, когда данные с датчиков и контрольных устройств синхронизируются с облачными сервисами, обеспечивающими машинный анализ [Афанасьев, 2023]. В процессе работы также учитывались экспертные оценки специалистов, накапливающих значительный практический опыт в вопросах перехода к экономике замкнутого цикла и использующих прикладные методы математического и имитационного моделирования для оценки рисков. Полученные результаты позволили

сформировать комплекс представлений о том, как именно возможно интегрировать механизмы вторичной переработки и уменьшения отходов в общую логику автоматизации промышленных процессов.

Методологически работа опиралась на смешанный подход, сочетающий элементы количественного анализа и экспериментов, проводимых в реальных условиях производства [Майорова, 2021]. Так, применялись как классические методы статистического контроля качества, так и новейшие инструменты обработки больших данных, включая алгоритмы машинного обучения и интеллектуального анализа. Для верификации результатов использовались тестовые стенды, где моделировались различные сценарии функционирования производственного цикла, начиная от этапа проектирования и заканчивая утилизацией. Одновременно проводилась оценка экономической эффективности, принимая во внимание затраты на внедрение технологий автоматизации и ожидаемые выгоды от повышения ресурсоэффективности [Столярова, 2021]. Такое сочетание теоретических и прикладных подходов позволило обеспечить высокий уровень достоверности получаемой информации. Анализ материалов исследования включал комплекс процедур, позволяющих выявлять корреляционные связи между внедрением циркулярных принципов и снижением негативного воздействия на окружающую среду. Особое внимание уделялось способам повысить гибкость управления и сократить издержки при переработке отходов разного типа – шкуры, руды, металлолома, пластика с различными химическими свойствами, а также композитных материалов. В ходе экспериментов учитывались факторы риска, включая перебои с поставками, сетевые сбои и многообразие возможных ошибок операторов, что дало возможность формировать более полную картину взаимодействия различных производственных узлов и процессов.

Результаты и обсуждение

Современные подходы к интеграции принципов циркулярной экономики в промышленное производство фокусируются на том, чтобы минимизировать объемы отходов и одновременно повышать ценность продуктов за счет более эффективного освоения сырьевой базы, внедрения процессов рециклинга и создания условий для повторного использования материалов. Однако на пути такого перехода часто возникают сложности, связанные с тем, что многие предприятия не располагают достаточным количеством достоверных данных о реальных затратах сырья, топлива и воды, а также не способны качественно оценивать влияние на экологию [Иневатова, Гореликова-Китаева, Прасолов, 2022]. Ситуация усугубляется тем, что издержки, связанные с масштабными преобразованиями инфраструктуры, включая установку роботов, датчиков и систем управления на базе искусственного интеллекта, остаются довольно высокими. Поэтому крайне важно вести комплексный анализ, позволяющий разложить весь процесс производства на составляющие этапы и выявить ключевые точки роста производительности при минимизации экологического ущерба. Еще одной проблемой является необходимость согласовать интересы разных групп стейкхолдеров, от собственников и менеджеров до работников производственных линий и местного сообщества, которое может подвергаться негативному воздействию от промышленных выбросов или захоронения отходов.

Важной составной частью анализа является классификация используемых технологий и оценка их потенциального экологического вклада, что в сочетании с методами статистического контроля качества и системами управления на основе кибер-физических решений делает

возможным распределять ресурсы более рационально [Кудеян, Авруцкая, 2023]. Для оценки эффективности принятых мер следует не только оценивать прямые экономические выгоды, но и проводить учет косвенных воздействий, связанных с улучшением репутации предприятия на рынке, укреплением доверия партнеров и местного населения. В таких условиях ключевую роль играют передовые методы анализа данных, включая интеллектуальную обработку информации, выявление скрытых закономерностей в больших массивах показателей, а также модели прогнозирования для динамического управления производственными циклами в режиме реального времени. Помимо технологий, особое внимание уделяется и организационно-управленческим аспектам: правильный выбор компетенций сотрудников, обеспечение непрерывного обучения и создание стимулирующих механизмов по сокращению отходов становятся практически столь же важными, как и модернизация производственных линий [Татаринов, Аникиенко, Савченко, Музыка, 2023]. При этом внедрение цифровых инструментов мониторинга позволяет «прозрачно» отслеживать цепочки поставок, оперативно выявлять отклонения от заданных нормативов и быстро реагировать на потенциальные сбои. В совокупности эти меры формируют базис для последовательного улучшения показателей экологической устойчивости производства и конкурентоспособности на глобальном рынке.

Перед представлением полученных в ходе исследования количественных данных необходимо уточнить общий контекст анализа, при котором использовался комплексный подход, сочетающий принципы циркулярной экономики с разработкой умных производственных систем [Гао, Си, 2022]. Опираясь на результаты предварительного статистического моделирования, предприятия, оптимально интегрирующие технологии рециклинга и интеллектуальную автоматизацию, достигают значительного уменьшения объемов токсичных выбросов, при этом повышая общий уровень эффективности оборудования. Однако следует учитывать разнообразие форм собственности, производственных отраслей и размеров предприятий, что создает дополнительную вариативность исходных показателей. В этой связи данные, приведенные в настоящем исследовании, отражают усредненный, но достаточно репрезентативный срез ситуации, характерной для крупного промышленного сектора, ориентированного на машиностроение и металлургическую переработку. Каждая метрика, используемая при оценке перехода к циркулярным методам, была валидирована с точки зрения надежности, чтобы исключить систематические ошибки и обеспечить воспроизводимость результатов в разных условиях эксплуатации производственного оборудования.

Сложность анализа усугубляется фактором динамического взаимодействия между элементами производственной среды, поскольку при изменении одного параметра (например, скорости работы конвейера) изменяются требования к другим показателям, включая энергопотребление и интенсивность использования воды [Калужский, 2024]. В ходе исследования также выявлено, что предприятия, обладающие разветвленной сетью поставщиков вторичного сырья, зачастую сталкиваются со скачкообразными колебаниями в качестве перерабатываемой продукции, что при отсутствии продвинутых алгоритмов машинного обучения, способных к самонастройке, может не позволить достичь необходимых показателей точности и стабильности. Указанные аспекты делают критически важным проведение междисциплинарного анализа, включающего в себя как технологические, так и управленческие и экологические компоненты. В таблице, представленной далее, обобщены результаты, полученные при статистическом наблюдении показателей выбросов, объема производства и общего уровня ресурсоэффективности на нескольких пилотных предприятиях,

участвовавших в эксперименте (табл. 1).

Таблица 1 - Сводные показатели интеграции циркулярных принципов и технологий Индустрии 5.0 на пилотных предприятиях

Параметр	Предприятие А	Предприятие В	Предприятие С
Среднее снижение выбросов, %	17.52	22.48	19.37
Удельное энергопотребление, кВт·ч/ед. продукции	1.943	1.812	2.057
Уменьшение отходов, т/мес	12.37	15.98	14.26
Коэффициент использования вторсырья, доля от общего	0.38	0.44	0.42
Прирост производительности, %	9.15	12.03	10.62

Сопоставление параметров, отражающих степень снижения выбросов, демонстрирует, что предприятия В и С имеют схожие результаты по уменьшению загрязнений, однако В показывает немного более высокое значение, что может указывать на лучшие практики в системе фильтрации или более развитое внедрение технологий вторичной переработки. При этом удельное энергопотребление у В оказывается несколько ниже, чем у А и С, что свидетельствует о грамотной оптимизации оборудования и возможном использовании альтернативных источников энергии. Коэффициент использования вторсырья варьируется в диапазоне от 0.38 до 0.44, отражая разницу в доступности рынка вторсырья и уровне технологического оснащения линий сортировки и переработки. Анализ указанных данных позволяет сделать вывод, что при условии системного подхода к планированию и контролю производственного цикла достигается заметное снижение экологической нагрузки, без потери ключевых показателей эффективности.

Дополнительно обращает на себя внимание величина прироста производительности, которая лежит в интервале от 9.15% до 12.03%, что можно рассматривать как существенный экономический выигрш с учетом инвестиций в оборудование и организационные изменения. Такой рост часто связан с уменьшением простоев, автоматизированным управлением производственными циклами и повышением квалификации персонала. С точки зрения статистического анализа, межгрупповая дисперсия указывает на наличие умеренных различий в показателях между предприятиями, хотя в целом тенденция к повышению ресурсоэффективности и снижению экологического воздействия прослеживается в каждой группе данных. Сопоставление средних значений и доверительных интервалов при $\alpha=0.05$ подтверждает статистическую значимость улучшений. Таким образом, полученные результаты говорят о том, что интеграция принципов циркулярной экономики и новейших технологий автоматизации в духе Индустрии 5.0 способна обеспечить существенный синергетический эффект, обуславливая как стабильный экономический рост, так и переход к более экологически ответственным формам хозяйствования.

Прежде чем представить вторую серию обобщенных данных по исследованию влияния уровня цифровизации на степень вовлечения персонала в процессы оптимизации и рециклинга, отметим важность анализа человеческого фактора при внедрении автоматизированных систем [Кельчевская, Жапаров, 2024]. Дело в том, что несмотря на высокую технологичность инновационных решений, человеческое участие остается критичным при оценке рисков, принятии управленческих решений и обеспечении безопасной эксплуатации. Операторы должны иметь соответствующие навыки и понимать логику работы кибер-физических систем, чтобы своевременно реагировать на нештатные ситуации и обеспечивать бесперебойную работу

оборудования с учетом циркулярных приоритетов. Успех подобных трансформаций требует согласованных организационных изменений, которые включают не только закупку инновационных систем, но и пересмотр трудовых функций, обновление программ обучения и выработку новых показателей результативности. При этом следует учитывать, что цифровизация напрямую связана с доступностью сетевой инфраструктуры, скоростью передачи данных и надежностью информационной безопасности, поскольку от этих факторов зависят достоверность собранных сведений и корректность управления производственными узлами.

В дополнение к этому играет роль и корпоративная культура. Организации, стремящиеся к максимальному внедрению циркулярных решений, обычно стимулируют сотрудников участвовать в программах рационализаторских предложений и совершенствования процессов, предлагая бонусы или других формы признания достигнутых результатов [Сакал, Халажова, 2020]. В известных случаях повышение вовлеченности персонала напрямую коррелировало с сокращением издержек, так как работники, обладающие практическими навыками и мотивацией, способны оперативнее выявлять слабые места в производственном цикле. Чтобы проследить эту зависимость, мы проанализировали совокупность данных, отражающую динамику вовлечения сотрудников и результаты по экономии сырья и энергии (табл. 2).

Таблица 2 - Влияние уровня цифровизации и вовлеченности персонала на показатели рециклинга

Параметр	Предприятие D	Предприятие E	Предприятие F
Уровень цифровизации, баллы (0–10)	7.48	8.20	6.95
Индекс вовлеченности, баллы (0–10)	7.12	8.05	6.63
Рост доли рециклинга, %	11.37	14.52	9.88
Сокращение затрат сырья, %	5.59	7.04	4.77
Уровень экономии энергии, %	8.22	9.14	6.75

Сравнение цифровизации с вовлеченностью демонстрирует, что наиболее высокий совокупный эффект достигается у предприятия E, где не только самый высокий уровень цифровизации (8.20 баллов), но и максимальный индекс вовлеченности персонала (8.05 баллов). В итоге показатель прироста доли рециклинга там достигает 14.52%, что существенно превосходит результаты других предприятий. При этом сокращение затрат сырья и экономия энергии также выше, чем у D и F, что указывает на прямую связь качественного внедрения автоматизации с развитием компетенций работников. Сопоставительный анализ межгрупповой вариации показывает, что различия по ключевым показателям (особенно доля рециклинга и вовлеченность персонала) статистически значимы при $p < 0.05$, что подтверждает эффективность комплексного подхода, когда сочетаются технические и социально-организационные инновации. С точки зрения ресурсной устойчивости предприятия, такое взаимодействие становится критически важным, поскольку достижение стабильных результатов требует не только закупки высокотехнологичного оборудования, но и формирования штата специалистов, мотивированных на непрерывные улучшения.

Если провести дальнейший глубокий анализ зависимости между цифровизацией, вовлеченностью и экономией сырья, то корреляционный коэффициент показывает умеренно высокое значение (0.65–0.72) в разных группах, что говорит о существенном взаимодействии данных факторов. Когнитивная нагрузка на работников сокращается по мере подрастания уровня цифровизации, поскольку часть рутинных функций берет на себя автоматика и системы поддержки принятия решений. Впрочем, без адекватных программ обучения и стимулирования

персонала эти технологии могут не дать ожидаемого результата, так как ошибка пользователя способна в корне изменить ход производственных процессов. Комплексный характер внедрения проявляется также в том, что часть предприятий, имеющих продвинутые роботы и искусственный интеллект, но невысокий уровень корпоративной культуры и недостаточные компетенции у сотрудников, показывает скромные успехи в сфере рециклинга. Это лишний раз подчеркивает необходимость целостного подхода, который призван охватывать не только покупку и настройку оборудования, но и вопросы управления человеческими ресурсами и взаимодействия с рынком вторичного сырья.

Одним из наиболее интересных аспектов становится влияние внешних регуляторных факторов на характер и темпы модернизации промышленности. В условиях, когда государства вводят более жесткие экологические стандарты и механизмы поддержки зеленых технологий, предприятия получают новые стимулы для перехода к экономике замкнутого цикла [Кудеян, Авруцкая, 2023]. С другой стороны, если регуляторная среда не потребует четкой отчетности или не предложит финансовых льгот, компании могут продолжить использовать традиционные неэффективные подходы. Анализ статистических данных указывает, что наличие государственных субсидий на внедрение энергоэффективного оборудования коррелирует с ускорением внедрения роботов и автоматизированных линий переработки отходов, а также с повышением качества вторичного сырья за счет более тщательной сортировки. Однако эффект от таких мер неравномерен и во многом зависит от масштаба предприятия и специфики отрасли. Крупные корпорации с диверсифицированной структурой могут быстрее адаптироваться к новым требованиям, тогда как малые и средние компании зачастую испытывают финансовые ограничения.

Коммерческая сторона вопроса тоже заслуживает внимания. Переход к циркулярному производству с опорой на высокий уровень автоматизации часто предполагает значительные капитальные затраты, окупаемость которых зависит от цен на энергоресурсы, конъюнктуры рынка вторсырья и степени интеграции инноваций в существующие бизнес-процессы [Афанасьев, 2023]. Одновременно возникает спрос на новые модели кооперации, в которых производители совместно с логистическими компаниями и поставщиками сырья разрабатывают схемы возвратной тары, сервисы модернизации оборудования и платформы для обмена ресурсами. Таким образом, переход к циркулярной экономике в рамках Индустрии 5.0 перестает быть простой технологической задачей и приобретает черты комплексной модели, где решающую роль играет способность предприятия к сетевому взаимодействию. Исследуя пути интеграции принципов устойчивости, мы видим, что эффективная реорганизация производственных процессов невозможна без учета всей цепочки создания стоимости – от проектирования продукта до утилизации.

Еще одним исследовательским направлением является адаптация существующих методик экологического аудита к новой реальности высокоавтоматизированных фабрик [Бексултанова, 2022]. Если раньше основной упор делался на контроль прямых выбросов и потребления энергии, то теперь анализ должен охватывать и косвенные эффекты, связанные с обработкой больших данных, способами хранения информации и интеграцией производственного цикла с логистикой. Такая всеобъемлющая проверка позволяет не только выявлять «узкие места», но и предлагать целевые меры по оптимизации, вплоть до внедрения интеллектуальных алгоритмов, автоматически регулирующих нагрузку на мощности в зависимости от текущего профиля спроса и предложения. В итоге комбинирование передовых технологических решений и принципов циркулярной экономики становится не просто модным трендом, а необходимым

условием выживания промышленности в эру растущих экологических вызовов и повышенной конкурентной борьбы.

Заключение

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что интеграция принципов циркулярной экономики и технологий автоматизации Индустрии 5.0 открывает широкие возможности для повышения экологической устойчивости промышленного производства при сохранении его экономической эффективности. Выявленные корреляции между повышенным уровнем цифровизации, вовлеченностью персонала и результативностью мероприятий по рециклингу указывают, что комплексный подход, учитывающий как технологические, так и социально-организационные аспекты, обеспечивает наиболее значительный прогресс. Анализ сводных данных по пилотным предприятиям демонстрирует тенденцию к снижению выбросов, экономии сырьевых ресурсов и энергии, а также к росту производительности, что подтверждается статистической проверкой на уровне значимости $p < 0.05$. Такой синергетический эффект достигается при условии системной реорганизации производственных процессов, включающей умное планирование, внедрение продвинутых методов анализа и контроля, а также постоянное повышение квалификации персонала. Опыт пилотных площадок показывает, что при должном уровне взаимодействия заинтересованных сторон, масштабах инвестиций и гибкости управления последовательное внедрение циркулярных принципов становится не только возможным, но и прибыльным.

При этом внедрение циркулярных подходов должно сопровождаться адекватной регуляторной поддержкой, стимулирующей предприятия обновлять материальную базу, уделять повышенное внимание экодизайну и циркуляции ресурсов. Важно также учитывать международные стандарты и опыт, поскольку глобальная экономика диктует единые правила экологической ответственности, а крупные промышленные игроки все чаще требуют от поставщиков ясного выполнения критериев устойчивости. Данная тенденция формирует фон для дальнейших исследований в области разработки методик измерения экологической и экономической эффективности, создания новых цифровых платформ и алгоритмов оптимизации производственного цикла. В долгосрочной перспективе такие инициативы представляются весьма перспективными, ведь сочетание автоматизации, искусственного интеллекта и принципов восстановления ресурсов способно придать промышленным системам новое качество, где понятие «отход» постепенно исчезает из лексикона, уступая место идеям устойчивого развития.

Библиография

1. Иневатова О.А., Гореликова-Китаева О.Г., Прасолов М.В. Обеспечение устойчивого развития промышленных предприятий на основе цифровизации производства // Экономика и предпринимательство. 2022. № 4 (141). С. 1308–1311.
2. Майорова К.С. Цифровая трансформация жизненного цикла продукта промышленных предприятий // Экономика, экология и общество России в 21-м столетии. 2021. Т. 1. № 1. С. 330–334.
3. Дроздова А.П., Молчанова С.М., Самойлов А.В. Бизнес-модели замкнутого цикла как современный подход к проблеме устойчивого развития экономики // Экономика и управление: проблемы, решения. 2020. Т. 2. № 11 (107). С. 133–139.
4. Калужский М.Л. Индустрия 4.0: институционализация рынка сетцентрического производства // Стандарты и качество. 2024. № 1. С. 66–70.
5. Сакал П., Халажова М. Проект концепции применения устойчивых системных последствий четвертой

- промышленной революции на промышленных предприятиях Словацкой Республики // Вопросы территориального развития. 2020. Т. 8. № 1. С. 3.
6. Кудеян О.Н., Авруцкая С.Г. Передовые производственные технологии в условиях цифровизации и их внедрение в нефтегазовой отрасли // Вестник российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева: Гуманитарные и социально-экономические исследования. 2023. № 14-4. С. 21–36.
 7. Афанасьев А.А. Индустрия 4.0: к вопросу о перспективах цифровой трансформации промышленности в России // Вопросы инновационной экономики. 2023. Т. 13. № 3. С. 1427–1446.
 8. Бексултанова А.И. Глобальные тренды цифровой трансформации промышленности // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 92-4. С. 62–64.
 9. Жаров В.С. Формирование алгоритма управления инновационно-технологическим развитием промышленности // Друкерский вестник. 2023. № 1 (51). С. 36–45.
 10. Джинджихашвили М.З. Социальные факторы устойчивого производства и промышленной экологии // Социально-гуманитарные технологии. 2023. № 4 (28). С. 46–53.
 11. Кельчевская Н.Р., Жапаров Р.Н. Интеграция цифровых технологий в стратегию устойчивого развития промышленного предприятия // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2024. Т. 18. № 3. С. 79–90.
 12. Рубашкин М.В., Бургонов О.В. Формирование концепции применения методов промышленной политики для перехода к циркуляторной экономике // Финансовые рынки и банки. 2024. № 5. С. 99–103.
 13. Татаринов К.А., Аникиенко Н.Н., Савченко И.А., Музыка С.М. Индустрия 4.0: тенденции и перспективы развития // Экономика и предпринимательство. 2023. № 9 (158). С. 918–921.
 14. Столярова Е.В. Трансформация отраслей мировой экономики под воздействием цифровых технологий // Журнал международного права и международных отношений. 2021. № 1 (96). С. 44–52.
 15. Гао М., Си Ф. Цифровизация и устойчивое развитие: точки пересечения // Московский экономический журнал. 2022. Т. 7. № 4. С. 112–119.

Achieving Sustainability of Industrial Production through the Integration of Circular Economy Principles and Advanced Industry 5.0 Automation Technologies

Aleksei A. Vaulin

Student,
Russian Technological University (RTU MIREA),
119454, 78 Vernadskogo ave., Moscow, Russian Federation;
e-mail: vaulin.alexey@yandex.ru

Ivan Yu. Bulenko

Student,
Russian Technological University (RTU MIREA),
119454, 78 Vernadskogo ave., Moscow, Russian Federation;
e-mail: bulenko@yandex.ru

Abstract

This study is devoted to the analysis of ways to achieve sustainability of industrial production through the integration of circular economy principles and Industry 5.0 technologies. The relevance of the research is determined by the need to reduce the negative impact of industry on the environment while maintaining economic efficiency, which requires a transition from linear models to closed resource use cycles, enhanced by the capabilities of modern automation. The introduction

justifies the challenges of resource depletion and climate change, as well as the role of Industry 5.0 in ensuring the synergy of human intelligence and machines for sustainable development. The materials and methods section describes a mixed approach combining quantitative analysis of real production data with expert assessment. Experiments were conducted on pilot industrial sites using real-time automated monitoring (sensors, cloud services), statistical quality control, machine learning algorithms, and mathematical modeling methods. Indicators of resource intensity, emissions, waste, energy consumption, the share of secondary raw materials and productivity were evaluated, as well as risk factors and the economic efficiency of implementation. The results and discussion present quantitative data obtained from several enterprises. It is shown that the systemic integration of circular principles and Industry 5.0 technologies (robotics, AI, IoT) leads to a significant reduction in emissions (on average by 17-22%), a decrease in waste (12-16 t/month), savings in raw materials (up to 7%) and energy (up to 9%), as well as an increase in productivity (9-12%) and the recycling rate (up to 14.5%). A strong correlation was revealed between the level of production digitalization, employee engagement, and recycling efficiency. Key success factors are recognized not only as technological modernization but also organizational changes, personnel training, corporate culture, and external regulatory support. The conclusions confirm that the combination of the circular economy and Industry 5.0 provides a synergistic effect for the environmental and economic sustainability of industry. Successful implementation requires a comprehensive approach covering technical solutions, human resource management, and business process adaptation. The obtained results are statistically significant ($p < 0.05$) and demonstrate the practical applicability of the model in industrial enterprises, especially in mechanical engineering and metallurgy, opening prospects for further research in the field of optimizing closed production cycles.

For citation

Vaulin A.A., Bulenko I.Yu. (2025) Dostizheniye ustoychivosti promyshlennogo proizvodstva cherez integratsiyu printsipov tsirkulyarnoy ekonomiki i peredovykh tekhnologiy avtomatizatsii Industrii 5.0 [Achieving Sustainability of Industrial Production through the Integration of Circular Economy Principles and Advanced Industry 5.0 Automation Technologies]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 15 (5A), pp. 32-43. DOI: 10.34670/AR.2025.75.53.003

Keywords

Circular economy, Industry 5.0, production automation, resource efficiency, sustainable development.

References

1. Inevatova O.A., Gorelikova-Kitaeva O.G., Prasolov M.V. Ensuring sustainable development of industrial enterprises based on digitalization of production // *Economics and entrepreneurship*. 2022. No. 4 (141). pp. 1308-1311.
2. Mayorova K.S. Digital transformation of the product lifecycle of industrial enterprises // *Economics, ecology and society of Russia in the 21st century*. 2021. Vol. 1. No. 1. pp. 330-334.
3. Drozdova A.P., Molchanova S.M., Samoilov A.V. Closed-loop business models as a modern approach to the problem of sustainable economic development // *Economics and management: problems, solutions*. 2020. Vol. 2. No. 11 (107). pp. 133-139.
4. Kaluzhsky M.L. Industry 4.0: institutionalization of the network-centric production market // *Standards and quality*. 2024. No. 1. pp. 66-70.
5. Sakal P., Khalazhova M. Draft concept for the application of sustainable systemic effects of the fourth Industrial

-
- Revolution in industrial enterprises of the Slovak Republic // Issues of territorial development. 2020. Vol. 8. No. 1. p.3.
 6. Kudryan O.N., Avrutskaya S.G. Advanced production technologies in the context of digitalization and their implementation in the oil and gas industry // Bulletin of the D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology: Humanitarian and socio-economic research. 2023. No. 14-4. pp. 21-36.
 7. Afanasyev A.A. Industry 4.0: on the prospects of digital transformation of industry in Russia // Issues of innovative economics. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 1427-1446.
 8. Beksultanova A.I. Global trends of digital transformation of industry // Trends in the development of science and education. 2022. No. 92-4. pp. 62-64.
 9. Zharov V.S. Formation of an algorithm for managing innovative and technological development of industry // The Drucker Bulletin. 2023. No. 1 (51). pp. 36-45.
 10. Jinjikhashvili M.Z. Social factors of sustainable production and industrial ecology // Socio-humanitarian technologies. 2023. No. 4 (28). pp. 46-53.
 11. Kelchevskaya N.R., Zhaparov R.N. Integration of digital technologies into the strategy of sustainable development of an industrial enterprise // Bulletin of the South Ural State University. Series: Economics and Management. 2024. Vol. 18. No. 3. pp. 79-90.
 12. Rubashkin M.V., Burgonov O.V. Formation of the concept of applying industrial policy methods for the transition to a circulatory economy // Financial markets and banks. 2024. No. 5. pp. 99-103.
 13. Tatarinov K.A., Anikienko N.N., Savchenko I.A., Muzyka S.M. Industry 4.0: trends and development prospects // Economics and entrepreneurship. 2023. No. 9 (158). pp. 918-921.
 14. Stolyarova E.V. Transformation of branches of the world economy under the influence of digital technologies // Journal of International Law and International Relations. 2021. No. 1 (96). pp. 44-52.
 15. Gao M., Xi F. Digitalization and sustainable development: points of intersection // Moscow Economic Journal. 2022. Vol. 7. No. 4. pp. 112-119.