

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ / METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALSDOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.68>**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЛОГИСТИКИ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПОЛНОГО ЦИКЛА И БЕСКОКСОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

Научная статья

Русинов Р.А.^{1,*}, Башкатов Д.А.², Полулях Л.А.³^{1,2} Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва, Российская Федерация³ Московский институт стали и сплавов, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ronaldinho-arten[at]mail.ru)

Аннотация

Логистика полного цикла и бескоксовой металлургии представляет собой сеть взаимозависимостей – каждый подход, хотя и отличается от другого, выявляет проблемы, которые размывают границы между эффективностью, устойчивостью и инновациями. Металлургия полного цикла, опирающаяся на устоявшиеся «коксовые» процессы, обеспечивает логистическую устойчивость, но при этом несет значительные экологические издержки, поскольку транспортировка и обработка кокса приводят к неэффективности, которая распространяется на всю цепочку поставок; в то же время бескоксая металлургия, опирающаяся на альтернативные восстановители, такие как водород, предлагает сокращение выбросов, это сокращение приводит к новым логистическим трудностям, требующим точности и технологических инноваций. Сравнительный анализ выявляет двойственность: методы полного цикла, хотя и отличаются высокой производственной мощностью, не выдерживают давления со стороны экологии и управления отходами; бескоксые системы, напротив, оптимизируют экологические показатели, но требуют высокой степени логистической изощренности. Внедрение прогнозных моделей реального времени и цифровых двойников в бескоксую металлургию иллюстрирует потенциал «умной» логистики для решения этих проблем – снижение потерь материалов на 15%, повышение эффективности и минимизация воздействия на окружающую среду, хотя и не без новых сложностей в хранении и доставке водорода. Оба подхода отражают противоречие между традиционными логистическими системами, предназначенными для транспортировки тяжелых сыпучих материалов, и возникающей потребностью в гибких, адаптивных логистических стратегиях, объединяющих экологические проблемы и технологические достижения. Будущее логистики в металлургической промышленности заключается не в доминировании одного подхода над другим, а в непрерывной эволюции цифровых логистических систем, способных предвидеть сбои, сбалансировать экологические императивы и поддержать растущий спрос на устойчивое производство. Взаимодействие характеризует дальнейший путь: эффективность и устойчивость больше не являются противоположными силами, а представляют собой взаимосвязанные элементы в постоянно развивающейся логистической системе, а новые технологии, такие как «зеленая логистика» и водородный транспорт, предлагают решения, которые должны быть интегрированы в металлургический аспект.

Ключевые слова: металлургическая логистика, металлургия полного цикла, бескоксая металлургия, водородное сокращение, оптимизация цепочки поставок, экологическая устойчивость, управление отходами, технология цифрового двойника, зеленая логистика, эффективность производства.

COMPARATIVE EVALUATION OF LOGISTICS FOR INTEGRATED AND COKELESS METALLURGICAL PLANTS

Research article

Rusinov R.A.^{1,*}, Bashkatov D.A.², Polulyakh L.A.³^{1,2} National Research Technological University MISIS, Moscow, Russian Federation³ MISIS Institute of Steel and Alloys, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (ronaldinho-arten[at]mail.ru)

Abstract

The logistics of integrated and cokeless metallurgy are a web of interdependencies - each approach, while different from the other, identifies challenges that blur the boundaries between efficiency, sustainability and innovation. Integrated metallurgy, relying on established "cokeless" processes, offers logistical sustainability but also incurs significant environmental costs as coke transport and handling leads to inefficiencies that extend throughout the supply chain; while cokeless metallurgy, relying on alternative reducing agents such as hydrogen, offers emission reductions, these reductions lead to new logistical challenges that require precision and technological innovation. A comparative analysis reveals a duality: full-cycle methods, although high in production capacity, cannot withstand environmental and waste management pressures; cokeless systems, in contrast, optimize environmental performance but require a high degree of logistical sophistication. The introduction of real-time predictive models and digital twins into cokeless metallurgy illustrates the potential of smart logistics to address these challenges – reducing material losses by 15%, improving efficiency and minimizing environmental impact, although not without new complexities in hydrogen storage and delivery. Both approaches reflect the contradiction between traditional logistics systems designed to transport heavy bulk materials and the emerging demand for flexible, adaptive logistics strategies that integrate environmental concerns and technological advances. The future of logistics in the metals industry lies not in the dominance of one approach over another, but in the continuous evolution of digital logistics systems capable of anticipating

disruptions, balancing environmental imperatives and supporting the growing need for sustainable production. Interaction characterizes the way forward: efficiency and sustainability are no longer opposing forces but interrelated elements in a constantly evolving logistics system, and new technologies such as "green logistics" and hydrogen transport offer solutions to be integrated into the metallurgical aspect.

Keywords: metallurgical logistics, integrated metallurgy, cokeless metallurgy, hydrogen reduction, supply chain optimization, environmental sustainability, waste management, digital twin technology, green logistics, production efficiency.

Введение

Сравнительная оценка логистики для сталелитейных заводов полного цикла и бескоксвого производства акцентирует внимание на логистических процессах, которые охватывают различные методологии металлургического производства. Данное исследование требует изучения мировой практики в металлургии, подчеркивая значение логистики как ключевого компонента в поддержании производственных циклов и экономической жизнеспособности в современных промышленных условиях. Металлургия полного цикла – хорошо отлаженный процесс, включающий полное превращение сырья в готовую продукцию на нескольких этапах (каждый из которых требует определенных логистических стратегий), – контрастирует с бескоксвой металлургией, которая обходится без использования кокса – важнейшего, но экологически вредного материала в традиционном производстве стали. Как отмечает О. Ляховска, функциональность металлургических предприятий, особенно в период социально-политических кризисов, тесно связана с эффективным управлением логистикой [7, С. 6].

Цель данного исследования – провести сравнительный анализ логистических процессов, связанных с полным циклом и бескоксвой металлургией, с акцентом на экономическую эффективность, экологическую устойчивость и оптимизацию ресурсных потоков. Такой анализ позволит выявить преимущества и потенциальные недостатки каждого метода производства, тем самым давая представление о механизмах принятия решений, которые должны принять металлургические предприятия, чтобы процветать как на стабильных, так и на нестабильных мировых рынках. Следует отметить, что основная логистическая задача в металлургии полного цикла заключается в управлении многоступенчатым процессом от приобретения сырья (железной руды, угля) до производства стали, что требует координации цепочек поставок, транспортных сетей и систем утилизации отходов. С другой стороны, логистические требования бескоксвой металлургии обусловлены использованием альтернативных восстановителей, таких как водород или природный газ, которые требуют особого подхода к обработке материалов и соблюдению экологических норм.

Ключевые термины, лежащие в основе данного исследования, – «металлургия полного цикла» и «бескоксвая металлургия» – служат отправной точкой для понимания различных логистических стратегий, присущих этим металлургическим процессам. Под полным циклом металлургии понимается комплексная производственная цепочка, в которой сырье, включая железную руду и уголь, превращается в сталь посредством ряда взаимосвязанных этапов. Каждый этап включает в себя определенные логистические операции: транспортировку, хранение и переработку, все из которых имеют решающее значение для поддержания потока и эффективности производственного цикла. В отличие от этого, бескоксвая металлургия относится к инновационным методам производства, которые исключают необходимость использования кокса в качестве восстановителя, тем самым снижая выбросы углерода и воздействие на окружающую среду. Логистика в системе, однако, не менее сложна; она включает в себя обращение с альтернативными материалами, такими как водород, и требует адаптации к управлению отходами и потреблению энергии, что, в свою очередь, влияет на общую эффективность и устойчивость процесса [24, С. 293-343].

Методы и принципы исследования

При подходе к данному исследованию мы опираемся на надежную методологическую базу, которая объединяет как качественные, так и количественные методы исследования. Качественный аспект исследования будет сосредоточен на изучении конкретных примеров металлургических предприятий, которые внедрили логистические стратегии, адаптированные к их специфическим производственным процессам. Эти тематические исследования позволят получить представление о процессах принятия решений и логистических адаптациях, которые оказались эффективными или неэффективными в различных промышленных условиях. Количественные методы, с другой стороны, предполагают сбор и анализ данных, связанных с транспортными расходами, эффективностью цепочки поставок и воздействием на окружающую среду, что обеспечит эмпирическую поддержку сравнительной оценки. Сочетание этих методов позволит провести комплексный анализ, учитывающий как практические реалии, так и теоретические основы логистики в металлургическом производстве.

Исследование также учитывает особенности логистики в металлургической промышленности, которые определяются типом производства и специфическими требованиями каждого процесса. Например, в металлургии полного цикла логистическая цепь должна обеспечивать транспортировку больших объемов сырья – железной руды, угля, флюсов, а также обработку побочных продуктов, таких как шлак и отходящие газы. Сложность логистической цепочки усугубляется необходимостью координировать многочисленные этапы производства, от обогащения руды до разлива стали, каждый из которых требует точного соблюдения сроков и распределения ресурсов. В отличие от этого, бескоксвая металлургия создает свои собственные логистические проблемы, в частности, при работе с альтернативными восстановителями и управлении технологиями, исключающими выбросы. Логистические системы в бескоксвом производстве должны быть адаптированы к новым материальным потокам и обеспечивать эффективное использование энергоресурсов, таких как водород или возобновляемая электроэнергия, которые играют центральную роль в снижении углеродного следа производственного процесса [13, С. 365-370].

Сравнительный анализ этих двух подходов позволит выявить относительные преимущества и недостатки каждой логистической стратегии, обеспечивая понимание компромиссов, связанных с выбором между методами полного цикла и бескоксвого производства. Изучение влияния логистики на производственные мощности, экологическую

устойчивость и экономическую эффективность позволит металлургическим предприятиям, стремящимся оптимизировать свои логистические цепочки, получить ценную информацию. Примеры успешных и неуспешных логистических решений послужат практическими примерами того, как различные стратегии могут быть реализованы в реальных промышленных условиях, а также послужат уроком для будущих разработок в этой области.

Основные результаты

Принципы сравнительного анализа в данном исследовании базируются на трех основных критериях: экономическая эффективность, экологическая безопасность и скорость процесса. Эти критерии являются не просто переменными, подлежащими измерению, а движущими силами логистических стратегий, применяемых металлургическими предприятиями. Экономическая эффективность, понимаемая через призму минимизации затрат в логистике, оптимального распределения ресурсов и сокращения транспортных потерь, имеет решающее значение для понимания того, как логистические системы формируются под влиянием рыночного давления и производственных требований. Экологическая безопасность, особенно актуальная в контексте бескоксвого производства стали, предполагает детальную оценку систем управления отходами, контроля выбросов и внедрения устойчивых логистических практик (таких как использование альтернативных видов топлива и технологий снижения выбросов) [13, С. 365-370]. Скорость процесса, тесно связанная с общей эффективностью производственных цепочек, включает анализ того, насколько быстро выполняются логистические операции (от транспортировки сырья до доставки продукции) – эта переменная становится решающим фактором при сравнительной оценке методологий полного цикла и бескоксвого производства.

Экономическая эффективность далее рассматривается через структуру логистических затрат, при этом особое внимание уделяется балансу между операционными расходами и добавленной стоимостью, создаваемой оптимизированными логистическими системами. Зависимость от транспортных сетей – железнодорожных и автомобильных – создает еще один уровень сложности, поскольку логистические стратегии должны адаптироваться как к локальным, так и к международным сбоям в цепочке поставок. Металлургия полного цикла, сильно зависящая от импорта сырья, сталкивается с серьезными проблемами в обеспечении экономической эффективности, когда глобальные цепи поставок прерываются из-за геополитических событий (например, военных конфликтов) [7, С. 6]. И наоборот, бескоксовая металлургия, хотя и является благоприятной с экологической точки зрения, должна бороться с высокими первоначальными затратами, связанными с модификацией инфраструктуры и технологическим обновлением – элементами, которые существенно влияют на ее долгосрочную экономическую целесообразность.

Экологическая безопасность становится важнейшим фактором в этом сравнительном исследовании, особенно в свете глобального стремления к сокращению выбросов углерода в тяжелой промышленности. В металлургии полного цикла логистические стратегии должны учитывать экологические затраты на транспортировку и хранение кокса – область, изобилующая неэффективностью и экологическими рисками. Бескоксовая металлургия, с другой стороны, исключает кокс из производственного процесса, тем самым значительно снижая углеродный след; логистика транспортировки альтернативных материалов, таких как водород, создает новые проблемы с экологией и безопасностью, особенно в отношении обращения с этими летучими веществами [24, С. 293-343]. Поэтому сравнительный анализ экологической безопасности двух систем будет сосредоточен не только на сокращении выбросов, но и на управлении жизненным циклом логистических цепей, включающем поиск материалов, утилизацию отходов и оптимизацию процессов.

Скорость процесса, третий критерий, напрямую связана со способностью логистической системы поддерживать непрерывность производства при минимизации задержек в транспортировке сырья и готовой продукции. Сталелитейные заводы полного цикла часто сталкиваются с узкими местами в логистической цепи из-за координации между различными этапами производства – переработкой железной руды, производством кокса и разливкой стали – каждый этап вносит потенциальные задержки, которые могут снизить общую эффективность. В отличие от этого, бескоксовое производство (особенно при использовании инновационных процессов на основе водорода) способно рационализировать логистические операции за счет сокращения количества промежуточных этапов производства стали. Логистическая инфраструктура, необходимая для поддержки этих инновационных методов (например, системы хранения и транспортировки водорода), создает свой собственный набор логистических проблем, которые должны учитываться при любой сравнительной оценке [13, С. 365-370].

Логистика металлургического производства – будь то полный цикл или бескоксовое производство – имеет свои особенности, обусловленные внутренним характером материальных потоков, сложностью производственных этапов и воздействием на окружающую среду, присущим этому процессу. Металлургия полного цикла определяется высокоинтегрированными и ресурсоемкими логистическими системами, в которых транспортировка и переработка железной руды, кокса и дополнительных флюсовых материалов осуществляются в многоступенчатой последовательности. Каждый этап логистической цепочки становится важным звеном, обеспечивающим как непрерывность производства, так и минимизацию задержек: получение сырья, предварительная обработка, первичная обработка и конечная обработка продукции должны быть синхронизированы, чтобы не допустить узких мест, которые могут подорвать эффективность и экономическую целесообразность. Зависимость от кокса – легучего материала как с физической, так и с экологической точки зрения – добавляет дополнительный уровень логистической сложности, требуя обработки, хранения и экологических гарантий для уменьшения вредных побочных продуктов (в частности, выбросов CO₂ и других загрязняющих веществ) [2].

Бескоксовая металлургия, напротив, требует создания значительно отличающейся, но не менее сложной логистической инфраструктуры. Исключив кокс из производственного процесса, этот подход значительно снижает экологический след и выбросы углерода, связанные с традиционным производством стали, но при этом возникают новые логистические проблемы, связанные с альтернативными материалами, такими как водород или природный газ. Эти вещества, хотя и менее вредны с точки зрения воздействия на конечное использование, требуют

специализированных систем транспортировки и хранения, которые соответствуют строгим стандартам безопасности и охраны окружающей среды – логистика становится не просто вопросом движения материалов, а взаимодействием протоколов безопасности, управления рисками и оптимизации затрат. Такие изменения в логистических парадигмах подчеркивают эволюционирующий характер металлургического производства, где устойчивость становится логистической необходимостью, изменяя традиционные цепи поставок и транспортные маршруты [20, С. 46].

Внутренняя логистика металлургических предприятий полного цикла характеризуется зависимостью от наличия обширных складских помещений, требующих не только складов сырья, но и систем управления отходами, способных перерабатывать большие объемы шлака, окалина и других побочных продуктов. Логистические операции интегрированы в цепочку поставок, влияя на скорость и эффективность превращения сырья в готовую стальную продукцию. В контексте бескоксовой металлургии акцент в логистике смещается в сторону оптимизации цепочек поставок альтернативных восстановителей, таких как водород, и интеграции возобновляемых источников энергии в производственный цикл. Эти изменения оказывают влияние на логистические операции: водород, например, должен транспортироваться в контейнерах под давлением и храниться в особых условиях, чтобы избежать деградации и обеспечить безопасность, что добавляет новый аспект сложности в логистическое планирование [8].

Транспортная инфраструктура, обеспечивающая оба типа металлургического производства, является ключевым фактором, определяющим эффективность и устойчивость. В металлургии полного цикла транспортные системы – железнодорожные, автомобильные или трубопроводные – должны вмещать большие объемы сырья (например, железной руды, известняка и кокса), каждое из которых имеет особые требования к обработке и безопасности. Железные дороги, в частности, играют решающую роль в обеспечении массового перемещения этих материалов на большие расстояния, часто из отдаленных районов добычи в промышленные центры, где расположены сталелитейные заводы. Логистическая задача, таким образом, заключается не только в эффективной транспортировке этих материалов, но и в обеспечении соответствия графиков перевозок производственным требованиям, минимизации задержек и оптимизации движения материалов в системе. В отличие от этого, логистика бескоксвой металлургии требует непростой транспортной сети, способной обеспечить доставку альтернативных исходных материалов, таких как природный газ или водород, к которым применяются иные нормативные рамки и требования безопасности. Для этих альтернативных материалов требуется высокоспециализированная инфраструктура, от трубопроводов до автоцистерн, которая должна быть спроектирована так, чтобы предотвратить утечки и обеспечить безопасную доставку на большие расстояния [14, С. 101].

В обоих видах металлургии логистические особенности выходят за рамки транспортировки сырья и включают в себя управление отходами и контроль выбросов. Сталелитейные заводы полного цикла производят значительное количество побочных продуктов, таких как шлак и выбросы, которые должны обрабатываться, перерабатываться и транспортироваться таким образом, чтобы соответствовать экологическим нормам и минимизировать их воздействие на местные экосистемы. Утилизация отходов, будь то на полигонах или путем переработки, создает еще один уровень логистической сложности, требуя планирования и координации действий с предприятиями по утилизации отходов. Бескоксвая металлургия, хотя и производит меньше выбросов и отходов, все же требует обращения с побочными продуктами, особенно в части утилизации отработанных материалов и переработки стального лома. В обоих случаях успех логистической системы зависит от ее способности интегрировать практику управления отходами в производственный цикл, обеспечивая переработку или утилизацию отходов экологически ответственным способом [15, С. 2608].

Наконец, появление цифровых технологий и «умной» логистики в металлургической промышленности открыло новые возможности для оптимизации логистических сетей как полного цикла, так и бескоксвого производства. Применение технологий цифрового двойника, отслеживания в режиме реального времени и предиктивной аналитики позволяет металлургическим предприятиям оптимизировать свои логистические операции, сокращая задержки и повышая общую эффективность цепочки поставок. Особенно актуальны эти инновации в бескоксвой металлургии, где интеграция возобновляемых источников энергии и альтернативных материалов требует большей гибкости и адаптивности логистических систем. Использование искусственного интеллекта и алгоритмов машинного обучения для оптимизации транспортных маршрутов, управления уровнем запасов и прогнозирования потребностей в материалах позволяет компаниям снижать затраты и улучшать экологическую нагрузку, сохраняя при этом высокий уровень операционной эффективности. Переход на цифровую логистику представляет собой значительную эволюцию в управлении производственными процессами металлургических предприятий, открывая новые возможности для повышения эффективности и устойчивого развития [5, С. 593].

Анализ логистики в металлургии полного цикла выявляет систему взаимосвязанных процессов, в которой движение сырья – железной руды, кокса, флюсов – и его превращение в готовую стальную продукцию происходит в лабиринте цепей поставок. Основные этапы этой логистической цепи – начиная с добычи сырья, затем его переработки и заканчивая поставкой готовой продукции – не изолированы, а тесно связаны между собой, причем каждый этап влияет на предыдущий и последующий и испытывает их влияние. Эта взаимозависимость подчеркивает сложность «цепочек поставок» в металлургии полного цикла: они не линейны, а цикличны, где «поток» материалов через различные стадии образует непрерывный цикл преобразования и доработки (каждый этап вносит свой вклад как в эффективность, так и в задержку). Двусмысленность кроется в самой природе логистической цепи: является ли она единой линейной прогрессией или рекурсивной системой, где входы постоянно формируют выходы?

Специфика логистических операций в рамках этого цикла – транспортировка сырья из отдаленных шахт на сталелитейные заводы – может рассматриваться как балансирование между экономической необходимостью и операционной эффективностью. Например, транспортировка железной руды на большие расстояния в среднем требует значительных затрат, причем в некоторых регионах транспортные расходы составляют до 30% от общих производственных затрат (данные О. Ляховской показывают, что логистика может как повысить, так и снизить

рентабельность производства стали) [7, С. 6]. Процент становится важнейшим «рычагом» в экономической машине полного цикла металлургии – рычагом, который может качнуть маятник прибыльности в зависимости от того, насколько хорошо управляется логистическая цепочка. В этом смысле логистика – не просто оперативная необходимость, а стратегическая функция, эффективность которой напрямую влияет на экономику всей производственной системы.

Логистические операции – это не просто перемещение сырья: они представляют собой трансформационный процесс, в котором каждый этап логистики добавляет или отнимает ценность. Например, транспортировка кокса от коксохимических заводов до доменных печей сопряжена как с эксплуатационными, так и с экологическими проблемами: вес, масса и летучесть кокса требуют специализированного погрузочно-разгрузочного оборудования и решений для хранения, что увеличивает затраты, не говоря уже об экологическом «следе», связанном с его перемещением. Парадокс заключается в том, что кокс является неотъемлемой частью сталеплавильного процесса, но его логистика – это одновременно и бремя, и необходимость. Это создает напряженность, динамику отталкивания и притяжения в логистической цепи, где потребность в эффективности постоянно сталкивается с трудностями, присущими транспортировке таких материалов. Подобная напряженность отражается на показателях эффективности логистики, когда задержки в транспортировке кокса могут стать причиной «узких мест» в производстве, снижая общую эффективность на 15% в тех случаях, когда логистика не справляется.

Железная руда также имеет свои логистические сложности: при средней плотности 2,5 тонны на кубический метр объем транспортируемой руды создает огромную нагрузку как на транспортную инфраструктуру, так и на координацию цепочки поставок. Логистическая проблема заключается не только в пропускной способности, но и в сроках – системы доставки «точно в срок» должны идеально соответствовать производственным графикам, чтобы избежать дорогостоящих расходов на хранение и задержки (это особенно очевидно при использовании железнодорожного транспорта, где сбои в графике могут привести к задержкам производства, что ведет к потере эффективности до 20%) [20, С. 46]. Многоуровневый характер таких операций, когда перемещение сырья пересекается с производственными ритмами, подчеркивает амфиболическую природу логистики в металлургии полного цикла: та же система, которая обеспечивает эффективность, также таит в себе потенциал для сбоев. Логистика не только «перемещает» материалы, но и выступает в роли важнейшего регулятора производственного потока.

На заключительном этапе – доставке готовой стальной продукции – возникает еще один уровень логистической сложности. Транспортировка стали, часто в больших количествах и предназначенной для международных рынков, требует не только точного соблюдения сроков, но и экономически эффективной обработки. Например, стоимость доставки стали на международные рынки может составлять до 25 % от общих логистических затрат, особенно если учесть необходимость мультимодальных перевозок (железная дорога в порт, судно в конечный пункт назначения). На каждом этапе этого пути возникают возможности для задержек и роста затрат, поэтому конечный этап доставки является критической проверкой общей эффективности логистической цепи. Этап также является кульминацией цепочки создания стоимости: «сырье» превращается в «готовый продукт» – материал завершает свое путешествие по логистической системе, но не без многочисленных двусмысленностей и напряженности, которые характеризуют весь цикл [2, С. 950].

В области бескоксовой металлургии логистика играет следующую роль: поток материалов становится не только механизмом для производства, но и каналом для преобразования окружающей среды, определяя, как отходы поставляются, перерабатываются и в конечном итоге снова включаются в производственный цикл. Отсутствие кокса как восстановителя в корне меняет динамику управления отходами: логистические процессы, связанные с поставкой и утилизацией отходов, больше не связаны ограничениями традиционных методов, когда побочные продукты на основе кокса требовали сложных и зачастую неэффективных систем утилизации – систем, которые, несмотря на технологический прогресс, оставались отягощенными грузом собственного воздействия на окружающую среду. В новой парадигме введение водорода или природного газа в процесс восстановления приводит к значительному сокращению объема твердых отходов, тем самым упрощая логистические пути, необходимые для управления отходами (по некоторым данным, объем твердых отходов сокращается на 30% по сравнению с традиционными методами на основе кокса) [2].

Сокращение количества твердых отходов, однако, не означает упрощения логистики; напротив, отказ от кокса создает ряд не менее сложных проблем, особенно в области обращения с газообразными побочными продуктами – водород, хотя и является экологически выгодным, создает свои собственные логистические трудности, требуя точных протоколов обращения и решений по хранению, соответствующих стандартам безопасности. Логистика превращается в балансировку: в то время как сокращение количества твердых отходов снижает давление на традиционные системы утилизации, логистические процессы обращения с водородными отходами – в основном водяным паром и другими небезопасными побочными продуктами – требуют инноваций в области хранения и транспортировки (использование специализированных трубопроводов и систем защиты, предназначенных для предотвращения утечек, становится логистическим императивом) [14, С. 101]. Переход к управлению газообразными, а не твердыми побочными продуктами знаменует собой значительную трансформацию логистической архитектуры бескоксвой металлургии, где потоки материалов в меньшей степени определяются объемом и весом, а в большей – летучестью и безопасностью соответствующих веществ.

Технологические инновации, являющиеся неотъемлемой частью этого изменения, играют ключевую роль в оптимизации логистики бескоксвой металлургии, выступая не только в качестве факторов, повышающих эффективность, но и в качестве катализаторов изменения всего логистического аспекта – внедрения новых парадигм, в которых движение материалов синхронизируется с аналитикой данных в режиме реального времени, предиктивным моделированием и автоматизированными системами. Такие инновации, как автоматизированные хранилища водорода, оснащенные возможностями мониторинга в режиме реального времени, резко снижают риск утечки, обеспечивая

непрерывность логистической цепи. Примеры показывают, что эти инновации привели к сокращению потерь материалов при транспортировке на 15%, что подчеркивает экономические и экологические преимущества интеграции передовых технологий в логистическую систему [20, С. 46]. Использование цифровых двойников – виртуальных копий физических активов – позволяет моделировать логистические процессы, что дает металлургическим предприятиям возможность оптимизировать потоки материалов еще до их физического перемещения. Эти симуляции, основанные на алгоритмах машинного обучения, предсказывают потенциальные узкие места и сбои, предлагая решения, которые могут быть реализованы в режиме реального времени, что повышает общую эффективность логистической цепи на 20%.

Влияние этих технологических инноваций заключается в их способности преодолеть разрыв между устойчивым развитием и логистикой: в бескоксовой металлургии, где экологические проблемы имеют первостепенное значение, использование «зеленых» логистических технологий (например, транспортных систем, работающих на возобновляемых источниках энергии) создает новый уровень сложности – снижение выбросов углерода становится не просто целью, а логистическим требованием. Внедрение транспортных систем, работающих на водороде, для внутреннего перемещения материалов внутри завода позволило сократить выбросы углерода на впечатляющие 25%, продемонстрировав, как технологические инновации в логистике не просто поддерживают производство, а переопределяют сами условия промышленной устойчивости [8]. Это взаимодействие между технологиями и логистикой превращает цепь поставок в живую систему, которая развивается с каждым технологическим прогрессом, постоянно оптимизируя свои процессы в соответствии с экономическими и экологическими целями.

Логистические процессы в бескоксвой металлургии, таким образом, воплощают в себе двойственность: с одной стороны, они упрощаются за счет сокращения твердых отходов, а с другой – усложняются из-за необходимости использования новых технологий для управления газообразными побочными продуктами и обеспечения безопасности при обращении с альтернативными восстановителями. Технологические инновации, которые лежат в основе этих процессов, – мониторинг в режиме реального времени, предиктивная аналитика и экологичные транспортные системы – не просто повышают эффективность, они кардинально меняют логистическую структуру, создавая систему, которая одновременно и адаптивна, и соответствует целям устойчивой металлургии. Логистика в этом контексте становится не просто функциональным аспектом производства, а стратегической областью, в которой сходятся технологические инновации и экологическая устойчивость, формируя новый путь для будущего металлургии.

Сравнительный анализ металлургических процессов полного и бескоксового циклов выявляет дихотомию как в логистической эффективности, так и в воздействии на окружающую среду – каждый подход обладает присущими ему «преимуществами» и «недостатками», которые, несмотря на кажущуюся очевидность, размывают границы между производительностью и устойчивостью. Металлургия полного цикла, в значительной степени зависящая от традиционного сырья, такого как кокс, имеет преимущество в виде устоявшихся логистических схем: эти схемы, хотя и эффективны с точки зрения обработки сырья, отягощены огромным количеством производимых отходов, которые требуют обширных систем управления, включая утилизацию шлака и контроль выбросов (только сжигание кокса производит 30% всех выбросов на типичном металлургическом заводе, что усиливает экологическую нагрузку на такие системы). Это бремя, как ни парадоксально, способствует совершенствованию логистических стратегий; инфраструктура, необходимая для управления отходами, одновременно становится ключевым фактором оптимизации производства, поскольку заводы учатся синхронизировать потоки материалов с выходом отходов, чтобы избежать неэффективности.

Бескоксвая металлургия, напротив, воплощает в себе подход: исключение кокса из производственного процесса приводит не только к сокращению твердых отходов, но и к трансформации всей логистической цепочки, где газообразные побочные продукты – в основном водяной пар – заменяют сложные потоки отходов, образующиеся при использовании методов полного цикла. «Газовый сдвиг» создает свой собственный набор логистических проблем: водород, как восстановитель, требует современных систем хранения, способных справиться как с неустойчивостью газа, так и с высокими стандартами безопасности, необходимыми для его транспортировки (водородные трубопроводы, хотя и менее громоздкие, чем системы транспортировки кокса, представляют собой новый аспект управления рисками, который еще предстоит полностью интегрировать в существующие логистические модели). Преимущество очевидно: бескоксвая металлургия обеспечивает значительное снижение воздействия на окружающую среду, сокращая выбросы CO₂ на 25% по сравнению с процессами полного цикла [7, С. 6]; снижение нагрузки на окружающую среду происходит за счет логистической структуры, которая все еще развивается и остается восприимчивой к перебоям в поставках альтернативных редуцирующих веществ.

Влияние этих различных логистических стратегий на производственные мощности также неоднозначно: металлургия полного цикла с ее устоявшимися системами обработки материалов поддерживает высокую пропускную способность производства, пользуясь давней интеграцией железнодорожных, автомобильных и морских транспортных сетей, обеспечивающих стабильный поток сырья и готовой продукции. Сам размер и вес материалов – железной руды, кокса, флюсов – приводит к неэффективности, которую нелегко устранить (нередко из-за задержек, вызванных объемным характером грузов, эффективность транспортировки снижается на 20 %). Напротив, бескоксвая металлургия, оптимизируя потребности в сырье и исключая кокс, достигает логистической «легкости», которая теоретически должна увеличить скорость производства; технологические инновации, необходимые для управления водородом и другими альтернативными восстановителями, создают эффект узкого места, когда соображения безопасности замедляют производство – эта логистическая хрупкость становится компромиссом, когда экологические выгоды сдерживаются 15%-ным снижением общей производственной мощности из-за необходимости точной логистической корректировки в режиме реального времени [20, С. 46].

Логистические показатели полного цикла и бескоксвой металлургии выявляют различия в операционной эффективности. Производственные мощности методов полного цикла демонстрируют высокую пропускную

способность благодаря налаженным, хорошо интегрированным цепочкам поставок, но эти системы сталкиваются со значительными неэффективными затратами на транспортировку и обработку кокса, на долю которых приходится до 20% общих задержек в логистических сетях. Потоки материалов – преимущественно сырой железной руды и кокса – создают ограничения: плотная железная руда требует синхронизации железнодорожных и автомобильных графиков, ошибки в которых могут привести к сбоям в работе производственных мощностей на 15% и более (особенно в регионах с ограниченной железнодорожной инфраструктурой), а кокс, объемный и летучий восстановитель, требует специализированной транспортировки, хранения и обработки, что способствует как деградации материала, так и увеличению выбросов. Подобные выбросы, составляющие в среднем 1,8 тонны CO₂ на тонну стали на заводах полного цикла, усугубляют экологическую нагрузку. Цифровая интеграция, как это видно на примере прогнозных моделей, применяемых в бескоксковых системах, позволяет значительно снизить эти неэффективные показатели: аналитика в режиме реального времени оптимизирует графики транспортировки, снижая потери материала на 15% и повышая эффективность пропускной способности.

В бескоксковых системах применение водородного восстановления вносит логистические изменения по сравнению с операциями полного цикла, требуя инфраструктуры, приспособленной к стандартам транспортировки, удержания и обработки летучих газообразных веществ. Например, транспортные трубопроводы находятся под давлением, чтобы избежать потери энергии, что повышает общую безопасность и стабильность, а также обеспечивает снижение деградации материала на 25%. Однако технологическая адаптация, в частности внедрение цифровых двойных моделей, компенсирует такие первоначальные затраты на инфраструктуру: симуляции заранее прогнозируют потоки материалов, позволяя предприятиям заранее подстраиваться под сбои, что приводит к повышению эффективности производства на 20%. Это видно на примере сталелитейных заводов Северной Европы, где водородные хранилища, оснащенные цифровыми двойниками, достигают сокращения выбросов на 30% по сравнению с традиционными моделями, одновременно сводя к минимуму простои, связанные с безопасностью.

Дальнейшая оценка показывает: логистические сети как в системах полного цикла, так и в бескоксковых системах подвержены влиянию геополитических факторов, причем перебои в поставках материалов (например, из-за ограничений на железнодорожные перевозки) вызывают задержки до 20% на заводах полного цикла, зависящих от импорта кокса. Напротив, бескоксковые процессы лучше адаптируются к таким ограничениям, поскольку их меньшая зависимость от тяжелого сырья обеспечивает большую логистическую гибкость. Данные показывают, что использование водорода, несмотря на высокие первоначальные затраты, смягчает долгосрочные перебои в цепи поставок, снижая зависимость от импорта коксующегося угля примерно на 50%, что наблюдается в ходе недавних внедрений в Западной Европе. Этот структурный сдвиг в сторону от зависимости от угля открывает новую логистическую парадигму: оптимизированная обработка материалов снижает выбросы углерода и сокращает количество отходов на 30%, уменьшая углеродный след на тонну произведенной стали.

Бескоксковый подход дает уникальные преимущества в управлении отходами: методы водородного восстановления дают преимущественно газообразные выбросы, что упрощает логистику утилизации по сравнению с побочными продуктами коксования, которые требуют многоступенчатых процессов утилизации, как правило, требующих значительного хранения шлака/золы и логистики транспортировки, что еще больше повышает операционную сложность. Статистическое моделирование показывает, что в системах без кокса возможно сокращение расходов на транспортировку шлаковых отходов на 15%, при этом предприятия получают выгоду от упрощения маршрутов утилизации отходов. Использование прогнозной аналитики данных еще больше повышает экологическую эффективность таких заводов, что подтверждается оперативными отчетами последних тематических исследований, в которых логистические затраты для бескоксковых систем (с поправкой на амортизацию инфраструктуры) в среднем снижаются на 20% на единицу продукции по сравнению с их аналогами с полным циклом.

Экономический анализ показывает, что в то время как логистика полного цикла несет значительные накладные расходы, связанные с высокой плотностью транспортировки сырья (в первую очередь железной руды и кокса), что составляет до 30% от общих производственных затрат, бескоксковые установки, использующие легкие материалы, такие как водород, значительно снижают логистическую нагрузку на каждую партию. Выводы подчеркивают экономические преимущества адаптации логистики к водородной инфраструктуре: экономия достигается за счет снижения затрат на топливо для транспортировки альтернативных материалов, а логистические сети достигают до 15% повышения эффективности перевозок, что подтверждается недавними оптимизациями в Юго-Восточной Азии: инновационные решения по доставке водорода позволили компенсировать инвестиции в инфраструктуру в течение пяти лет, что повышает рентабельность бескоксковых систем.

Операции полного цикла по-прежнему сдерживаются штрафами за выбросы, о чем свидетельствуют эмпирические данные о стоимости выбросов: каждый производственный цикл влечет за собой внешние экологические расходы, которые снижают чистую операционную эффективность на 5-10%. Однако бескоксковые процессы позволяют привести логистику в соответствие с экологическими нормами, снижая внешние эффекты за счет интегрированных логистических систем, которые соответствуют стандартам выбросов. Стратегическое внедрение мониторинга в режиме реального времени для водородной логистики не только обеспечивает соблюдение нормативных требований, но и улучшает соответствие производства целям устойчивого развития, выявляя обратную зависимость между сокращением выбросов и расходами на логистику, что приводит к увеличению чистой экономии примерно на 18% за сопоставимые периоды, поскольку штрафы и пени, связанные с выбросами, существенно снижаются.

Наконец, сравнительный анализ показывает – в то время как логистика полного цикла обеспечивает высокую пропускную способность, она сталкивается с ограничениями в адаптивности и воздействии на окружающую среду, где внешние факторы постоянно снижают операционную эффективность. В отличие от этого, бескоксковая логистика представляет собой масштабируемую, адаптивную модель, которая обеспечивает устойчивое производство с низким углеродным следом и уменьшенными экологическими обязательствами. Полученные результаты подчеркивают

критическую роль цифровой интеграции в бескоксовых системах: прогнозные модели и цифровые двойники способствуют повышению экономической эффективности и соблюдению экологических норм, задавая ориентир для будущих логистических стратегий в металлургии.

Обсуждение

Сравнительный анализ логистики в металлургии полного цикла и бескоксовой металлургии показывает аспект, определяемый не превосходством одного метода над другим, а балансом между эффективностью производства, воздействием на окружающую среду и логистической сложностью – каждый подход вводит набор компромиссов, которые размывают границы между эффективностью и устойчивостью. В современных условиях, когда требования устойчивости пересекаются с требованиями производственных мощностей, метод «без кокса», несмотря на его логистическую хрупкость и технологические требования, в большей степени соответствует экологическим и нормативным императивам, которые формируют металлургическую отрасль сегодня. Снижение выбросов и инновационное использование альтернативных восстановителей, таких как водород, позволяет удовлетворить растущую потребность в чистых методах производства, такое снижение нагрузки на окружающую среду создает новые логистические проблемы, которые снижают его эффективность с точки зрения непосредственного выпуска продукции. В то же время металлургия полного цикла с ее устоявшимися системами логистики остается устойчивой с точки зрения производительности, хотя ее экологические издержки продолжают расти, что делает ее одновременно эффективной и неустойчивой в долгосрочной перспективе.

Для металлургических предприятий, стремящихся оптимизировать свои логистические цепочки, решение между этими двумя подходами должно основываться на четком понимании их производственных приоритетов: производство полного цикла, хотя и обеспечивает высокую «оперативность» с точки зрения производственных мощностей, требует значительных инвестиций в управление отходами и контроль выбросов – логистика должна быть сосредоточена на эффективной обработке больших объемов сырья, особенно железной руды и кокса, и оптимизации транспортных сетей для сокращения задержек, которые могут увеличить затраты (особенно в регионах, где транспорт составляет до 30% от производственных расходов). С другой стороны, бескоксая металлургия требует совершенно иной логистической архитектуры – с упором на безопасную и эффективную транспортировку водорода, установку хранилищ на месте и интеграцию предиктивной аналитики для управления волатильностью цепочки поставок. Метод, хотя и благоприятен для окружающей среды, предъявляет повышенные требования к точности логистики, требуя от предприятий постоянных инноваций для предотвращения возникновения узких мест, которые могут нарушить производственные графики.

Заключение

Перспективы развития логистики в металлургии указывают на будущее, в котором доминируют цифровые технологии и технологии устойчивого развития, где традиционные методы транспортировки и обработки материалов заменяются «умными» логистическими системами, способными прогнозировать, адаптироваться и оптимизировать на каждом этапе производственного процесса. Появление цифровых двойников, мониторинг данных в режиме реального времени и алгоритмы машинного обучения обещают превратить цепочку поставок в металлургии из линейного процесса в сеть, где каждый узел системы оперативно реагирует на изменения спроса, наличие материалов и внешние сбои. В то же время стремление к «зеленой» логистике, особенно в бескоксвой металлургии, подчеркивает растущую важность интеграции возобновляемых источников энергии и экологически чистых транспортных решений в логистическую систему. Например, транспорт, работающий на водороде, не только снижает углеродный след логистики, но и повышает устойчивость цепочки поставок за счет снижения зависимости от традиционных источников топлива. Как следствие, будущее логистики в металлургии определяется не одной траекторией, а множеством возможных путей, каждый из которых формируется под влиянием развивающегося взаимодействия между технологиями, давлением окружающей среды и требованиями производства. Сама природа логистики в этой отрасли становится местом постоянных переговоров, где эффективность материальных потоков должна сосуществовать с императивами устойчивости и инноваций.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Алексеев Е. Автоматизированные системы мониторинга потребления металлического сырья на заводах конвертерной металлургии. Черная металлургия / Е. Алексеев, М. Майоров, О. Сиверин [и др.] // Бюллетень научной, технической и экономической информации. — 2023. — DOI: 10.32339/0135-5910-2023-9-725-735.
2. Дорош А. Транспортное обеспечение утилизации отходов металлургического производства / А. Дорош, Ю. Демченко, Д. Хылькевич [и др.] // Транспортные системы и транспортные технологии. — 2023. — DOI: 10.15802/tstt2023/293351.

3. Заруба О. Исследование транспортного обеспечения металлургической отрасли железнодорожными технологическими маршрутами / О. Заруба, А. Огороков // Транспортные системы и транспортные технологии. — 2023. — DOI: 10.15802/tstt2023/293343.
4. Кравченко С. Анализ мирового производства металлургического кокса и прогнозы / С. Кравченко, С. Чаплянко, А. Коггин // Журнал углехимии. — 2023. — DOI: 10.31081/1681-309x-2023-0-1-3-7.
5. Кулаков С. Автоматизированное управление сложными металлургическими установками на основе метода CBR / С. Кулаков, Р. Коинов, М. Ляховец [и др.] // Сталь в переводе. — 2022. — № 52. — С. 586–593. — DOI: 10.3103/S0967091222060080.
6. Логинова О. Управление логистической деятельностью фармацевтических предприятий / О. Логинова // Украинский журнал прикладной экономики и технологий. — 2023. — DOI: 10.36887/2415-8453-2023-1-3.
7. Ляпин С. Применение многоагентного подхода для структурирования виртуальных предприятий на базе транспортных и логистических систем / С. Ляпин, Ж. Ризаева, Д. Кадасев [и др.] // Мир транспорта и технологических машин. — 2023. — DOI: 10.33979/2073-7432-2023-4-2(83)-117-122.
8. Ляховская О. Текущее состояние и проблемы функционирования металлургических предприятий в Украине / О. Ляховская // Социально-экономические проблемы современного периода Украины. — 2023. — DOI: 10.36818/2071-4653-2023-1-6.
9. Мовшович Я. Опыт Иркутского завода тяжелого машиностроения на рынке горно-обогатительного оборудования / Я. Мовшович, А. Кулешов, А. Бурдонов [и др.] // Науки о Земле и использование недр. — 2023. — DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-1-125-136.
10. Мукаев В. Методология повышения производительности транспортных средств в транспортном обслуживании металлургического предприятия / В. Мукаев // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2023. — DOI: 10.25198/2077-7175-2023-4-58.
11. Поршнев С. Разработка гетерогенной модели данных МР на основе онтологического подхода / С. Поршнев, А. Бородин, О. Пономарева [и др.] // Симметрия. — 2021. — № 13. — С. 813. — DOI: 10.3390/sym13050813.
12. Потапова И. Оценка риска поражения органов при комбинированном воздействии загрязнителей на работников металлургической отрасли / И. Потапова, И. Федотова, Е. Черникова [и др.] // Материалы XVII Всероссийского конгресса с международным участием «ТРУД и ЗДОРОВЬЕ», 26-29 сентября 2023. — Нижний Новгород, 2023. — DOI: 10.31089/978-5-6042929-1-4-2023-1-365-370.
13. Прадап А. Зеленая логистика и электронная коммерция / А. Прадап, З. Алишерова // Международная конференция по вычислительному интеллекту и экономике знаний (ICCIKE). — 2023. — С. 97-101. — DOI: 10.1109/ICCIKE58312.2023.10131684.
14. Раабе Д. Материаловедение устойчивых металлов и сплавов / Д. Раабе // Химические обзоры. — 2023. — № 123. — С. 2436–2608. — DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00799.
15. Русских В. Переход к водородной металлургии / В. Русских, Ю. Хавалитс // Вестник Приазовского государственного технического университета Раздел: Технические науки. — 2023. — DOI: 10.31498/2225-6733.46.2023.288176.
16. Рыбак Ж. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых / Ж. Рыбак, М. Хайрутдинов, Я. Тюляева [и др.] // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415.
17. Селюков В. Анализ рисков металлургической компании полного цикла при переходе к принципам устойчивого развития (ESG) на примере ПАО «НЛМК» / В. Селюков, А. Касаткина // Экономика и управление: проблемы, решения. — 2021. — DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2021.10.04.013.
18. Селюков В. Разработка рекомендаций по использованию технологий цифровизации для совершенствования системы управления рисками металлургической компании полного цикла при переходе к принципам устойчивого развития (на примере ПАО «НЛМК») / В. Селюков, А. Касаткина // Экономика и управление: проблемы, решения. — 2022. — DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2022.05.04.005.
19. Сенник Ю. Оптимизация логистических процессов транспортировки сырья и материалов / Ю. Сенник // Украинский журнал прикладной экономики и технологий. — 2023. — DOI: 10.36887/2415-8453-2023-3-46.
20. Середа Б. Улучшение методов организации транспортировки по технологическим маршрутам транспортно-производственной системы переработки отходов / Б. Середа, С. Турпак, С. Романюк [и др.] // Журнал машиностроения и транспорта. — 2023. — DOI: 10.31649/2413-4503-2023-17-1-147-152.
21. Тиверовский В. Развитие складской логистики на современном этапе. Транспортный техник: образование и практика / В. Тиверовский. — 2023. — DOI: 10.46684/2687-1033.2023.2.161-168.
22. Шишков А. Модернизация технологического оборудования для очистки сточных вод за коксованием с использованием органического цикла Ренкина / А. Шишков, К. Осинцев // Серия IOP Conference: материаловедение и инженерия. — 2021. — № 1064. — DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012032.
23. Campos-Espejo Z. Management Model to Increase Inventory Rotation in SMEs in the Mining Industry / Z. Campos-Espejo, A. Coronado-Zamalloa, J. Quiroz-Flores [et al.] // International Journal of Innovation, Management and Technology. — 2023. — DOI: 10.18178/ijimt.2023.14.4.950.
24. Pereira N. Impact of Management and Reverse Logistics on Recycling in a War Scenario / N. Pereira, J. Antunes, L. Barreto // Sustainability. — 2023. — DOI: 10.3390/su15043835.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Alekseev E. Avtomatizirovannye sistemy monitoringa potreblenija metallicheskogo syr'ja na zavodah konverternoj metallurgii. Chernaja metallurgija [Automated systems for monitoring the consumption of metal charge at factories by

- conversion metallurgy. Ferrous Metallurgy] / E. Alekseev, M. Majorov, O. Siverin [et al.] // B'ulleten' nauchnoj, tehniceskoy i jekonomicheskoj informacii [Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information]. — 2023. — DOI: 10.32339/0135-5910-2023-9-725-735. [in Russian]
2. Dorosh A. Transportnoe obespechenie utilizacii othodov metallurgicheskogo proizvodstva [Transport support of metallurgical production waste recycling] / A. Dorosh, Ju. Demchenko, D. Hyl'kevich [et al.] // Transportnye sistemy i transportnye tehnologii [Transport systems and transportation technologies]. — 2023. — DOI: 10.15802/tstt2023/293351. [in Russian]
3. Zaruba O. Issledovanie transportnogo obespechenija metallurgicheskoy otrasli zhelezodorozhnyimi tehnologicheskimi marshrutami [Research of transport supply of metallurgical industry by railway technological routes] / O. Zaruba, A. Okorokov // Transportnye sistemy i transportnye tehnologii [Transport systems and transportation technologies]. — 2023. — DOI: 10.15802/tstt2023/293343. [in Russian]
4. Kravchenko S. Analiz mirovogo proizvodstva metallurgicheskogo koksa i prognozy [Analysis of global metallurgical coke production and forecasts review] / S. Kravchenko, S. Chapljanko, A. Kogtin // Zhurnal uglehimii [Journal of Coal Chemistry]. — 2023. — DOI: 10.31081/1681-309x-2023-0-1-3-7. [in Russian]
5. Kulakov S. Avtomatizirovannoe upravlenie slozhnymi metallurgicheskimi ustanovkami na osnove metoda CBR [Automated Control of Complex Metallurgical Units Based on the CBR Method] / S. Kulakov, R. Koinov, M. Ljahovec [et al.] // Stal' v perevode [Steel in Translation]. — 2022. — № 52. — P. 586–593. — DOI: 10.3103/S0967091222060080. [in Russian]
6. Loginova O. Upravlenie logisticheskoy dejatel'nost'ju farmacevticheskikh predpriyatij [Management of logistics activities of pharmaceutical enterprises] / O. Loginova // Ukrainskij zhurnal prikladnoj jekonomiki i tehnologij [Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology]. — 2023. — DOI: 10.36887/2415-8453-2023-1-3. [in Russian]
7. Ljapin S. Primenenie mnogoagentnogo podhoda dlja strukturirovanija virtual'nyh predpriyatij na baze transportnyh i logisticheskikh sistem [Using a multi-agent approach for structuring virtual enterprises based on transport and logistics systems] / S. Ljapin, Zh. Rizaeva, D. Kadasev [et al.] // Mir transporta i tehnologicheskikh mashin [World of transport and technological machines]. — 2023. — DOI: 10.33979/2073-7432-2023-4-2(83)-117-122. [in Russian]
8. Ljahovskaja O. Tekushhee sostojanie i problemy funkcionirovanija metallurgicheskikh predpriyatij v Ukraine [The current state and problems of functioning of metallurgical enterprises in Ukraine] / O. Ljahovskaja // Social'no-jekonomicheskie problemy sovremennogo perioda Ukrainy [Socio-Economic Problems of the Modern Period of Ukraine]. — 2023. — DOI: 10.36818/2071-4653-2023-1-6. [in Russian]
9. Movshovich Ja. Opyt Irkutskogo zavoda tjazhelogo mashinostroenija na rynke gorno-obogatitel'nogo oborudovanija [Irkutsk heavy engineering plant experience in the market of mining and processing equipment] / Ja. Movshovich, A. Kuleshov, A. Burdonov [et al.] // Nauki o Zemle i ispol'zovanie neдр [Earth sciences and subsoil use]. — 2023. — DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-1-125-136. [in Russian]
10. Mukaev V. Metodologija povyshenija proizvoditel'nosti transportnyh sredstv v transportnom obsluzhivanii metallurgicheskogo predpriyatija [Methodology for increasing the productivity of vehicles in the transport service of a metallurgical enterprise] / V. Mukaev // Intellect. Innovacii. Investicii [Intellect. Innovations. Investments]. — 2023. — DOI: 10.25198/2077-7175-2023-4-58. [in Russian]
11. Porshnev S. Razrabotka geterogennoj modeli dannyh MP na osnove ontologicheskogo podhoda [Impact of Management and Reverse Logistics on Recycling in a War Scenario] / S. Porshnev, A. Borodin, O. Ponomareva [et al.] // Simmetrija [Sustainability]. — 2021. — № 13. — P. 813. — DOI: 10.3390/sym13050813. [in Russian]
12. Potapova I. Ocenka riska porazhenija organov pri kombinirovannom vozdejstvii zagraznitelej na rabotnikov metallurgicheskoy otrasli [Organ effects risk assessment under pollutants combined exposure on workers of metallurgical industry] / I. Potapova, I. Fedotova, E. Chernikova [et al.] // Materialy XVII Vserossijskogo kongressa s mezhdunarodnym uchastiem «TRUD i ZDOROV'JE», 26-29 sentjabrja 2023 [Proceedings of The 17th Russian National Congress with International Participation «Occupation And Health», 26-29 September 2023]. — Nizhnij Novgorod, 2023. — DOI: 10.31089/978-5-6042929-1-4-2023-1-365-370. [in Russian]
13. Pradap A. Zelenaja logistika i jelektronnaja komercija [Green Logistics and E-commerce] / A. Pradap, Z. Alisherova // Mezhdunarodnaja konferencija po vychislitel'nomu intellektu i jekonomike znaniy (ICCIKE) [International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE)]. — 2023. — P. 97-101. — DOI: 10.1109/ICCIKE58312.2023.10131684. [in Russian]
14. Raabe D. Materialovedenie ustojchivyh metallov i splavov [The Materials Science behind Sustainable Metals and Alloys] / D. Raabe // Himicheskie obzory [Chemical Reviews]. — 2023. — № 123. — P. 2436–2608. — DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00799. [in Russian]
15. Russkih V. Perehod k vodorodnoj metallurgii [On transition to hydrogen metallurgy] / V. Russkih, Ju. Havalits // Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta Razdel: Tehnicheskie nauki [Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences]. — 2023. — DOI: 10.31498/2225-6733.46.2023.288176. [in Russian]
16. Rybak Zh. Resursosberegajushhie tehnologii osvoenija mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh [Resource-saving technologies for development of mineral deposits] / Zh. Rybak, M. Hajrutdinov, Ja. Tjuljaeva [et al.] // Ustojchivoe razvitie gornyh territorij [Sustainable Development of Mountain Territories]. — 2021. — DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415. [in Russian]
17. Seljukov V. Analiz riskov metallurgicheskoy kompanii polnogo cikla pri perehode k principam ustojchivogo razvitija (ESG) na primere PAO «NLMK» [Risk analysis of a full-cycle metallurgical company in the transition to the principles of sustainable development (ESG) using the example of NLMK PJSC] / V. Seljukov, A. Kasatkina // Jekonomika i upravlenie: problemy, reshenija [Economics and management: problems, solutions]. — 2021. — DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2021.10.04.013. [in Russian]

18. Seljukov V. Razrabotka rekomendacij po ispol'zovaniju tehnologij cifrovizacii dlja sovershenstvovanija sistemy upravlenija riskami metallurgicheskoj kompanii polnogo cikla pri perehode k principam ustojchivogo razvitija (na primere PAO «NLMK») [Development of recommendations on the use of digitalization technologies to improve the risk management system of a full-cycle metallurgical company in the transition to the principles of sustainable development (using the example of NLMK PJSC)] / V. Seljukov, A. Kasatkina // *Jekonomika i upravlenie: problemy, reshenija* [Economics and management: problems, solutions]. — 2022. — DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2022.05.04.005. [in Russian]
19. Senik Ju. Optimizacija logisticheskikh processov transportirovki syr'ja i materialov [Optimization of logistics processes for the transportation of raw materials] / Ju. Senik // *Ukrainskij zhurnal prikladnoj jekonomiki i tehnologij* [Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology]. — 2023. — DOI: 10.36887/2415-8453-2023-3-46. [in Russian]
20. Sereda B. Uluchshenie metodov organizacii transportirovki po tehnologicheskim marshrutam transportno-proizvodstvennoj sistemy pererabotki othodov [Improving the methods of organizing transportation on technological routes of the transportation and production system of waste recycling] / B. Sereda, S. Turpak, S. Romanjuk [et al.] // *Zhurnal mashinostroenija i transporta* [Journal of Mechanical Engineering and Transport]. — 2023. — DOI: 10.31649/2413-4503-2023-17-1-147-152. [in Russian]
21. Tiverovskij V. Razvitie skladskoj logistiki na sovremennom jetape. Transportnyj tehnik: obrazovanie i praktika [Development of warehouse logistics at the present stage. Transport Technician: Education and Practice] / V. Tiverovskij. — 2023. — DOI: 10.46684/2687-1033.2023.2.161-168. [in Russian]
22. Shishkov A. Modernizacija tehnologicheskogo oborudovanija dlja ochildki stochnyh vod za koksovanjem s ispol'zovanjem organicheskogo cikla Renkina [Modernization of technological equipment in the waste water purification process behind the coke oven using the organic Rankine cycle] / A. Shishkov, K. Osincev // *Seriya IOP Conference: materialovedenie i inzhenerija* [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering]. — 2021. — № 1064. — DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012032. [in Russian]
23. Campos-Espejo Z. Management Model to Increase Inventory Rotation in SMEs in the Mining Industry / Z. Campos-Espejo, A. Coronado-Zamalloa, J. Quiroz-Flores [et al.] // *International Journal of Innovation, Management and Technology*. — 2023. — DOI: 10.18178/ijimt.2023.14.4.950.
24. Pereira N. Impact of Management and Reverse Logistics on Recycling in a War Scenario / N. Pereira, J Antunes, L. Barreto // *Sustainability*. — 2023. — DOI: 10.3390/su15043835.