

ISSN 1999-4125 (Print)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ГОРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
THEORETICAL FOUNDATIONS OF THE DESIGN
OF MINING SYSTEMS

Научная статья

УДК 159.92

DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-71-79

АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ ЦИФРОВИЗАЦИИ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ НА
ПРИМЕРЕ АО «УГОЛЬНАЯ КОМПАНИЯ «КУЗБАССРАЗРЕЗУГОЛЬ»

Семенов Юрий Николаевич, Семенова Ольга Сергеевна

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

*для корреспонденции: syun.ap@kuzstu.ru

**Информация о статье**

Поступила:

10 января 2023 г.

Одобрена после
рецензирования:

10 мая 2023 г.

Принята к публикации:

25 мая 2023 г.

Опубликована:

15 июня 2023 г.

Ключевые слова:цифровизация, угольная
отрасль, цепочки поставок,
AnyLogistix, цифровой двойник.**Аннотация.**

В статье показано, что такие национальные программы, как НТИ, СНТР и Цифровая экономика включают в себя мероприятия, направленные на оптимизацию, роботизацию, вертикальную и горизонтальную цифровизацию всех бизнес-процессов угольной промышленности. Создание «цифровых двойников» цепочек поставок позволяет визуализировать все элементы цепи создания добавленной стоимости, их взаимосвязи, анализировать положение конкретного угольного предприятия в общей стоимостной системе, получать конкурентные преимущества. На начальной стадии создания цифрового двойника цепочки поставок предлагается использовать математические и программные инструменты, например программу AnyLogistix. С помощью данного программного продукта осуществляется формирование таблиц с исходными данными, в которые помещается вся необходимая информация не только о составляющих глобальной цепочки поставок – угольных предприятиях, угольных складах, обогатительных фабриках, потребителях, но и об их взаимодействии, к которому можно отнести тип и параметры спроса, производимую продукцию, ее себестоимость, цену продажи, стоимость транспортировки и т. д. Проведение имитационных экспериментов с различными входными данными позволяет оценить риски, провести анализ влияния политики управления запасами и транспортной политики на функционирование системы. Это может помочь руководству угольных компаний найти резервы для оптимизации и трансформации всех звеньев цепи создания добавленной стоимости.

Для цитирования: Семенов Ю.Н., Семенова О.С. Анализ решений задач цифровизации угольной отрасли на примере АО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь» // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 2 (156). С. 71-79. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-71-79, EDN: NGWJAW

Актуальность работы

В настоящее время широко обсуждаются вопросы внедрения в Российской Федерации передовых производственных технологий во всех значимых отраслях народного хозяйства. Для

этого предлагаются такие инструменты, как Национальная технологическая инициатива (НТИ)¹, Цифровая экономика², Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации (СНТР)³. В каждой из перечисленных программ уделяется место модернизации и цифровизации горной отрасли.

Одним из рынков НТИ (аналог немецкой программы «Индустрия-4.0» [1]) является TechNet, в рамках которого предусмотрены мероприятия по обеспечению опережающего развития РФ в будущем за счет создания или модернизации высокотехнологичных отраслей, значимых с точки зрения обеспечения национальной безопасности и повышения уровня жизни граждан. Трансформация предприятий угольной промышленности в сторону оптимизации, роботизации и цифровизации рабочего процесса возможна благодаря реализации таких направлений, как большие данные и бизнес аналитика, цифровое моделирование, промышленный Интернет вещей, автономные роботы, дополненная реальность, горизонтальная и вертикальная интеграция систем, облачные технологии, аддитивные технологии, информационная безопасность [1]. Предполагается, что переход от встроенных систем (embedded systems) к киберфизическим (cyber-physical systems, CPS), базирующихся на принципе взаимодействия подключенных к Интернету устройств между собой, позволит занять предприятию, отрасли, стране лидирующее положение на международном рынке.

СНТР в качестве приоритетного направления, среди прочих, выделяет повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии. Применительно к угольной промышленности можно говорить о разработке и внедрении нового оборудования и современных технологий для разведки месторождений, выемки угля, его обогащения и т.д.

Национальный проект «Цифровая экономика» предусматривает преобразование социально-экономической сферы минерально-сырьевых кластеров посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений. Данная программа предусматривает как вертикальную, так и горизонтальную цифровизацию всех процессов не только фокусного предприятия (разреза, шахты, фабрики), но и всех участников цепочки создания добавленной стоимости. Создание «цифровых двойников» цепочек поставок позволяет визуализировать все элементы цепи создания добавленной стоимости, их взаимосвязи, проанализировать положение предприятия в общей стоимостной системе и как следствие, достичь конкурентных преимуществ [2].

Согласно общепринятой терминологии [3] выделяют 3 типа фабрик будущего (Factories of the Future), объединяющих передовые технологии для создания глобально конкурентоспособной продукции нового поколения:

- «умные» фабрики (Smart Factories, Smart manufacturing), принцип работы которых основывается на гибком производстве и применении автоматизированных и роботизированных систем управления производственными процессами [4];
- виртуальные фабрики (Virtual Factories, Virtual Manufacturing Network), представляющие собой управляемую цепочку создания добавленной стоимости продукции [5];
- цифровые фабрики (Digital Factories), предназначенные для проектирования и моделирования продукции, создания «цифровых двойников» (Smart Digital Twin) или макетов (Digital Mock-Up, DMU) [6].

Методы исследования

Отличительной особенностью угольной промышленности является относительная стабильность цепочек поставок готовой продукции: контракты на поставку энергоресурсов заключаются на длительный период, поставщики оборудования и запасных частей имеют устойчивое положение на рынке, потребители заранее известны, производимая продукция имеет

¹ Постановление Правительства РФ от 18.04.2016 N 317 (ред. от 20.04.2019) «О реализации Национальной технологической инициативы»

² Паспорт национального проекта «Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» (утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 04.06.2019 N 7)

³ Указ Президента РФ от 01.12.2016 N 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»

определенный и зависящий только от месторождения набор свойств (группа окисленности; размер кусков; массовая доля влаги, золы, серы и примесей; высшая и низшая теплота сгорания; выход летучих веществ и т. д.). В зависимости от потребности заказчика в угле определенных марок осуществляется предварительное планирование объемов выработки угля для каждого из разрезов (Рис. 1).

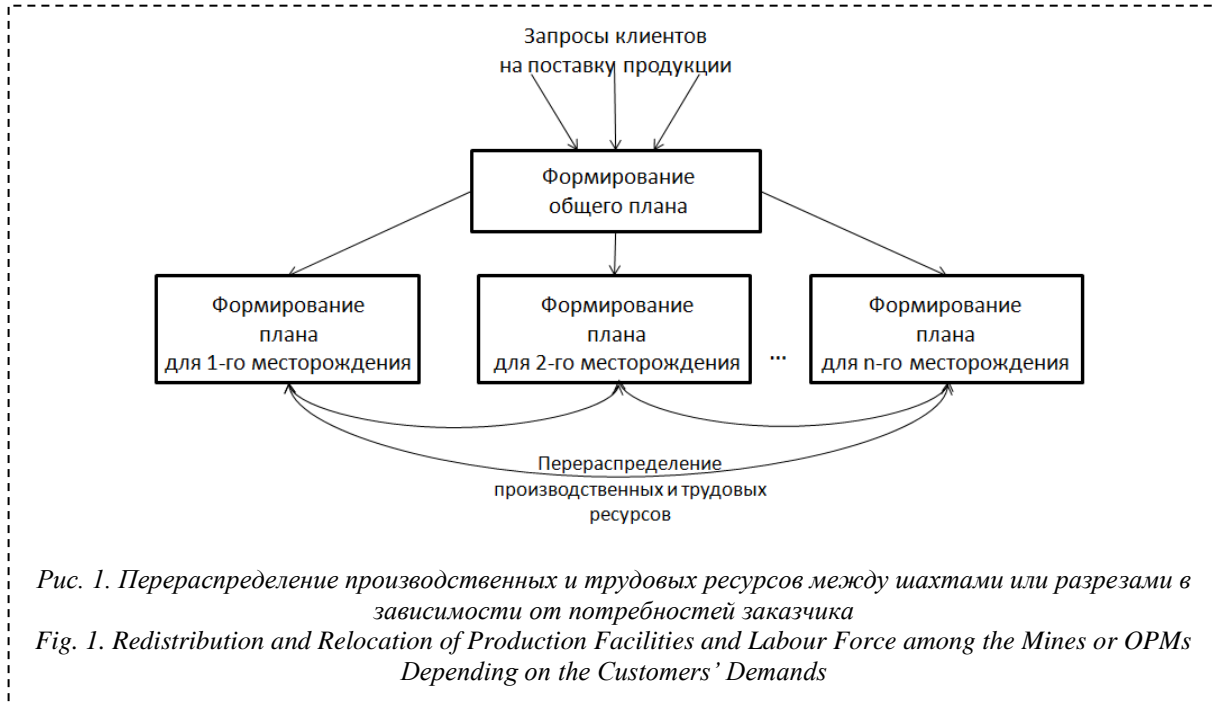


Рис. 1. Перераспределение производственных и трудовых ресурсов между шахтами или разрезами в зависимости от потребностей заказчика

Fig. 1. Redistribution and Relocation of Production Facilities and Labour Force among the Mines or OPMs Depending on the Customers' Demands

Концепция Smart Factories подразумевает быструю перенастройку необходимых производственных мощностей, учитывающую потребности клиента. Этого можно достигнуть с помощью использования модульных установок, позволяющих гибко реагировать на спрос угольной продукции за счет наращивания или сокращения его производства, перераспределения производственных и трудовых ресурсов между шахтами или разрезами. В качестве перемещаемых производственных мощностей может выступать такое горное оборудование, как машины для перевозки руды, буровые станки, машины для добычи пород, дробильное оборудование, экскаваторы, отвалообразующие машины, обогатительные и сортировочные комплексы, вспомогательное оборудование.

Задачу поиска оптимального плана перераспределения производственных и трудовых ресурсов можно сформулировать в виде задачи линейного программирования

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (c_{ij}x_{ij} + s_{ij}y_{ij}) \rightarrow \min,$$

при

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i, i = 1, 2 \dots m, \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} \geq b_j, j = 1, 2 \dots n, \\ \sum_{j=1}^n y_{ij} \leq d_i, i = 1, 2 \dots m, \\ \sum_{i=1}^m y_{ij} \geq g_j, j = 1, 2 \dots n, \\ x_{ij} \geq 0, y_{ij} \geq 0, \text{ для всех } i \text{ и } j, \end{array} \right.$$

где a_i – количество доступных для перераспределения производственных мощностей в пункте i ,

b_j – количество необходимых для потребления в пункте j производственных мощностей,

c_{ij} – стоимость перемещения единицы производственной мощности из i -го в j -й пункт,

x_{ij} – количество единиц производственных мощностей, перераспределяемых из исходного пункта в пункт назначения,

d_i – количество доступных для перераспределения трудовых ресурсов в пункте i ,

g_j – количество необходимых для потребления в пункте j трудовых ресурсов,

s_{ij} – стоимость транспортировки единицы трудовых ресурсов из i -го в j -й пункт,

y_{ij} – количество единиц трудовых ресурсов, перераспределяемых из исходного пункта в пункт назначения.

Так как кроме разового перемещения необходимого горного оборудования в места добычи полезных ископаемых необходимы регулярные перемещения трудовых ресурсов, то в классическую постановку транспортной задачи вводится дополнительное слагаемое $s_{ij}y_{ij}$. Однако в условиях «безлюдного производства», также относящегося к концепции Smart Factories, переменная y_{ij} , характеризующая перемещение трудовых ресурсов, будет стремиться к нулю.

Повышение рентабельности функционирования угольных предприятий возможно за счет качественных или количественных изменений структуры управления производством, изменения технологии добычи или обогащения природных ресурсов и т.д. Известными путями повышения качества угольной продукции является его рассортировка и обогащение, внедрение передовых производственных технологий добычи и переработки угля, однако данные задачи в большинстве угольных компаний практически полностью решены. Например, в АО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь» разработана программа увеличения обогатительных мощностей, согласно которой осуществляется модернизация используемых обогатительных фабрик и установок по переработке угля и строительство новых [7]. В результате выполнения вышеназванной программы с 2011 года объем переработанного угля увеличился с 71 до 89% от общей добычи [8].

Организация виртуальных фабрик (Virtual Factories) позволяет реализовать качественные изменения не в производимой продукции, а в цепочках поставок за счет снижения времени ожидания заказа, повышения уровня сервиса, уменьшения рисков и т.д. Управление цепочками поставок объединяет производственные и логистические процессы на нескольких уровнях.

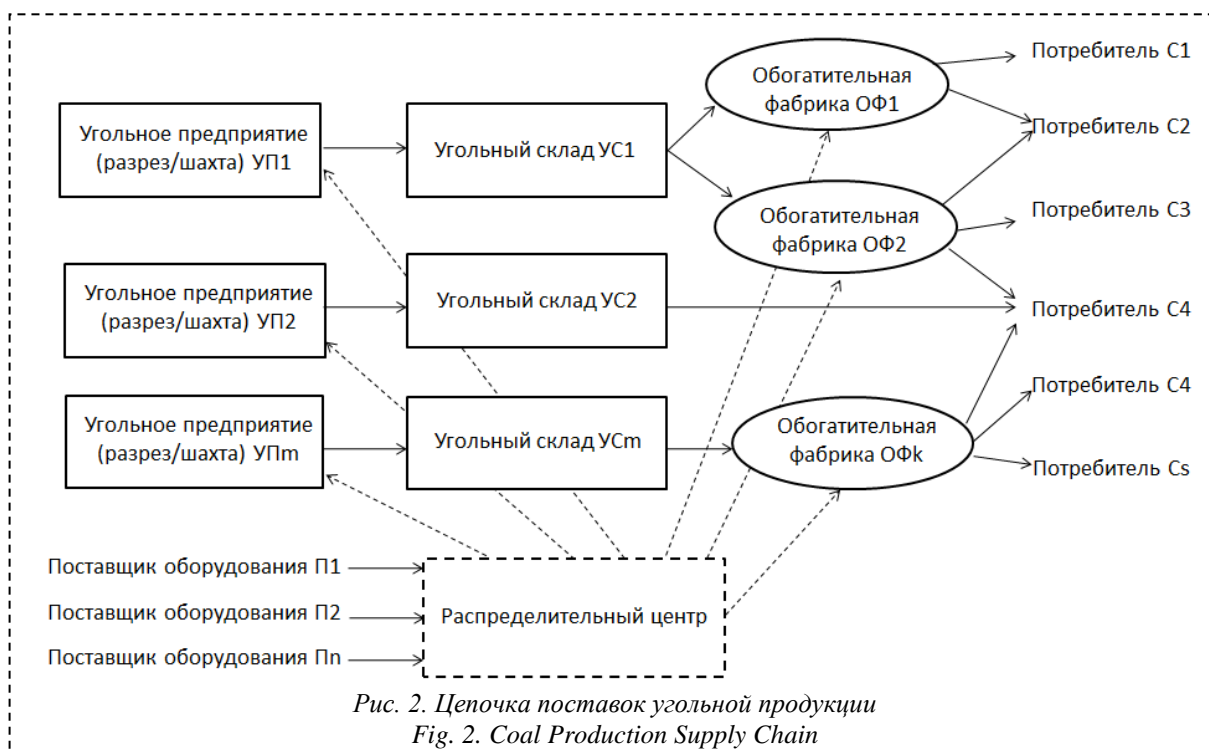


Рис. 2. Цепочка поставок угольной продукции

Fig. 2. Coal Production Supply Chain

Стратегические вопросы включают в себя такие решения, как размер и расположение производственных предприятий или распределительных центров, структура сетей обслуживания и проектирование цепочки поставок. Тактические вопросы включают планирование производства, транспортировки и запасов. Наконец, оперативные вопросы касаются планирования производства и контроля, управления запасами и маршрутизации транспортных средств.

Для угледобывающей отрасли характерны два типа цепочек поставок – с обогатительной фабрикой и без нее. Так как в угольную компанию обычно входят несколько фокусных предприятий, то необходимо сформировать из отдельных цепочек поставок одну глобальную (Рис. 2), включающую в себя угольные предприятия УП1, УП2, ... УПm (open-pit mine OPMm), угольные склады УСm (coal storage CSm), обогатительные фабрики ОФ1, ..., ОФk (concentrating factory CFk) и потребителей продукции С1, С2, ..., Сs (Customer Cs).

К основным рискам цепочки поставок угольной продукции можно отнести [9]:

- риски, связанные со срывом объема добычи угля на разрезе;
- риски срыва поставок продукции транспортными компаниями;
- риски срыва отгрузки готовой продукции;
- финансовые риски, связанные с изменением курса валют;
- риски, связанные со срывами работ на обогатительных фабриках.

Цепочку поставок и все виды рисков можно смоделировать с помощью построения цифрового двойника в программе имитационного моделирования AnyLogistix, позволяющей получать необходимые данные о работе сети и анализировать их для принятия решений [10].

Рассмотрим моделирование цепочки поставок на примере АО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь», в состав которого входят такие филиалы (угольные разрезы), как Кедровский, Моховский (включая шахту Байкаимскую), Бачатский, Краснобродский, Талдинский, Калтанский.

Исходными данными для построения модели является совокупность структурированной информации, характеризующей каждый узел цепочки поставок (Таблица 1). Так как поставщики оборудования П1, П2, ... Пn (Supplier Sn) практически не влияют на цепочку создания добавленной стоимости угольной продукции, то в глобальную цепочку поставок их можно не включать.

Таблица 1. Исходные данные, используемые для моделирования

Table 1. Data for developing the model

Узел цепочки поставок	Информация
Разрез УПm (open-pit mine OPMm)	Дислокация разреза, производимая продукция и ее характеристики
Склад УСm (coal storage CSm)	Дислокация угольного склада; номенклатура хранимой продукции; фиксированные затраты, связанные с работой склада (Facility expenses); переменные затраты, связанные с обработкой заказа (Processing costs), емкость (Capacity)
Обогатительная фабрика ОФk (concentrating factory CFk)	Дислокация обогатительной фабрики, номенклатура перерабатываемой продукции, номенклатура конечной продукции; фиксированные затраты, связанные с работой обогатительной фабрики (Facility expenses); переменные затраты, связанные с обработкой заказа (Processing costs); мощность (Capacity)
Потребители Cs (Customer Cs)	Дислокация потребителей, заказываемая продукция, периодичность спроса

Каждый узел цепочки поставок добывает, перерабатывает, хранит или транспортирует определенный тип продукции. Например, Кедровский разрез добывает уголь марки СС, обогатительная фабрика Кедровская обогащает его до марок ССПК, ССОМ, СССШ, ССМСШ, ССПКО, ССМСШ, КСНОМ, отгрузка потребителям производится в соответствии со спросом, тип и параметры которого указываются в таблице Demand программы имитационного моделирования AnyLogistix [11]. Для моделирования необходима также такая информация по производимой продукции, как себестоимость добычи и обогащения каждой марки угля на каждом разрезе (Cost), цена продажи (Selling Price), стоимость транспортировки различными видами транспорта и т.д.

Результаты и обсуждение

В результате моделирования с использованием реальных данных получаем цифровой двойник глобальной цепи поставок (Рис. 3), с помощью которого можно получить представление о влиянии производственной политики и политики распределения на цепочку поставок. Также становится возможным оценить эффективность логистики, решить задачи поиска путей повышения эффективности цепочки поставок, осуществить поиск узких мест, моделировать риски, связанные с функционированием цепочки поставок [12, 13]. Задавая различную транспортную политику, политику управления запасами на складах и проводя имитационные эксперименты, можно определить оптимальный уровень сервиса (ELT), время ожидания заказа, суммарные затраты и другие ключевые показатели эффективности KPI.

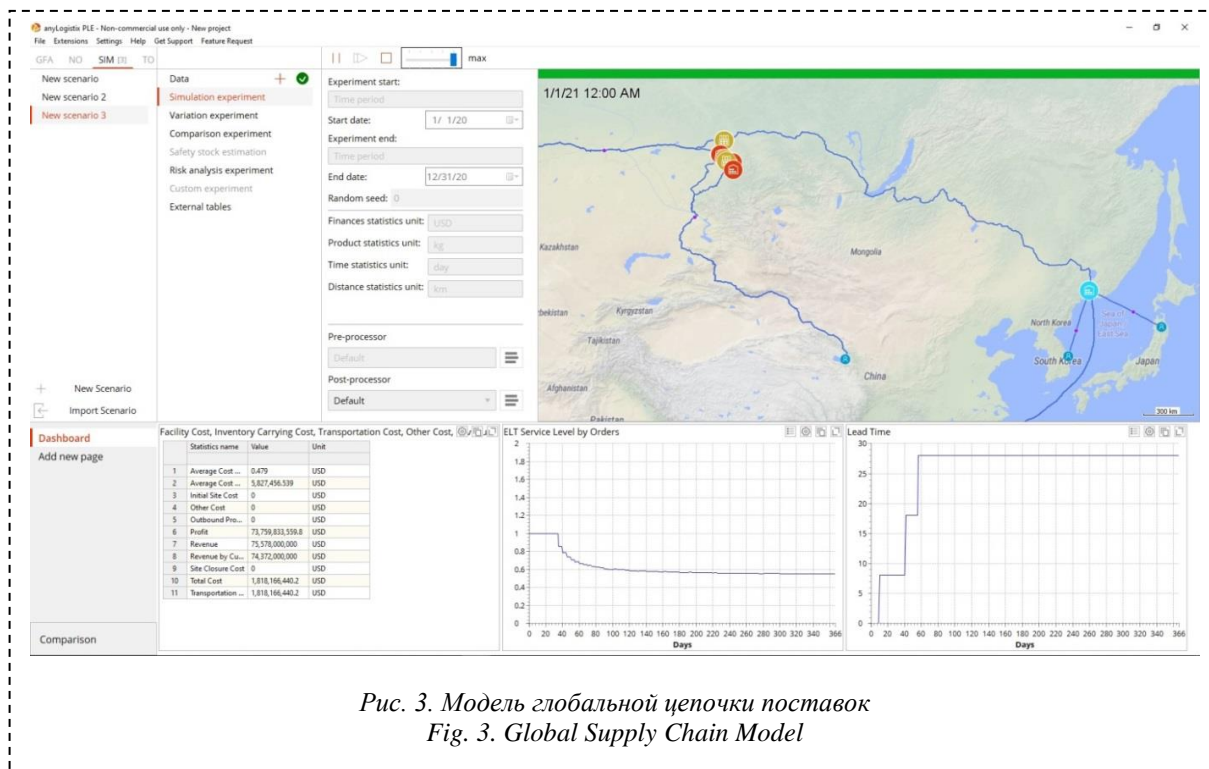


Рис. 3. Модель глобальной цепочки поставок
Fig. 3. Global Supply Chain Model

Создав цифрового двойника цепи поставок, можно получить исчерпывающую информацию о ее текущем состоянии, планировать нововведения, экспериментировать с ее структурой и элементами [14, 15].

Выводы

В статье показано, что в рамках таких национальных программ, как НТИ, СНТР и Цифровая экономика необходимо продолжать цифровизацию и оптимизацию угольной отрасли. На начальной стадии предлагается использовать математические и программные инструменты, позволяющие осуществить построение модели реальной системы с определенным уровнем абстракции, но с учетом ее важных составляющих. Это позволит руководству угольных компаний проанализировать влияние различных факторов на функционирование системы.

Создание цифрового двойника цепочки поставок существенно упрощает получение исчерпывающей информации о взаимодействии фокусных угледобывающих предприятий и контрагентов, проведение имитационных экспериментов с различными входными данными, анализ влияния политики управления запасами и транспортной политики на функционирование системы.

Проведение имитационных экспериментов существенно снижает риски, возникающие при принятии управленческих решений на реальном предприятии, позволяет найти резервы для оптимизации и трансформации всех звеньев цепи создания добавленной стоимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Plakitkin Y. A., Plakitkina L. S. Programs Industry-4.0 and Digital Economy of the Russian Federation – Opportunities and horizons in the coal sector // Min. Ind. J. 2018. Т. 1. С. 22–28.
2. Porter M. E. Competitive advantage of nations: creating and sustaining superior performance. Simon and Schuster, 2011.
3. M. Gaillard. (2012). Grands défis pour Horizon 2020. FutuRIS.
4. Davis J. [et al.] Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance // Computers & Chemical Engineering. 2012. Т. 47. С. 145–156.
5. Nabuco O. [et al.] Scientific collaboration and knowledge sharing in the virtual manufacturing network // IFAC Proceedings Volumes. 2004. Т. 37. №. 4. С. 587–592.
6. Azevedo A., Almeida A. Factory templates for digital factories framework // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2011. Т. 27. №. 4. С. 755–771.
7. Смирнова А. Д., Михайлова Т. В. Актуальность цифровой трансформации угледобывающей промышленности Кузбасса // Сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Редколлегия: К. С. Костиков (отв. ред.) [и др.] Кемерово, 2022. С. 102061-102061.
8. АО «УК «Кузбассразрезуголь»: [Электронный ресурс]. URL: http://www.kru.ru/ru/activity/primary_production/obogashchenie-uglya/ (дата обращения: 21.12.2022).
9. Lobov S. Reduction of economic risk by re-planning in real-time // The Advanced Science Journal. 2015. №. 1. С. 114–117.
10. Hosseini S., Ivanov D., Dolgui A. Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2019. Т. 125. С. 285–307.
11. Ivanov D. [et al.] Digital supply chain twins: Managing the ripple effect, resilience, and disruption risks by data-driven optimization, simulation, and visibility // Handbook of ripple effects in the supply chain. Springer, Cham, 2019. С. 309–332.
12. Ivanov D., Dolgui A., Sokolov B. The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics // International Journal of Production Research. 2019. Т. 57. №. 3. С. 829–846.
13. Dolgui A., Proth J. M. Supply chain engineering: useful methods and techniques. London : Springer, 2010. Т. 539.
14. Зозуля А. В. [и др.] Эффективность использования цифровых технологий в производственных процессах угольной промышленности // Уголь. 2022. №. 9 (1158). С. 47–52.
15. Варкентин Е. В. Цифровизация и ее влияние на угледобывающую отрасль // Вестник науки. 2022. Т. 1. №. 11 (56). С. 17–21.

© 2023 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Семенов Юрий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, (650000, г. Кемерово, Весенняя, 28), e-mail: syun.ap@kuzstu.ru
Семенова Ольга Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, (650000, г. Кемерово, Весенняя, 28), e-mail: sos.ap@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Семенов Юрий Николаевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Семенова Ольга Сергеевна – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

SELECTION OF TYPES AND PARAMETERS OF SUPPORTS IN THE CONDITIONS OF UNDERGROUND MINING OF APATITE-NEPHELINE DEPOSITS

Yury N. Semenov, Olga S. Semenova

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*for correspondence: syun.ap@kuzstu.ru



Article info

Received:

10 January 2023

Accepted for publication:

10 May 2023

Accepted:

25 May 2023

Published:

15 June 2023

Keywords: digitalization, coal industry, supply chains, anyLogistix, digital twin

Abstract.

The article describes that Russian national programs (National Technological Initiative, Digital Economy, Strategy of Scientific and Technological Development of the Russian Federation) include measures aimed at optimization, robotization, vertical and horizontal digitalization of all business processes of coal enterprises. The creation of "digital twins" of supply chains allows you to visualize all the elements of the value chain, their interrelations, analyze the position of a particular coal enterprise in the overall cost system, and gain competitive advantages. To create a digital twin of the supply chain, the authors suggest using mathematical and software tools, such as the anyLogistix program. The anyLogistix program generates tables with source data. They contain all the necessary information about the components of the global supply chain – coal enterprises, coal warehouses, processing plants, consumers. The tables also store information about the interaction of elements of the supply chain, for example, the type and parameters of demand, the products produced, their cost price, sale price, transportation cost, etc. Conducting simulation experiments with various input data allows you to assess risks, analyze the impact of inventory management policy and transport policy on the functioning of the system. This helps the management of coal companies to find reserves for optimization and transformation of all links in the value chain.

For citation: Semenov Yu.N., Semenova O.S. Solving the problems of digitalization of the coal industry on the example of UK Kuzbassrazrezugol. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023; 2(156):71-79. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-71-79, EDN: NGWJAW

REFERENCES

1. Plakitkin Y.A., Plakitkina L.S. Programs Industry-4.0 and Digital Economy of the Russian Federation – Opportunities and horizons in the coal sector. *Min. Ind. J.* 2018; 1:22–28.
2. Porter M.E. Competitive advantage of nations: creating and sustaining superior performance. Simon and Schuster, 2011.
3. M. Gaillard. (2012). Grands défis pour Horizon 2020. *FutuRIS*.
4. Davis J. [et al.] Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance. *Computers & Chemical Engineering*. 2012; 47:145–156.
5. Nabuco O. [et al.] Scientific collaboration and knowledge sharing in the virtual manufacturing network. *IFAC Proceedings Volumes*. 2004; 37(4):587–592.
6. Azevedo A., Almeida A. Factory templates for digital factories framework //Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2011; 27(4):755–771.
7. Smirnova A. D., Mikhaylova T. V. Aktual'nost' tsifrovoy transformatsii ugledo-byvayushchey promyshlennosti Kuzbassa [The relevance of the digital transformation of the Kuzbass coal mining industry]. *Sbornik materialov XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Redkollegiya: K.S. Kostikov (otv. red.) [i dr.] [Collection of materials of the XIV All-Russian Scientific and Practical conference with international participation. Editorial Board: K.S. Kostikov and others]. Kemerovo, 2022. P. 102061-102061.
8. AO «UK «Kuzbassrazrezugol» [UK Kuzbassrazrezugol AO]. URL: http://www.kru.ru/ru/activity/primary_production/obogashchenie-uglya/ (accessed: 21.12.2022).
9. Lobov S. Reduction of economic risk by re-planning in real-time. *The Advanced Science Journal*. 2015; 1:114-

117.

10. Hosseini S., Ivanov D., Dolgui A. Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2019; 125:285–307.

11. Ivanov D. [et al.] Digital supply chain twins: Managing the ripple effect, resilience, and disruption risks by data-driven optimization, simulation, and visibility // Handbook of ripple effects in the supply chain. – Springer, Cham, 2019. P. 309–332.

12. Ivanov D., Dolgui A., Sokolov B. The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*. 2019; 57(3):829-846.

13. Dolgui A., Proth J. M. Supply chain engineering: useful methods and techniques. London : Springer, 2010; 539.

14. Zozulya A.V. [et al.] Effektivnost' ispol'zovaniya tsifrovyykh tekhnologiy v proiz-vodstvennykh protsessakh ugol'noy promyshlennosti [The effectiveness of the use of digital technologies in the production processes of the coal industry]. *Ugol' [Coal]*. 2022; 9 (1158):47–52.

15. Varkentin E.V. Tsifrovizatsiya i ee vliyanie na ugledobyvayushchuyu otrasl' [Digitalization and its impact on the coal mining industry]. *Vestnik nauki [Bulletin of Science]*. 2022; 1(11(56)):17–21.

© 2023 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Yury N. Semenov, C. Sc. in Engineering, associate professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28 street Vesennyyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: syun.ap@kuzstu.ru

Olga S. Semenova, C. Sc. in Engineering, associate professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (28 street Vesennyyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: sos.ap@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Yury N. Semenov – formulation of a research task, scientific experiment, review of relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, writing a text.

Olga S. Semenova – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, writing a text.

All authors have read and approved the final manuscript.

