



Перспективы применения цифровых двойников в новой распределенной сетевой модели организации процессов цементных производств

С.Н. Гончаренко¹, М.Я. Пашаев²

¹ Университет науки и технологий МИСИС, Москва

²Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Грозный

Аннотация: Актуальность работы определяется широким применением цифровизации во многих отраслях экономики и значительным отставанием в этой сфере цементной промышленности. Приведен обзор современных подходов к изучению цифровых двойников и дана оценка состояния их внедрения в цементных производствах. Цель работы заключается в определении особенностей процессов цифровизации, а также выявлении барьеров и перспектив развития цифровых двойников в цементной отрасли. Показано, что внедрение цифровых технологий может стать эффективным инструментом трансформации цементной отрасли при условии внедрения цифровых двойников в рамках цепочек создания стоимости продукции. Доказана необходимость создания новой модели долгосрочного устойчивого развития цементной отрасли на основе современных цифровых технологий в структуре отраслевого баланса строительных материалов.

Ключевые слова: цифровизация предприятия, цифровое моделирование, цифровой двойник, цифровые технологии, оптимизация производственных процессов, типология цифровых двойников, цементная отрасль, цепочки создания стоимости, модель устойчивого развития, эффективность управления.

В настоящее время широко развернулось внедрение цифровых технологий во всех отраслях экономики в рамках наступления четвертой промышленной революции или Индустрии 4.0 [1], при этом наиболее активно в данные процессы вовлечены высокотехнологичные отрасли промышленности. В этой связи целенаправленно поддерживается внедрение цифровых технологий в таких направлениях как анализ больших данных, бизнес аналитика, цифровое моделирование, промышленный интернет вещей, цифровые двойники, безлюдные технологии и роботизация, дополненная реальность, облачные технологии, аддитивные технологии и др. [2].

Цементная отрасль несколько отстает во внедрении цифровых технологий, однако имеется ряд положительных тенденций цифровизации



производственных процессов как на уровне отрасли в целом, так и на уровне отдельных предприятий и компаний. Последние технологические разработки и достижения сделали возможной автоматизацию всех основных звеньев цепочек создания стоимости, позволили комплексно внедрять перспективные технологии, формирования проектных цементных смесей, разрабатывать оптимальные пути доставки готовой продукции.

Цифровизация на уровне производства все чаще ассоциируется с созданием, так называемых, цифровых двойников. На сегодняшний день в литературе существует достаточно много разнообразных определений, часть из них связывают цифровые двойники с разработкой программных продуктов для моделирования результатов производственно-хозяйственной деятельности [3,4], а также программных систем для мониторинга в режиме реального времени состояния технологического оборудования и показателей производственного процесса [5,6]. В ряде зарубежных источников под цифровым двойником понимают полномасштабное вероятностное моделирование производимого продукта или системы на основе интегрированных симуляций, которое в полной мере отражает физические свойства реального объекта [7,8]. В России в 2021 году был принят ГОСТ, согласно которому под цифровым двойником следует понимать виртуальное представление объекта или процесса/последовательности взаимосвязанных процессов, которое на протяжении всего жизненного цикла поддерживает взаимосвязь с реальной средой. Внедрение цифровых двойников чаще всего осуществляется тогда, когда необходимо [9]: оперативно выявлять «узкие» места в технологическом процессе или работе оборудования для своевременного предотвращения возможных сбоев или аварийных ситуаций; сократить время простоя технологического оборудования; моделировать ход технологических процессов или работу оборудования при планировании изменений технологических регламентов; оптимизировать



производственную логистику или перестроить существующие бизнес-процессы [10]. Это связано с тем, что особенности применения цифровых двойников наиболее востребованы там, где возникновение потенциальной ошибки может привести к угрозе безопасности или существенным экономическим потерям.

Одной из сфер, которая бурно развивается, является строительство. По данным Росстата за период с 2019 по 2024г.г. ежегодный рост ввода жилья в эксплуатацию составил от 4 до 12%. С развитием строительства тесно связано развитие предприятий цементной промышленности. Цементная отрасль, помимо машиностроительной, металлургической, горной и химической, формирует промышленный и экономический потенциал Российской Федерации. Ее важность подтверждается принятой Правительством РФ стратегией развития промышленности строительных материалов, одной из целью которой является формирование инновационных, конкурентоспособных и высокотехнологичных производств [11]. Резко возросшая сложность продуктов производства и технологий, а также усиление взаимосвязей между технологическими составляющими производственного цикла стали причиной формирования сетевой модели организации производственно-экономических отношений. В современной парадигме процесс производства (создания) продукта или предоставления услуги представляет собой цепочку взаимосвязанных узкоспециализированных операций, предоставление которых может быть делегировано различным организациям или предприятиям. Созданные таким образом элементы цепочки, собираются воедино и формируется окончательный, готовый к эксплуатации товарный продукт. Формирование стоимости такого распределенного продукта состоит из стоимости производства (создания) продукта или услуги, архитектуры цепочки создания стоимости этого продукта (услуги), механизма определения его



добавленной стоимости, а также внешней среды, сформированной сложной взаимосвязью входящих и исходящих потоков поставок и формирования рынков реализации продукта или услуги. Вследствие сказанного можно предположить, что функционирование цифровых двойников станет наиболее эффективным и рентабельным при реализации их с применением формирования цепочки создания стоимости [12].

Рассматривая цементную отрасль с точки зрения описанного выше процесса формирования цепочки создания стоимости можно сказать, что производство цемента является последовательностью технологических процессов со сложными структурно-параметрическими взаимосвязями [13]. Сама цепочка создания стоимости имеет аддитивно-разветвленную структуру, состоящую из линейной последовательности операций сложных производственных операций. Она включает в себя технологические звенья, занятые основными производственными процессами: геологоразведкой и подготовительными работами, добычей, внутрикарьерной транспортировкой, переработкой (цементный завод), продажей и логистикой готовой продукции. В данной цепочки создания стоимости добыча известняка, как исходного сырья для производства цемента, рассматривается как элемент горного производства. Добыча известняка ведется открытым способом и является первой в цепочке создания стоимости, к тому же играет довольно важную роль, поскольку от показателей качества (химического состава) исходного добываемого сырья во многом определяется качество конечного продукта. Несмотря на значительную важность сырьевой компоненты, основная часть добавленной стоимости приходится на переработку, производство и сбыт готовой продукции.

Поскольку цементное производство зависит от объемов и качества добываемого природного сырья, то формирование цепочки создания стоимости сталкивается еще с рядом особенностей, среди которых следует



выделить геологическую неопределенность, наличие транспортной инфраструктуры, энерго- и капиталоемкость производства, его ограниченную диверсификацию, а также значительную зависимость от колебаний рынка строительства, который является одним из основных потребителей продукции.

Создание цифрового двойника цементного производства было бы логично рассматривать с позиции формализованного описания и моделирования производственно-технологической цепочки «карьер известняка – производство цементной продукции (цементный завод) – сбытовая логистика (строительный рынок)». К специфическим особенностям данной модели следует отнести сложность моделирования условий залегания известняка и формирование потоков полезного ископаемого на карьере, формализацию геотехнологических, геологических и вспомогательных процессов, происходящих в карьере, сложность, инертность и многостадийность технологических циклов цементного производства, разветвленную транспортную сеть и вариации объемов сбыта продукции.

Анализ ряда промышленных кейсов в области информационных технологий цементных производств позволил сделать вывод, что в большинстве случаев в компаниях цементной отрасли цифровые технологии пока представлены традиционными системами автоматизации (система управления производственными процессами, планирование ресурсов предприятия), внедрение же цифровых двойников носит единичный и локальный характер.

Внедрение цифровых двойников на сегодняшний день зачастую происходит между первым и вторым уровнем цифровизации, при этом даже в достаточно крупных цементных компаниях цифровые технологии не дают ожидаемой производственной и экономической эффективности (рис.1).

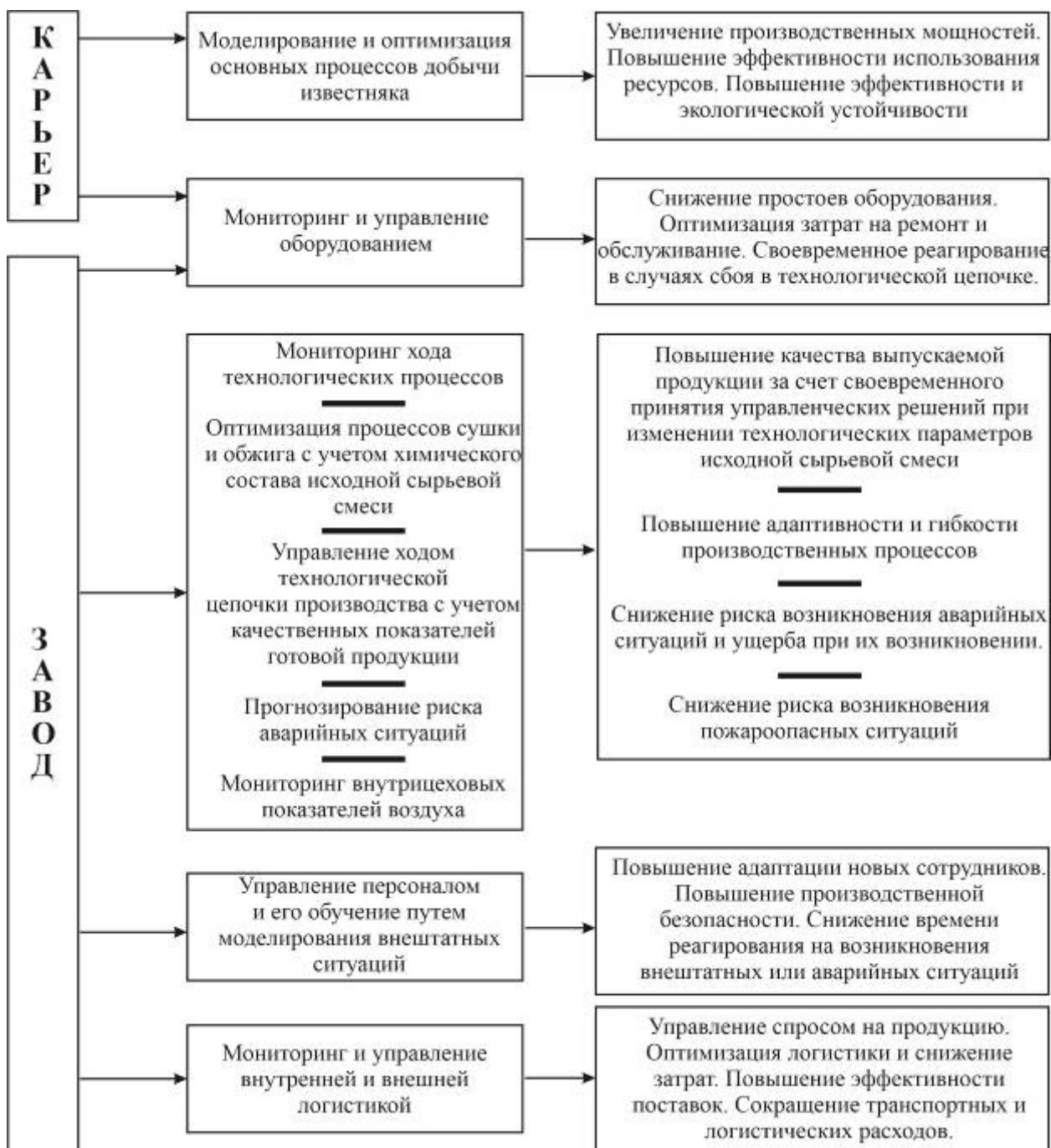


Рисунок 1 – Возможные направления применения цифровых двойников
в отдельных цепочках создания стоимости

В основу данной модели необходимо положить обеспечение долгосрочного устойчивого к внешним и внутренним воздействиям развитию цементной отрасли на основе современных технологий экологичного



рационального использования сырья и межотраслевого сотрудничества на основе устойчивых прозрачных кооперационных связей. В этой связи моделирование цепочек создания стоимости связано с необходимостью проведения следующих исследований. Изучение существующих типов цепочек создания стоимости в цементной промышленности для оценивания их возможной адаптации к изменяющимся условиям как цементной, так и смежных отраслей. Оценивание существующих типов цепочек с позиции готовности внедрения цифровых двойников в цементную и смежные отрасли, а также возможности их социально-экономической эффективности. Изучение возможности использования цифровых моделей цепочек создания стоимости в условиях неопределенности внутренних и внешних возмущающих воздействий. Несмотря на то, что внедрение цифровых технологий и цифровых двойников в цементной отрасли находится на начальных этапах, в перспективе отдача от них может быть очень значима, в основе которой должны лежать глубокие технологические и структурные преобразования, направленные на ее адаптацию к текущим кризисным условиям и формирование новой модели отраслевого развития.

Для достижения данных целевых ориентиров необходимо осуществить моделирование функционирования цепочек создания стоимости, сложившихся в цементной и смежных отраслях, причем делать это без активного внедрения цифровых технологий и цифровых двойников практически невозможно. Для успешной реализации данной модели требуется провести глубокие исследования по следующим направлениям:

1. инвентаризация и типологизация цепочек создания стоимости, сложившихся в цементной отрасли, оценка их влияния на текущую и долговременную стрессоустойчивость отрасли и смежных отраслей с целью выявления основных сегментов, спектра возможных альтернативных сценариев механизмов их трансформации;



2. комплексная оценка готовности существующих цементных цепочек создания стоимости обеспечивать социально-экономическую эффективность, стрессоустойчивость, формирование технологического суверенитета цементных и смежных отраслей с использованием цифровых двойников;

3. разработка цифровой модели, опирающейся на цепочки добавленной стоимости для адаптации цементной отрасли к условиям неопределенности, вызванной различными факторами внешней и внутренней среды.

4. разработка комплексных автоматизированных моделей прогнозирования параметров развития цементной отрасли как системы с разнообразными межотраслевыми, межрегиональными, технологическими, институциональными и финансово-экономическими связями для повышения надёжности функционирования промышленных объектов, связанности территорий регионов, конкурентоспособности продукции региональных предприятий и улучшения экологической обстановки, а также в целом как механизма идентификации проблем социально-экономического развития регионов, выявления потенциальных угроз и путей их преодоления.

Таким образом, в ходе проведенных исследований были проанализированы и систематизированы подходы к определению понятия цифрового двойника, структуры и типологии цифровых двойников. При этом анализ цепочек создания стоимости позволил выявить барьеры и потенциальные направления внедрения цифровых двойников в цементной отрасли. Цифровые двойники рассматривались как инструменты управления, осуществляемые с помощью комплекса цифровых технологий, и комплекса взаимосвязей между типами цифровых двойников и спецификой цепочек создания стоимости в цементной отрасли. Проведенный анализ позволил выделить отдельные перспективные направления и звенья цепочек создания стоимости в цементной отрасли, в которых цифровые двойники внедряются особенно активно. Хотя, процесс интеграции технологии цифровых



двойников на предприятиях цементной промышленности еще только начинается, однако, следует отметить, что него есть значительный потенциал. Применение цифровых технологий может послужить началом изменений, способных преобразовать предприятия промышленности, сделать их более адаптивными и устойчивыми к возможным рискам в случае кризисных ситуаций, а также обеспечить необходимый уровень инновационности и конкурентоспособности строительной отрасли.

Литература

1. Шваб Клаус Четвертая промышленная революция. Москва: ЭКСМО, 2016. 208с.
2. Черепенин В.А., Газырин И.Е., Лесников Д.А., Воробьев С.П. Интеграция облачных, туманных, граничных вычислений: перспективы и вызовы цифровой трансформации // Инженерный вестник Дона. 2025. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/issue/206.
3. Илюхина С.С., Гончаренко С.Н. Особенности и перспективы применения цифровых двойников в транспортно-логистических системах промышленных предприятий // Инженерный вестник Дона, URL: ivdon.ru/ru/magazine/issue/211.
4. Бурлаков В.В., Мясоедова Т.К. Цифровой двойник: ключ к совершенствованию бизнес-процессов телекоммуникационных компаний. Москва: СОЛООН-Пресс, 2024. 104с.
5. Тарануха Н.Л., Семенова С.В., Панков С.Н. Цифровой двойник – эффективный инструмент цифровой трансформации промышленных предприятий // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. №3. с.11-26.
6. Соловенко, И.С., Рожков А.А. Цифровизация предприятий топливно-энергетического комплекса России (рубеж XX-XXI вв.): степень изученности



проблемы // Вестник Томского государственного университета. 2023. № 489. с. 153-161.

7. Fantozzi I.C., Santolamazza A., Loy G., Schiraldi M.M. Digital twins: strategic guide to utilize digital twins to improve operational efficiency in Industry 4.0 // Future Internet. 2025. №1. p.41.

8. Wharton M. Are fair digital objects and digital twins the same things? // Research ideas and outcomes. 2022. №8. URL: riojournal.com/article/95975.

9. Абрамов В.И. Цифровые двойники: характеристики, типология, практики развития // Вопросы инновационной экономики. 2024. Т. 14. № 3. с. 691-716.

10. Клюева И.А., Фролова С.О. Цифровые двойники и области их использования // Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы устойчивого развития регионов, отраслей, предприятий». Тюмень: Изд-во Тюменского индустриального университета, 2024. С.73-76.

11. Волосатова М.А. Производство цемента // Энциклопедия технологий 2.0: производство неметаллов. Москва: Изд-во Научно-исследовательского центра «Центр экологической промышленной политики». 2022. с.201-318.

12. Никитенко С.М., Гоосен Е.В., Кавкаева О. Моделирование гибких цепочек добавленной стоимости на основе «чистых» технологий переработки угля. Горная промышленность. 2023. № S2. с.126-134.

13. Комисарова М.В. Производство цемента // XII Международная научно-практическая конференция «Стратегическое развитие инновационного потенциала отраслей, комплексов и организаций». Пенза: Изд-во Пензенского государственного аграрного университета, 2024. С.325-328.



References

1. Shvab Klaus Chetvertaya promyshlennaya revolyuciya [Fourth industrial revolution]. Moskva: EHKSMO, 2016, 208p.
2. Cherepenin V.A., Gazyrin I.E., Lesnikov D.A., Vorob'ev S.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/issue/206.
3. Ilyukhina S.S., Goncharenko S.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, №7, URL: ivdon.ru/ru/magazine/issue/211.
4. Burlakov V.V., Myasoedova T.K. Cifrovoj dvojnik: klyuch k sovershenstvovaniyu biznes-processov telekommunikacionnykh kompanij [Digital twin: the key to improving business processes for telecommunications companies]. Moskva: SOLON-Press, 2024. 104p.
5. Taranukha N.L., Semenova S.V., Pankov S.N. Intellektual'nye sistemy v proizvodstve, 2023, №3. pp.11-26.
6. Solovenko, I.S., Rozhkov A.A. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2023, № 489. pp. 153-161.
7. Fantozzi I.C., Santolamazza A., Loy G., Schiraldi M.M. Future Internet, 2025, №1. p.41.
8. Wharton M. Research ideas and outcomes, 2022, №8. URL: riojournal.com/article/95975.
9. Abramov V.I. Voprosy innovacionnoj ekonomiki, 2024, Т. 14, № 3. pp. 691-716.
10. Klyueva I.A., Frolova S.O. Izd-vo Tyumenskogo industrial'nogo universiteta, 2024, pp.73-76.
11. Volosatova M.A. Izd-vo Nauchno-issledovatel'skogo centra «Centr ekologicheskoy promyshlennoj politiki», 2022, pp.201-318.
12. Nikitenko S.M., Goosen E.V., Kavkaeva O. Gornaya promyshlennost'. 2023, № S2, pp.126-134.



13. Komisarova M.V. XII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Strategicheskoe razvitiye innovacionnogo potenciala otrraslej, kompleksov i organizacij». Penza: Izd-vo Penzenskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2024, pp.325-328.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 20.12.2025

Дата публикации: 24.01.2026