

Формализованная информационная модель цифрового двойника технологических циклов цементного производства в цепочке создания стоимости продукции

С.Н. Гончаренко¹, М.Я. Пашаев²

¹ Университет науки и технологий МИСИС, Москва

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

Аннотация: Актуальность работы определяется необходимостью определения приоритетных направлений формализации, алгоритмизации, моделирования и развития цифровых технологий в цементной отрасли. Для создания интегрированного цифрового двойника цементного производства были формализованы различные варианты технологических схем, отличающиеся числом элементов, степенью их агрегированности, количеством типов взаимосвязей элементов производственного процесса. Отличительной особенностью цифрового двойника являлся охват нескольких звеньев технологических переделов в реальном режиме времени. Для всех технологических звеньев производства цемента сформировано формализованное описание элементов технологических циклов. Моделирование производственных процессов и сценарных условий цементного производства позволило достичь увеличения производственной мощности и повышения эффективности использования ресурсов, решить задачи оптимизации и сокращения удельных операционных затрат, а также повышения эффективности и устойчивости цементного производства.

Ключевые слова: цифровой двойник, информационная модель, цепочка создания стоимости, технологические циклы, технологические связи, технологические схемы, оптимизация ресурсов, колаборативные комплексы, интеллектуальные горные машины, оптимизация производственных процессов.

Одним из наиболее популярных на сегодняшний день направлений в развитии цифровых технологий является внедрение цифровых двойников, которые являются технологией-интегратором всех сквозных цифровых технологий [1,2]. Они обеспечивают максимальную отдачу от внедрения прорывных технологий и используются для решения широкого спектра задач оптимизации производственных процессов, эффективного управления ресурсами, обучения персонала [3,4]. В такой постановке на основе анализа данных, моделирования и прогнозирования, а также симуляции потенциальных сценариев развития можно не только снижать

производственные и управленческие риски, но и существенно повышать эффективность работы предприятия [5].

Для создания цифрового двойника цементного производства были рассмотрены различные варианты технологических схем, отличающиеся числом элементов, степенью их агрегированности, количеством типов соотношений, входящих в формализованное описание производственного процесса [6]. На сегодняшний день одним из наиболее готовых для внедрения в производство цифровых двойников является использование коллаборативных комплексов роботизированных и автономных интеллектуальных машин и устройств при открытой добыче полезных ископаемых (карьеры известняка). Эффективность и степень экологической безопасности горных работ на карьерах во многом определяются качеством работы горнотранспортного оборудования: экскаваторов различного назначения, большегрузных самосвалов (автономные автосамосвалы) и других специализированных транспортных средств [7]. Кроме того, на сегодняшний день, уже разработано и внедрено несколько автономных систем транспортировки горной массы на карьерах. Их популярность объясняется способностью увеличить производительность труда, снизить количество несчастных случаев и эксплуатационных расходов за счет сокращения простоев, увеличения срока службы машин, снижения расхода топлива. При этом, цифровой двойник включает в себя данные об основном оборудовании и производственных процессах, используется для оптимизации производства, сокращения времени простоя и повышения безопасности. Его базой является использование интеллектуальных горных машин и оборудования. Цифровой двойник позволяет моделировать различные сценарии и мониторить влияние изменений основных технико-экономических показателей, а также осуществлять их корректировку и нормировку до их внедрения на реальном производственном объекте.

Таким образом, в структуру создания цифровых двойников помимо автономных грузовиков и буровых установок необходимо включать также транспорт для внутренней логистики и все компоненты производственной цепочки, делая весь технологический процесс от карьера до отгрузки готовой продукции максимально автономным, интегрированным и интеллектуальным – способным самостоятельно принимать оперативные и отдельные стратегические решения. Отличительной особенностью этого большого интегрированного цифрового двойника должно быть то, что он охватывает не отдельное звено производственной цепочки, или несколько таких звеньев, а все технологические переделы и логистику в реальном времени, начиная от проектирования объемов горных работ в карьере и подготовки к вскрытию запасов известняка, добычи, транспортировки, переработки, закупки оборудования и заканчивая транспортировкой и логистикой готовой продукции потенциальными потребителями (цементным заводам).

При формализованном описании производственного элемента «карьерное хозяйство» добывается основное сырье – известняк, мергель, глинистые сланцы, мел, глина и др., которое поступает в элементы «производство известковой муки» и «производство клинкера» [8]. На цементном заводе может быть не один, а несколько карьеров. Завод обычно находится от них на расстоянии нескольких километров. Транспортировка полезного ископаемого осуществляется собственными транспортными средствами (автомобильный, железнодорожный транспорт, транспортеры, канатные дороги, трубопроводы). Работа карьера, как правило, осуществляется круглогодично. В элементе «измельчение и сушка добавок» добавки, определяющие вид цемента, измельчаются и доводятся до необходимого процента влажности [9]. Известковая мука, изготавливаемая в элементе «производство известковой муки» и используемая для известкования кислых почв, выпускается не на всех цементных заводах. В элементе

«производство клинкера» осуществляются две операции: приготовление сырьевой смеси и получение клинкера в специальных печах путем обжига смеси. Сырьевая смесь готовится либо мокрым, либо сухим способом; печи могут быть либо механизированными шахтными, неподвижными, либо вращающимися. При мокром приготовлении смеси твердые сырьевые материалы (известняк, мергель, глинистые сланцы) после их дробления тонко измельчаются в воде, затем в болтушку добавляются мягкие сырьевые материалы (мел, глина и др.) и производится совместный помол в трубных (шаровых) мельницах [10]. Полученная однородная сметанообразная масса (шлам) обжигается во вращающихся (наклонных) печах. Шлам равномерно поступает в верхний конец печи и движется вниз навстречу сжигаемому топливу. При сухом способе производства дробленые сырьевые материалы высушиваются и тонко размельчаются. Полученная тонкая сырьевая мука после корректирования ее до заданного химического состава обжигается в шахтных или вращающихся печах. Продукт обжига – клинкер. Цемент получается при совместном помоле клинкера, гипса и добавок в специальных цементных мельницах. Вид (сорт) цемента определяется добавками. Цемент одного и того же вида подразделяется на марки в зависимости от предела прочности на сжатие, которую имеет раствор цемента через 28 суток после затвердения. Различают следующие марки: 200, 300, 500 и 600. Обычно число марок цемента, выпускаемых предприятием, превышает число мельниц, поэтому раз в несколько дней цементные мельницы переключаются с выпуска одной марки цемента на другую. Мельницы работают как аппараты непрерывного действия, т.е. в них непрерывно поступают сырьевые компоненты; готовый цемент транспортируется в силосы. Мельницы различаются производительностью и типом мелющих тел, которые определяют тонкость помола. Цементные силосы – это совокупность емкостей для хранения готового цемента. Цемент каждой марки хранится в отдельном

силосе, причем под некоторые марки может быть отведено несколько силосов. Перераспределение силосов происходит очень редко (один раз в год). Из силосов большая часть цемента самотеком перегружается в железнодорожные вагоны и автоцементовозы. Оставшийся цемент пакетируется в многослойные бумажные 50-килограммовые мешки.

В качестве основной выходной продукции цементного производства возможно выделить следующие позиции: известковая и доломитовая мука для известкования кислых почв; шлакопортландцемент, в том числе быстротвердевающий; пуццолановый цемент; сульфатостойкий цемент; тампонажный цемент; декоративный цемент; кислотоупорный цемент; глиноземистый цемент; расширяющий цемент; кладочный цемент, в том числе портландцемент марки 600, портландцемент марки 500; портландцемент с добавками до 5%; быстротвердеющий цемент; сульфатостойкий портландцемент; дорожный портландцемент; портландцемент с умеренной экзотермией; портландцемент для производства асбесто-цементных изделий; гидрофобный цемент [11].

Состав и внутренние технологические связи предприятия цементной промышленности можно представить в виде комбинации нескольких элементов, приведенных на технологической схеме (рис.1).

Для формализованного описания цифрового двойника элемента «карьерное хозяйство» принят следующий подход. Выходные продукты включают наименования $i \in I_1$: известняк, глина, мел, мергель и т.д. Основное оборудование элемента – экскаватор и транспортные средства. Ограничения по мощности имеют следующий вид: $\sum_{i \in I_1} d_{ji} v_i \leq V_j, j \in J_1$.

Сырьевые и трудовые затраты связаны с величинами используемых мощностей:

$$v_{i'}^\sigma = \sum_{j \in J_1} a_{i'j} \sum_{i \in I_1} d_{ji} v_i, \quad i \in I_1^\sigma; \quad L_r^\sigma = \sum_{j \in J_1} l_{rj} \sum_{i \in I_1} d_{ji} v_i, \quad r \in R_1.$$

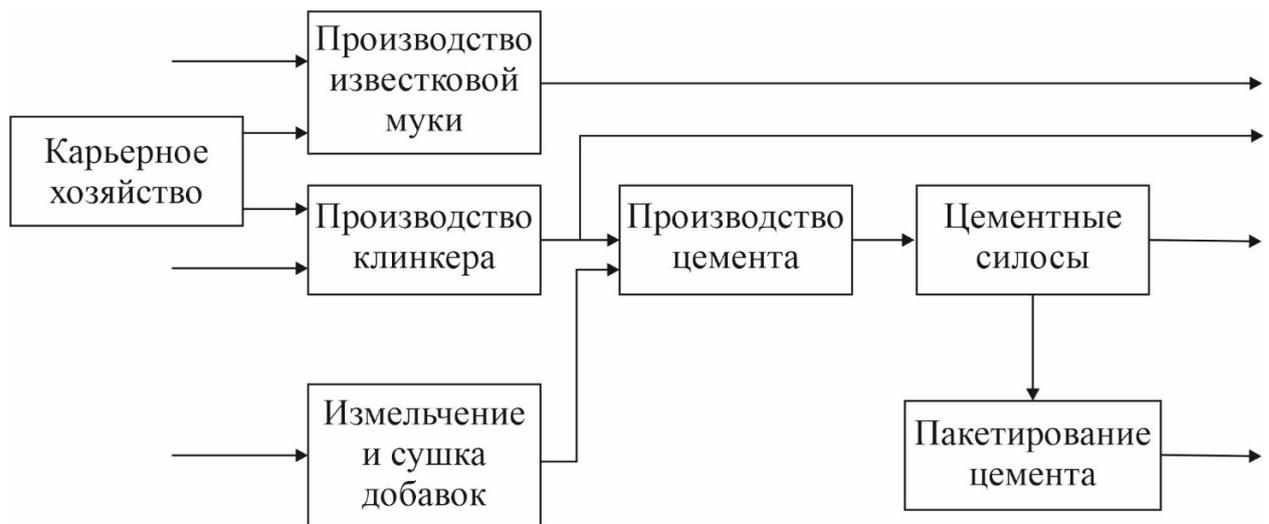


Рисунок 1. – Структурная схема цементного производства

Элемент «измельчение и сушка добавок» возможно представить в виде следующей постановки. Множество I_2 наименований выходных продуктов образуют виды производимых сухих добавок. Оборудование элемента – это дробилки и сушильный барабан непрерывного действия, загружаемый добавками и выпускающий доведенные до заданного процента влажности сухие добавки. Ограничения по мощностям сушки добавок: $\sum_{i \in I_2} d_{ji} v_i \leq V_j, j \in J_2$.

К сырьевым продуктам относятся невысушенные добавки и электроэнергия. Они исчисляются по величине загруженной мощности, таким же образом вычисляются и трудовые затраты:

$$v_{i'}^{\sigma} = \sum_{j \in J_1} a_{i'} \sum_{i \in I_2} d_{ji} v_i, \quad i \in I_2^{\sigma}; \quad L_r^{\sigma} = \sum_{j \in J_2} l_{rj} \sum_{i \in I_2} d_{ji} v_i, \quad r \in R_2.$$

Формальная постановка элемента «производство известковой муки» выглядит следующим образом. Выходной продукт – известковая мука $i \in I_3$ (множество I_3 содержит только одно наименование – известковая мука). Оборудование состоит из дробилок. Ограничение по мощности записывается в виде следующего соотношения: $v_i \leq V_j, i \in I_3, j \in J_3$, в которую

вырождается эта общая форма для одноэлементных множеств I_3, J_3 . К сырьевым продуктам относятся известняк и другие продукты: их затраты, так же, как и затраты труда, описываются стандартным образом:

$$v_{i'}^\sigma = \sum_{i \in I_3} a_{i'i} v_i, \quad i' \in I_3^\sigma; \quad L_r^\sigma = \sum_{i \in I_3} l_{ri} v_i, \quad r \in R_3.$$

Формализованное описание элемента «производство клинкера» представлено в следующем виде. Множество наименований выходных продуктов I_4 содержит один элемент – клинкер. Оборудование включает в себя трубные (шаровые) мельницы, предназначенные для помола компонентов смеси, обжиговую печь, холодильник и др. Ограничения по мощностям определяются обычно производительностью печи как самого главного вида оборудования, в общем же случае $v_i \leq V_j, \quad i \in I_4, j \in J_4$.

Сырьевые затраты состоят из компонентов смеси: известняк, мергель, глинистые сланцы, а также электроэнергии и топлива. Сырьевые и трудовые затраты записываются следующим образом:

$$v_{i'}^\sigma = \sum_{i \in I_4} a_{i'i} v_i, \quad i' \in I_4^\sigma; \quad L_r^\sigma = \sum_{i \in I_4} l_{ri} v_i, \quad r \in R_4.$$

Формализованное описание основного элемента «производство цемента» возможно представить через показатели выходных продуктов элемента – цемент различных видов. Оборудование включает в себя мельницы для помола. Обозначим через V_i максимальный выпуск цемента i -го вида, когда мельницы производят только этот вид. Ограничение по мощности тогда запишется так: $\sum_{i \in I_5} \frac{v_i}{V_i} \leq 1 - \xi_5$, где ξ_5 – отношение среднего времени, затраченного на переключение мельниц с производства одного вида цемента на другой, к общему временному ресурсу мельниц. Сырьевые затраты пропорциональны выпускам цемента:

$$v_{i'}^\sigma = \sum_{i \in I_5} a_{i'i} v_i, \quad i' \in I_5^\sigma; \quad L_r^\sigma = \sum_{i \in I_5} l_{ri} v_i, \quad r \in R_5.$$

К сырьевым продуктам относится клинкер, добавки, электроэнергия, мелющие тела. Отметим, что ряд цементных заводов не производит собственный клинкер, а использует выпущенный другими заводами избыточный клинкер.

Формализованное описание элемента «цементные силосы» возможно представить в виде множества наименований выходных продуктов, состоящих из всех видов цемента. Данный элемент представляет собой совокупность емкостей – силосов – для хранения цемента. В квазистационарном режиме выпуски цемента стеснены предельными объемами емкостей, отнесенными к характерной продолжительности хранения τ^x : $v_i \leq \frac{V_{j(i)}^x}{\tau^x}$, $i \in I_6, j(i) \in J_6$.

Здесь учтено, что каждый вид цемента i должен храниться отдельно. В качестве сырья на входе необходим только цемент, предназначенный для хранения (быть может, в несколько большем количестве, чем получится на выходе); трудовые затраты пропорциональны выходным потокам:

$$v_{i'(i)}^\sigma = a_{i'(i)i} v_i, \quad i \in I_6, \quad i'(i) \in I_6^\sigma; \quad L_r^\sigma = \sum_{i \in I_6} l_{ri} v_i, \quad r \in R_6.$$

После выхода из силосной башни часть потока цемента v_i поступает самотеком в железнодорожные вагоны и автоцементовозы, а оставшаяся – пакетируется. Элемент «пакетирование цемента» возможно описать в виде объемов выпуска пакетированного цемента, ограниченных производственной мощностью пакетирующего оборудования: $\sum_{i \in I_7} d_{ji} v_i \leq V_j$, $j \in J_7$. Затраты сырья, к которому принадлежат многослойные бумажные пакеты, готовый цемент разных марок и т.д., а также трудовые затраты на пакетирование выражаются следующим образом:

$$v_{i'}^\sigma = \sum_{i \in I_7} a_{i'i} v_i, \quad i' \in I_7^\sigma; \quad L_r^\sigma = \sum_{i \in I_7} l_{ri} v_i, \quad r \in R_7.$$

Для формализованного описания базовых элементов цифрового двойника цементного производства были использованы следующие обозначения. E –

множество наименований e производственных элементов: $e=1$ – карьерное хозяйство; $e=2$ – измельчение и сушка добавок; $e=3$ – производство известковой муки; $e=4$ – производство клинкера; $e=5$ – производство цемента; $e=6$ – цементные силосы; $e=7$ – пакетирование цемента.

Множество наименований сырьевых продуктов: I_e – множество наименований входных сырьевых продуктов элемента e ; J_e – множество наименований мощности элемента e ; I_e^σ – множество наименований входных сырьевых продуктов элемента e .

Множество основных технико-экономических показателей производственного процесса: R_e – множество наименований рабочих специальностей элемента e ; v_i – выпуск выходного продукта i ; V_j – размер мощности j ; $d_{ji}v_i$ – коэффициент приведения выпуска продукта i к мощности вида j ; $V_{j(i)}^x$ – объем емкости для цемента вида i ; τ^x – время хранения цемента в силосе; ξ_5 – отношение среднего времени, затраченного на переключение мельниц, к общему ресурсу времени мельниц; v_i^r – поток входного сырьевого продукта i ; $a_{ii'}$ – объем затрат продукта вида i на производство единицы продукта вида i' ; L_r^r – потребное количество специалистов вида r ; L_{rj} – количество специалистов вида r , необходимое для обслуживания единицы используемой мощности; l_{ri} – количество специалистов вида r , обеспечивающих единичный выпуск продукта i .

Множество показателей, характеризующих выпуски продукции: Среди которых необходимо выделить – множества наименований выпусков: I_1 – [известняк, мел, мергель, глина]; I_2 – [гипс, кирпичный бой, активные минеральные добавки (диатомит, трепел, шлаки)]; I_3 – [известковая мука]; I_4 – [клинкер]; I_5 – [список выходной продукции без известковой муки, с пометкой «до хранения»]; I_6 – [список выходной продукции без известковой муки, с

пометкой «после хранения»]; I_7 - [список выходной продукции без известковой муки, с пометкой «пакетированные»].

Ограничения по производственным мощностям цементного производства могут быть представлены в следующем виде:

$$e = 1, 2, 7: \sum_{i \in I_1} d_{ji} v_i \leq V_j, \quad j \in J_e; \quad e = 3, 4: v_i \leq V_j, \quad i \in I_e, j \in J_e;$$

$$e = 5: \sum_{i \in I_5} \frac{v_i}{V_i} \leq 1 - \xi_5; \quad e = 6: v_i \leq \frac{V_{j(i)}^x}{\tau^x}, \quad i \in I_e, j(i) \in J_e.$$

Здесь – множество наименований мощностей: J_1 - [экскаваторы, бурильные станки, скреперы, бульдозеры, транспортные средства]; J_2 - [дробилки, сушильные барабаны]; J_3 - [оборудование цеха по производству известковой муки]; J_4 - [дробилки, мельницы, шламбассейны, вращающиеся печи, холодильник]; J_5 - [мельницы]; J_6 - [цементные силосы]; J_7 - [упаковочные машины].

При этом сырьевые затраты могут быть представлены следующими соотношениями:

$$e = 1, 2: v_{i'}^\sigma = \sum_{j \in J_e} a_{i'j} \sum_{i \in I_e} d_{ji} v_i, \quad i' \in I_e^\sigma;$$

$$e = 3, 4, 5, 7: v_{i'}^\sigma = \sum_{i \in I_e} a_{i'i} v_i, \quad i' \in I_e^\sigma;$$

$$e = 6: v_{i'(i)}^\sigma = a_{i'(i)i} v_i, \quad i \in I_e, i'(i) \in I_e^\sigma.$$

Здесь $I_1^\sigma, \dots, I_7^\sigma$ – множества наименования сырья: I_1^σ – [горючесмазочные материалы]; I_2^σ – [I_2 , электроэнергия]; I_3^σ – [известняк, электроэнергия]; I_4^σ – [мазут, уголь, газ, II]; I_5^σ – [I_2 , клинкер, электроэнергия, мелющие тела]; I_6^σ – [I_5]; I_6^σ – [бумажные мешки, электроэнергия, I_5].

Трудовые ресурсы, используемые в цементном производстве, могут быть представлены следующими соотношениями:

$$e = 1, 2: L_r^\sigma = \sum_{j \in J_e} l_{rj} \sum_{i \in I_e} d_{ji} v_i, \quad r \in R_e;$$

$$e = 3, \dots, 7: L_r^\sigma = \sum_{i \in I_e} l_{ri} v_i, \quad r \in R_e.$$

Здесь R_1, \dots, R_7 – множества наименований рабочих специальностей: R_1 – [машинисты экскаваторов, бульдозеристы, бурильщики]; R_2 – [машинисты дробилок, дежурные слесари]; R_3 – [персонал цеха по производству известковой муки]; R_4 – [машинисты вращающихся печей, дежурные электромонтеры]; R_5 – [машинисты мельниц, слесари, электромонтеры]; R_6 – [операторы, слесари]; R_7 – [операторы, слесари].

Таким образом, для большей части цементных предприятий и компаний, находящихся на стадии перехода от автоматизации к цифровизации необходимы формальные модели, методы и алгоритмы описания технологических циклов. Так как перед ними стоят задачи оптимизации показателей производственной цепочки от добычи известняка в карьере до поставки готовой продукции потребителю. Большая часть данных задач на сегодняшний день представляет собой отдельные технологические и организационные решения на базе информационных технологий и локальные цифровых двойников. При этом, компании, работающие в цементных отраслях пока не готовы вкладываться в интеграционные решения на основе цифровых двойников. В этой связи для формирования цифровых инструментов управления производственным процессом и повышения производительности необходимо определить следующие приоритетные направления алгоритмизации, моделирования и развития цифровых технологий в цементной отрасли: 3D-моделирование геологической среды при разведке месторождений; моделирование процессов автоматизация и роботизация проведения горных работ на основе создания нового класса горных машин и оборудования; развитие промышленного интернета вещей при добыче и переработке полезного ископаемого и внедрение цифровых двойников; моделирование процессов и сценарных условий увеличения

производственной мощности цементных заводов и повышения эффективности использования ресурсов; оптимизация и сокращение удельных операционных затрат, повышения эффективности и экологической устойчивости цементного производства.

Литература

1. 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/archive/n2y2025/9814.
2. Жуковская И.В., Кузьмин М.С. Технология формирования цифрового двойника как драйвер развития цифровой экономики // Микроэкономика. 2025. №6. с 71-75.
3. Илюхина С.С., Гончаренко С.Н. Особенности и перспективы применения цифровых двойников в транспортно-логистических системах промышленных предприятий // Инженерный вестник Дона. 2025. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2025/10219.
4. Yun CH., Jian LV., Cheng YA., Haisong H., Henghao Q., Fangfang L. Knowledge-based digital twin systems: developing actionable knowledge-enhanced digital twin // Unmanned systems. Online first. 2025. DOI: 10.1142/s2301385026500305.
5. Ladj A., Wang ZH., Meski O., Belkadi F., Ritou M., Da Cunha C. A Knowledge-based digital shadow for machining industry in a digital twin perspective // Journal of manufacturing systems. 2021. Vol. 58. p. 168-179. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.07.018.
6. Мадатов Д.А., Борисов В.В., Сивков В.С. Будущее технологии цифровых двойников // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2025. Т. 10. № 1(51) С. 10-15.

7. Гельдиева Г. Современные технологии производства цемента // Академическая публицистика. 2023. №11-2. с. 40-43.
8. Фадин Ю.М., Сычев Е.А., Бочарникова А.С., Луценко Р.В., Севостьянов И.В. Направления совершенствования технологии производства цементного клинкера // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. 2022. С.405-409.
9. Несмеянов Н.П., Бражник Ю.В., Королева Л.А., Белоус А.С., Денисова Е.М. Методы интенсификации процесса измельчения цементного клинкера и добавок // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. 2021. С.122-126.
10. Белов В.В., Курятников Ю.Ю., Новиченкова Т.Б. Технология и свойства современных цементов и бетонов. М.: АСВ. 2014. 281с.
11. Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Технология морозостойкого бетона. М.: АО «НИЦ «Строительство». 2023. С.78-118.

References

1. Cherepenin V.A., Gazyrin I.E., Lesnikov D.A., Vorob'ev S.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2025/9814.
 2. Zhukovskaya I.V., Kuz'min M.S. Mikroehkonomika. 2025. №6. p. 71-75.
 3. Plyukhina S.S., Goncharenko S.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. №7. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2025/10219.
 4. Yun CH., Jian LV., Cheng YA., Haisong H., Henghao Q., Fangfang L. Unmanned systems. Online first. 2025. DOI: 10.1142/s2301385026500305.
 5. Ladj A., Wang ZH., Meski O., Belkadi F., Ritou M., Da Cunha C. A Journal of manufacturing systems. 2021. Vol. 58. p. 168-179. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.07.018.
-



6. Madatov D.A., Borisov V.V., Sivkov V.S. Mezhdunarodnyj zhurnal informacionnyh tekhnologij i energoeffektivnosti. 2025. V. 10. № 1(51). pp. 10-15.
7. Gel'dieva G. Akademicheskaya publicistika. 2023. №11-2. pp. 40-43.
8. Fadin YU.M., Sychev E.A., Bocharnikova A.S., Lucenko R.V., Sevost'yanov I.V. Ehnergoberegayushchie tekhnologicheskie komplekсы i oborudovanie dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov. 2022. pp.405-409.
9. Nesmeyanov N.P., Brazhnik YU.V., Koroleva L.A., Belous A.S., Denisova E.M. Ehnergoberegayushchie tekhnologicheskie komplekсы i oborudovanie dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov. 2021. pp.122-126.
10. Belov V.V., Kuryatnikov YU.YU., Novichenkova T.B. Tekhnologiya i svoystva sovremennykh cementov i betonov [Technology and properties of modern cements and concretes]. M.: ASV, 2014. 281p.
11. Rozental' N.K., Chekhnij G.V. Tekhnologiya morozostojkogo betona [Frost-resistant concrete technology]. M.: АО «НИС «Строительство», 2023. pp.78-118.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 26.12.2025

Дата публикации: 22.02.2026