



УДК 656.024:691.54

Н. В. РОЗАНЦЕВА, канд. техн. наук, доц. кафедры организации строительства; **А. Д. ДРОЗДОВ**, доц., канд. техн. наук, доц. кафедры организации строительства

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ И СКЛАДИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В СИЛОСЫ

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Тел.: (812) 317-80-41; эл. почта: prozanceva@lan.spbgasu.ru

Ключевые слова: строительство, логистика, методы разгрузки, пневматические и шнековые системы подачи, силосы.

В работе исследованы методы транспортировки цемента из вагонов-хопперов в силосы, включая традиционные, пневматические, конвейерные и шнековые системы. Проанализированы их преимущества и недостатки.

Предложены рекомендации по оптимизации процессов, сочетающие пневматические и механические методы с автоматизированными технологиями. Рассчитаны параметры для непрерывной работы комплекса. Внедрение этих решений повысит производительность, улучшит экономические показатели предприятий и снизит негативное воздействие на окружающую среду.

Введение

Развитие страны зависит от роста регионов, который невозможен без динамичного развития строительной сферы. Качественное и своевременное снабжение стройматериалами (*песок, щебень, цемент*) определяет сроки и качество работ. Эффективное управление цепями поставок включает выбор транспорта, оптимизацию маршрутов и контроль запасов. Организация хранения и распределения больших объемов сыпучих материалов критически важна для успешной реализации проектов, железнодорожный транспорт способен обеспечить бесперебойную доставку [1], а грамотная организация эффективных систем хранения и распределения цемента снижают риски и способствуют укреплению экономики. Однако при неправильной организации это может ухудшить экологическую обстановку. Учет экологических требований и современные решения позволяют сократить потери и загрязнение окружающей среды. Таким образом, оптимальная система хранения и распределения цемента обеспечивает стабильное развитие строительной отрасли и улучшает экологическую ситуацию в стране. *Исследование посвящено разработке рекомендаций по проектированию высокопроизводительной системы разгрузки и хранения сухих смесей, повышающей надежность, экологичность и экономичность, а также минимизирующей потери и улучшающей качество продукции, проанализированы существующие методы транспортировки и хранения смесей и предложен наиболее эффективный вариант оптимизации.*



Предмет исследования – основные проблемы при перевалке сухих смесей из железнодорожного транспорта в силосные емкости и хранения, напрямую влияющие на качество и организацию материально-технического обеспечения стройплощадок. **Объект исследования** – технологические схемы и устройства, хранения и распределения.

Материалы и методы

Прием и перекачка цементных смесей – ключевой этап от разгрузки до хранения в силосах, влияющий на качество продукции и экономичность. Наиболее эффективна доставка железнодорожным транспортом. Успешное складирование требует удобных подъездных путей и зон разгрузки, правильного размещения резервуаров, защиты от влаги и пыли, регулярного обслуживания оборудования.

Для повышения производительности технологическая система должна рассматриваться как единый комплекс взаимосвязанных элементов.

Анализ исходных условий хранения и распределения цемента состоит из следующих ключевых компонентов:

1) система транспортировки:

– вагоны-хопперы объемом 55–72 м³, грузоподъемностью 67–79,5 т, средней длиной 11,92 м; *детальное проектирование на основе сбора и анализа параметров входящего потока (объемы, интенсивность поставок [2]);*

– узлы разгрузки: *граничные условия площадки (грунтовые воды, планировка, энергоемкость);* целевой показатель: *время разгрузки ≤ 40 мин;* основные проблемы *приямка (гидроизоляция, вибрации, целостность);* включают приемные бункеры (приямки или подкатные лотки) объемом 36 м³, площадью 24 м² и глубиной приямка 5,8 м. Бункеры оснащены вибраторами и затворами (ручного или пневматического типа). Разгрузка осуществляется механически (*с помощью устройств*), пневматически (*сжатым воздухом*) или комбинированно (*винтовыми компрессорами*) [3];

– *транспортные системы (аэрожелоба, вакуумные и пневматические насосы);* распределительная система (механические (шнековые конвейеры, нории) и пневматические конвейеры, а также их комбинации); дозаторы для выдачи цемента. Автоматика управляет задвижками с пневмоприводом.

2) *система хранения:* силосы емкостью 520–700 т, высотой в среднем 25–27,5 м, при отношении высоты к диаметру $\leq 5D$;

3) *вспомогательные системы:* компрессорное оборудование для подачи сжатого воздуха, аспирация и фильтрация для удаления пыли, автоматизированная система управления (АСУ ТП) [4] с контролем давления воздуха, сигналов наполнения и вибраторами при неполадках.

Загрузка цементовозов выполняется из крайних силосов с помощью шнекового транспортера и телескопического загрузчика.

Проблемы переработки и хранения сухих строительных смесей распространены на предприятиях отрасли и связаны с рядом промышленных рисков [5]. Их успешное преодоление требует комплексного подхода. На основании обобщения опыта, ранее полученного при проектировании и строительстве в Казахстане, Чечне, на Яковлевском руднике и в Ленинградской области, была составлена методика проведения исследований: *системный анализ; проведение сравнительного моделирования систем хранения;* акцент на *компромиссном выборе*, рассмотрение системы как целостного комплекса, где «слабое звено» может нивелировать



преимущества самого производительного основного оборудования; *составление последовательности этапов.*

Выявлены основные проблемы: негативное воздействие грунтовых вод, осадков, агрессивных веществ, промерзание и выпучивание; ограниченное пространство и сложность обслуживания; повышенные требования к надежности; образование пыли при перевалке; коррозия и износ металлических конструкций под действием влаги, пыли и гидравлических ударов. Для эффективного хранения и быстрой выдачи цемента большими объемами с минимальной нагрузкой на персонал и сроком обслуживания предполагается следующий режим работы: количество рабочих дней по приему материала – 264–240 дней в году; рабочих дней по выдаче – 132–100 дней в году; продолжительность одной смены – 8 часов. На основании ранее перечисленных основных проблем, включая перегрузку фундаментов, приводящую не только к нагрузке на боковые стенки, но и износу покрытий с образованием трещин, и предлагаемых решений для фундаментов и стен бетонных прямков под приемку цемента с железнодорожных составов составлена табл. 1.

Таблица 1

Основные проблемы и предлагаемые решения

Область проблемы	Возможные проблемы	Предлагаемые решения
Структурная целостность	Динамические нагрузки, вызывающие трещины; местное смятие бетона под балками	Тщательный анализ динамических нагрузок; опорные плиты под балки; бетон высокой марки с армированием
Гидроизоляция, дренаж, утепление	Проникновение грунтовых вод; гидростатическое давление; повреждение гидроизоляции, выпор прямка, и промерзание стенок	Комплексные системы внешнего и внутреннего дренажа; качественная гидроизоляция с проникающими составами, применение модифицирующих добавок, «Пеноплекс ГЕО» [6]
Вибрация и устойчивость	Передача вибрации; разжижение грунта; долговременная осадка	Виброизоляция балок; детальное геотехническое исследование; использование свайных фундаментов

Обеспечить надежное функционирование прямков для приема цемента из железнодорожных составов можно путем внедрения следующих решений¹:

- структурная целостность обеспечивается применением прочного бетона и точной проектной проработкой узлов крепления;
- водонепроницаемость достигается устройством внешнего дренажа, внутреннего водосбора и специальной обработкой поверхностей;
- управление вибрациями осуществляется установкой виброизолирующих прокладок и проведением геотехнического анализа.

¹ Емкости для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах/ И. В. Горюшинский, И. И. Кононов, В. В. Денисов, Е. В. Горюшинская, Н. В. Петрушкин. Под общей редакцией И. В. Горюшинского: Учебное пособие. – Самара: СамГАПС, 2003. – 232с.



Осуществлен выбор и расчет пролетных балок для рельсового пути над приямком для установки передвижного состава. Система балок принимается в зависимости от габаритов приямков, количества одновременно поставленных под разгрузку вагонов-хопперов, технологического оборудования: расчет производился исходя из нагрузок – 100 кН/м, с учетом установки двух 4-осных крытых вагонов-хопперов для цемента, модель 11–715; грузоподъемность – 67 т; масса тары вагона – 18,5 т; объем кузова – 55 м³, длина пролета 23,45 м; материала балки и ее механических характеристик, в качестве образцов были отобраны балки: 60Ш1² ГОСТ Р 57837–2017, 60Ш4³ и 50Ш4⁴.

Расчетные напряжения в выбранных балках составили для балки 60Ш1–194МПа, 60Ш4–119МПа, 50Ш4–179МПа. Распределенная нагрузка на каждую пару из 4-х осей вагона-хоппера модели 11–715–171 т. Расчет показал, что все балки выдерживают эксплуатационную нагрузку, но с учетом возможных вариантов вагонов-хопперов и необходимого запаса прочности 30–35 % оптимальным выбором является балка 60Ш4. Рекомендуется постоянный мониторинг состояния конструкции.

Выбор базовой технологической схемы:

- *ключевые критерии*: объем перевозок, расстояние, условия производства;
- *решающие правила*: при объеме > 500 т/сут и расстоянии > 70 м – комбинированная схема; для скорости разгрузки ≤ 40 мин/вагон обязательны: источник воздуха (15 м³/мин), аэрация конусов, 2 приемных насоса;
- оборудование*: пневмовинтовые и пневмокамерные насосы (табл. 2), винтовые конвейеры, ленточные или цепные нории – по требуемой производительности;
- *методы разгрузки*: традиционный (приямок с бункерами), механический (шнеки), комбинированный, редко гидравлический;
- *транспортировка*: механические системы – для малых расстояний, пневматические – для дальних.

Современный тренд – гибридные решения и интеллектуальные системы управления, позволяющие оптимизировать процессы и предсказывать износ оборудования с точностью до 85 %.

² <https://23met.ru/spravka/balka/60%D0%A81?g=%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2%20%D0%A0%2057837-2017>

³ <https://23met.ru/spravka/balka/60%D0%A84?g=%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2%20%D0%A0%2057837-2017>

⁴ Размеры – Балка 50Ш4



Таблица 2

Способы транспортировки цемента из приемных бункеров в силосы [7]

Характеристика	Пневматическая транспортировка	Механическая транспортировка	Комбинированные
Средства транспортировки	Потоки сжатого воздуха	Шнековые; ленточные, винтовая подача или разгрузка с подкатных шнековых конвейеров	Выгрузка самотекотом в шнековый конвейер, подача в расходный бункер, транспортировка сжатым воздухом по пневмомагистрали
Основные преимущества	Простота установки, высокая надежность	Низкие строительные и эксплуатационные расходы	Снижение энергопотребления на 25–30 %
Производительность	От 0 до 300 т/ч	До 200 т/ч	Зависит от вида материала и работы шнека, до 250 т/ч
Максимальная дистанция	Горизонтальное и наклонное перемещение	До 40 м, экономия до 40 % по сравнению с пневматическими	До 75 м вертикально; свыше 100 м пневмотранспорт
Экологическая безопасность	Закрытая система, снижает пыль (рукавные фильтры с импульсной продувкой и аспирацией и рециркуляцией воздуха)	Возможна повышенная запыленность	Минимализация пылевых выбросов, экономия энергии, уменьшают уровень шумового загрязнения
Особенность технологии	Использование приемка, пневмонасос под разгружаемым вагоном. Закрытость системы, малоэнергоёмки	Прямая доставка, отсутствие износа	Частичное использование подрельсового приемка, разгруз из-под вагона шнековым транспортером, сложности с уровнем подземных вод
Пример оборудования	Камерные и винтовые пневмонасосы	Конвейеры, элеваторы	Вакуумные насосы, транспортировочные трубы, механические устройства

Продуктивность пневмотранспорта зависит от характеристик системы. Материал из бункера подается в насос, разрыхляется и аэрируется сжатым воздухом, транспортируется по трубопроводу в силос без расслоения. Ключевое значение имеет правильный выбор насоса. Сравним три основных способа: пневмокамерные и пневмовинтовые насосы. (см. табл. 3, рис. 1), используемых для этих целей [8], и шнековые конвейеры.



Таблица 3

Сравнение технических решений для разгрузки цемента

Параметр	Пневмовинтовые насосы [9]	Пневнокамерные насосы [10]	Шнек + Нория (гравитационно-поточный метод)
Принцип работы	Винтовая передача	Периодическое нагнетание воздуха	Механическое перемещение шнеком, подъем ковш. элеватором
Ключевое оборудование	Пневмовинтовой насос	Прием. бункер, шнековые питатели (Ø 273 мм, 70 м³/ч), пневнокамерные насосы ACCU (2 шт., 1,5 м³), система аспирации, управления ПЛК	Шнековый питатель (винтовой конвейер), ковшовый элеватор (нория)
Производительность	От низкой до средней. Широкая вилка (7–80 т/ч), (от модели)	Высокая (до 200 т/ч)	Средняя и высокая (30–150 т/ч)
Контроль точности дозы	Хороший контроль	Менее точный	Не предусмотрен
Энергопотребление	Очень высокое (электропривод шнека 10–37 кВт + воздух)	Высокое (0,8–1,2 кВт·ч/т), требует сжатого воздуха	Низкое (0,3–0,5 кВт·ч/т)
Преимущества	Относительная простота	Высокая степень автоматизации; эффективная подача на расстоянии; герметичность процесса, минимальное пыление	Простота, надежность; отсутствие цикличности в работе, наименьшие первоначальные затраты
Недостатки / Проблемы	Высокое энергопотребление; сильное пыление	Цикличность работы; требуется два насоса; более высокие эксплуатационные затраты, вибрация	Большие эксплуатационные затраты, нет регулировки, пыление, возможна сегенерация смеси
Применение / Опыт эксплуатации	Применялась в Казахстане. Отмечена проблема пыления, за счет выхлопа в обратную сторону	Применялась на Яковлевском руднике. Техническое решение от <i>ENS Group</i>	Применялась в Гудермесе (Чечня). Простое и проверенное механическое решение



Предпоследний этап – подача смеси из бункера по трубам насосами в загрузочный лоток нории, подъем к выгрузке: *выгрузка из нории*: материал поднимается в ковшах и поступает в разгрузочную воронку; *направление в силосы*: из воронки материал поступает: самотеком – если силосы под норией; конвейерами – для удаленных силосов; через шиберы – для распределения потока.

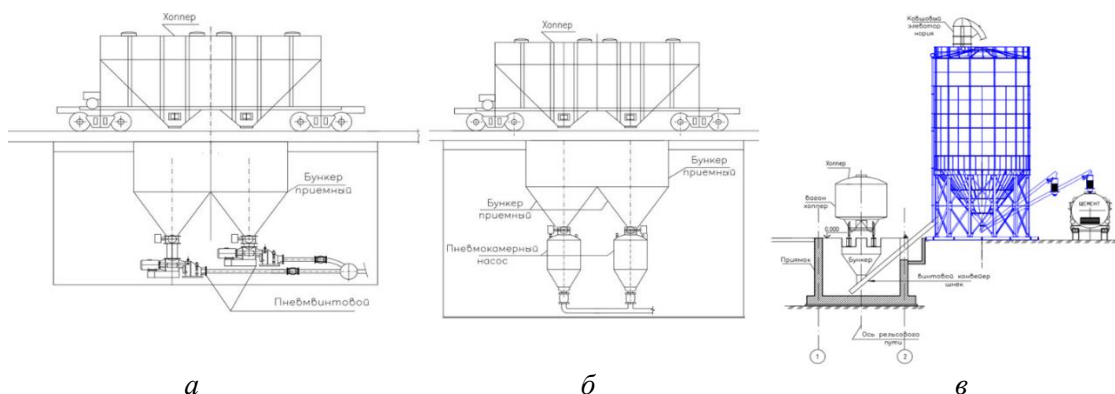


Рис. 1. Технические решения для разгрузки цемента: *а* – пневмовинтовой насос; *б* – пневмокамерный; *в* – шнек+нория

Система оснащается приводом (электродвигатель и редуктор). Ниже представлена сравнительная таблица основных видов норий (табл. 4).

Возможные проблемы и недостатки норий: механические повреждения: дробление материала, износ и повреждение ковшей; нарушение качества: неравномерная загрузка, сегрегация смеси, образование пыли; эксплуатационные трудности: высокий износ, значительные энергозатраты, сбои в подаче, перегрузки или недогрузки.

Заключительный этап – распределение по силосам. Силос – цилиндрическая емкость из прочных металлических сплавов с автоматической системой управления, фильтрацией, вентиляцией, виброустройствами против зависания и системами загрузки/разгрузки. Объем силоса определяется суточной потребностью в цементе⁵. *Конструктивные особенности*: методы сборки: рулонная, листовая, комбинированная⁶; для объемов свыше 200 тыс. м³ рулонная сборка не применяется; горизонтальные швы – двусторонние, толщина стенки – 8–40 мм (дифференцирована по высоте).

Риски: нарушение целостности при неправильном проектировании [12], разрушение материала из-за ударов, сегрегация, пылеобразование, поломки и износ оборудования.

⁵ Хранение компонентов CCC: силосы, влагозащита, FIFO

⁶ СП 359.1325800.2017 «Силосы стальные вертикальные цилиндрические для хранения сыпучих продуктов. Правила проектирования» / Минстрой России



Таблица 4

Виды норий

Вид нории	Характеристики	Преимущества	Недостатки
Ленточная нория [11]	Передача груза лентой с прикрепленными ковшами. Используются ковши открытого типа, для малых перегрузок	Ценовая доступность. Скорость ленты регулируется мотор-редуктором. Простота в установке, легкость обслуживания	Невысокая грузоподъемность. Вероятность разрыва ленты при нагрузках
Цепная нория	Груз передается цепью с жестко закрепленными ковшами. Используется закрытая цепь с кольцами	Большая грузоподъемность. Устойчивость к высоким нагрузкам. Удобна для крупнокузовых грузов	Трудоемкость в обслуживании цепи. Повышенный износ элементов цепи. Дороже ленточных аналогов
Модульная нория	Гибрид ленточной и цепной конструкции, легко модернизируется	Универсальна. Средняя цена. Легко адаптируется. Высокая надежность, легкая смена модулей	Необходима постоянная диагностика модуля. Ограничение высоты подъема. Цена выше средней
Шахтная нория	Применяется для высокоэффективного вертикального подъема крупных партий материала	Компактность. Защищена от внешней среды. Предназначена для сложных производств. Высокий ресурс работы	Сложность диагностики скрытых дефектов. Опасность застревания материала. Цена выше средних показателей

Результаты

Интеграция и оценка эффективности. Эффективность разгрузки хоппера за 40 минут достигается при расходе воздуха не менее 15 м³/мин, давлении 2–3 атм, ресивере 10 м³ и двух насосах (по числу конусов). На производительность также влияют параметры материалопровода и аспирационного фильтра. *Выбор системы перекачки* – баланс инвестиций, эксплуатации и экологии: *пневмовинтовой насос*: высокие энергозатраты и износ, оправдан при непрерывной подаче (например, *Monjus*): надежен, прост, низкие эксплуатационные расходы, но цикличен); *ленточный конвейер*: для больших объемов и дальних расстояний, пыление; *шнековый питатель*: компактен, закрытого типа исключает пыление, но ограничен по объему и энергозатратен; *ковшовый элеватор*: эффективен для подачи в силосы, но шумный и громоздкий; *виброаэраторы*: предотвращают зависание, но энергозатратны; *аспирационная система*: улучшает условия труда, увеличивает расходы на обслуживание.

Максимальная эффективность достигается комбинацией оборудования, компенсирующей недостатки отдельных узлов. Дополнительные требования:



защита фундаментов приямков от грунтовых вод; разгонный участок трубопровода (~ 5 м), минимальное число поворотов (радиус $\geq 1,5$ м); производительность компрессора и фильтра: не менее $24,75 \text{ м}^3/\text{мин}$ (с учетом коэффициента неравномерности 1,5); компрессоры с частотным регулированием, ресивер 3600 л, осушитель воздуха (точка росы $+3^\circ\text{C}$). Оптимизация процесса: герметичные системы, пылеулавливающие фильтры, орошение, автоматизация, контроль влажности и температуры, аспирация. **Функционально-стоимостной анализ:** поиск баланса между капитальными вложениями, эксплуатационными расходами и технологическими требованиями. Разработка алгоритма выбора комплектации на основе технологической схемы разгрузки (см. рис. 2).

Этап 1: Предпроектный анализ и определение граничных условий

Анализ входящих потоков: максимальная длина состава, пиковая/среднесуточная потребность (т/ч, т/сут), интенсивность поставок, режим работы склада. Анализ площадки и инфраструктуры: уровень грунтовых вод, проект гидроизоляции, расстояние до силосов (L , м), перепад высот (H , м), электрическая мощность, параметры воздушных магистралей; экологические и эксплуатационные нормы: ПДК пыли, уровень шума. Характеристики материала: тип смеси – сыпучесть, абразивность, склонность к аэрации и слеживанию. Экономические и ресурсные ограничения: бюджет, эксплуатационные расходы, наличие квалифицированного персонала. На основе Фазы 1 выбирается основной метод.

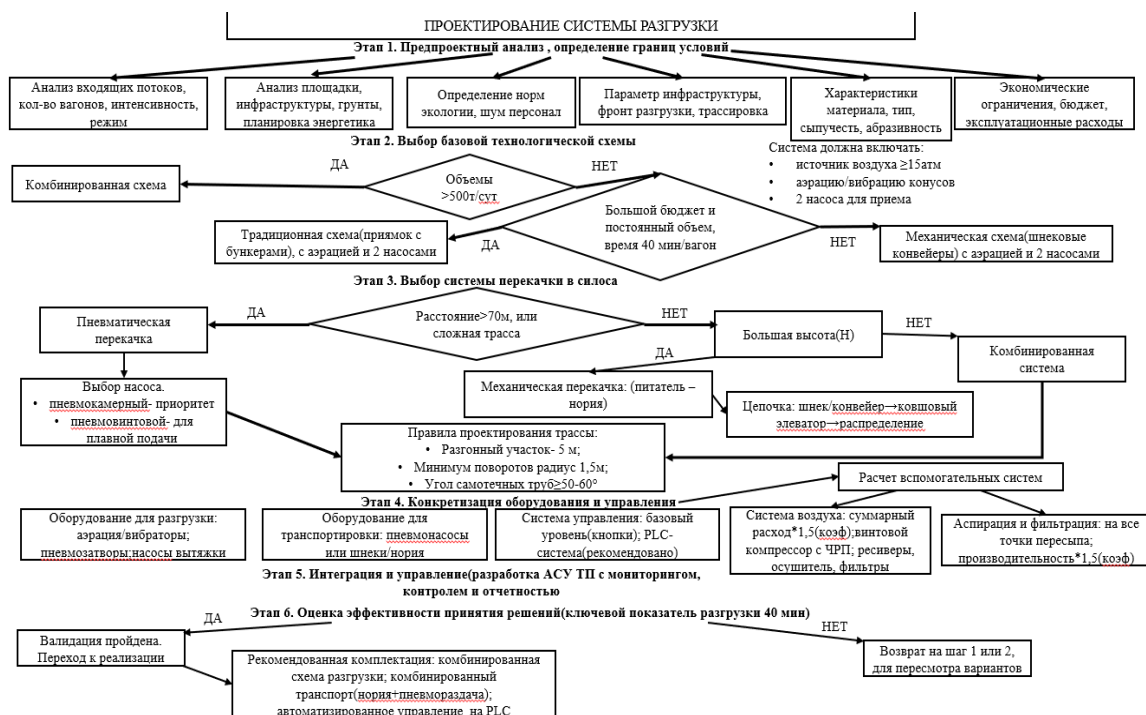


Рис. 2. Алгоритм проектирования систем разгрузки



Этап 2: Выбор базовой технологической схемы (см. табл. 5) [13]

Таблица 5

Выбор базовой технологической схемы разгрузки вагона-хоппера

Критерий	Традиционный (прямоук с бункерами)	Механический (шнековые конвейеры)	Комбинированный	Гидравлический (редко)
Объем перевозок	Средние и большие	Малые и средние	Средние и большие	Спец. задачи (очистка)
Скорость разгрузки	Средняя (зависит от выгрузки)	Высокая для прямого потока	Максимальная (совмещает плюсы)	Низкая
Расстояние до силоса	Любое (транспорт из бункера)	Короткое (ограничено длиной шнека)	Любое	Неприменимо
Кап. затраты	Высокие (прямоук)	Низкие/ средние	Высокие	Средние
Гибкость	Низкая (по месту)	Высокая (мобильность)	Средняя	Низкая
Рекоменда- ция	Для постоянных больших объемов с развитой стац. инфраструктурой	Для малых баз, сезонных работ, ограниченного бюджета	Для производственных терминалов. Часто: нижняя разгрузка на ленту + аэрация.	Для полной очистки или специфических материалов

Вывод по 2 этапу: приоритетными являются комбинированные или высокопроизводительные схемы с аэрацией (вибраторы, пневмоподушки).

Этап 3: Выбор системы перекачки от приемного узла к силосам (поиск компромисса): подбор оборудования как единой системы (бункер, шнек), в силос (табл. 6).

Таблица 6

Выбор системы транспортировки от места разгрузки к силосу [14]

Критерий / Способ	Пневматический (напорный/вакуумный)	Механический (нория+шнеки)	Комбинированный (чаще всего)
Расстояние (L)	Большое (> 100 м), сложная трасса	Короткое ($< 50-70$ м), прямая линия	Среднее, с переходами
Высота (H)	Любая	Любая (нория)	Любая
Пыльность	Низкая (замкнутый контур)	Высокая (требует аспирации)	Контролируемая
Энергозатраты	Высокие	Низкие	Средние
Гибкость	Высокая (гиб. рукава)	Низкая (жесткая трасса)	Средняя
Типовое решение	Пневмокамерный насос или винтовой компрессор + пневмовинтовой. Требование: $15 \text{ м}^3/\text{мин}$, $2-3 \text{ атм}$, ресивер 10 м^3	Приемный шнек – ковшовый элеватор (нория) – распределительный шнек по силосам	Нория поднимает материал, а далее пневмотранспорт распределяет по силосам

В качестве основного транспортирующего механизма принята нория, обеспечивающая подачу материала в силосы и их разгрузку. Для минимизации воздействия на прирельсовый прямок выполнено геотехническое моделирование. На основе данных о непрерывном производстве (1000 т), 10-суточном запасе (9000 т) и насыпной плотности ($1,1 \text{ т/м}^3$) определены параметры двух силосов: высота – 27,5 м, диаметр – 8 м. Построены изополя осадок (рис. 3) основания (суглинок) с учетом срока эксплуатации ≥ 20 лет.

Краткое техническое резюме:

Зона влияния: минимальное расстояние от силосов до прямка – 29,4 м (осадка $> 5 \text{ мм}$); **транспортировка:** $L > 70$ м или сложная трасса: пневматическая перекачка, приоритет: пневмокамерный насос (*Monjus*) – надежность, низкие расходы; альтернатива: пневмовинтовой – непрерывная подача (*высокие затраты*); $L < 70$ м, значительный подъем: механическая схема: Питатель → Нория → Распределение. Вертикаль: нория; горизонталь: шнек или ленточный конвейер в укрытии (*для цемента*). Распределение: самотек (*шиберы*) или короткие шнеки/пневмозатворы; **проектирование трассы:** разгонный участок: ~ 5 м; минимум поворотов, радиус $\geq 1,5$ м; угол наклона самотека: $50\text{--}60^\circ$.

Комплекс включает ж/д пути, БСУ, хранилище, временную инфраструктуру. Угол подачи $45\text{--}60^\circ$. Автоматизация управления (рис. 4).

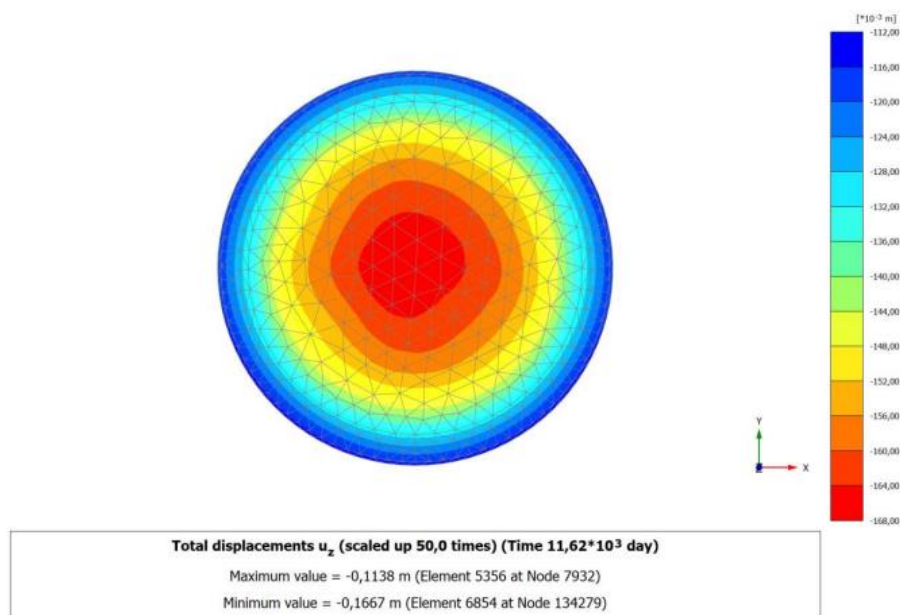


Рис. 3. Изополя итоговых осадок силоса за время эксплуатации (20 лет), выполнено в PLAXIS 3D

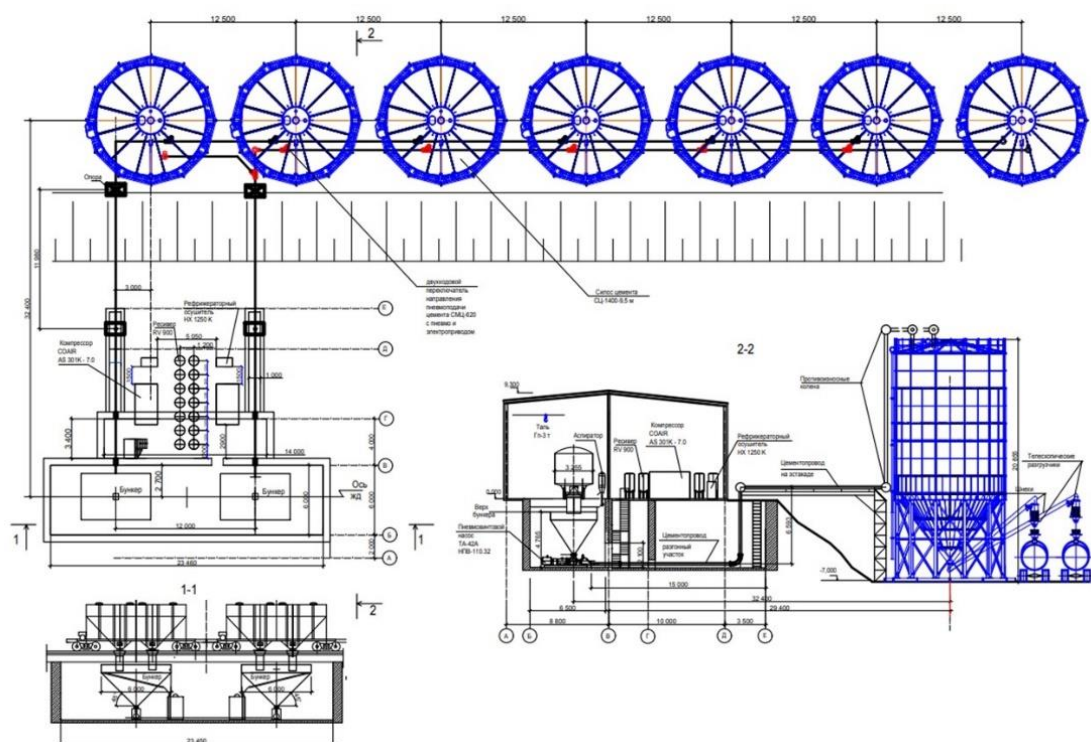


Рис. 4. Предлагаемая технологическая схема прирельсового склада

Вывод по этапу 3: для дальней транспортировки (> 70 м) – пневматика; для вертикального подъема и коротких расстояний – нория + шнеки; для высокой скорости и гибкости – комбинированная система (нория + пневмораздача).

Этап 4: Конкретизация оборудования и систем управления. Детализация оборудования по выбранной схеме:

- *Разгрузка:* аэрация: пневматические/электрические вибраторы и пневмоподушки на хоппер; затворы: пневмопривод (автоматизация), ручной – резерв; насосы для остатков: 2 пневмовинтовых (PCP), по числу конусов.

- *Транспортировка:* пневмосистемы: пневмокамерные (большие объемы, дальние дистанции) или пневмовинтовые (плавная подача); механика: желобчатые шнеки большого диаметра, нория с запасом производительности + 30 %.

- *Система управления:* базовая: локальные шкафы с реле; рекомендуемая: интеллектуальная система на PLC (автоматический цикл, контроль параметров, журнал событий, удаленный мониторинг).

Расчет и подбор вспомогательных систем: система сжатого воздуха: суммарный расход всех потребителей с коэффициентом неравномерности 1,5, итоговая производительность компрессорной – около 40 м³/мин; оборудование: винтовой компрессор с частотным регулированием, ресиверы (3600 л), осушитель (+ 3 °C), фильтры; аспирационная система: все точки пересыпа. Фильтр на силосе – с коэффициентом 1,5 к объему воздуха для предотвращения выброса пыли и поддержания разрежения.

Этап 5: Интеграция и управление: Разработка АСУ ТП: управление всеми элементами по заданному алгоритму (например, «Запуск цикла разгрузки»);



контроль уровня в бункерах приемка и силосах; мониторинг ключевых параметров: давление и расход воздуха, токовая нагрузка на двигателях, состояние фильтров (перепад давления); формирование отчетов (объем разгруженного, время простоя вагонов).

Этап 6: Оценка эффективности и принятие решения. Финальное сравнение вариантов комплектации: *ключевой показатель*: время разгрузки 1 вагона-хоппера ≤ 40 мин; *производительность*: расчет пропускной способности всех звеньев для обеспечения заданного цикла; *ТЭО*: сравнение капитальных и эксплуатационных затрат (энергопотребление, обслуживание, расходные части), расчет срока окупаемости за счет сокращения простоя вагонов.

Алгоритм принятия решения:

- метод разгрузки: по объему и экологическим требованиям. Для ≤ 40 мин – обязательны аэрация и 2 насоса; транспортировка: L велико – пневмотранспорт (базово-пневмокамерный насос); L мало, H велико – нория (с выбором типа загрузки и распределения);

- проектирование трассы: разгонный участок 5 м, минимум поворотов, радиус $\geq 1,5$ м;

- расчет системы воздуха, суммируя расход всех потребителей; с коэффициентом 1,5 к расходу на аспирацию и продувку; подбирается компрессор с ЧРП, осушитель, ресиверы (ориентир 3600 л);

- подбор аспирационной системы с фильтрами, производительность которых также учтет коэффициент 1,5.

По факту должен быть проведен проверочный расчет времени цикла для выбранной комплектации. Если время превышает 40 минут – необходимо вернуться к Шагам 1 или 2, рассмотрев более производительные варианты (например, увеличение диаметра труб, мощности насосов, добавление аэрации).

Рекомендуемая комплектация: *схема комбинированная*: герметичная разгрузка хоппера → пневмотранспорт → вертикальные нории → пневматическое распределение по силосам. Обязательны аэрация конусов (2–3 атм, 15 м³/мин) и пневмозатворы; *управление*: автоматизированная система с диспетчеризацией всего цикла; *результат*: высокая надежность, интеграция в АСУ склада.

Обсуждение и заключения

Разработан алгоритм и технологическая схема для эффективного цикла переработки сухих смесей, минимизирующие энергозатраты и пыление. Научная новизна: разработаны адаптированный к российским условиям алгоритм выбора оборудования и методов пылеудаления; инженерные решения по модернизации линий для повышения производительности, энергоэффективности и долговечности.

Результат: создание надежной, экономичной и экологичной системы управления приемкой и хранением цемента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев, В. Р. Организация перевозки грузов железнодорожным транспортом с согласованным расписанием / В. Р. Андреев // Теоретические и концептуальные проблемы логистики и управления цепями поставок : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции / Пензенский государственный аграрный университет. – Пенза, 2019. – С. 11–13. – ISBN 978-5-94338-971-9.

2. Адволотикин, Д. И. Моделирование складов для хранения материалов верхнего



строения железнодорожного пути/Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 10 (148) Октябрь. С. 1–8.

3. Stosic, N. Optimisation of screw compressors / N Stosic, Ian K Smith, A Kovacevic // Applied Thermal Engineering. – 2003. – № 23 (10). – P. 1177–1195. – DOI 10.1016/S1359-4311(03)00059-0 (дата обращения: 10.12.2025).

4. Рамазин, Н. И. Автоматизированная система управления технологическим процессом бункерной загрузки сыпучих материалов / Н. И. Рамазин, Д. В. Иванов // Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте : материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. – Самара, 2025. – С. 7–10.

5. Ахмедулин, В. А., Проблема определения понятия риск / В. А. Ахмедулин, Р. Р. Ахметов, Л. Е. Алтынбаева // Теория и практика современной науки. – 2023. – №1 (91). – С. 46–51.

6. Угляница, А. В., Дуваров, В. Б. Утепление обделки подземных сооружений теплоизоляционно-конструкционным геополитиролбетоном // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 2 (150). С. 64–74. doi: 10.26730/1999-4125-2022-2-64-74.

7. Davydov, S. Y., Kosarev, N. P., Valiev, N. G. et al. Problems with the Use of Pneumatic Screw Pumps to Transport Bulk Cargo. Refract Ind Ceram 54, 100–105 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11148-013-9557-z> (дата обращения: 10.12.2025).

8. Аксенова, Н. А., Корабельников, М. И., Бастриков, С. Н., Зайцев, А. Ю. Экскурс в историю насосостроения: от ведра к сложным гидравлическим машинам / Инженер-нефтяник. 2025. № 2. С. 90–98.

9. Фадин, Ю. М., Гавриленко, А. В., Гавриленко Ю. В., Вечканова, М. В., Гавшин, А. П., Потарь, Е. Д. Пневмовинтовые насосы. Преимущества и недостатки/ В сборнике: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Межвузовский сборник статей. Под редакцией В. С. Богданова. Белгород, 2018. С. 371–374.

10. Шаптала, В. Г., Шаптала, В. В., Гавриленко, А. В. Численное моделирование движения цементно-воздушной смеси в пневмокамерном насосе/ Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2015. № 2. С. 159–161.

11. Жорабек, А. Н. К вопросу исследования ленточных конвейеров/ В сборнике: Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения. Материалы XII Международной научно-практической конференции. Астана, 2024. С. 302–305.

12. Гашина, А. С., Красотина, Л. В. Анализ причин аварий на объектах, использующих стальные цилиндрические силосы для хранения сухих сыпучих материалов, как инструмент усовершенствования существующей методики расчета// В сборнике: World of science. Сборник статей XII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2025. С. 67–71.

13. Alexander Varlamov, Nelly Varlamova, Natalya Mazko Providing mechanisation of loading and unloading operations in hopper rail stores// E3S Web of Conferences 402, 01001 (2023). International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2023: (PDF) Providing mechanisation of loading and unloading operations in hopper rail stores (дата обращения: 10.12.2025).

14. Склад цемента: эффективное решение проблемы дефицита строительного сырья/ Опубликовано: 14 марта 2022 11:19 [Электронный ресурс] // Цементный терминал – устройство цементного склада.



ROZANTSEVA Nadezhda Vladimirovna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of construction organization; DROZDOV Aleksandr Danilovich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of construction organization

ENVIRONMENTALLY FRIENDLY CONCEPT FOR TRANSPORTING AND STORING BULK MATERIALS FROM RAIL TRANSPORT TO SILOS

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

4 2nd Krasnoarmeyskaya St., Saint Petersburg, 190005, Russia.

Tel.: (812) 317-80-41; e-mail: nrozanceva@lan.spbgasu.ru

Key words: construction, logistics, unloading methods, pneumatic and screw feeding systems, silos.

The paper investigates methods of transporting cement from hopper wagons to silos, including traditional, pneumatic, conveyor and screw systems. Their advantages and disadvantages are analyzed. Recommendations for process optimization combining pneumatic and mechanical methods with automated technologies are proposed. The parameters for the continuous operation of the complex are calculated. The implementation of these solutions will increase productivity, improve the economic performance of enterprises and reduce the negative impact on the environment.

REFERENCES

1. Andreev V. R. Organizatsiya perevozki грузов zheleznodorozhnym transportom s soglasovannym raspisaniem [Organization of cargo transportation by rail transport with a coordinated schedule]. Teoreticheskie i kontseptualnye problemy logistiki i upravleniya tsepyami postavok [Theoretical and conceptual problems of logistics and supply chain management]: sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Penzenskiy gosudarstvennyy agrarny universitet. Penza, 2019, P. 11–13.
2. Advolotkin D. I. Modelirovanie skladov dlya khraneniya materialov verkhnyego stroyeniya zheleznodorozhnogo puti [Modeling of warehouses for storing materials of the railway track superstructure]. Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Research Journal]. Ekaterinburg, 2024, № 10 (148), P. 1–8.
3. Stosic N., Smith I. K., Kovacevic A. Optimisation of screw compressors. Applied Thermal Engineering. 2003, № 23 (10), P. 1177–1195. DOI 10.1016/S1359-4311(03)00059-0 (accessed: 10.12.2025).
4. Ramazin N. I., Ivanov D. V. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya tekhnologicheskim protsessom bunkernoy zagruzki syipuchikh materialov [Automated control system for the technological process of bunker loading of bulk materials]. Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie na transporte [Mechatronics, automation and control in transport]: materialy VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Samara, 2025, P. 7–10.
5. Akhmedulin V. A., Akhmetov R. R., Altynbaeva L. E. Problema opredeleniya ponyatiya risk [The problem of defining the concept of risk]. Teoriya i praktika sovremennoy nauki [Theory and practice of modern science]. Moscow, 2023, № 1 (91), P. 46–51.
6. Uglanitsa A. V., Duvárov V. B. Uteplenie obdelki podzemnykh sooruzheniy teploizolyatsionno-konstruktivnym geopolistirolobetonom [Insulation of the lining of underground structures with thermal-insulating and structural geopolymer foam concrete]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. Kemerovo, 2022, № 2 (150), P. 64–74. DOI 10.26730/1999-4125-2022-2-64-74.



7. Davydov S. Y., Kosarev N. P., Valiev N. G., [et al.] Problems with the Use of Pneumatic Screw Pumps to Transport Bulk Cargo. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2013, Vol. 54, P. 100–105. DOI 10.1007/s11148-013-9557-z (accessed: 10.12.2025).

8. Aksyonova N. A., Korabelnikov M. I., Batrikov S. N., Zaytsev A. Yu. Ekskurs v istoriyu nasosostroyeniya: ot vedra k slozhnym gidravlicheskim mashinam [Excursion into the history of pump engineering: from a bucket to complex hydraulic machines]. *Inzhener-neftyanik [Oil Engineer]*. Moscow, 2025, № 2, P. 90–98.

9. Fadin Yu. M., Gavrilenko A. V., Gavrilenko Yu. V., Vechkanova M. V., Gavshin A. P., Potar E. D. Pnevmovintovye nasosy. Preimushchestva i nedostatki [Pneumatic screw pumps. Advantages and disadvantages]. *Energoberegayushchie tekhnologicheskie komplekсы i oborudovanie dlya proizvodstva stroitelnykh materialov [Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials]*. Mezhdunarodnyi sbornik statey. pod red. V. S. Bogdanova. Belgorod, 2018, P. 371–374.

10. Shaptala V. G., Shaptala V. V., Gavrilenko A. V. Chislennoye modelirovanie dvizheniya tsementno-vozdushnoy smesi v pnevmokamernom nasose [Numerical modeling of the movement of a cement-air mixture in a pneumatic chamber pump]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov]*. Belgorod, 2015, № 2, P. 159–161.

11. Zhorabek A. N. K voprosu issledovaniya lentochnykh konveyerov [On the issue of studying belt conveyors]. *Aktualnye problemy transporta i energetiki: puti ikh innovatsionnogo resheniya [Actual problems of transport and energy: ways of their innovative solution]*. Materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Astana, 2024, P. 302–305.

12. Gashina A. S., Krasotina L. V. Analiz prichin avariі na ob'yektakh, ispolzuyushchikh stalnye tsilindricheskie silosy dlya khraneniya sukhikh syipuchikh materialov, kak instrument usovershenstvovaniya sushchestvuyushchey metodiki rascheta [Analysis of the causes of accidents at facilities using steel cylindrical silos for storing dry bulk materials as a tool for improving the existing calculation method]. *World of science. Sbornik statey XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Penza, 2025, P. 67–71.

13. Varlamov A., Varlamova N., Mazko N. Providing mechanisation of loading and unloading operations in hopper rail stores. *E3S Web of Conferences*. 2023, Vol. 402, 01001. International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2023 (accessed: 10.12.2025).

14. Sklad tsementa: effektivnoye reshenie problemy defitsita stroitel'nogo syr'ya [Cement warehouse: an effective solution to the problem of shortage of building raw materials]. Opublikovano: 14 marta 2022 11:19. Tsementny terminal – ustroystvo tsementnogo sklada.

© Н. В. Розанцева, А. Д. Дроздов, 2026

Получено: 25.03.2026 г.