



УДК 622.647.25

## ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ КОНВЕЙЕРА С МАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ ЛЕНТЫ ДЛЯ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Гордин С.А.<sup>1</sup>, Захаров А.Ю.<sup>1</sup>, Захарова А.Г.<sup>1</sup>, Атрушкевич В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

<sup>2</sup>Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН)



### Информация о статье

Поступила:

02 октября 2024 г.

Рецензирование:

05 мая 2025 г.

Принята к печати:

19 мая 2025 г.

### Ключевые слова:

ленточный конвейер,  
магнитный подвес, лента,  
система магнитной левитации  
MagLev, постоянные магниты.

### Аннотация.

Цель исследования заключается в оценке потенциала использования систем магнитной левитации (MagLev) с акцентом на их способность снижать сопротивление движению, увеличивать срок службы и повышать энергоэффективность. Обзор основан на анализе научно-технической литературы и патентов, включая исследования по базовым принципам магнитной левитации, развитию технологий, техническим характеристикам и типам магнитолевитационных систем. Анализируются перспективы применения магнитолевитационных конвейеров для повышения эффективности транспортных технологий при транспортировании горной массы. Рассмотрены проблемы износа транспортного оборудования, ограниченной скорости и производительности, а также недостатки традиционных конвейеров, эксплуатируемых в условиях горного производства. Показано, что в настоящее время существует достаточно много направлений создания левитации для ленточных конвейеров. Выявлено, что наиболее перспективными для горной промышленности являются системы на основе постоянных магнитов, сочетающие нулевое энергопотребление, возможность влияния на конфигурацию магнитного поля и устойчивость к внешним воздействиям. Основные выводы подтверждают, что внедрение MagLev-конвейеров позволит существенно повысить надежность, безопасность и экономическую эффективность транспортирования грузов, однако это направление требует дальнейших исследований для преодоления технико-экономических барьеров.

**Для цитирования:** Гордин С.А., Захаров А.Ю., Захарова А.Г., Атрушкевич В.А. Перспективы создания конвейера с магнитным подвесом ленты для горной промышленности // Техника и технология горного дела. – 2025. – № 2(29). – С. 40-62. – DOI: 10.26730/2618-7434-2025-2-40-62, EDN: XJHRVO

### Введение

Конвейерные системы играют большую роль в горном производстве, обеспечивая транспортировку горной массы и полезного ископаемого. Они позволяют перемещать большие объемы материалов на значительные расстояния, минимизируя простои и снижая затраты на транспортирование [1]. Использование конвейеров повышает общую производительность горных работ, обеспечивая бесперебойную доставку сырья на последующие этапы переработки [2].

Конвейеры, в которых лента поддерживается с помощью роликоопор, имеют существенные недостатки, связанные с их конструкцией и эксплуатацией [3]. Прежде всего, между роликопорами лента провисает, что приводит к её неравномерному прогибу и шевелению груза, и, соответственно, созданию сопротивления движению. Кроме того, куски груза, находящиеся непосредственно на поверхности ленты, при прохождении роликов вызывают ударные нагрузки, ускоряющие износ ленты. Увеличение скорости движения ленты в таких условиях приводит к



ещё более интенсивному износу и повреждению её поверхности [4]. По этой причине скорость движения ленты на таких конвейерах ограничена: средняя скорость редко превышает 5 м/с, а максимально достижимая – около 10 м/с. К тому же, взаимодействие ленты с роликами создаёт значительное трение [5] (вдавливание ролика в нижнюю обкладку ленты), в результате всего этого возникают усталостные напряжения, а затем – усталостный износ ленты [6].

Магнитная левитация представляет собой технологию, основанную на использовании магнитных полей для создания подъемной силы и движения объектов без физического контакта с опорной поверхностью [7]. Это явление достигается за счет взаимодействия магнитных полей, создаваемых электромагнитами, постоянными магнитами или сверхпроводниками, что позволяет объектам «левитировать» и перемещаться с минимальным сопротивлением.

Одним из преимуществ технологии магнитной левитации является ее экологичность [8]. Благодаря отсутствию механического контакта между движущимися частями и опорной частью практически не создают шума [9]. Такие системы не требуют использования смазочных материалов, которые могут быть источником загрязнения, и минимизируют негативные воздействия, связанные с трением или износом деталей [10]. Это актуально для транспортных и конвейерных систем, где традиционные технологии часто сопровождаются значительным уровнем шума и выбросов вредных веществ. Таким образом, использование магнитной левитации позволяет минимизировать экологический след и создать более устойчивые решения для современных транспортных и промышленных задач [11].

Цель обзора заключается в оценке применимости магнитолевитационных конвейеров для совершенствования транспортных технологий горного производства, снижения износа оборудования, повышения скорости транспортировки и снижения энергопотребления.

Методология основана на проведении обширного поиска в различных исследовательских базах данных, включая Web of Science, Scopus, IEEE Xplore и т.д.; поисковое содержание включало: статьи, книги, доклады, патенты.

Задачи обзора:

- провести анализ ключевых этапов развития магнитной левитации – от первых прототипов до современных технологий;
- исследовать технические характеристики и типы магнитолевитационных конвейеров, выявить их преимущества перед традиционными системами.

Ожидаемые результаты:

- выявить наиболее перспективные типы магнитолевитационных конвейеров для применения в горном деле, основываясь на анализе их технических характеристик, энергоэффективности и адаптивности к сложным условиям эксплуатации;
- разработать рекомендации для дальнейших исследований и внедрения технологии MagLev на основе определения ключевых тенденций развития магнитолевитационных систем, выявления их текущих ограничений и анализе потенциала для практического применения.

### **Общее представление о системе MagLev**

Технология магнитной левитации MagLev, благодаря своим уникальным характеристикам, таким, как отсутствие механического трения и высокая скорость перемещения, получают все более широкое применение в различных областях от транспортных систем до промышленного оборудования.

Магнитная левитация основана на принципе отталкивания и/или притяжения магнитных полей, которые обеспечивают подъемную силу для удержания объекта в воздухе без физического контакта. Магнитное поле [12-14] может быть создано различными способами: с использованием сверхпроводников, электромагнитов, постоянных магнитов или их комбинаций (Рис.1). Сверхпроводники обеспечивают мощные и стабильные магнитные поля [15] благодаря эффекту «закрепления» магнитного потока, но требуют сложной системы охлаждения [16-17]. Электромагниты позволяют точно управлять величиной магнитного поля за счет изменения тока в катушках, и это сопровождается высоким энергопотреблением [18]. Постоянные магниты [19], особенно на основе Nd-Fe-B, обеспечивают нулевое энергопотребление для поддержания магнитного поля, однако их возможность управления силой левитации ограничена [20, 21]. Комбинированные системы, такие, как гибридные электромагниты, сочетают преимущества

постоянных магнитов и электромагнитов, снижая общее энергопотребление и повышая эффективность [22].



Рис. 1. Способы создания магнитной левитации

Fig. 1. Methods of creating magnetic levitation

Для обеспечения устойчивой работы магнитной левитации применяются активные системы управления. Они регулируют величину воздушного зазора между объектом и направляющей путем изменения тока в электромагнитах по специальному алгоритму [23]. Такие системы позволяют компенсировать изменения веса объекта, например, при погрузке или разгрузке, сохраняя стабильное положение объекта в пространстве [24]. Однако активное управление требует сложного контрольного оборудования, что увеличивает стоимость системы [25]. Тем не менее, современные методы управления, к примеру такие как PID-контроллеры, позволяют достичь быстрого отклика и точной стабилизации левитирующего объекта [26].

#### Ключевые этапы развития технологии

Развитие технологии магнитной левитации представляет собой сложный и многоэтапный процесс, охватывающий как теоретические открытия, так и практические реализации. Понимание ключевых этапов истории развития технологии магнитной левитации позволяет проследить эволюцию этой технологии – от первых теоретических формулировок до современных высокоскоростных систем. Рассмотрим основные этапы развития, включая фундаментальные исследования, появление первых экспериментальных установок и достижения в области скоростного транспорта, которые определили современное состояние магнитной левитации как одного из перспективных направлений технологического прогресса.

Началом развития технологии магнитной левитации стала сформулированная в 1842 году фундаментальная теорема британского физика Сэмюэля Ирншоу [27]. Эта теорема оказала значительное влияние на дальнейшие исследования в области левитации и заложила основу для поиска инновационных решений в данной области. Согласно теореме Ирншоу, статическая левитация с использованием только постоянных магнитов или электростатических сил невозможна из-за неустойчивого равновесия: любое отклонение усиливает нестабильность. Это делает такие системы неподходящими для практических применений без дополнительных механизмов стабилизации. Таким образом, теорема Ирншоу послужила фундаментальной основой для разработки современных технологий магнитной левитации.

История развития магнитной левитации для транспортных систем начинается с работ Германа Кемпера, который предложил концепцию подвески транспортных средств на магнитной подушке. В своей патентной заявке от 1934 года [28] он описал концепцию железной дороги с использованием магнитных полей для поддержания и направления вагонов, которые могли бы двигаться практически без трения. Хотя в то время технологические ограничения не позволили реализовать эту идею в полной мере, работа Кемпера заложила фундамент для последующих исследований и экспериментальных установок, которые привели к созданию современных MagLev систем.

Первые практические шаги в развитии магнитной левитации были сделаны только в 1960-х годах, когда развитие электротехники и материаловедения позволило создавать более эффективные системы управления магнитными полями [29]. Именно в этот период появились первые прототипы магнитных систем, демонстрирующие потенциал технологии [30].



Наиболее проработанные технологии магнитной левитации начали активно развиваться в 70-е 80-е годы XX века, что связано с прогрессом в области материаловедения и электротехники [31]. В этот период появились первые практические решения, направленные на снижение механического трения и повышение эффективности транспортировки грузов за счет использования магнитных полей [32].

В 1995 году Бюро горного дела США опубликовало исследование, посвященное возможностям применения магнитной левитации для транспортирования горных пород и полезных ископаемых [33]. В рамках данного исследования рассматривались технические и экономические аспекты внедрения технологии MagLev в горнодобывающей промышленности. Особое внимание уделялось потенциальным преимуществам технологии, таким как снижение износа оборудования, повышение скорости транспортирования и уменьшение энергопотребления. Результаты исследования подтвердили возможность использования технологии MagLev не только в пассажирских перевозках, но и в грузовых [34], что обосновало дальнейшее развитие исследований в этом направлении.

#### **Железнодорожный транспорт**

Одним из наиболее известных применений магнитной левитации является скоростной железнодорожный транспорт [35]. Маглев-поезда, такие как «Transrapid» [36] в Германии или «Shanghai Maglev Train» в Китае [37], способны развивать скорости до 430–600 км/ч, что значительно превышает возможности традиционных поездов [38]. Особенностью таких систем является использование электромагнитной или электродинамической левитации, обеспечивающей стабильное положение поезда на магнитной подушке и минимизацию сопротивления движению [39]. Наиболее значимым достижением в области MagLev технологий является разработка системы SCMaglev, основанной на использовании сверхпроводящих магнитов [40]. Эта технология позволяет достигать рекордных скоростей, превышающих 1000 км/ч, что делает её одной из самых быстрых транспортных систем в мире [41].

Анализ гибридных систем магнитной левитации [42] показывает возможность создания устойчивой транспортной системы, способной перемещать объекты массой до нескольких тонн на единицу длины пути с семикратным снижением энергопотребления по сравнению с традиционными электромагнитными решениями. Данные результаты подчеркивают перспективность использования маглев-технологий не только для пассажирских перевозок, но и в промышленной логистике, где требуется эффективное перемещение больших объемов грузов. Полученные данные подтверждают возможность применения магнитной левитации для решения задач грузоперевозок в условиях повышенной надежности и экономической эффективности [43].

#### **Магнитные подшипники**

Магнитные подшипники представляют собой устройства, которые поддерживают вращающиеся или движущиеся элементы без физического контакта за счет магнитных полей. Это обеспечивает практически полное отсутствие трения, что значительно увеличивает срок службы оборудования и снижает затраты на обслуживание [44]. Такие подшипники используются в высокоскоростных механизмах, таких, как турбины, насосы и электродвигатели, где требуется высокая точность и надежность работы. Кроме того, магнитные подшипники не требуют смазки, что делает их перспективными для использования в условиях повышенной чистоты, например, в производстве полупроводников или фармацевтической промышленности. Также данная технология применяется в системах конвейерных установок [45].

#### **Плавка металлов**

Магнитная левитация применяется в процессе плавки металлов, а именно, в технологии бесконтактной плавки [46]. В этом методе металл нагревается и удерживается в воздухе магнитным полем, что исключает контакт с тиглем или другими материалами. Это позволяет избежать загрязнения расплава и обеспечивает высокую чистоту получаемого материала [47]. Левитационная плавка важна при работе с реактивными металлами, такими, как титан или алюминий, которые легко взаимодействуют с материалами тиглей. Данная технология широко используется в аэрокосмической и химической промышленности, где к качеству материалов предъявляются строгие требования.

#### **Магнитная виброизоляция**

Магнитная виброизоляция представляет собой инновационный подход к снижению вибраций и ударных нагрузок на оборудование и конструкции. В основе этой технологии лежит использование магнитных полей для создания «магнитной подушки», которая эффективно гасит колебания без механического контакта [48].

### MagLev конвейеры

#### Ленточные конвейеры с механической связью

Еще одной перспективной областью применения технологии MagLev являются конвейеры на магнитной подушке. Первоначально появились конвейеры с магнитоэластичной лентой, взаимодействующей с опорными магнитами, которые крепятся на ставе (Рис. 2). Боковому сходу ленты препятствуют ролики, установленные на ставе перпендикулярно рабочей поверхности ленты с обеих сторон. [49, 50]. Конвейеры на магнитной подушке позволяют увеличить скорость движения ленты до 10 м/с, а также длину конвейера на один привод, что существенно повышает производительность системы [51]. Кроме того, минимизация вращающихся частей делает такие конвейеры более безопасными и экологичными по сравнению с традиционными решениями.

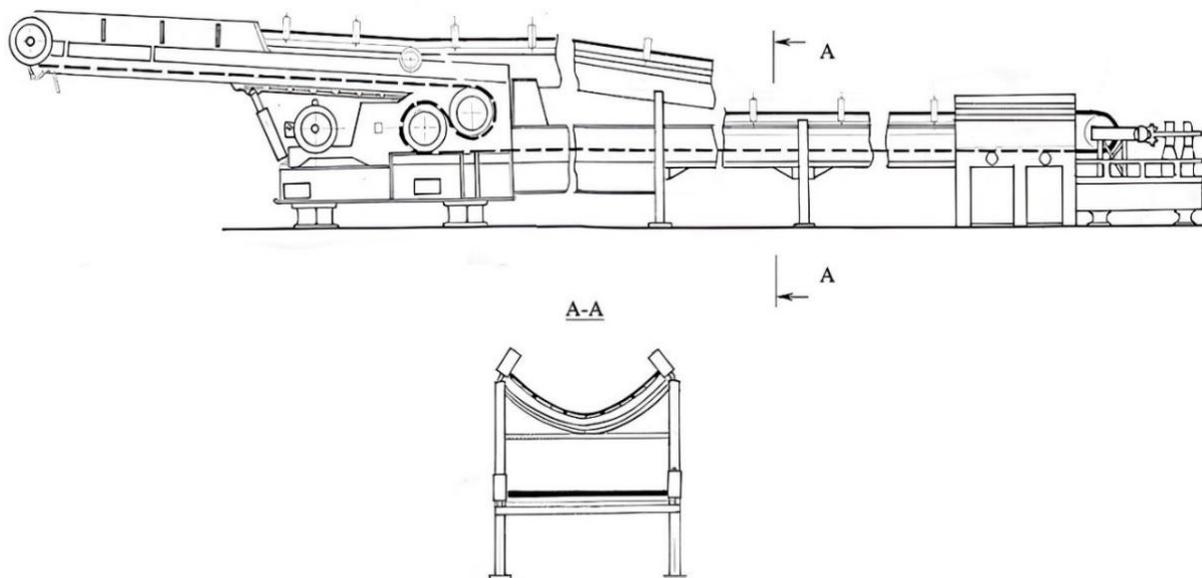


Рис. 2. Одноконтурный конвейер на магнитной подушке с механической связью благодаря боковым роликам

Fig. 2. Single-circuit conveyor on magnetic cushion with mechanical connection thanks to side rollers

Магнитоэластичный конвейер (МЭК) (Рис. 3) [13] предназначен для транспортировки крупнокусковой горной массы, такой как песчаник или аргиллит, с размером кусков до 800 мм и высотой около 1,1 м. Его конструкция разработана специально для снижения износа ленты, характерного для традиционных ленточных конвейеров при работе с массивными грузами. Основной особенностью системы является использование двухконтурной магнитоэластичной подвески, в которой грузонесущая лента поддерживается траверсами, опирающимися на магнитные ряды. Порожняная ветвь ленты, в свою очередь, перемещается по обычным роликам.

Лента конвейера имеет встроенные полосы магнитоэластика или постоянные магниты (Рис. 4, 5), обеспечивающие её жёсткость, а также поперечные пластины, аналогичные применяемым в ленточно-канатных конвейерах, что повышает прочность и устойчивость конструкции [51]. Такое решение позволяет исключить провисание ленты между опорами и равномерно распределить нагрузку от перевозимого груза. Концевые барабаны имеют специальную конструкцию, позволяющую передавать тяговое усилие без дополнительных нагрузок на ходовые тележки, а при необходимости устанавливаются промежуточные приводы для увеличения длины трассы и снижения натяжения ленты.

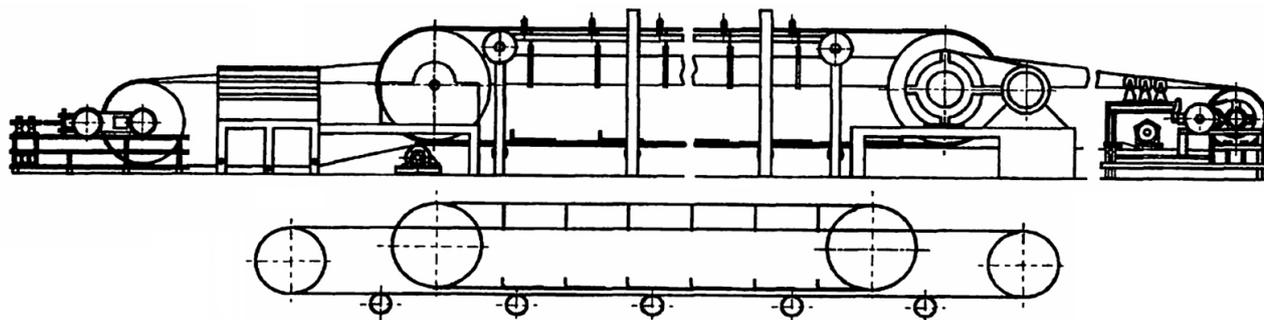


Рис. 3. Конструктивная схема конвейера на магнитной подушке  
Fig. 3. Structural diagram of a conveyor on a magnetic cushion

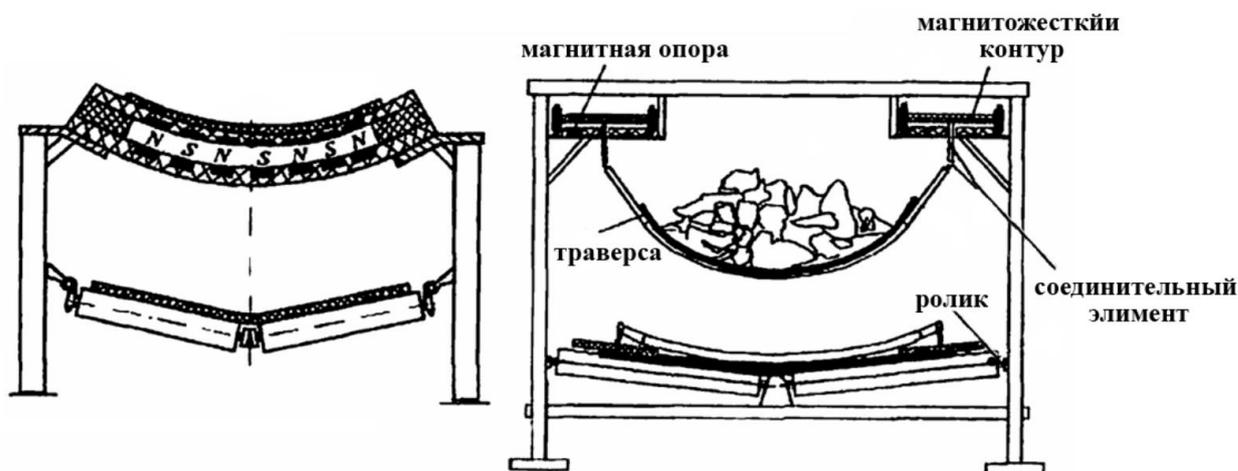


Рис. 4. Конструктивная схема конвейера на магнитной подушке в разрезе  
Fig. 4. Structural diagram of a magnetic levitation conveyor in section

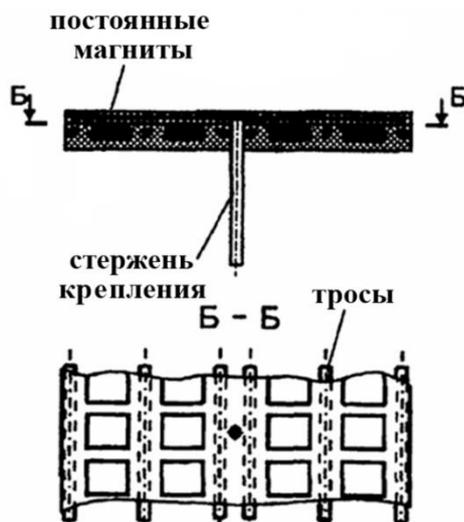


Рис. 5. Устройство магнитного подвеса  
Fig. 5. Magnetic suspension device

Одним из ключевых преимуществ конвейера является значительное снижение динамических нагрузок на ленту. Благодаря двухконтурной системе и встроенной поперечной жёсткости ленты улучшается работа стабилизирующих устройств, таких как боковые электромагниты и вертикальные ролики. Центр масс ленты расположен ниже плоскостей опор,



что облегчает поперечную стабилизацию и делает движение более устойчивым. Это позволяет отказаться от сложных систем центрирования и повысить надёжность работы конвейера в целом.

Внедрение магнитожестного конвейера даёт ощутимый экономический эффект за счёт увеличения срока службы ленты, снижения затрат на обслуживание и электроэнергию, так как отсутствует необходимость поддержания магнитного поля [52]. Оборудование особенно эффективно в условиях длительной эксплуатации и при работе с крупногабаритными и тяжёлыми грузами, обеспечивая не только технические, но и экономические преимущества.

**Конвейеры на сверхпроводниках** благодаря свойству идеального диамагнетизма при использовании сверхпроводника минимизируют потери энергии на создание магнитного поля, что позволяет поддерживать конвейерную ленту без контакта с опорными конструкциями. Это обеспечивает снижение износа оборудования и возможность транспортировки более тяжелых грузов за счет высокой силы магнитного взаимодействия [20]. Одним из ключевых преимуществ таких установок является их способность обеспечивать стабильную левитацию без сложных систем управления. Например, использование комбинации сверхпроводников и постоянных магнитов позволяет создать устойчивый магнитный подвес [53], который минимизирует динамические колебания конвейера. Однако возникают определенные сложности, такие как ограниченная высота левитации и эффект ползучести магнитного потока, который может влиять на точность позиционирования.

Установка MagLev конвейера с применением сверхпроводников [54] включает левитирующую ленту, магнитные рельсы, электромагниты для дополнительного намагничивания и приводной механизм. Магнитные рельсы, выполненные из материалов NdFeB, характеризуются высокой плотностью магнитного потока и минимальной неоднородностью, что обеспечивает равномерное распределение нагрузки по всей длине конвейера. Несмотря на очевидные преимущества, внедрение таких систем требует значительных затрат на оборудование и эксплуатацию, включая системы охлаждения для поддержания сверхпроводящих свойств материалов.

Таким образом, несмотря на высокую эффективность сверхпроводниковых конвейеров, их широкое внедрение сдерживается экономическими и техническими барьерами, такими как высокая стоимость криогенной инфраструктуры, сложности эксплуатации и необходимость систем охлаждения. Это подчеркивает потребность в дальнейших исследованиях для снижения затрат и повышения технологичности данных систем [53].

**Конвейеры на электромагнитах** благодаря способности создавать управляемое магнитное поле, позволяют со значительной точностью управлять положением ленты. Это обеспечивает не только снижение износа оборудования, но и возможность точной настройки параметров подвеса для транспортировки грузов различной массы и габаритов [55]. Однако, такие конвейеры требуют постоянного электропитания для поддержания магнитного поля, что увеличивает энергозатраты на эксплуатацию.

Конвейерные системы на электромагнитах используют управляемое магнитное поле для создания левитации и перемещения грузов (Рис. 6) [56]. Основу конструкции составляют электромагниты, расположенные вдоль пути движения конвейера, которые формируют подъемную силу за счет взаимодействия с ферромагнитными элементами или непосредственно с лентой. Система включает магнитные опоры, приводной механизм и вторичную подвеску, состоящую из линейных направляющих и пружин, передающих силу на верхнюю платформу.

Особенностью данной конструкции является возможность точного управления магнитным полем путем изменения тока в электромагнитах, что обеспечивает адаптивность к различным нагрузкам. Для стабилизации положения ленты используются датчики, контролируемые воздушный зазор, и алгоритмы управления, поддерживающие устойчивость системы. Несмотря на высокую точность позиционирования и минимальное трение, система требует постоянного электропитания, что увеличивает энергозатраты. Дополнительным ограничением является сложность конструкции, связанная с необходимостью охлаждения электромагнитов и использования высокоточных компонентов.

Конвейерная система, основанная на использовании электромагнитов для создания магнитной левитации, может быть использована для трубчатого конвейера, где лента формирует

замкнутый контур вокруг транспортируемого груза (Рис. 7) [26]. Конструкция включает пару магнитных опор, два электромагнита для импульсного намагничивания и приведения в движение ленты, а также источники питания. Электромагниты установлены над конвейером и генерируют импульсное магнитное поле, которое обеспечивает устойчивую подвеску и перемещение трубчатой ленты. Для передачи подъемной силы используется вторичная подвеска, состоящая из линейных направляющих и пружин, которые стабилизируют положение верхней платформы.

Управление магнитным полем осуществляется за счет изменения тока в электромагнитах, что позволяет системе адаптироваться к различным нагрузкам. Несмотря на высокую точность позиционирования и минимальное трение, система требует постоянного электропитания, что увеличивает энергозатраты. Трубчатая форма ленты обеспечивает дополнительную защиту груза от внешних воздействий и повышает экологическую безопасность транспортирования. Однако сложность конструкции и необходимость высокоточных компонентов остаются основными ограничениями для широкого применения.

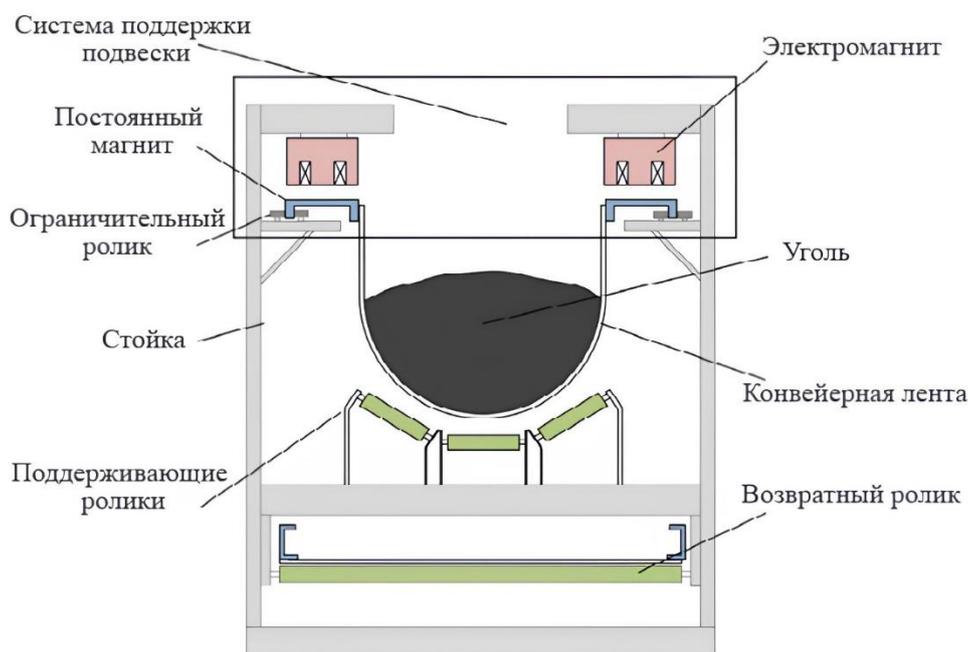


Рис.6. Конструкция ленточного конвейера с магнитной подвеской  
Fig.6. Design of a belt conveyor with magnetic suspension

Подобная конвейерная установка [57] предназначена для транспортировки грузов, требующих максимальной плавности движения и защиты от вибраций и загрязнений – например, взрывоопасных материалов или хрупких изделий, таких как стеклянные кассеты для ЖК-дисплеев. Движение обеспечивает линейный индукционный двигатель (ЛИМ), создающий тяговое усилие без контакта [58]. Для безопасности система дополнена направляющими роликами. Такая конструкция незаменима в условиях, где важны чистота, отсутствие вибраций и минимальный износ.

Несмотря на то, что конвейеры, использующие электромагниты для создания магнитного поля, обеспечивают управляемую левитацию, их применение ограничено высокими энергозатратами, сложностью конструкции и необходимостью постоянного электропитания. Однако, такие системы эффективны для специализированных задач, где важны чистота, отсутствие вибраций и минимальный износ оборудования.

**Конвейеры на постоянных магнитах** благодаря способности создавать стабильное магнитное поле без необходимости постоянного энергопотребления позволяют минимизировать механическое трение за счет поддержания конвейерной ленты в воздухе без контакта с опорными элементами [59]. Кроме того, такие конвейеры не требуют затрат электроэнергии на

поддержание магнитного поля, что делает их привлекательными для длительной эксплуатации. Подобные конструкции имеют большой потенциал для применения в горном деле, где важны надежность, безопасность и минимальное обслуживание оборудования в сложных условиях и возможность взрывобезопасного исполнения [60]. Однако их применение ограничено фиксированными характеристиками постоянных магнитов, которые не могут быть легко адаптированы под изменяющиеся нагрузки или условия работы.

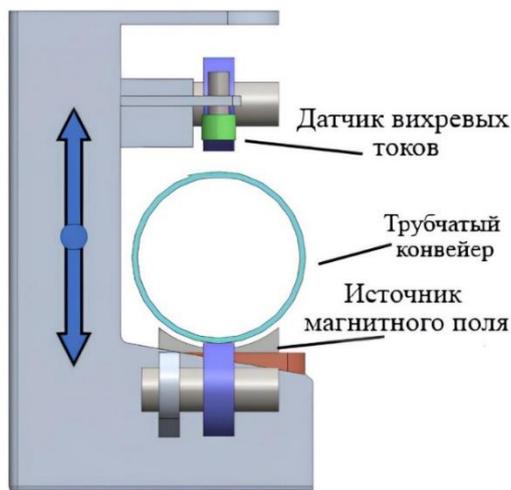


Рис. 7. Трубчатый конвейер с электромагнитным подвесом системы «Sanki»  
Fig. 7. Tubular conveyor with electromagnetic suspension of the «Sanki» system

Конвейер на постоянных магнитах (Рис. 8) [61] разработан для транспортировки крупнокусковых грузов в горной промышленности. Его ключевая особенность — использование постоянных магнитов для создания магнитной левитации, что минимизирует трение и износ оборудования. Конструкция включает ленту с вертикально ориентированными бортами и ползунами, взаимодействующими с желобчатыми направляющими из соосных магнитов. Такая форма уменьшает зазор между ползунами и направляющими, повышая эффективность магнитного взаимодействия. Направляющие крепятся к П-образным стойкам через немагнитные кронштейны, снижая потери на рассеивание магнитного поля. Ползуны равномерно распределены по периметру ленты, а борта фиксируются отогнутыми магнитами. Расстояние между ползунами определяется исходя из несущей способности системы, что обеспечивает надежную работу даже при значительных нагрузках [21].

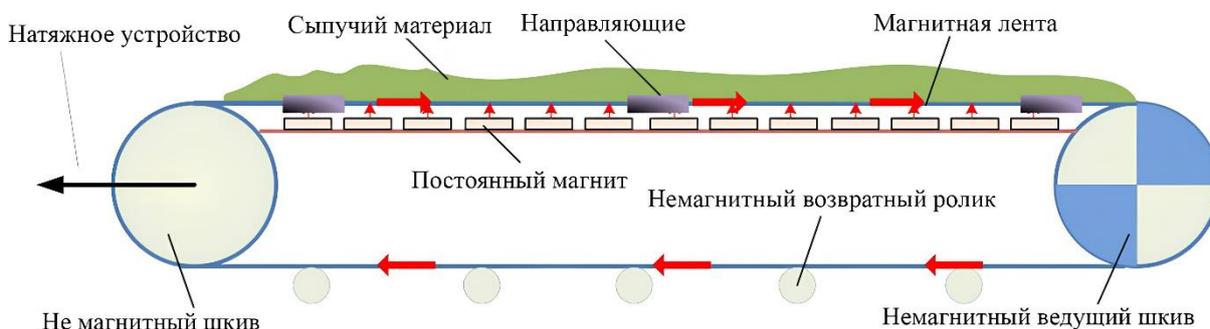


Рис. 8. Конвейерная система на постоянных магнитах  
Fig. 8. Conveyor system on permanent magnets

Качественные показатели конвейера включают высокую скорость движения ленты (до 10 м/с), повышенную вместимость, возможность работы на углах наклона до 30° и улучшенные

экологические характеристики. Эти преимущества делают его особенно подходящим для сложных условий горного производства.

Конвейер с системой MagLev (Рис. 9) [62] разработан специально для условий горной промышленности и использует постоянные магниты для создания сил магнитного отталкивания. Конструкция включает три взаимодействующих постоянных магнита, обеспечивающих как вертикальную поддержку, так и боковую стабилизацию ленты. Симметричное расположение магнитных элементов формирует саморегулирующуюся систему стабилизации, способную адаптивно восстанавливать равновесное положение при возникновении внешних возмущений.

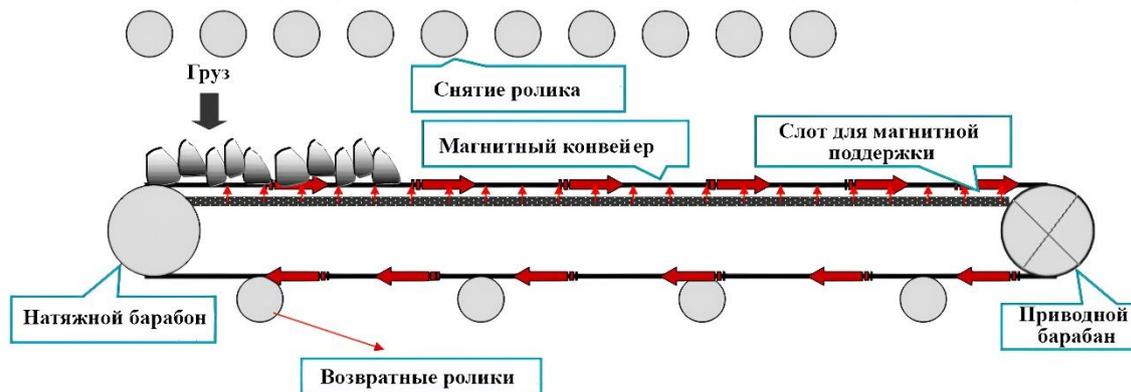


Рис. 9. Схема конвейера с постоянными магнитами  
Fig. 9. Diagram of a conveyor with permanent magnets

Конструктивная особенность системы заключается в способности автоматически компенсировать малые возмущения за счет изменения сил магнитного отталкивания между несущими магнитами и намагниченной лентой. При смещении ленты вдоль оси X происходит перераспределение магнитных сил, возвращающее систему в состояние равновесия. В направлении оси Y система демонстрирует аналогичные свойства самостабилизации. Однако, при значительных внешних воздействиях требуется дополнительная система корректировки параметров работы конвейера.

Специализированная трубчатая конвейерная система (Рис. 10) [63] для горнодобывающей промышленности, функционирующая на базе постоянных магнитов с халбаховской ориентацией. Конструкция основана на шестиугольной магнитной системе с неодим-железоборными магнитами (NdFeB), создающими радиальную магнитную подвеску транспортной ленты. Система демонстрирует нелинейную зависимость магнитной силы от остаточной намагниченности и длины постоянных магнитов вдоль направления транспортирования.

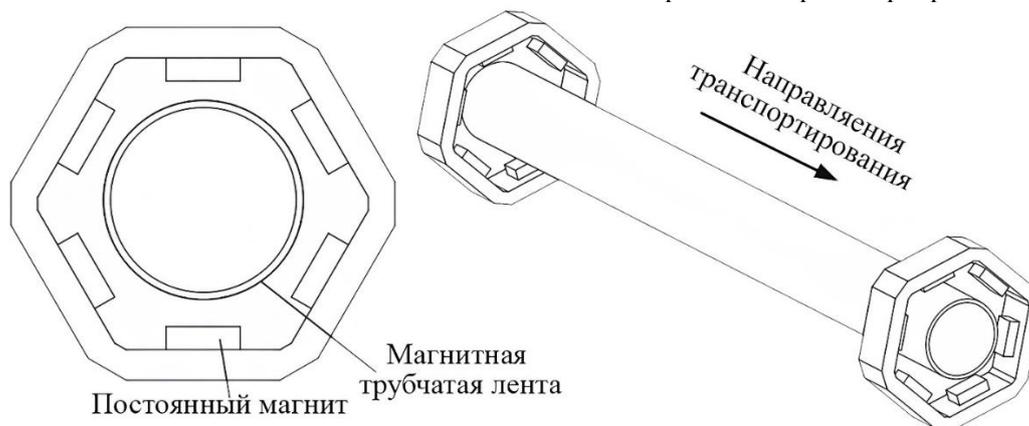


Рис. 10. Трубчатый магнитолевитационный конвейер с постоянными магнитами  
Fig. 10. Tubular magnetic levitation conveyor with permanent magnets

Ключевой особенностью конструктива является трубчатая форма диаметром 0,25м с магнитными модулями длиной 15-60 мм, обеспечивающими бесконтактную поддержку конвейерной ленты. Трубчатый дизайн позволяет минимизировать механическое трение и эксплуатационное сопротивление, устраняя риск возникновения электростатических разрядов в условиях подземных горных работ. При этом распределение магнитного потока показывает некоторую асимметрию, требующую установки антидрейфового устройства для стабильной работы системы.

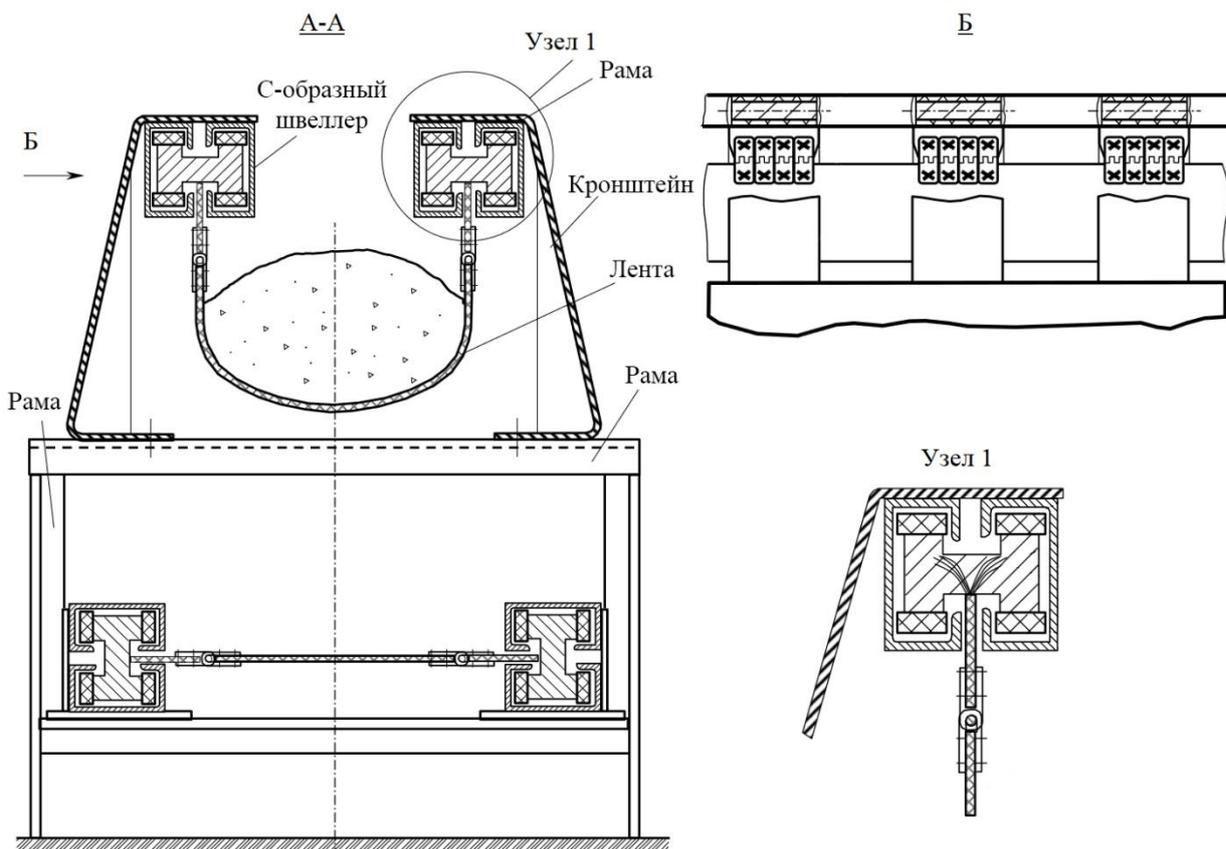


Рис. 11. Ленточный конвейер с подвесной лентой и ходовыми опорами скольжения  
Fig. 11. Belt conveyor with overhead belt and sliding running supports

Конвейерная система с подвесной лентой (Рис. 11) [7], специально разработанная для горной промышленности и реализующая принцип движения на магнитной подушке. Конструкция базируется на использовании трубчатого конвейера с ходовыми опорами скольжения, выполненными из резиновых башмаков с низкофрикционным покрытием и постоянными магнитами. Особенностью конструкции является применение швеллерных направляющих С-образного профиля, взаимодействующих с магнитными элементами опор, что обеспечивает эффект магнитной левитации и существенно снижает коэффициент трения при движении.

Основное конструктивное решение заключается в интеграции постоянных керамических магнитов как в опорную поверхность резиновых башмаков, так и в рабочую поверхность направляющих, где они расположены одноименными полюсами друг к другу. Данная компоновка создает уникальную систему магнитного центрирования и обеспечивает практически безынерционное движение опорных элементов.

Конвейерные системы на постоянных магнитах демонстрируют высокую надежность и эффективность, особенно в сложных условиях горной промышленности. Они экономически выгодны благодаря отсутствию необходимости в постоянном энергопотреблении для поддержания магнитного поля. Системы обеспечивают стабильность работы, безопасность и минимальные затраты на обслуживание, что делает их перспективными для транспортировки



крупнокусковых и сыпучих грузов. Однако ограниченная адаптивность магнитов к изменяющимся нагрузкам требует дальнейшего совершенствования технологии.

**Комбинированные системы** магнитной левитации объединяют преимущества постоянных магнитов и электромагнитов. Постоянные магниты обеспечивают базовое поле, снижая энергопотребление, а электромагниты позволяют точно настраивать и стабилизировать подвес. Такие системы сочетают надежность и эффективность, что особенно важно в условиях высоких нагрузок. Однако их внедрение сопряжено с рядом сложностей, включая высокую стоимость, технические ограничения и необходимость специальной инфраструктуры.

Система магнитной левитации конвейера [64] объединяет постоянные и электромагниты в подвеске с тремя степенями свободы, обеспечивая стабильность при изменении нагрузок за счёт механизма с переменным магнитным потоком и вращающихся дисковых магнитов, что минимизирует трение. Управление левитацией и позиционированием осуществляется с высокой точностью благодаря двойному контроллеру с обратной связью, а боковые гибридные электромагниты обеспечивают контроль наклона и предотвращают опрокидывание платформы, что в совокупности делает систему высокоадаптивной к различным условиям работы, энергоэффективной и надёжной при транспортировке чувствительных грузов, особенно в чистых помещениях.

Выбор технологии создания магнитного поля для MagLev конвейеров зависит от требуемых характеристик системы. Сверхпроводники обеспечивают стабильную левитацию, но нуждаются в криогенном охлаждении. Электромагниты позволяют точно управлять подвесом и адаптироваться к нагрузкам, однако требуют постоянного энергопотребления. Постоянные магниты экономичны в эксплуатации, но имеют ограниченную способность к адаптации. Комбинированные системы сочетают базовое поле постоянных магнитов с возможностью точной настройки электромагнитов, обеспечивая оптимальное соотношение эффективности и управляемости, хотя их внедрение связано с высокой стоимостью и техническими сложностями [65].

### **Проблемы внедрения**

Одним из ключевых препятствий на пути широкого внедрения MagLev конвейеров является то, что создание таких систем требует значительных затрат на разработку, производство и установку компонентов, включая мощные магниты, электромагнитные системы и специализированное оборудование [66]. Это делает их менее доступными для массового применения. Снижение стоимости возможно за счет разработки более дешевых и эффективных марок постоянных магнитов, а также оптимизации конструкции.

Технические сложности обеспечения устойчивости и управляемости левитации требуют сложных алгоритмов и высокоточных датчиков. Предполагаемым решением может стать комбинированные системы с постоянными магнитами и электромагнитами, повышающие адаптивность.

Еще одно ограничение — необходимость специальной инфраструктуры. Это усложняет проектирование и эксплуатацию. Возможные решения: разработка универсальных модульных конструкций и использование гибридных технологий. Проблема решается применением постоянных магнитов, не требующих сложной инфраструктуры, что упрощает внедрение.

### **Современное состояние и перспективы развития**

В ходе обзора было выяснено, что значительная часть современных исследований в области магнитной левитации сосредоточена на совершенствовании технологий управления [67]. Это связано с необходимостью повышения устойчивости, точности и адаптивности систем, особенно в сложных условиях эксплуатации. Управление магнитной левитацией требует разработки сложных алгоритмов, которые могут обеспечивать стабильную работу системы при изменении нагрузок или внешних воздействий [68]. Важным направлением также является создание гибридных систем, сочетающих постоянные магниты и электромагниты, что позволяет минимизировать энергопотребление и повысить эффективность.

Одним из ключевых факторов, влияющих на внедрение магнитолевитационных конвейеров, являются экономические аспекты. Высокая стоимость разработки и внедрения таких систем остается основным барьером для их широкого применения.



Магнитолевитационные конвейеры имеют значительный потенциал для горной промышленности, обеспечивая снижение износа оборудования, повышение скорости. Они снижают энергопотребление и экологическое воздействие [69]. Несмотря на ограниченный опыт внедрения, их преимущества в отсутствие механического контакта, делают технологию перспективной.

#### Анализ научно-технической базы

Для оценки научно-технической базы и уровня заинтересованности исследовательского сообщества в области магнитной левитации и, в частности, конвейеров, использующих технологию магнитной левитации, был проведен анализ публикационной активности с использованием сервиса «Google Scholar». В ходе исследования были отобраны публикации, содержащие ключевые слова, наиболее релевантные данной тематике, такие как «Magnetic levitation», «Magnetic levitation mining», "Magnetic levitation conveyor", «Magnetic levitation conveyor mining» и другие связанные термины. Анализ проводился с периодичностью в пять лет, начиная с 1980 года и до 2025 года, что позволило выявить динамику интереса к технологии на протяжении нескольких десятилетий. Результаты анализа представлены на Рис. 12, где показано количество публикаций по указанной тематике за рассматриваемый период.

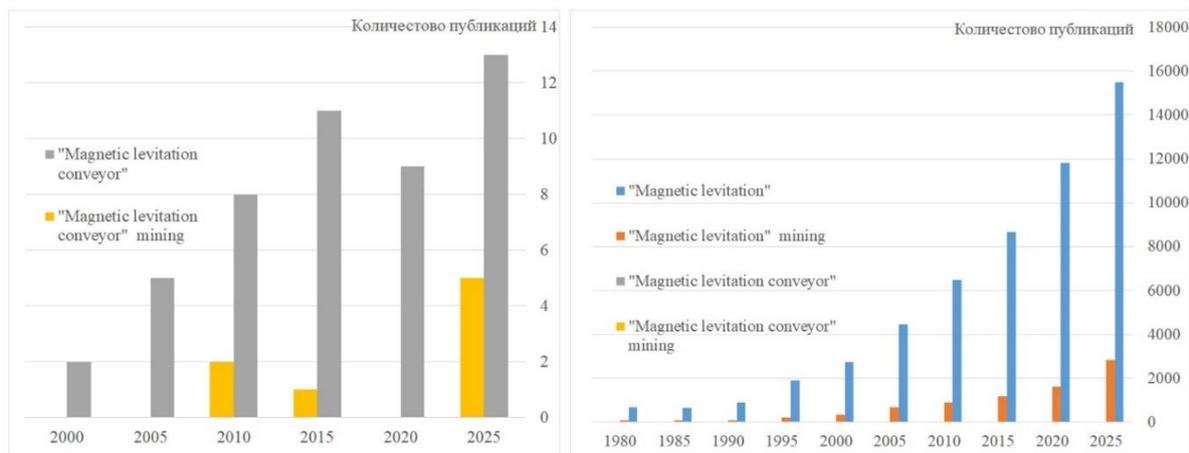


Рис. 12. Количество публикаций в период с 1980 по 2025 годы  
Fig. 12. Number of publications in the period from 1980 to 2025

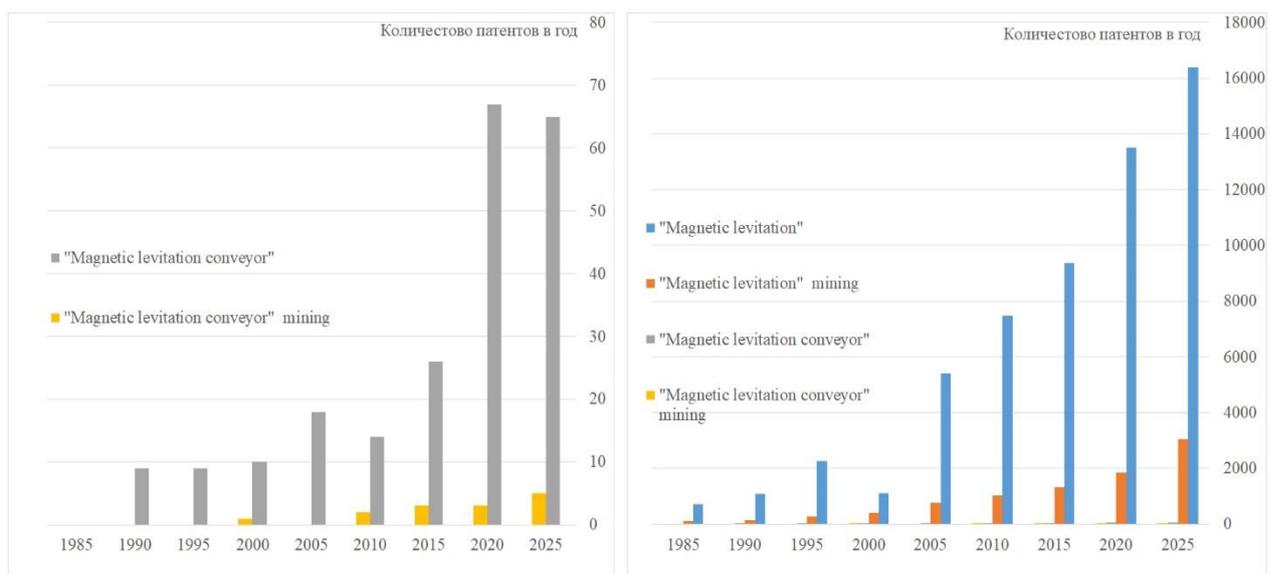


Рис. 13. Количество патентов в период с 1985 по 2025 годы  
Fig. 13. Number of patents in the period from 1985 to 2025



Анализ публикаций показывает, что интерес к магнитной левитации растет. Количество научных работ по этой теме увеличивается с каждым годом, что подтверждает интерес научного сообщества, а следовательно её актуальность.

Также в рамках анализа научно-технической базы были рассмотрены патенты, связанные с технологиями магнитной левитации (Рис. 13). Это позволило оценить уровень патентной активности, выявить ключевых разработчиков и определить региональные особенности внедрения инноваций в данной области.

Основными странами, активно занимающимися исследованиями в области магнитной левитации, стали Китай, Япония, США и Россия.

Для наглядной оценки динамики интереса к технологии магнитной левитации данные о количестве публикаций и зарегистрированных патентов объединены в единый график (Рис. 14).

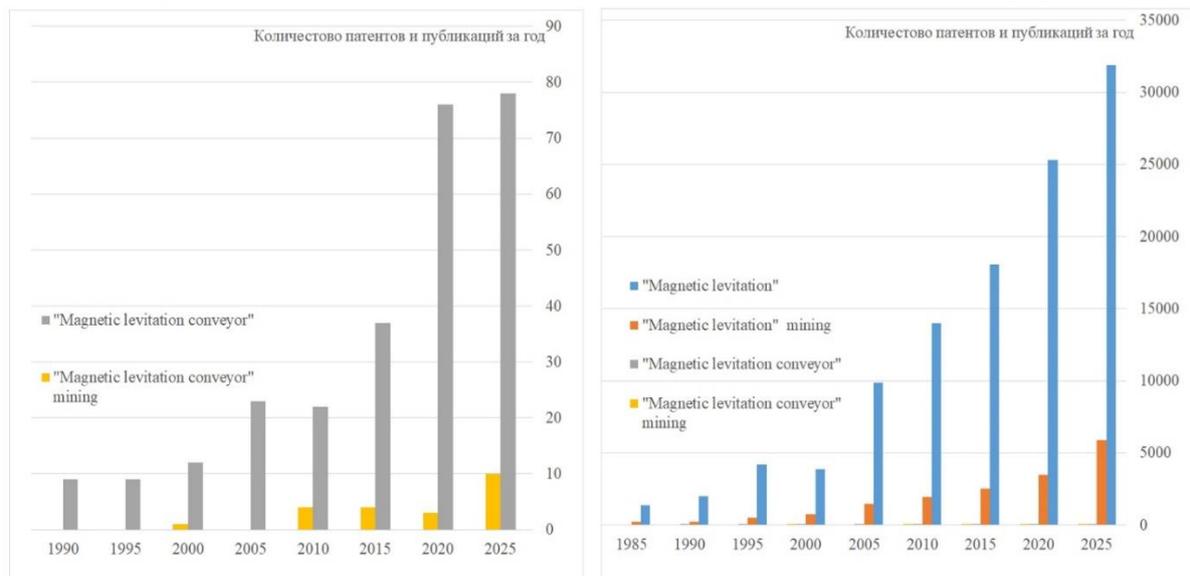


Рис. 14. Количество публикаций и патентов в период с 1985 по 2025 годы  
Fig. 14. Number of publications and patents in the period from 1985 to 2025

Рост интереса к магнитной левитации обусловлен значительными открытиями в смежных областях науки и техники. В последние десятилетия были разработаны новые марки постоянных магнитов, обладающих повышенной остаточной намагниченностью и улучшенными эксплуатационными характеристиками. Также произошел заметный прогресс в области микроконтроллеров, необходимых для точного управления системами магнитной левитации на основе электромагнитов, что сделало такие системы более доступными и эффективными. Кроме того, современные методы и программные средства для моделирования электромагнитных взаимодействий [70] позволили значительно упростить процесс проектирования и оптимизации устройств на базе технологии MagLev [71, 72]. Актуальность задач, решаемых с помощью магнитной левитации – таких, как снижение трения, повышение энергоэффективности и надежности оборудования, – также способствовала росту внимания к этой технологии со стороны научного сообщества и промышленности.

#### Закключение

Проведенное исследование современного состояния развития конвейерных систем с технологией MagLev показывает данное технологическое направление как перспективное. Технология MagLev демонстрирует преимущества перед традиционными конвейерными системами, обусловленные отсутствием провисания ленты между роликов, минимизацией трения и возможностью создания устойчивых систем перемещения грузов без физического контакта с опорными элементами.

На основе проведенного анализа установлено, что для горного дела наиболее целесообразными являются MagLev конвейеры на постоянных магнитах. Такие системы



обеспечивают стабильную левитацию без необходимости постоянного энергопотребления, что особенно важно в условиях сложной производственной среды горных предприятий. Постоянные магниты минимизируют эксплуатационные затраты. Они не требуют сложных систем управления или дополнительного оборудования для поддержания магнитного поля, исключая необходимость в охлаждении и защите. Это делает их наиболее приемлимым решением для горной промышленности.

Детальный анализ показывает, что эти ограничения могут быть преодолены за счет накопления практического опыта применения, оптимизации конструктивных решений и разработки новых материалов с улучшенными характеристиками.

Научная новизна представленного исследования заключается в систематизации существующих технологий магнитной левитации применительно к условиям горного производства и выявлении перспективных направлений их развития. Особое внимание уделяется совершенствованию систем управления, разработке новых конструктивных решений и оптимизации режимов работы оборудования. Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных данных при проектировании и внедрении современных транспортных систем в горной промышленности.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

### **Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2025-530/1).

### **Информация об авторах**

**Гордин Сергей Александрович**, аспирант, научный сотрудник научно-исследовательской лабораторий цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса  
e-mail: [gordinsa@kuzstu.ru](mailto:gordinsa@kuzstu.ru)

**Захаров Александр Юрьевич**, д.т.н., профессор кафедры горных машин и комплексов  
e-mail: [zay@kuzstu.ru](mailto:zay@kuzstu.ru)

**Захарова Алла Геннадьевна**, д.т.н., профессор кафедры электропривода и автоматизации  
e-mail: [zag.eav@kuzstu.ru](mailto:zag.eav@kuzstu.ru)

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева  
650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

**Атрушкевич Виктор Аркадьевич**, докт. техн. наук, проф., заведующий лабораторией геолого-структурного моделирования  
e-mail: [iugi@mail.ru](mailto:iugi@mail.ru)

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4.

### **Список литературы**

1. Захаров, А.Ю. Определение критической величины сопротивления вращению конвейерных роликов / Захаров, А.Ю., Ширямов, Д. А. // Горное Оборудование и Электромеханика. – 2016. – Вып. 1 (119). – С. 3–8.
2. Галкин, В. И. Ленточные конвейеры на современном этапе развития горной техники / В.И. Галкин, Е.Е. Шешко // Горный Журнал. – 2017. – Вып. 9. – С. 85–90. – DOI: 10.17580/gzh.2017.09.15.
3. The Ultimate Rotating Resistance of the Belt Conveyors Rollers / Захаров, А.Ю., Герике, Б.Л., Ширямов, Д.А. // 2018. – P. 227–230. – DOI: 10.2991/coal-18.2018.42.



4. RU 2478548 С1, РФ, МКИ В65G 15/08 . Крутонаклонный магнитофункциональный ленточный конвейер / Тарасов Ю. Д. 2013. – № 10.
5. Influence of tension force asymmetry on distribution of contact forces among the conveyor belt and idler rolls in pipe conveyor during transport of particulate solids / Molnar, V., Fedorko, G., Stehlikova, B., Paulikova, A. // Measurement. – 2015. – Vol. 63. – P. 120–127. – DOI: 10.1016/j.measurement.2014.12.014.
6. Васильев, К. А. Ленточный конвейер с подвесной лентой на ходовых опорах скольжения / Васильев, К. А., Николаев, А. К. // Journal of Mining Institute. – 2008. – Том 178. – С 35–39.
7. Fuzzy Linear Active Disturbance Rejection Control Method for Permanent Magnet Electromagnetic Hybrid Suspension Platform/ Qin, Y., [и др.]// Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, Iss. 4. – Art. 2631. – DOI: 10.3390/app13042631.
8. Захаров, А.Ю. Возможности снижения динамических нагрузок на конвейерную ленту / Захаров, А.Ю., Ерофеева, Н.В. // Горное Оборудование и Электромеханика. – 2018. – Вып. 6 (140). – С. 3–14. – DOI: 10.26730/1816-4528-2018-6-3-13.
9. Dynamic analysis of a maglev conveyor using an EM-PM hybrid magnet / Kim, K.-J., Han, H.-S., Kim, C.-H., Yang, S.-J. // Journal of electrical engineering and technology. – 2013. – Vol. 8, Iss. 6. – P. 1571–1578. – DOI: 10.5370/JEET.2013.8.6.1571.
10. Design and Testing of a Magnetically Levitated Conveyor / Fabbri, M., Ribani, P. L., Zuffa, D. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2013. – Vol. 49, Iss. 1. – P. 577–585. – DOI: 10.1109/TMAG.2012.2207401.
11. Dynamic analysis of Maglev conveyor using an EM-PM hybrid suspension / Kim, K., Han, J., Kim, C., Lee, J., Han, H. // 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. – 2011. – С. 2027–2032. – DOI: 10.1109/ICMA.2011.5986238.
12. Dynamic Simulation of the Novel XLEV Magnetically Levitated Conveyor Vehicle / Goethem, J. V., Henneberger, G. // LDIA. – 2008. – С. 7.
13. Load characteristics of a magnetically levitated system with hybrid magnets / Takata, K., [и др.] // 2017 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LIDA). – 2017. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/LIDA.2017.8097271.
14. Modelling EMS Maglev systems to develop control algorithms / Amoskov, V. [и др.] // Cybernetics and Physics. – 2018. – Vol. 7, Iss. 1. – P. 11–17. – DOI: 10.35470/2226-4116-2018-7-1-11-17.
15. Study on Magnetically Levitated Conveying System Using Hybrid-Magnetized High-Tc Superconductors / Maruo, R., Inoue, A., Okano, M., Komori, M. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2008. – Vol. 18, Iss. 2. – P. 820–823. – DOI: 10.1109/TASC.2008.921975.
16. Review of maglev train technologies / Lee, H. [и др.] // IEEE Transactions on Magnetics. – 2006. – Vol. 42, Iss. 7. – P. 1917–1925. – DOI: 10.1109/TMAG.2006.875842.
17. Basic Study on Magnetically Levitated Conveyor System Using Field-Cooling Magnetization and Pulse-Field Magnetization / Miyatake, Y., Komori, M. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2011. – Vol. 21, Iss. 3. – P. 1507–1510. – DOI: 10.1109/TASC.2011.2109050.
18. Trial Application of Pulse-Field Magnetization to Magnetically Levitated Conveyor System / Miyatake, Y., Komori, M., Asami, K., Sakai, N. // Advances in Condensed Matter Physics. – 2012. – Vol. 2012. – P. 8. – DOI: 10.1155/2012/561657.
19. Захаров А. Ю. Системы магнитного подвеса в ленточных конвейерах для транспортирования крупнокусковой горной массы : дис. - док. тех. наук. / А. Ю. Захаров. – Кемерово, 2001. – 41 с.
20. RU 2739939 С1, РФ, МКИ H01F 7/00 (2020.08). Гибридный электромагнит для системы маглев / Амосков В. М. [и др.] – 2020. – № 14.
21. Analysis and experimental research on air gap characteristics of permanent magnet low-resistance belt conveyor / Wang, S., Hu, K., Li, D. // IET Science, Measurement & Technology. – 2018. – Vol. 12, Iss. 4. – P. 395–402. – DOI: 10.1049/iet-smt.2017.0269.
22. Influence of Lateral-Impact Force on Electropermanent Magnet Suspension Conveyor With Inherent Guidance Force / Shin, H.-J., Choi, J.-Y., Jung, K.-H., Lee, J.-M., Kim, C.-H. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2016. – Vol. 52, Iss. 7. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/TMAG.2016.2514298.
23. A state observer for sensorless control of magnetic levitation systems / Bobtsov, A., Pyrkin, A., Ortega, R., Vedyakov, A. // Automatica. – 2018. – Vol. 97. – P. 263–270. – DOI: 10.1016/j.automatica.2018.08.004.
24. Comparative Study of Magnetic Levitation Models / Raut, N. K., Miller, J., Chiao, R. Y., Sharping, J. E. // Journal of Nepal Physical Society. – 2022. – Vol. 8, Iss. 2. – P. 37–41. – DOI: 10.3126/jnphys.v8i2.50147.
25. Optimization and Design of the Permanent Magnet Guideway With the High Temperature Superconductor / Song, H., Zheng, J., Liu, M., Zhang, L., Lu, Y. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2006. – Vol. 16, Iss. 2. – P. 1023–1026. – DOI: 10.1109/TASC.2006.871307.
26. Development of a Conveyor Cart with Magnetic Levitation Mechanism Based on Multi Control Strategies / Tang, X., Hashimoto, S., Kurita, N., Kawaguchi, T., Ogiwara, E., Hishinuma, N., Egura, K. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, Iss. 19. – Art. 10846. – DOI: 10.3390/app131910846.



27. On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether / Earnshaw, S. // Transactions of the Cambridge Philosophical Society. – 1848. – Vol. 7. – P. 97.
28. DE 643316 C, Германия. Suspension railway with wheelless vehicles that are guided floating along iron rails by means of magnetic fields / Hermann Kemper Dipling. – 1937.
29. SU 208518 A1, СССР. Конвейерная лента / Штокман, И. Г. [и др.] – 1966.
30. GB 1292959 A, Великобритания. Improvements relating to magnetic support / Heller, W. C., Brooke, T. A., Folkes, H. L. – 1972.
31. Штокман, И. Г. Основы создания магнитных транспортных установок. – Москва : Недра, 1972. – 191 с.
32. US 4805761 A, США. Magnetic conveyor system for transporting wafers / Totsch, J. W. – 1989.
33. Magnetic Levitation Transport of Mining Products / Geraghty, J. J., Wright, W. E., Lombardi, J. A. // Report of Investigations 9555. – United States Bureau of Mines, 1995.
34. US 5398804 A, США. Curved conveyor belt with supporting frame devoid of belt band rollers / Ecker, R., Lintermann, J., Buderath, F. – 1995.
35. Experiments and Simulations of the Secondary Suspension System to Improve the Dynamic Characteristics of HTS Maglev / Li, H., Deng, Z., Huang, H., Liao, H., Yuan, Y., Zhang, W. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2021. – Vol. 31, Iss. 6. – P. 1–8. – DOI: 10.1109/TASC.2021.3088447.
36. Yan, L. Suggestion for selection of Maglev option for Beijing-Shanghai high-speed line // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2004. – Vol. 14, Iss. 2. – P. 936–939. – DOI: 10.1109/TASC.2004.830324.
37. Numerical Simulation and Parameter Identification of Dynamic Levitation Force of HTS Pinning Maglev for Engineering Application / Huang, H., Deng, Z., Zhang, X., Cheng, Y., Hong, Y., Li, H. // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2021. – Vol. 34. – P. 2753–2760. – DOI: 10.1007/s10948-021-06042-2.
38. Fan, Z., Feasibility Analysis of Vacuum Pipeline Magnetic Levitation Energy Storage System Based on Existing Magnetic Levitation Transportation Technology / Fan, Z., Yang, J., Xu, H. // E3S Web of Conferences. – 2022. – Vol. 358. – Art. 01041. – DOI: 10.1051/e3sconf/202235801041.
39. Lu, Y., Magnetic Force Investigation of High-Tc Superconducting Bulk over Permanent Magnet Railway under Different Lateral Offsets with Experimental Methods / Lu, Y., He, D., Liu, M. // Journal of Modern Physics. – 2013. – Vol. 4, Iss. 6. – P. 24–28. – DOI: 10.4236/jmp.2013.46A006.
40. Salman, A. Position Sensorless and Energy-efficient Electromagnetic Levitation for Translational Motion Conveyor System – Smart use of high frequency switching noise : Master's Thesis / A. Salman. – The University of Tokyo, 2016. – P. 89.
41. Hyung-Suk, H., Dong-Sung, K. Magnetic Levitation: Maglev Technology and Applications. – Springer, 2016. – 256 с. – ISBN 978-94-017-7522-9.
42. Side-suspended High-Tc Superconducting Maglev Prototype Vehicle Running at a High Speed in an Evacuated Circular Test Track / Zhou, D., Zhao, L., Cui, C., Zhang, Y., Guo, J., Zhao, Y. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 871, Iss. 1. – Art. 012092. – DOI: 10.1088/1740-6296/871/1/012092.
43. Experimental development of levitation control for a high-accuracy magnetic levitation transport system / Kim, J., Na, C.-W., King, G. B., Kim, C.-H. // ISA Transactions. – 2020. – Vol. 101. – P. 358–365. – DOI: 10.1016/j.isatra.2020.01.026.
44. A new conveyor system based on a passive magnetic levitation unit having repulsive-type magnetic bearings / Ohji, T., Ichiyama, S., Amei, K., Sakui, M., Yamada, S. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2004. – Vol. 272–276. – P. E1731–E1733. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2003.12.984.
45. RU 195137 U1, РФ. Приводной барабан ленточного конвейера на магнитных опорах вращения / Агафонов, Ф. Н., Чернов, К. П. – 2020.
46. New technology for large scale electromagnetic levitation melting of metals / Spittans, S., Baake, E., Nacke, B., Jakovics, A. // Magnetohydrodynamics. – 2015. – Vol. 51, Iss. 1. – P. 12. – DOI: 10.22364/mhd.51.1.12.
47. Research on the Suspension Force Model for the Large-Air-Gap Permanent-Magnet Suspension Belt Conveyor / Wang, Z., Pu, J. // 2021 3rd International Conference on Applied Machine Learning (ICAML). – 2021. – P. 356–361. – DOI: 10.1109/ICAML54311.2021.00082.
48. Design and testing of a magnetic suspension for a 90° horizontal bend conveyor / Fabbri, M., Ribani, P. L., Zuffa, D. // COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2015. – Vol. 34, Iss. 1. – P. 380–396. – DOI: 10.1108/COMPEL-02-2014-0049.
49. Zakharov, A. Yu. Enhancement of Efficiency of the Magnetic Suspension of Belt Conveyor / Zakharov, A. Yu., Chepikov, P. V. // Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety. – Kemerovo, Russia, 10–12 October 2016. – P. 229–232.



50. Теория и практика использования магнитных полей для предохранения конвейерных лент : монография / А. Ю. Захаров ; КузГТУ. – Кемерово, 2000. – 155 с.
51. Пешков, С. В. Обоснование параметров магнитных элементов, встроенных в ленту конвейера : дис. кан. тех. наук / С. В. Пешков. – Кемерово, 2009. – 18 с.
52. Characteristics of magnetically levitated conveyor system with permanent magnets / Hiroshi, Y., Kazuya, K., Masatsugo, Y., Yasushi, T. // Proceedings of the Japan Society of Mechanical Engineers. – 1989. – Vol. 55, Iss. 519. – P. 2731–2739. – DOI: 10.1299/kikaic.55.2731.
53. Komori, M. Basic study of a magnetically levitated conveyor using superconducting magnetic levitation / Komori, M., Kamogawa, G. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, Iss. 2. – P. 2238–2241. – DOI: 10.1109/TASC.2005.849620.
54. Miyatake, Y. Basic Study on Magnetically Levitated Conveyor System Using Field-Cooling Magnetization and Pulse-Field Magnetization / Miyatake, Y., Komori, M. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2011. – Vol. 21, Iss. 3. – P. 1507–1510. – DOI: 10.1109/TASC.2011.2109050.
55. CN 103449096 A, КНР. Hybrid Belt Conveyor with Electromagnetic and Permanent Magnet / Lin, Z., Xiao, H. – 2013.
56. Magnetic Levitation Belt Conveyor Control System Based on Multi-Sensor Fusion / Hu, K., Jiang, H., Zhu, Q., Qian, W., Yang, J. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, Iss. 13. – Art. 7513. – DOI: 10.3390/app13137513.
57. System integration of a non-contact conveyor using magnetic levitation technology / Han, H., Kim, C.-H., Lee, J.-M., Lee, C.-W. // 2011 IEEE International Conference on Mechatronics. – 2011. – P. 708–712.
58. Dynamic Analysis of a Maglev Conveyor Using an EM-PM Hybrid Magnet / Kim, K.-J., Han, H.-S., Kim, C.-H., Yang, S.-J. // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 8, Iss. 6. – P. 1571–1578. – DOI: 10.5370/JEET.2013.8.6.1571.
59. Analysis of Lateral Force and Deviation of Permanent Magnetic Belt Conveyor / Hu, K., Shuang, W., Guo, Y., Li, D. // Journal of System Simulation. – 2020. – Vol. 28, Iss. 5. – P. 1173–1178.
60. CN 101987692 A, China. Magnetic suspension belt conveyor / Fan, R. D., Gao, J. L., Wang, Z. B., Jiang, J., Li, W. P. – 2011.
61. Optimization on detent force characteristics of the permanent magnet suspension belt conveyor / Wang, Z., Hu, K., Guo, Y., Wang, S. // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 10, Iss. 5. – P. 1–10. – DOI: 10.1177/1687814018778186.
62. Magnetic Belt Conveyor Running Stability Analysis / Cheng, G., Guo, Y. C., Hu, K., Wang, P. Y. // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 437. – P. 682–685. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.437.682.
63. Research on Magnetic Model of Low Resistance Permanent Magnet Pipe Conveyor / Wang, S., Li, D.-y., Guo, Y.-c. // 3DR express. – 2016. – Vol. 7, Iss. 3. – Art. 23. – DOI: 10.1007/s13319-016-0100-0.
64. Permanent Maglev Platform Using a Variable Flux Path Mechanism: Stable Levitation and Motion Control / Sun, F., Pei, W., Zhao, C., Jin, J., Xu, F., Zhang, X. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2022. – Vol. 58, Iss. 7. – P. 1–10. – DOI: 10.1109/TMAG.2022.3174452.
65. On the limits of uniaxial magnetic anisotropy tuning by a ripple surface pattern / Arranz, M. A., Colino, J. M., Palomares, F. J. // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 115, Iss. 18. – Art. 183906. – DOI: 10.1063/1.4876232.
66. Demagnetization Analysis of Mechanical Manipulation on Permanent Magnets / Ribeiro, M., Martins, L., Ortner, M. // 2018 UKSim-AMSS 20th International Conference on Computer Modelling and Simulation. – 2018. – P. 169–174. – DOI: 10.1109/UKSim.2018.00041.
67. Design and Analysis of Guidance Function of Permanent Magnet Electrodynamics Suspension / Xiang, Y., Deng, Z., Shi, H., Li, K., Cao, T., Deng, B., Liang, L., Zheng, J. // Technologies. – 2023. – Vol. 11, Iss. 3. – Art. 1101003. – DOI: 10.3390/technologies1101003.
68. Protection Method of Traction Power Supply System for Low and Medium Speed Maglev Traffic Based on Fault Traveling Wave Features / Yan, N., Wang, J., Li, Q. // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2023. – Vol. 17, Iss. 5. – DOI: 10.1049/gtd2.13028.
69. Survey on Air Levitation Conveyors with Possible Scalability Properties / Zhu, L., El-Baz, D., Ning, H. // 2015 IEEE 12th Intl Conf on Ubiquitous Intelligence and Computing and 2015 IEEE 12th Intl Conf on Autonomic and Trusted Computing and 2015 IEEE 15th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops (UIC-ATC-ScalCom). – 2015. – P. 802–807. – DOI: 10.1109/UIC-ATC-ScalCom-CBDCoN.2015.73
70. Analysis and Optimization of Permanent Magnet Dimensions in Electrodynamics Suspension Systems / Hasanazadeh, S., Rezaei, H., Qiyassi, E. // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 13, Iss. 1. – P. 307–314. – DOI: 10.5370/JEET.2018.13.1.307.



71. Repulsive forces of highly coercive permanent magnets in magnetic clutches and plane magnetic systems / Krasil'nikov, A. Ya., Krasil'nikov, A. A. // Russian Engineering Research. – 2013. – Vol. 33, Iss. 4. – P. 194–196. – DOI: 10.3103/S1068798X13040114.
72. Modelling and Analysis of Permanent Magnet Electrodynamics Suspension Systems / Rezaei, H., Vaez-Zadeh, S. // Progress In Electromagnetics Research. – 2014. – Vol. 36. – P. 77–84. – DOI: 10.2528/PIERM14032407.

## PROSPECTS FOR CREATING A CONVEYOR FOR THE MINING INDUSTRY WITH MAGNETIC LEAVING BELTS

Sergei A. Gordin<sup>1</sup>, Alexander Y. Zakharov<sup>1</sup>, Alla G. Zakharova<sup>1</sup>, Victor A. Atrushkevich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

<sup>2</sup>Institute of Complex Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences



### Article info

Received:  
02 October 2024

Revised:  
05 May 2025

Accepted:  
19 May 2025

**Keywords:** belt conveyor,  
magnetic suspension, belt,  
MagLev magnetic levitation  
system, permanent magnets

### Abstract.

The purpose of this study is to evaluate the potential of magnetic levitation (MagLev) systems, with a focus on their ability to reduce motion resistance, increase service life, and improve energy efficiency. The review is based on an analysis of scientific and technical literature and patents, including research on the basic principles of magnetic levitation, technology development, technical characteristics, and types of magnetic levitation systems. The prospects for the use of magnetic levitation conveyors to improve the efficiency of transport technologies for transporting rock mass are analyzed. The problems of wear and tear on transport equipment, limited speed and productivity, as well as the disadvantages of traditional conveyors operated in mining conditions are considered.

It is shown that there are currently many directions for creating levitation for belt conveyors. It has been found that the most promising for the mining industry are systems based on permanent magnets, combining zero energy consumption, the ability to influence the configuration of the magnetic field, and resistance to external influences. The main conclusions confirm that the introduction of MagLev conveyors will significantly improve the reliability, safety, and economic efficiency of cargo transportation, but this direction requires further research to overcome technical and economic barriers.

---

**For citation** Gordin S.A., Zakharov A.Y., Zakharova A.G., Atrushkevich V.A. Prospects for creating a conveyor for the mining industry with magnetic leaving belts. *Journal of mining and geotechnical engineering*. 2025;2(29):40-62. DOI: 10.26730/2618-7434-2025-2-40-62, EDN: XJHRVO

---

### References

1. Zakharov, A.Yu. Determination of the critical value of resistance to rotation of conveyor rollers / Zakharov, A.Yu., Shiryamov, D.A. // Mining Equipment and Electromechanics. – 2016. – Issue 1 (119). – Pp. 3–8.
2. Galkin, V.I. Belt conveyors at the current stage of mining technology development / Galkin, V.I., Sheshko, E.E. // Mining Journal. – 2017. – Issue 9. – Pp. 85–90. – DOI: 10.17580/gzh.2017.09.15.
3. The Ultimate Rotating Resistance of the Belt Conveyors Rollers / Zakharov, A.Yu., Gerike, B.L., Shiryamov, D.A. // 2018. – P. 227–230. – DOI: 10.2991/coal-18.2018.42.
4. RU 2478548 C1, RF, MKI B65G 15/08 . Steeply inclined magnetic belt conveyor / Tarasov Yu. D. 2013. – No. 10.
5. Influence of tension force asymmetry on distribution of contact forces among the conveyor belt and idler rolls in pipe conveyor during transport of particulate solids / Molnar, V., Fedorko, G., Stehlikova, B., Paulikova, A. // Measurement. – 2015. – Vol. 63. – P. 120–127. – DOI: 10.1016/j.measurement.2014.12.014.



6. Vasilyev, K. A. Belt conveyor with a suspended belt on sliding running supports / Vasilyev, K. A., Nikolaev, A. K. // *Journal of Mining Institute*. – 2008. – Vol. 178. – P. 35–39.
7. Fuzzy Linear Active Disturbance Rejection Control Method for Permanent Magnet Electromagnetic Hybrid Suspension Platform/ Qin, Y., [et al.]// *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, Iss. 4. – Art. 2631. – DOI: 10.3390/app13042631.
8. Zakharov, A. Yu. Possibilities for reducing dynamic loads on conveyor belts / Zakharov, A. Yu., Erofeeva, N. V. // *Mining Equipment and Electromechanics*. – 2018. – Issue 6 (140). – Pp. 3–14. – DOI: 10.26730/1816-4528-2018-6-3-13.
9. Dynamic analysis of a maglev conveyor using an EM-PM hybrid magnet / Kim, K.-J., Han, H.-S., Kim, C.-H., Yang, S.-J. // *Journal of Electrical Engineering and Technology*. – 2013. – Vol. 8, Iss. 6. – P. 1571–1578. – DOI: 10.5370/JEET.2013.8.6.1571.
10. Design and Testing of a Magnetically Levitated Conveyor / Fabbri, M., Ribani, P. L., Zuffa, D. // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2013. – Vol. 49, Iss. 1. – P. 577–585. – DOI: 10.1109/TMAG.2012.2207401.
11. Dynamic analysis of Maglev conveyor using an EM-PM hybrid suspension / Kim, K., Han, J., Kim, C., Lee, J., Han, H. // *2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. – 2011. – P. 2027–2032. – DOI: 10.1109/ICMA.2011.5986238.
12. Dynamic Simulation of the Novel XLEV Magnetically Levitated Conveyor Vehicle / Goethem, J. V., Henneberger, G. // *LDIA*. – 2008. – P. 7.
13. Load characteristics of a magnetically levitated system with hybrid magnets / Takata, K., [et al.] // *2017 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LIDA)*. – 2017. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/LIDA.2017.8097271.
14. Modeling EMS Maglev systems to develop control algorithms / Amoskov, V. [et al.] // *Cybernetics and Physics*. – 2018. – Vol. 7, Iss. 1. – P. 11–17. – DOI: 10.35470/2226-4116-2018-7-1-11-17.
15. Investigation of a maglev transportation system using hybrid magnetized superconductors with high T<sub>c</sub> / Maruo R., Inoue A., Okano M., Komori M. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. - 2008. - Vol. 18, Iss. 2. - P. 820-823. - DOI: 10.1109/TASC.2008.921975.
16. Review of maglev train technologies / Lee, H. [et al.] // *IEEE Transactions on Magnetics*. - 2006. - Vol. 42, Iss. 7. - P. 1917-1925. - DOI: 10.1109/TMAG.2006.875842.
17. Basic study of a magnetically levitated conveyor system using field magnetization and pulse field magnetization / Miyatake, Y., Komori, M. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. - 2011. - Vol. 21, Iss. 3. - P. 1507-1510. - DOI: 10.1109/TASC.2011.2109050.
18. Trial application of pulse field magnetization for a magnetically levitated conveyor system / Miyatake, Y., Komori, M., Asami, K., Sakai, N. // *Advances in Condensed Matter Physics*. - 2012. - Vol. 2012. - P. 8. - DOI: 10.1155/2012/561657.
19. Zakharov, A. Yu. Magnetic suspension systems in belt conveyors for transporting large-piece rock mass: dissertation. - Doctor of Technical Sciences. / A. Yu. Zakharov. - Kemerovo, 2001. - 41 p.
20. RU 2739939 C1, RF, MKI H01F 7/00 (2020.08). Hybrid electromagnet for a maglev system / Amoskov V. M. [et al.] - 2020. - No. 14.
21. Analysis and experimental research on air gap characteristics of permanent magnet low-resistance belt conveyor / Wang, S., Hu, K., Li, D. // *IET Science, Measurement & Technology*. – 2018. – Vol. 12, Iss. 4. – P. 395–402. – DOI: 10.1049/iet-smt.2017.0269.
22. Influence of lateral impact force on a suspended conveyor with permanent magnets and inherent guiding force / Shin, H.-J., Choi, J.-Y., Jung, K.-H., Lee, J.-M., Kim, C.-H. // *IEEE Transactions on Magnetics*. - 2016. - Vol. 52, Iss. 7. - P. 1-4. - DOI: 10.1109/TMAG.2016.2514298.
23. State observer for sensorless control of magnetic levitation systems / Bobtsov A., Pyrkin A., Ortega R., Vedyakov A. // *Automatica*. - 2018. - Vol. 97. - P. 263-270. - DOI: 10.1016/j.automatica.2018.08.004.
24. Comparative study of magnetic levitation models / Raut, N. K., Miller, J., Chiao, R. Y., Sharping, J. E. // *Journal of Nepal Physical Society*. - 2022. - Vol. 8, Iss. 2. - P. 37-41. - DOI: 10.3126/jnphys.v8i2.50147.
25. Optimization and design of a permanent magnet guide with a high-temperature superconductor / Song, H., Zheng, J., Liu, M., Zhang, L., Lu, Y. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. - 2006. - Vol. 16, Iss. 2. - P. 1023-1026. - DOI: 10.1109/TASC.2006.871307.
26. Development of a conveyor trolley with a magnetic levitation mechanism based on several control strategies / Tang X., Hashimoto S., Kurita N., Kawaguchi T., Ogihara E., Hishinuma N., Egura K. // *Applied Sciences*. - 2023. - Vol. 13, Iss. 19. - Art. 10846. - DOI: 10.3390/app131910846.
27. On the nature of molecular forces regulating the constitution of luminous ether / Earnshaw, S. // *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*. - 1848. - Vol. 7. - P. 97.



28. DE 643316 C, Germany. Suspension railway with wheel-less vehicles that are guided floating along iron rails by means of magnetic fields / Hermann Kemper Dipling. – 1937.
29. SU 208518 A1, USSR. Conveyor belt / Shtokman, I. G. [et al.] – 1966.
30. GB 1292959 A, United Kingdom. Improvements relating to magnetic support / Heller, W. C., Brooke, T. A., Folkes, H. L. – 1972.
31. Shtokman, I. G. Fundamentals of creating magnetic transport installations. – Moscow: Nedra, 1972. – 191 p.
32. US 4805761 A, USA. Magnetic conveyor system for transporting wafers / Totsch, J. W. – 1989.
33. Magnetic Levitation Transport of Mining Products / Geraghty, J. J., Wright, W. E., Lombardi, J. A. // Report of Investigations 9555. – United States Bureau of Mines, 1995.
34. US 5398804 A, USA. Curved conveyor belt with supporting frame devoid of belt band rollers / Ecker, R., Lintermann, J., Buderath, F. – 1995.
35. Experiments and Simulations of the Secondary Suspension System to Improve the Dynamic Characteristics of HTS Maglev / Li, H., Deng, Z., Huang, H., Liao, H., Yuan, Y., Zhang, W. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2021. – Vol. 31, Iss. 6. – P. 1–8. – DOI: 10.1109/TASC.2021.3088447.
36. Yan, L. Suggestion for selection of Maglev option for Beijing-Shanghai high-speed line // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2004. – Vol. 14, Iss. 2. – P. 936–939. – DOI: 10.1109/TASC.2004.830324.
37. Numerical Simulation and Parameter Identification of Dynamic Levitation Force of HTS Pinning Maglev for Engineering Application / Huang, H., Deng, Z., Zhang, X., Cheng, Y., Hong, Y., Li, H. // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2021. – Vol. 34. – P. 2753–2760. – DOI: 10.1007/s10948-021-06042-2.
38. Fan, Z., Feasibility Analysis of Vacuum Pipeline Magnetic Levitation Energy Storage System Based on Existing Magnetic Levitation Transportation Technology / Fan, Z., Yang, J., Xu, H. // E3S Web of Conferences. – 2022. – Vol. 358. – Art. 01041. – DOI: 10.1051/e3sconf/202235801041.
39. Lu, Y., Magnetic Force Investigation of High-Tc Superconducting Bulk over Permanent Magnet Railway under Different Lateral Offsets with Experimental Methods / Lu, Y., He, D., Liu, M. // Journal of Modern Physics. – 2013. – Vol. 4, Iss. 6. – P. 24–28. – DOI: 10.4236/jmp.2013.46A006.
40. Salman, A. Position Sensorless and Energy-efficient Electromagnetic Levitation for Translational Motion Conveyor System – Smart use of high frequency switching noise : Master's Thesis / A. Salman. – The University of Tokyo, 2016. – P. 89.
41. Hyung-Suk, H., Dong-Sung, K. Magnetic Levitation: Maglev Technology and Applications. – Springer, 2016. – 256 p. – ISBN 978-94-017-7522-9.
42. Side-suspended High-Tc Superconducting Maglev Prototype Vehicle Running at a High Speed in an Evacuated Circular Test Track / Zhou, D., Zhao, L., Cui, C., Zhang, Y., Guo, J., Zhao, Y. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 871, Iss. 1. – Art. 012092. – DOI: 10.1088/1740-6296/871/1/012092.
43. Experimental development of levitation control for a high-accuracy magnetic levitation transport system / Kim, J., Na, C.-W., King, G. B., Kim, C.-H. // ISA Transactions. – 2020. – Vol. 101. – P. 358–365. – DOI: 10.1016/j.isatra.2020.01.026.
44. A new conveyor system based on a passive magnetic levitation unit having repulsive-type magnetic bearings / Ohji, T., Ichiyama, S., Amei, K., Sakui, M., Yamada, S. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2004. – Vol. 272–276. – P. E1731–E1733. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2003.12.984.
45. RU 195137 U1, Russian Federation. Drive drum of a belt conveyor on magnetic rotation supports / Agafonov, F. N., Chernov, K. P. – 2020.
46. New technology for large scale electromagnetic levitation melting of metals / Spittans, S., Baake, E., Nacke, B., Jakovics, A. // Magnetohydrodynamics. – 2015. – Vol. 51, Iss. 1. – P. 12. – DOI: 10.22364/mhd.51.1.12.
47. Research on the Suspension Force Model for the Large-Air-Gap Permanent-Magnet Suspension Belt Conveyor / Wang, Z., Pu, J. // 2021 3rd International Conference on Applied Machine Learning (ICAML). – 2021. – P. 356–361. – DOI: 10.1109/ICAML54311.2021.00082.
48. Design and testing of a magnetic suspension for a 90° horizontal bend conveyor / Fabbri, M., Ribani, P. L., Zuffa, D. // COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2015. – Vol. 34, Iss. 1. – P. 380–396. – DOI: 10.1108/COMPEL-02-2014-0049.
49. Zakharov, A. Yu. Enhancement of Efficiency of the Magnetic Suspension of Belt Conveyor / Zakharov, A. Yu., Chepikov, P. V. // Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety. – Kemerovo, Russia, 10–12 October 2016. – P. 229–232.



50. Theory and practice of using magnetic fields to protect conveyor belts: monograph / A. Yu. Zakharov; KuzGTU. – Kemerovo, 2000. – 155 p.
51. Peshkov, S. V. Justification of the parameters of magnetic elements built into the conveyor belt: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / S. V. Peshkov. – Kemerovo, 2009. – 18 p.
52. Characteristics of magnetically levitated conveyor system with permanent magnets / Hiroshi, Y., Kazuya, K., Masatsugo, Y., Yasushi, T. // Proceedings of the Japan Society of Mechanical Engineers. – 1989. – Vol. 55, Iss. 519. – P. 2731–2739. – DOI: 10.1299/kikaic.55.2731.
53. Komori, M. Basic study of a magnetically levitated conveyor using superconducting magnetic levitation / Komori, M., Kamogawa, G. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, Iss. 2. – P. 2238–2241. – DOI: 10.1109/TASC.2005.849620.
54. Miyatake, Y. Basic Study on Magnetically Levitated Conveyor System Using Field-Cooling Magnetization and Pulse-Field Magnetization / Miyatake, Y., Komori, M. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2011. – Vol. 21, Iss. 3. – P. 1507–1510. – DOI: 10.1109/TASC.2011.2109050.
55. CN 103449096 A, KHP. Hybrid Belt Conveyor with Electromagnetic and Permanent Magnet / Lin, Z., Xiao, H. – 2013.
56. Magnetic Levitation Belt Conveyor Control System Based on Multi-Sensor Fusion / Hu, K., Jiang, H., Zhu, Q., Qian, W., Yang, J. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, Iss. 13. – Art. 7513. – DOI: 10.3390/app13137513.
57. System integration of a non-contact conveyor using magnetic levitation technology / Han, H., Kim, C.-H., Lee, J.-M., Lee, C.-W. // 2011 IEEE International Conference on Mechatronics. – 2011. – P. 708–712.
58. Dynamic Analysis of a Maglev Conveyor Using an EM-PM Hybrid Magnet / Kim, K.-J., Han, H.-S., Kim, C.-H., Yang, S.-J. // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 8, Iss. 6. – P. 1571–1578. – DOI: 10.5370/JEET.2013.8.6.1571.
59. Analysis of Lateral Force and Deviation of Permanent Magnetic Belt Conveyor / Hu, K., Shuang, W., Guo, Y., Li, D. // Journal of System Simulation. – 2020. – Vol. 28, Iss. 5. – P. 1173–1178.
60. CN 101987692 A, China. Magnetic suspension belt conveyor / Fan, R. D., Gao, J. L., et al. – 2011.
61. Optimization on detent force characteristics of the permanent magnet suspension belt conveyor / Wang, Z., Hu, K., Guo, Y., Wang, S. // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 10, Iss. 5. – P. 1–10.
62. Magnetic Belt Conveyor Running Stability Analysis / Cheng, G., Guo, Y. C., Hu, K., Wang, P. Y. // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 437. – P. 682–685. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.437.682
63. Research on Magnetic Model of Low Resistance Permanent Magnet Pipe Conveyor / Wang, S., Li, D.-y., Guo, Y.-c. // 3DR express. – 2016. – Vol. 7, Iss. 3. – Art. 23. – DOI: 10.1007/s13319-016-0100-0.
64. Permanent Maglev Platform Using a Variable Flux Path Mechanism: Stable Levitation and Motion Control / Sun, F., Pei, W., Zhao, C., Jin, J., Xu, F., Zhang, X. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2022. – Vol. 58, Iss. 7. – P. 1–10. – DOI: 10.1109/TMAG.2022.3174452.
65. On the limits of uniaxial magnetic anisotropy tuning by a ripple surface pattern / Arranz, M. A., Colino, J. M., Palomares, F. J. // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 115, Iss. 18. – Art. 183906. – DOI: 10.1063/1.4876232.
66. Demagnetization Analysis of Mechanical Manipulation on Permanent Magnets / Ribeiro, M., Martins, L., Ortner, M. // 2018 UKSim-AMSS 20th International Conference on Computer Modelling and Simulation. – 2018. – P. 169–174. – DOI: 10.1109/UKSim.2018.00041.
67. Design and Analysis of Guidance Function of Permanent Magnet Electrodynamic Suspension / Xiang, Y., Deng, Z., Shi, H., Li, K., Cao, T., Deng, B., Liang, L., Zheng, J. // Technologies. – 2023. – Vol. 11, Iss. 3. – Art. 1101003. – DOI: 10.3390/technologies1101003.
68. Protection Method of Traction Power Supply System for Low and Medium Speed Maglev Traffic Based on Fault Traveling Wave Features / Yan, N., Wang, J., Li, Q. // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2023. – Vol. 17, Iss. 5. – DOI: 10.1049/gtd2.13028.
69. Survey on Air Levitation Conveyors with Possible Scalability Properties / Zhu, L., El-Baz, D., Ning, H. // UIC-ATC-ScalCom. – 2015. – P. 802–807. – DOI: 10.1109/UIC-ATC-ScalCom-CBDCoN.2015.73
70. Analysis and Optimization of Permanent Magnet Dimensions in Electrodynamic Suspension Systems / Hasanazadeh, S., Rezaei, H., Qiyassi, E. // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 13, Iss. 1. – P. 307–314. – DOI: 10.5370/JEET.2018.13.1.307.
71. Repulsive forces of highly coercive permanent magnets in magnetic clutches and plane magnetic systems / Krasil'nikov, A. Ya., Krasil'nikov, A. A. // Russian Engineering Research. – 2013. – Vol. 33, Iss. 4. – P. 194–196. – DOI: 10.3103/S1068798X13040114.



72. Modelling and Analysis of Permanent Magnet Electrodynamics Suspension Systems / Rezaei, H., Vaez-Zadeh, S. // Progress In Electromagnetics Research. – 2014. – Vol. 36. – P. 77–84.

### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### Information about the authors

**Sergey A. Gordin**, postgraduate student  
e-mail: [gordinsa@kuzstu.ru](mailto:gordinsa@kuzstu.ru)

**Alexander Y. Zakharov**, D.Sc. (Tech.), Professor  
e-mail: [zay@kuzstu.ru](mailto:zay@kuzstu.ru)

**Alla G. Zakharova**, D.Sc. (Tech.), Professor  
e-mail: [zag.eav@kuzstu.ru](mailto:zag.eav@kuzstu.ru)

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Victor A. Atrushkevich**, Dr.Sc. (Tech.), Professor, Head of the Laboratory of Geological and Structural Modeling  
e-mail: [iugi@mail.ru](mailto:iugi@mail.ru)

Institute of Complex Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, 4 Kryukovsky tupik, Moscow, 111020, Russian Federation

