

Магнитолевитационные транспортные системы шестого поколения: основы сверхпроводящей левитации и перспективы развития



Д. О. Шкондин,
студент Санкт-Петербургского
политехнического
университета Петра
Великого

Магнитная левитация представляет собой радикальную инновацию в наземном транспорте, знаменуя переход от механики трения к управлению силами электромагнитного поля. Переход к маглев-технологиям шестого поколения связан с качественными изменениями не только в транспортной сфере, но и в смежных промышленных отраслях.

Современные коммерческие магнитолевитационные системы, такие как шанхайский «Трансрапид» на основе электромагнитной подвески и японский L0 Series на электродинамической подвеске с низкотемпературными сверхпроводниками, относятся к четвертому и пятому технологическим поколениям [1, 2].

В России исследования в области магнитолевитационного транспорта проводились рядом научных школ: коллективом под руководством А. А. Зайцева [3, 4], Ю. Ф. Антонова [5], Л. К. Ковалева [6], а также группами в МГТУ им. Н. Э. Баумана (Н. А. Нижельский) и в Челябинске (С. В. фон Гратовски, В. Г. Шавров, Д. А. Карпухин). Эти работы заложили основу для отечественных подходов к сверхпроводящим магнитным подвескам и вакуумному транспорту.

Несмотря на достигнутые рекордные скорости, существующие системы сталкиваются с фундаментальными ограничениями: высокое энергопотребление для активной стабилизации зазора, значительные затраты на криогенику и экспоненциальный рост аэродинамического сопротивления с увеличением скорости.

Шестое поколение отличается переходом на новые архитектурные и физические принципы. Его основу составляет триада технологий:

- применение высокотемпературных сверхпроводников второго рода для создания пассивно-устойчивых левитационных контуров на основе эффекта пиннинга вихрей магнитного потока,

что устраняет необходимость в сложных системах активного контроля;

- интеграция с замкнутыми низковакуумными аэродинамическими коридорами для минимизации сопротивления среды;

- использование распределенных систем интеллектуального управления на базе искусственного интеллекта и цифровых двойников.

Актуальность работы обусловлена не только транспортным, но и технологическим значением. Развитие таких систем может предоставить долгосрочные преимущества в логистике, машиностроении и энергетике.

Целью данной работы является системное инженерное обоснование технологического фундамента маглев-систем шестого поколения. В рамках исследования решаются следующие задачи: раскрытие физики пассивной левитации на высокотемпературных сверхпроводниках с углубленным сравнительным анализом материалов и учетом явления ползучести потока; проектирование криогенных архитектур с детальным тепловым расчетом для вакуумной среды; моделирование аэродинамики низковакуумного тоннеля; синтез архитектуры распределенной системы управления на основе гибридного искусственного интеллекта.

Физические основы и эволюция левитационных технологий

Эффект Мейснера — вытеснение поля из сверхпроводника — дает отталкивание [7]. Однако для транспортных систем на

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) № 23-29-00123. Автор выражает благодарность за содействие коллективам Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Научно-образовательного центра «Сверхпроводящие технологии в транспорте», Института физики твердого тела РАН, Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского и Центра экономического моделирования транспорта.

Таблица 1. Сравнительный анализ перспективных высокотемпературных сверхпроводников для левитационных систем

Параметр	ReBCO (YBCO) – ленты второго поколения	BSCCO-2223 – ленты первого поколения	Значимость для маглев-систем
Плотность критического тока J_c при 77 К, 1 Тл	Более $1 \cdot 10^9$ А/м ² (высокая)	Около $3 \cdot 10^8$ А/м ² (умеренная)	Определяет максимальную левитационную силу
Угловая анизотропия $J_c(\theta)$	Сильная (максимум при ориентации поля параллельно оси c)	Слабая (почти изотропна)	Влияет на стабильность при изменении ориентации поля в движении
Механическая прочность	Высокая (благодаря металлической подложке)	Низкая (хрупкая керамика)	Определяет стойкость к вибрациям и нагрузкам
Технология усиления J_c	Искусственные центры пиннинга (наноклонны BaZrO ₃)	Радиационные дефекты, оптимизация текстуры	Возможность целенаправленного улучшения свойств
Стоимость производства	Высокая, но снижается	Умеренная	Влияет на экономическую жизнеспособность
Устойчивость термоциклированию	Хорошая	Ограниченная	Определяет долговечность при повторных охлаждениях

Таблица 2. Эволюция маглев-технологий

Поколение	Технический принцип	Максимальная скорость, км/ч	Ключевая характеристика	Критическое ограничение
Четвертое	Электродинамическая подвеска на низкотемпературных сверхпроводниках (Nb-Ti, жидкий He, 4,2 К)	430 (Шанхай)	Первая коммерческая высокоскоростная система	Высокие эксплуатационные затраты на гелиевую криогенику
Пятое	Электродинамическая подвеска на высокотемпературных сверхпроводниках (BSCCO, жидкий N ₂ , 77 К) с активным управлением	603 (Япония)	Переход на азотное охлаждение	Высокое аэродинамическое сопротивление (>85 % мощности тратится на его преодоление)
Шестое (проектируемое)	Гибридная подвеска: высокотемпературные сверхпроводники второго поколения (ReBCO с управляемым пиннингом) + пассивные магниты. Интеграция с вакуумной средой	1000+ (проект)	Пассивная стабильность за счет пиннинга, преодоление аэродинамического предела в вакууме	Стоимость материалов, вакуумная инфраструктура, системы управления

высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) второго рода ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$) ключевую роль играет пиннинг (закрепление) вихрей Абрикосова на дефектах кристаллической решетки [8–11]. В режиме охлаждения в поле формируется «замороженная» конфигурация потока. В российской литературе детальный анализ этого дан в обзоре И. А. Руднева и И. В. Анищенко [12] и работах челябинской школы [13].

Пиннинг обеспечивает пассивную трехмерную стабильность, гистерезис силовых характеристик, сверхпроводящую «память». При этом необходимо учитывать ползучесть потока (flux creep) — тепловую активацию вихрей [14]. В основе маглево шестого поколения лежит управляемый пиннинг в ВТСП с искусственными дефектами.

При сравнении материалов (табл. 1) видно, что ленты второго поколения ReBCO (YBCO) имеют высокую плотность критического тока $J_c > 1 \cdot 10^9$ А/м² (77 К, 1 Тл) и механическую прочность, но сильную угловую анизотропию. BSCCO-2223 — $J_c \sim 3 \cdot 10^8$ А/м² — слабая анизотропия, но высокая хрупкость. ReBCO

рассматривается в качестве основного кандидата [15, 16]. Анизотропию предлагается компенсировать чередующейся укладкой лент.

Практическая реализация требует поддержания температуры ниже критической. Для YBCO ($T_c \sim 92$ К) возможно использование жидкого азота (77 К) [8, 17]. В вакуумном тоннеле вследствие радиации и теплопроводности опор происходит приток тепла, что требует многослойной изоляции и экранов [18]. Перспективной представляется гибридная система на жидком водороде (20,3 К): охлаждение ВТСП до 30–40 К, а испаряющийся водород используется в топливных элементах [19]. Расчетное время безопасного останова при отказе охлаждения составляет 30–60 мин.

Технологическая эволюция маглев-технологий выглядит следующим образом (табл. 2):

- четвертое поколение — электродинамическая подвеска на низкотемпературных сверхпроводниках (Nb-Ti, жидкий He, 4,2 К), скорость 430 км/ч, ограничение — высокая стоимость гелиевой криогеники;

- пятое поколение — на ВТСП (BSCCO, жидкий N₂, 77 К) с активным управлением, скорость 603 км/ч, ограничение — аэродинамическое сопротивление (>85 % мощности);

- шестое поколение (проект) — ReBCO с управляемым пиннингом + вакуумная среда, скорость 1000+ км/ч, ограничения — стоимость материалов, вакуумная инфраструктура [20].

Как видно из табл. 1, ленты второго поколения на основе ReBCO обладают преимуществом по сочетанию высокой плотности критического тока и механической прочности, что делает их основным кандидатом для применения [15, 16]. Однако их сильная угловая анизотропия требует специальных инженерных решений: укладки лент в модуле с чередующейся ориентацией или использования текстурированных буферных слоев.

Эффективность пиннинга характеризуется плотностью критического тока J_c — максимальным током без диссипации. Для транспортной левитации критически важна зависимость $J_c(B, T, \theta)$, где B — магнитная индукция, T — температура,

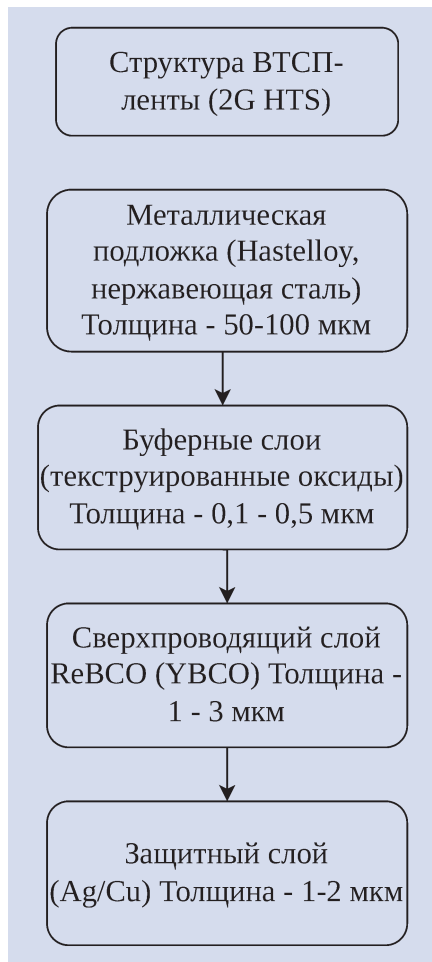


Рис. 1. Структура ВТСП-ленты второго поколения

θ — угол ориентации поля. Левитационная жесткость системы прямо пропорциональна плотности критического тока и градиенту магнитного поля.

Практическая реализация требует поддержания ВТСП ниже критической температуры. Для YBCO (критическая температура около 92 K) открывается возможность использования жидкого азота (77 K), что дает ключевое экономическое преимущество перед гелиевыми системами [8, 17]. Однако криогенная система шестого поколения представляет собой высокоинтегрированную термодинамическую платформу. В условиях вакуумного тоннеля основной приток тепла в криостат при 20–30 K, как уже упоминалось, идет через радиационный теплообмен и теплопроводность опор, что требует многослойной вакуумной изоляции и тепловых экранов [18].

Перспективной является концепция гибридной системы на жидком водороде (20,3 K) как универсального хладагента и топлива: ВТСП охлаждаются до 30–40 K, а испаряющийся водород используется в топливных элементах для выработки электроэнергии [19]. Криостаты проектируются с высокой тепловой массой для

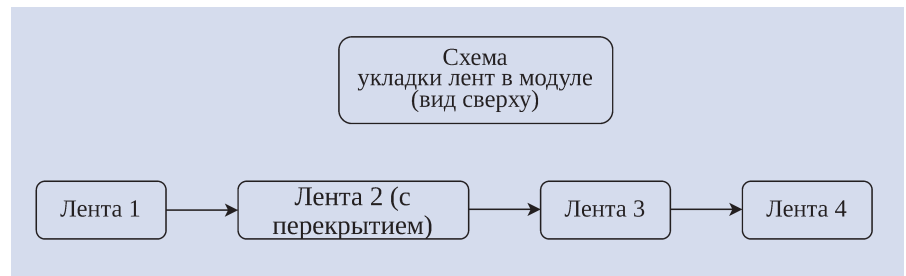


Рис. 2. Схема укладки лент в левитационном модуле

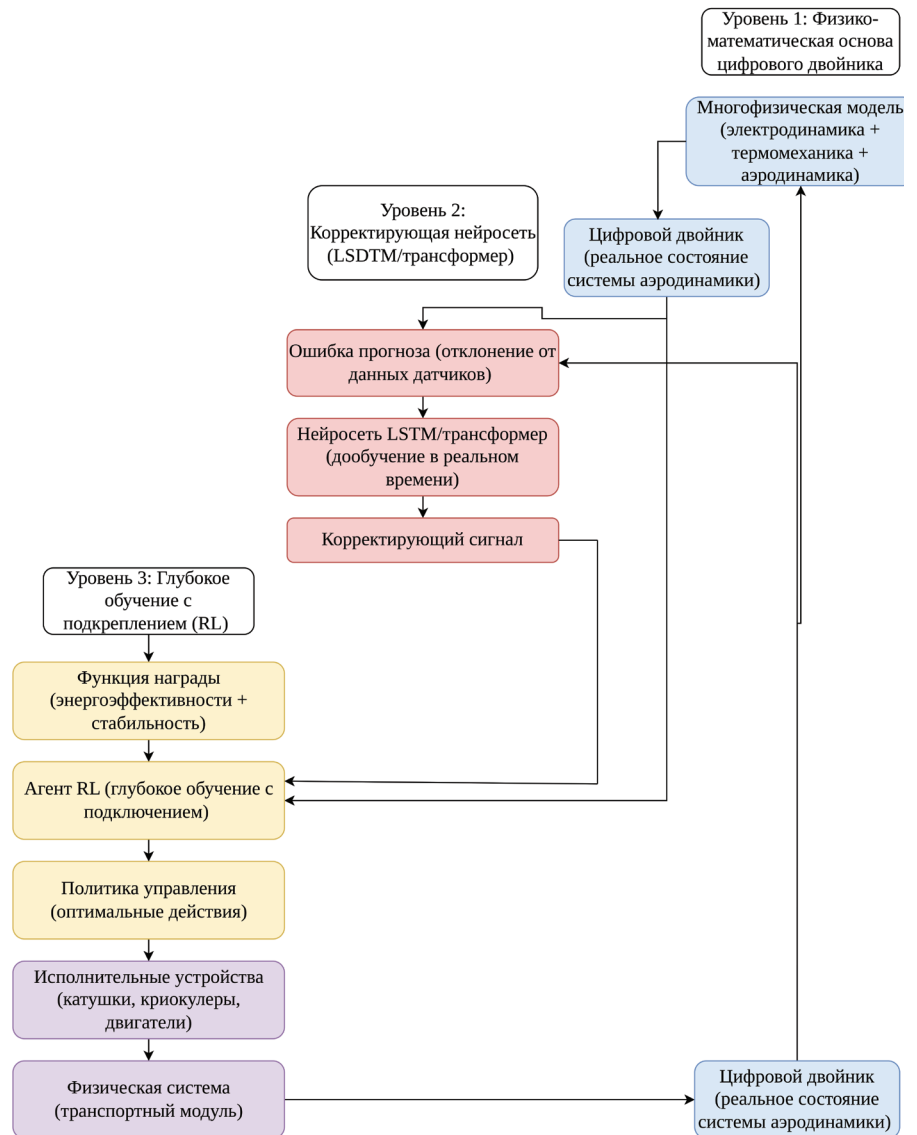


Рис. 3. Гибридная архитектура ИИ для управления динамикой магнитолевитационного транспорта

обеспечения времени безопасного останова при отказе охлаждения (не менее 30–60 мин).

Физический смысл перехода к шестому поколению, как показано в табл. 2, заключается в синергетическом решении двух основных проблем: переход к пассивной самостабилизирующейся левитации на основе управляемого пиннинга в ReBCO и движение в низковакуумной среде для кардинального снижения сопротивления [20].

Ключевые компоненты и системная интеграция

Основой левитационной системы шестого поколения являются высокоинтегрированные модули из ВТСП-лент второго поколения. Каждый модуль представляет собой массив лент на основе ReBCO, нанесенных на металлическую подложку с буферными слоями. Ленты укладываются с перекрытием для обеспечения непрерывности пути вихревых токов и снижения анизотропии свойств (рис. 1, 2).

Ключевая физическая задача — создание и поддержание в этом массиве режима охлаждения в присутствии поля путевых постоянных магнитов (field cooling). При охлаждении ниже критической температуры в присутствии поля в объеме ВТСП «замораживается» строго определенная конфигурация магнитного потока, формируя жесткую магнитную связь «транспортное средство — путь» [21]. Путевая структура при этом упрощается до линии пассивных постоянных магнитов или ферромагнитных рельсов. Однако главный инженерный вызов заключается в обеспечении экстремальной однородности магнитного поля вдоль всего пути: допуски по индукции должны составлять менее 0,1 % на протяжении десятков километров.

Преодоление квадратичного роста аэродинамического сопротивления — ключ к скорости более 1000 км/ч. Решение заключается в движении в инженерном низковакуумном коридоре с давлением 100–1000 Па (0,1–1 % от атмосферного), что снижает силу лобового сопротивления на 2–3 порядка. Переход к вакуумной среде порождает три фундаментальных технологических вызова.

Во-первых, меняется режим течения газа: при рабочих давлениях число Кнудсена становится сравнимо с единицей, что соответствует переходному режиму и требует для корректного моделирования использования уравнения Больцмана или методов прямого статистического моделирования [22].

Во-вторых, создание и поддержание вакуума в тоннелях большой протяженности требует применения распределенных вакуумных насосов. Перспективным решением здесь является сегментация тоннеля вакуумными шлюзами, позволяющая поддерживать рабочее давление только в занятых сегментах.

В-третьих, исключение конвективного теплообмена в вакууме требует новых подходов к тепловому менеджменту, включая использование лучистого теплообмена и кондуктивных шин для отвода тепла к корпусу [23].

Сверхзвуковые скорости вкупе с вакуумной средой требуют принципиально новых систем управления — предиктивных, построенных на основе гибридных моделей искусственного интеллекта и цифровых двойников. Предлагается трехуровневая гибридная архитектура ИИ (рис. 3).

Первый уровень — физико-математическая модель цифрового двойника, описывающая электродинамику ВТСП, теплопередачу в вакууме и аэродинамику разреженного газа. Второй — корректирующая нейросеть (LSTM/трансформер), которая в реальном времени компенсирует отклонения прогнозов от данных датчиков, учитывая деградацию материалов и неучтенные факторы. Третий уровень — глубокое обучение с подкреплением (RL), которое на основе скорректированных данных вырабатывает оптимальные управляющие сигналы для достижения глобальных целей (минимизации энергозатрат, максимизации устойчивости и безопасности).

Такая архитектура обеспечивает надежность (физическая модель гарантирует работоспособность даже при отсутствии обучающих данных), адаптивность и оптимальность [24]. Система безопасности строится на принципе «отказоустойчивости через пассивную стабильность» и требует детального моделирования аварийных сценариев, таких как постепенная потеря охлаждения и электромагнитная совместимость в замкнутом тоннеле-волноводе.

Перспективы развития, барьеры и дорожная карта

Внедрение технологий шестого поколения может создать универсальную высокоскоростную платформу. Помимо пассажирских линий, где для дистанций 500–1500 км прогнозируется стоимость перевозки на 30–40 % ниже авиационной [25], открываются специализированные ниши. Это магистрали для доставки грузов в автоматических вакуумных капсулах, создающие новый класс логистики

со скоростью авиации и стоимостью, близкой к железной дороге.

Также это системы запуска космических аппаратов, где использование вакуумного маглев-разгонного участка позволяет по оценкам увеличить полезную нагрузку на 20–30 % [26]. Сам вакуумный транспортный коридор может служить уникальной исследовательской инфраструктурой для аэродинамических испытаний.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что ядро шестого поколения — это синергия трех фундаментальных принципов: пассивная самостабилизирующаяся левитация на основе эффекта пиннинга в ВТСП с искусственными дефектами; преодоление аэродинамического барьера за счет движения в низковакуумной среде; системная интеллектуализация на основе предиктивных цифровых двойников.

Для реализации этой парадигмы необходимо преодолеть ряд критических барьеров. Материаловедческий барьер заключается в необходимости снижения стоимости длинномерных лент второго поколения с высокой плотностью критического тока (более 10^9 А/м² при 30 К, 3 Тл) и сглаженной угловой зависимостью $J_c(\theta)$.

Инфраструктурно-энергетический барьер связан с высокими энергозатратами на создание и поддержание вакуума в тоннелях большой протяженности, что требует разработки эффективных вакуумных систем и схем сегментирования.

Барьер моделирования и безопасности требует создания верифицированных мультифизических моделей, а также разработки новых стандартов и регламентов для киберфизических транспортных систем, движущихся со сверхзвуковыми скоростями в замкнутом пространстве.

Для системного преодоления этих барьеров предлагается дорожная карта научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, представленная в табл. 3.

Таблица 3. Дорожная карта развития технологий маглев-технологий шестого поколения

Фаза	Период	Задачи	Ожидаемые результаты
1	0–3 года	Создание лабораторных образцов высокотемпературных сверхпроводников с целевыми параметрами; разработка прототипа криомодуля на жидком водороде; создание многофизической вычислительной платформы	Лабораторные образцы с $J_c > 5 \cdot 10^8$ А/м ² при 77 К; верифицированные модели
2	3–7 лет	Изготовление полноразмерного левитационного модуля; строительство испытательного стенда (участок 3–5 км); комплексные испытания	Полноразмерный прототип; экспериментальные данные; предварительная сертификация
3	7–15 лет	Проектирование и строительство пилотной коммерческой линии (до 100 км); полная сертификация; запуск эксплуатации	Коммерчески viable система; отраслевые стандарты

Заключение

На основе проведенного анализа могут быть сформулированы следующие выводы.

Достижение проектных характеристик (скорость >1000 км/ч, энергоемкость <30 Вт·ч/пас.-км) для перспективных маглев-систем возможно только при комплексной реализации трех принципов: пассивной левитации на закреплённом магнитном потоке, движения в низковакуумной среде и интеллектуального управления. Каждый из этих элементов в отдельности не позволяет преодолеть ограничения существующих поколений.

Сравнительный анализ ВТСП-материалов показывает, что ленты второго поколения на основе ReBCO являются предпочтительным кандидатом для левитационных модулей благодаря сочетанию высокой плотности критического тока ($J_c > 1 \cdot 10^9$ А/м² при 77 К) и механической прочности. Для компенсации угловой анизотропии $J_c(\theta)$ предложены инженерные методы, включая укладку лент с чередующейся ориентацией. Отмечена необходимость учета ползучести потока при долговременной эксплуатации.

Предложена концепция использования жидкого водорода как универсального рабочего тела, обеспечивающего охлаждение ВТСП до 30–40 К и выработку электроэнергии в бортовых топливных элементах. Данное решение позволяет упростить бортовую энергетику и обеспечить время безопасного останова при отказах охлаждения не менее 30 мин.

Для корректного описания аэродинамики в низковакуумном тоннеле (100–1000 Па) показана необходимость перехода к методам прямого статистического моделирования (DSMC) ввиду роста числа Кнудсена. В области электродинамики обосновано применение модели критического состояния с учетом зависимостей $J_c(B, T, \theta)$.

Разработана трехуровневая гибридная архитектура искусственного интеллекта, сочетающая физически детерминированную модель (цифровой двойник), адаптивную нейросетевую коррекцию и обучение с подкреплением. Предложенная структура обеспечивает устойчивость к нештатным ситуациям и способность к самообучению. Принцип «отказоустойчивости через пассивную стабильность» положен в основу систем безопасности.

Предложенная поэтапная дорожная карта позволяет последовательно наращивать технологическую готовность и минимизировать риски при создании

пилотных образцов и последующих коммерческих систем.

Дальнейшее развитие данного направления требует скоординированных исследовательских усилий, в том числе в области производства длинномерных ВТСП-лент, и создания специализированных испытательных стендов для отработки ключевых технологий.

Литература

- Shanghai Maglev Transportation Development Co., Ltd. Technical Overview of the Shanghai Transrapid System. Shanghai, 2022. 156 p.
- Central Japan Railway Company. The Technical Overview of the SCMaglev L0 Series. Tokyo: JR Central, 2023. 98 p.
- Зайцев А. А. Магнитолевитационный транспорт: ответ на вызовы времени // Транспорт Российской Федерации. 2017. № 1. С. 28–32.
- Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А., Морозова Е. И., Хозиков Ю. Ф. Технология «МагТранСити» в проекте «Санкт-Петербургский Маглев» // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2013. Вып. 4. С. 5–12.
- Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. А. А. Зайцева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 612 с.
- Ковалев Л. К., Ковалева Л. А., Ильин А. В. и др. Высокотемпературные сверхпроводящие магнитные подвесы для левитационного транспорта // Доклады Академии наук. 2016. Т. 468. № 4. С. 396–400.
- Tinkham M. Introduction to Superconductivity. 2nd ed. Mineola: Dover Publications, 2004. 454 p.
- Brandt E. H. Levitation in Physics // Science. 1989. Vol. 243. № 4889. P. 349–355.
- Blatter G., Feigel'man M. V., Geshkenbein V. B. et al. Vortices in High-Temperature Superconductors // Reviews of Modern Physics. 1994. Vol. 66. № 4. P. 1125–1388.
- Matsumoto K., Mele P. Artificial Pinning Centers in YBCO Coated Conductors // Superconductor Science and Technology. 2020. Vol. 33. № 4. Art. 043001.
- Hull J. R., Cansiz A. Vertical and Lateral Forces Between a Permanent Magnet and a High-Temperature Superconductor // Journal of Applied Physics. 1999. Vol. 86. № 11. P. 6396–6404.
- Руднев И. А., Анищенко И. В. Физические принципы создания магнитолевитационных систем на основе высокотемпературных сверхпроводящих ком-

позитов второго поколения (Обзор) // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. Вып. 12. С. 1813–1847.

- Фон Гратовски С. В., Шавров В. Г., Карпунин Д. А. Моделирование динамики высокотемпературного сверхпроводящего подвеса в транспортных системах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». 2019. Т. 12. № 3. С. 97–109.
- Yeshurun Y., Malozemoff A. P., Shaulov A. Magnetic Relaxation in High-Temperature Superconductors // Reviews of Modern Physics. 1996. Vol. 68. № 3. P. 911–949.
- Foltyn S. R., Civale L., MacManus-Driscoll J. L. et al. Materials Science Challenges for High-Temperature Superconducting Wire // Nature Materials. 2007. Vol. 6. № 9. P. 631–642.
- Obradors X., Puig T. Coated Conductors for Power Applications: Materials Challenges // Superconductor Science and Technology. 2014. Vol. 27. № 4. Art. 044003.
- Barron R. F. Cryogenic Heat Transfer. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. 568 p.
- Weisend J. G. Handbook of Cryogenic Engineering. Philadelphia: Taylor & Francis, 1998. 512 p.
- Wang J., Li Y., Zhang M. A Closed-Cycle Cryogenic System for HTS Maglev Vehicles Using Liquid Hydrogen // Cryogenics. 2023. Vol. 130. Art. 103656.
- Zhao Y., Wang L. From Transrapid to Hyperloop: The Generational Shift in Magnetic Levitation Transport // Journal of Advanced Transportation. 2024. Vol. 2024. Art. 8873125.
- Durrell J. H., Dennis A. R., Shi Y. et al. The Superconducting Levitation of a Magnet Above a Superconductor // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018. Vol. 28. № 4. Art. 3601005.
- Bird G. A. Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows. Oxford: Clarendon Press, 1994. 458 p.
- Opgenoord M. M. J., Caplan P. C. Aerodynamic Design of the Hyperloop Pod // Journal of Spacecraft and Rockets. 2021. Vol. 58. № 1. P. 252–264.
- Liu W., Zhang Y., Chen X. A Digital Twin Framework for Predictive Maintenance of HTS Maglev Systems // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2023. Vol. 24. № 5. P. 4871–4883.
- Levinson D. M. The Hyperloop Business Case Analysis // Transport Policy. 2020. Vol. 86. P. 1–10.
- Andrews J., Davis E., Smith R. MagLev Launch Assist: A Cost-Benefit Analysis for Small Satellite Orbital Deployment // Acta Astronautica. 2022. Vol. 190. P. 1–12.