

Обзор совмещенного движения на высокоскоростных железнодорожных магистралях: мировой и российский опыт

В.В. Кожевников✉

Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

✉kozhevnikov@v-vladimir.ru

Резюме

В статье проведен комплексный анализ мировых и отечественных практик проектирования и эксплуатации высокоскоростных железнодорожных магистралей с совмещенным движением – одновременным курсированием высокоскоростных пассажирских и грузовых (контейнерных) поездов. Особое внимание уделено вопросам выбора радиусов круговых кривых при проектных скоростях движения до 400 км/ч и эксплуатационных до 360 км/ч. Актуальность представленной работы обусловлена необходимостью значительного повышения эффективности использования существующей и вновь создаваемой железнодорожной инфраструктуры при обеспечении требований безопасности движения, комфорта пассажиров и экономической целесообразности инвестиций. Основная проблема заключается в потребности технологически грамотного совмещения разнотипных эксплуатационных требований к трассе в условиях смешанного движения с учетом допустимых скоростей следования, степени и характера износа рельсового полотна, обеспечения динамической устойчивости подвижного состава, инженерно-конструктивных ограничений. Кроме того, большое внимание уделяется решению задачи по достижению высокой пропускной способности линии при разнотипном трафике. В работе рассмотрены соответствующие примеры устройства железнодорожных магистралей в других странах – Германии, Франции, Китае, Японии, Испании, Великобритании. Проведено сравнение инженерных, эксплуатационных и экономических характеристик совмещенного и выделенного движения на высокоскоростных магистралях. Обозначены основные факторы, влияющие на выбор радиуса кривых: скорость движения, возвышения и уклоны пути, износ инфраструктуры и подвижного состава, безопасность. По результатам исследования сделан вывод, что на высоконагруженных пассажирских магистралях в России более предпочтительным является выделение отдельных линий для движения поездов различных категорий с возможностью частичного их совмещения в отдельных регионах. Даны рекомендации по применимости тех или иных проектных решений.

Ключевые слова

высокоскоростная магистраль, радиус кривой, совмещенное движение, пассажирский поезд, грузовой поезд, износ рельсов

Для цитирования

Кожевников В.В. Обзор совмещенного движения на высокоскоростных железнодорожных магистралях: мировой и российский опыт / В.В. Кожевников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 35–48. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).35-48.

Информация о статье

поступила в редакцию: 14.04.2025 г.; поступила после рецензирования: 22.04.2025 г.; принята к публикации: 23.04.2025 г.

Review of mixed traffic on high-speed rail lines: global and Russian experience

V.V. Kozhevnikov✉

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation

✉kozhevnikov@v-vladimir.ru

Abstract

The article presents a comprehensive analysis of global and domestic practices in the design and operation of high-speed railways with mixed traffic – the simultaneous circulation of high-speed passenger and freight (container) trains. Special attention is paid to the choice of circular curve radii at design speeds of up to 400 km/h and operational speeds of up to 360 km/h. The relevance of the study is driven by the need to significantly increase the efficiency of both existing and newly developed railway infrastructure while simultaneously ensuring traffic safety, passenger comfort, and the economic feasibility of investments. The core challenge lies in the technologically sound integration of differing operational requirements for the track under mixed traffic conditions – including permissible speeds, the degree and nature of track wear, dynamic stability of rolling stock, engineering and construction constraints, and the need to achieve high line capacity under heterogeneous traffic patterns. The paper reviews examples from Germany, France, China, Japan, Spain, the United Kingdom, and Russia. A comparison is made between the engineering, operational, and economic characteristics of mixed and dedicated traffic on high-speed rail lines. The main factors influencing the selection of curve radii are identified: speed, track gradients, wear of infrastructure and rolling stock, and safety. The study concludes that dedicated lines are preferable for heavily loaded passenger corridors in Russia, while partial mixed-traffic

integration may be feasible in regions with lower traffic volumes involving trains of various categories. Recommendations are provided regarding the applicability of specific design solutions.

Keywords

high-speed railway, curve radius, combined movement, passenger train, freight train, rail wear

For citation

Kozhevnikov V.V. Obzor sovmeshchennogo dvizheniya na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh: mirovoi i rossiiskii opyt [A review of mixed traffic on high-speed railways: international and Russian experience]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 2 (86). Pp. 35–48. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).35-48.

Article info

Received: April 14, 2025; Revised: April 22, 2025; Accepted: April 23, 2025.

Введение

Развитие высокоскоростных магистралей (ВСМ) – ключевое направление модернизации транспортной инфраструктуры в XXI в. Высокая скорость, сокращение времени в пути, рост мобильности населения и повышение конкурентоспособности железных дорог на фоне автомобильного и воздушного транспорта – лишь часть аргументов в пользу ВСМ. Однако масштабное внедрение таких магистралей сопряжено с множеством инженерных и экономических вызовов. Одним из ключевых параметров, определяющих трассу ВСМ, является радиус круговых кривых, от которого зависят допустимая скорость, комфорт и безопасность движения, а также уровень износа пути и подвижного состава.

В условиях ограниченного бюджета, плотной застройки или сложного рельефа часто возникает вопрос о целесообразности совмещенного движения – организации совместного использования трассы как высокоскоростными пассажирскими поездами, так и грузовыми или обычными скоростными составами. Это может снизить затраты на инфраструктуру, повысить ее окупаемость и эффективность, однако потребует компромиссов при проектировании и эксплуатации.

Цель настоящей статьи – провести систематизированный анализ мирового и отечественного опыта совмещенного движения на ВСМ, выделить основные факторы, влияющие на выбор радиуса кривых и сформулировать практические рекомендации для российских условий.

Мировой опыт

Во многих странах ВСМ проектируются специально для движения пассажирских поез-

дов, что позволяет использовать большие радиусы кривых и крутые уклоны продольного профиля без учета тяжелых грузовых составов. Например, на французских линиях LGV минимальные радиусы кривых около 4 000 м, а на новых линиях они достигают 6 000–7 000 м [1]. Эти радиусы рассчитаны под скорость 300–350 км/ч при повышенной боковой устойчивости и комфорте для пассажиров. Соответственно допускаются и большие продольные уклоны: во Франции до 35 ‰, на некоторых немецких ВСМ – до 40 ‰ (линия Кёльн – Франкфурт) [2], что приемлемо для легких пассажирских поездов с мощными приводами, но делает движение тяжелых грузовых составов практически невозможным [3].

Тем не менее ряд стран реализует совмещенное движение, когда по одной линии курсируют как высокоскоростные пассажирские поезда, так и более медленные (тяжелые) поезда (грузовые, ночные и т.д.). Обычно это требует инженерных компромиссов. Германия имеет несколько таких примеров: старые линии Ганновер – Вюрцбург и Мангейм – Штутгарт (проектировались под 250 км/ч) изначально рассчитаны и на грузовое движение. Там выбраны более пологие уклоны (примерно 12,5 ‰) и радиусы порядка 4 000–5 500 м, за счет чего половина трассы проходит по тоннелям и виадукам [4]. Новая немецкая линия Нюрнберг – Ингольштадт со скоростью движения до 300 км/ч также имеет ограничения по движению грузовых поездов: минимальный радиус кривых $\approx 4 085$ м, максимальный уклон – 20 ‰ [5]. Благодаря этому ночью по ней могут следовать легкие грузовые составы на скоростях до 160 км/ч [5]. В то же время полностью пассажирская линия Кёльн – Франкфурт (300 км/ч) была проложена с минимальными радиусами

порядка 3 300–3 500 м и уклонами до 40 %, что удешевило строительство, но исключило возможность грузового движения [6].

Опыт Китая во многом схож с европейским: стремительный рост сети ВСМ (более 40 тыс. км) основан на строительстве обособленных пассажирских линий под скорость 300–350 км/ч, с радиусами кривых порядка 7 000 м [2] и уклонами до ≈ 20 –25 %. Тяжелые грузовые поезда при этом перенаправляются на отдельную сеть обычных магистралей. Совмещенное движение на скоростях 350 км/ч в Китае почти не используется – вместо этого развиваются специальные высокоскоростные грузовые поезда. В 2020 г. в Китае разработан высокоскоростной контейнерный поезд со скоростью до 350 км/ч, что существенно сокращает сроки доставки груза и повышает конкурентоспособность железнодорожного транспорта [7]. Такие технологии сглаживают разницу в скоростях между пассажирскими и грузовыми составами, что особенно важно для совмещенного движения. Аналогичные идеи реализуются в Италии: ее новые линии (Рим – Неаполь, Милан – Болонья и др.) построены под скорость 300–350 км/ч с радиусами $\approx 5 000$ –7 000 м и не используются тяжелыми грузовыми поездами. Однако в 2018 г. запущен сервис Mercitalia Fast – грузовой экспресс на базе переделанного поезда ETR500, следующего по высокоскоростной линии со скоростью ≈ 180 км/ч [8] (т.е. по сути тоже «пассажирский» по своим нагрузкам).

В Испании и Бельгии сеть ВСМ также в основном выделена под пассажирское движение: линии строятся с расчетными скоростями 300–350 км/ч и радиусами порядка 4 000–6 500 м. Однако из соображений эффективности отдельные линии используются совместно. Так, через тоннель под Пиренеями и по участку ВСМ Фигерас – Перпиньян проходят как высокоскоростные поезда, так и грузовые составы (стандарта UIC) – это наиболее прямой маршрут между Испанией и остальной Европой.

В Великобритании линия HS1 (Лондон – Евротоннель) обслуживает Eurostar на 300 км/ч, но по ночам по ней также следуют грузовые поезда из континентальной Европы [9] – при этом уклоны на HS1 не превышают ≈ 25 %, в отличие от французских 35 % на подходах к туннелю.

Япония, напротив, избежала подобных компромиссов благодаря строительству сети

«Синкансэн» стандартной колеи, полностью изолированной от старых линий. Это позволило задать параметры пути только под легкие пассажирские поезда: радиусы круговых кривых 4 000–8 000 м, уклоны до 15 %, отсутствие пересечений с иной инфраструктурой. Грузовое движение на линиях Синкансэн отсутствует в принципе (вся грузовая работа продолжается на раздельной сети колеи 1 067 мм).

Таким образом, мировой опыт показывает, что совмещенное движение на высоких скоростях технически возможно, но применяется относительно редко. Чаще строятся отдельные скоростные линии под пассажирские поезда, а совмещение категорий происходит лишь при особой необходимости, например на труднопроходимых участках или для повышения отдачи от дорогого инфраструктурного объекта [10]. В таких случаях параметры трассы выбираются как компромисс между требованиями высоких скоростей и тяжелого тоннажа.

Российский опыт

В России примеры собственно ВСМ пока ограничены: специализированные линии для скоростей свыше 250 км/ч еще только планируются. **Совмещенное движение** высокоскоростных и обычных поездов реализовано на существующей инфраструктуре, в частности на участке Октябрьской железной дороги Москва – Санкт-Петербург. С конца 2009 г. здесь эксплуатируются поезда «Сапсан» (Velaro RUS) со скоростью до 250 км/ч по общему пути с другими пассажирскими и грузовыми поездами [11]. Этот опыт подтвердил, что есть возможность повышения скоростей на существующей магистрали, однако при этом возникают и проблемы совмещения: для обеспечения 250 км/ч потребовалась модернизация пути (усиление верхнего строения, выпрямление ряда кривых, установка автоблокировки с укороченными блок-участками). Тем не менее ряд участков трассы имеет радиусы менее 2 000 м, что вынуждает скоростные поезда снижать скорость, а отсутствие полной изоляции линии приводит к частым помехам в графике (приоритетное прохождение «Сапанов» ухудшает пропуск пассажирских пригородных и грузовых составов). Эти сложности стимулировали РЖД к разработке проекта новой выделенной ВСМ Москва – Санкт-Петербург. Согласно специальным техническим условиям, **радиусы кривых** на

ней предусмотрены не менее 7 500 м в сложных местах (для скорости 350 км/ч) и преимущественно $\approx 10\,000$ м для скорости до 400 км/ч [12]. Для сравнения: на действующей линии радиусы кривых на порядок меньше и потому максимальная скорость ограничена ≈ 250 км/ч. Проект ВСМ Москва – Санкт-Петербург предполагает также уклоны не круче 24 ‰ [12] (против существующих уклонов ≈ 10 –12 ‰ на Октябрьской железной дороге), полностью обособленное полотно (двухпутная линия с междупутьем $\approx 4,8$ м) [9] и отсутствие пересечений в одном уровне. Это фактически будет «чистая» высокоскоростная линия для пассажирского сообщения. Грузовые поезда на нее пускать не планируется, хотя обсуждалась возможность запуска по новой трассе легких почтово-грузовых экспрессов в ночное время.

Другой перспективный проект – ВСМ Москва – Нижний Новгород – Казань – изначально рассматривался как чисто пассажирский коридор (скорость 360 км/ч, радиус кривых около 8–10 км). Тем не менее высказывались предложения организовать на нем и скоростные грузовые перевозки, чтобы повысить окупаемость. Речь идет не о движении тяжелых товарных составов, а о контейнерных поездах и экспресс-грузах, способных вписаться в график. На 2025 г. строительство этой линии не начато, но технологии в этой области развиваются. Например, Группа «Синара» совместно с CRRC разрабатывает проект высокоскоростного грузового поезда для российских ВСМ [13]. Пока что в РЖД заявляют, что приоритетом является создание сети пассажирских ВСМ и только после появления нескольких линий появится смысл запускать по ним специализированные грузовые поезда [13]. Таким образом, стратегия России вначале предусматривает раздельное развитие (чтобы не снижать параметры линий под нужды грузов) с последующим возможным частичным совмещением – запуском скоростных грузовых поездов, когда инфраструктура будет готова их принять без ущерба для пассажирского движения.

Стоит отметить, что на длинных протяженных участках Сибири и Дальнего Востока, где пассажиропотоки невелики, концепция совмещенного движения может оказаться востребованной в будущем. Например, планирование организации Евразийского скоростного грузового коридора через территорию России:

обсуждаются проекты железнодорожных магистралей для контейнерных поездов со скоростями 140–160 км/ч (значительно выше нынешних – 90 км/ч на Транссибе). Если такие линии будут строиться, их, вероятно, совместят с пассажирскими скоростными маршрутами регионального значения. Однако максимальные скорости там будут ниже «классических» ВСМ, а радиусы – меньше (в пределах 3–5 км), что технически ближе к концепции ускоренных магистралей двойного назначения.

Технические факторы выбора радиуса и параметров пути

Максимальная скорость движения.

Допустимая скорость в кривой напрямую зависит от ее радиуса и величины возвышения наружного рельса. Чем выше скорость, тем больше должен быть радиус круговой кривой для обеспечения приемлемого центростремительного ускорения [3]. Например, для движения со скоростью 350 км/ч без ощутимого дискомфорта минимальный радиус порядка 7 000 м [2] (при возвышении ≈ 150 мм). Если радиус меньше, приходится снижать скорость или допускать повышенные поперечные ускорения. Поэтому на совмещенных линиях максимальная скорость поездов ограничивается возможностями инфраструктуры: там, где по условиям рельефа невозможно проложить плавные кривые большого радиуса, скорость вынужденно снижается. Так, на совмещенной линии Токио – Осаке (Токайдо Синкансэн, Япония) минимальный радиус $\approx 2\,500$ м. И, хотя по прямому поезду могли бы идти быстрее, фактическая максимальная скорость ограничена ≈ 270 км/ч из-за кривых малого радиуса. В целом, чем выше заданная скорость движения, тем более жесткие требования предъявляются к радиусам поворотов пути.

Комфортабельность поездки. Радиус кривой влияет на уровень поперечного ускорения, воспринимаемого пассажирами. Для высокоскоростных экспрессов обычно лимитируют несбалансированное поперечное ускорение величиной около $0,5$ – $1,0$ м/с² в длительных кривых, чтобы пассажиры не испытывали дискомфорта. Это достигается подбором сочетания радиуса и возвышения наружного рельса. На пассажирских ВСМ допускается большое недостаточное возвышение (например, 100–130 мм сверх рассчитанного на скорость), позволяю-

щее поездам проходить кривые на высокой скорости без недопустимого ухудшения комфорта. Однако на совмещенной линии высокий надбаланс вызывает проблемы для медленных тяжелых поездов, которые в тех же кривых будут испытывать избыток возвышения (т.е. будут как бы «проваливаться» во внутреннюю сторону). Это крайне негативно сказывается на плавности хода грузового состава и устойчивости груза. По этой причине на линиях с совмещенным движением обычно ограничивают величину возвышения и недобаланса до умеренных значений (например, 110–120 мм), даже если при чисто пассажирском движении могли бы применить больше. В итоге пассажирские поезда в таких кривых частично жертвуют комфортом (несколько повышенное значение поперечного ускорения), а грузовые – все равно идут с небольшим избытком возвышения. Такие компромиссные решения, как активный наклон кузова пассажирских вагонов или автоматическая регулировка скоростей грузовых поездов под профиль, могут смягчить проблему, но полностью не устраняют ее. Таким образом, требования комфорта диктуют минимальный радиус и плавность введения кривой (длинные переходные кривые) особенно для линий с пассажирами. Если радиус недостаточно велик, пассажирские поезда должны снижать скорость (ухудшение времени хода) либо терпеть повышенные неудобства – оба варианта нежелательны.

Износ рельсов и колесных пар. Интенсивное вписывание тележек в кривую малого радиуса приводит к повышенным контактным напряжениям между гребнем колеса и головкой рельса. На высоких скоростях это усугубляется динамическими эффектами. Поэтому малые радиусы ускоряют износ как рельсов (боковое нарастание износа на наружном рельсе, контактные усталостные дефекты), так и колесных гребней. Присутствие тяжелых грузовых поездов усиливает проблему: если путь обладает большим уклоном возвышения (рассчитан под скоростные поезда), то медленный грузовой состав идет в избытке возвышения, когда центр тяжести смещен к внутреннему рельсу. Это вызывает неравномерное нагружение рельсов и интенсивный износ низкого (внутреннего) рельса, вплоть до его пластического течения и расплющивания головки [14]. Отмечены случаи разгула колеи и даже выкрашивания внутрен-

них ребер шпал из-за движения тяжелых поездов по переуклоненным путям [14]. Следовательно, совмещенное движение предъявляет повышенные требования к материалам и профилям рельсов (применяют износостойкие закаленные рельсы, частую шлифовку), к обслуживанию (смазка гребней, контролируемое торможение, чтобы не было юза колес на кривой). На чисто пассажирских ВСМ износ тоже есть, но несколько меньший из-за относительно меньшей осевой нагрузки поездов. Кроме того, расстановка путевых смазчиков на кривых и применение каботажных (упругих) рамных узлов тележек позволяют минимизировать износ на радиусах ≈ 4000 м и более, что, конечно, затруднительно реализовать на более тесных кривых.

Динамическая устойчивость и безопасность. Радиусы кривых влияют на динамику движения: на слишком малых радиусах при большой скорости возрастают риски бокового удара гребня о рельс и даже схода состава при превышении критической скорости в кривой. Обычно закладываемый запас прочности и устойчивости таков, что даже при +10–15 % превышения скорости на заданном радиусе не происходит схода, однако это требует ограничивать степень «остроты» кривых. Для высокоскоростных поездов с их низким центром тяжести и жесткой базой тележек боковая устойчивость в плавных кривых обычно не проблема, но вот длинные грузовые составы более чувствительны к комбинации кривых и уклонов. Например, на коротких кривых могут возникать значительные продольные усилия (искривление длинного поезда, особенно при торможении или трогании). Это требует проверки воздушных промежутков автосцепок, ограничения длины тяжелых составов в особо кривых местах и т.п. Также совмещенная линия должна учитывать габарит и центробежный выброс длинного подвижного состава: радиусы и переходные кривые проектируются так, чтобы даже самый длинный вагон не выходил из габарита при максимальной боковой ускоряющей силе. Для безопасного движения в кривых ключевыми факторами являются строгий допуск по уровню и перекосу пути, удержание возвышения в заданных пределах и бесперебойная работа системы сигнализации (АТС/ETCS), включающая заход поезда в кривую с превышением скорости. Таким образом, чем меньше

радиус кривой на линии, тем выше требования к точности укладки пути и к системе контроля скорости поездов на входе в кривую (риск человеческой ошибки на высоких скоростях нивелируется автоматикой).

Продольный профиль и уклоны. Хотя крутизна уклонов напрямую не связана с радиусом кривой, эти факторы сопряжены в проектировании трассы. На чисто пассажирских ВСМ допустимы уклоны до 35–40 ‰ [2], что упрощает обход препятствий и часто позволяет проложить трассу с более крупными радиусами (так как можно «взбираться» на эстакады или уходить в тоннель с большим подъемом вместо обхода рельефа по долине с малым радиусом кривых). Однако на линии, по которой должны ходить тяжелые грузовые поезда, уклоны ограничивают уровнем $\approx 12\text{--}18\text{ ‰}$ [2], чтобы составы могли преодолевать подъемы. Это, в свою очередь, заставляет обходить возвышенности по более протяженным участкам и закладывать круговые кривые большей кривизны. Таким образом, требование пологих уклонов увеличивает длину трассы и может уменьшать радиусы кривых в стесненных условиях, либо вынуждает строить длинные тоннели и мосты, что ведет к удорожанию проекта. Например, немецкая линия Ганновер – Вюрцбург (смешанное движение) ради снижения уклонов до 12,5 ‰ получила тоннели на 40 % длины [1], но зато сохранила большие радиусы кривых и возможность пропуска грузов. В общем, совмещенное движение требует более пологого профиля, что взаимосвязано с планом трассы и радиусами поворотов.

Сцепление и торможение. В контексте кривых эти факторы проявляются опосредованно. Для тяжелого грузового поезда на крутом уклоне и в кривой может не хватить силы тяги (буксование) или тормозного усилия (риск перегрева тормозов), поэтому крутые спуски/подъемы в сочетании с малым радиусом крайне нежелательны для них. Высокоскоростной же пассажирский поезд имеет распределенный привод и электродинамическое торможение, что позволяет ему уверенно работать даже на уклонах 30–40 ‰. Однако экстренное торможение на кривом участке для него тоже критично: при больших скоростях длина тормозного пути велика и кривизна может повлиять на стабильность (например, из-за неодновременного срабатывания тормозов по составу

или юза колес на рельсах различного уровня). Поэтому радиусы кривых на участках перед опасными местами (станциями, мостами) стараются делать больше, либо оснащают кривые системой контроля за скоростью (бализы, требующие снижения скорости перед крутой кривой, как, например, на подходе к Курскому вокзалу Москвы, где скоростной поезд снижается до 140 км/ч из-за радиуса ≈ 600 м). Для сцепления важно и состояние рельсов: на совмещенных линиях тяжелые поезда могут полировать рельс, ухудшая сцепление для следующих за ними легких составов, или оставлять на катании окалину, масло, что особенно опасно на высоких скоростях и в кривой, поэтому поддержание чистоты и шероховатости рельсов контактной поверхности – еще один технический вызов на совмещенном движении.

Ограничения подвижного состава и инфраструктуры. Длина и масса поездов, габариты, конструкция тележек – все это накладывает ограничения на вписывание в кривые. Длинные составы (например, грузовые поезда длиной 700–1 000 м) требуют очень длинных переходных кривых при входе в поворот, иначе различие в возвышении на головной и хвостовой части поезда приводит к сильному скручиванию рамы и ударным нагрузкам. Также на совмещенных линиях обычно увеличивают ширину колеи в кривых малого радиуса (так называемое уширение колеи), чтобы уменьшить натяг гребней тяжелых вагонов. Высокоскоростные поезда, как правило, имеют относительно более короткую базу между тележками и способны вписываться в кривые радиусом $\approx 7\,000$ м, но для них критичны плавные (гауссовы) переходные кривые длиной не менее нескольких сотен метров. По стандартам, переходная кривая должна обеспечивать прирост возвышения не более ≈ 1 мм на метр пути для комфорта; для скоростей 300+ км/ч это выливается в длины переходных спиралей порядка 200–250 м минимум. Грузовые поезда менее требовательны к плавности (они медленнее), но их наличие не позволяет сократить переходные кривые, а скорее наоборот, может потребоваться еще более пологое нарастание возвышения, чтобы тяжелый состав плавно «встал» в кривую. Поперечные ускорения и вибрации воздействуют и на инфраструктуру: легкий пассажирский поезд на большой кривизне дает относительно

небольшую боковую силу на рельсы, тогда как тяжелый грузовой даже на малой скорости создает значительную боковую составляющую. Следовательно, при совмещении приходится усиливать пути, особенно в кривых (частая рихтовка, более тяжелые шпалы, возможно бетонные, усиленное рельсовое скрепление). Наконец, габаритная ширина подвижного состава: грузовые вагоны шире и выше пассажирских, поэтому на кривых малого радиуса им нужен больший запас расстояния до столбов и сооружений (из-за выброса центра масс наружу кривой). Это учитывается при планировании минимального радиуса: слишком малый радиус может потребовать неприемлемо расширять полосу отвода и расстояние между путями. В итоге технические ограничения подвижного состава и пути в совокупности определяют предельный минимальный радиус на совмещенной линии – обычно порядка 3 500–4 000 м для скорости ≈ 300 км/ч (как на линии Нюрнберг – Ингольштадт) [5]. Если пытаться сделать радиус меньше, придется снижать скорость или вводить специальные меры (наклон кузова, ограничение длины и массы составов и т.п.).

Максимальный радиус круговых кривых

Анализ опыта эксплуатации ВСМ в различных странах свидетельствует о нецелесообразности применения круговых кривых с радиусами более 15 000 м. Согласно [15], максимальный радиус круговой кривой должен быть ограничен 14 000 м, что обусловлено эксплуатационными и техническими факторами. При проектировании новых высокоскоростных железнодорожных линий необходимо учитывать весь жизненный цикл магистрали, поскольку чрезмерно большие радиусы кривых приводят к ряду проблем, включая сложности в текущем содержании пути и увеличение объема ремонтных работ. Малые коэффициенты кривизны затрудняют диагностику и контроль геометрии пути, что в дальнейшем сказывается на эксплуатационных затратах [3].

Поддержание гладкости рельсового пути во многом зависит от качества проектирования, строительства, а также своевременного контроля и ремонта после ввода линии в эксплуатацию. Важным параметром в проектировании является геометрия кривых, определяемая абсолютным значением синус-верзуса (стрелки дуги) или ко-

синус-верзуса (измерения неравных хорд), которые применяются для минимизации динамических нагрузок и обеспечения плавности движения поездов [3].

В настоящее время в Китае поезда, предназначенные для тестирования рельсовых путей, оснащены оборудованием, позволяющим проводить измерения как при нормальной, так и при высокой скорости движения. В условиях обычной скорости и при радиусах кривых $R \leq 8\,000$ м результаты измерений обладают высокой точностью. Однако при $R > 8\,000$ м система автоматически фиксирует отметку «F», что указывает на сомнения в достоверности данных измерений на участках с большими радиусами кривых. Основная проблема заключается в неточности определения местоположения характерных точек, так как при больших радиусах кривых изменения геометрии пути становятся минимальными и трудноразличимыми в разных точках измерения. Это приводит к снижению точности диагностики и возможным ошибкам при интерпретации состояния рельсового пути [15].

На высокоскоростной железнодорожной линии «Гуандун – Шэньчжэнь» имеется множество кривых с большими радиусами в диапазоне 10 000–70 000 м [15], что создает значительные сложности при их обслуживании. Основная проблема заключается в том, что при радиусах свыше 10 000 м и фактическом превышении наружного рельса в 10 мм диагностические системы, используемые для проверки состояния железнодорожного пути, не могут корректно определить, является ли данный участок прямолинейным или кривой. Это приводит к затруднениям при контроле геометрии пути, поскольку программное обеспечение диагностических комплексов не распознает деформации пути, что усложняет своевременное выявление и устранение возможных дефектов. Таким образом, с точки зрения осуществимости ремонта и технического обслуживания, радиус кривой не должен превышать 10 000 м, поскольку это значительно упрощает мониторинг инфраструктуры и повышает точность диагностики состояния рельсового пути.

Для высокоскоростных железных дорог с проектными скоростями 250, 300, 350 и 400 км/ч установлены ограничения по радиусам круговых кривых. Максимальный радиус кривой не должен превышать 15 000 м, поскольку кривые с большими радиусами созда-

ют трудности при диагностике состояния пути и проведении ремонта. Кроме того, для обеспечения оптимального баланса между безопасностью движения, эксплуатационной надежностью и техническим обслуживанием стандартный радиус кривой ограничен 10 000 м. Эти нормативные параметры позволяют поддерживать стабильность пути, минимизировать износ рельсов и колесных пар, а также обеспечивать точность измерений при проверке геометрии пути, что критично для безопасной и эффективной эксплуатации высокоскоростных магистралей.

До строительства высокоскоростных железных дорог в Японии, Франции и Германии возводились экспериментальные участки для испытаний, верификации расчетов и доработки проектов, что снижало риски и уточняло параметры пути. Опыт показал, что для точности геометрии пути на кривых необходимы базисные сваи с шагом 10 м и погрешностью не более 1 мм, что обеспечивает стабильность рельсов, предотвращает деформации и минимизирует износ при движении поездов на высоких скоростях [15].

На испытательных участках высокоскоростных магистралей Франции исследовали оптимальные параметры кривых и предельные скорости движения. На линии «TGV-PSE» (80 км) максимальный радиус кривой 10 000 м позволил тестировать поезда на скорости свыше 345 км/ч, обеспечивая стабильность движения и минимизируя динамические нагрузки. На линии «TGV-A» (66 км) радиусы варьировались от 6 000 до 15 000 м, что позволило провести испытания на скоростях более 350 км/ч. Разнообразие кривых помогло оценить влияние трассы на устойчивость поездов и плавность хода. Итоги испытаний подтвердили эффективность радиусов 10 000–15 000 м для безопасности и комфорта пассажиров, став основой для проектирования новых ВСМ.

На испытательных участках высокоскоростных железных дорог Германии исследовали оптимальные параметры трассы и устойчивость подвижного состава. На линии «Ганновер – Вюрцбург» (26 км) использовались кривые радиусом 5 300, 7 000 и 32 000 м, где был установлен рекорд скорости 345 км/ч. Это позволило изучить влияние геометрии пути на поведение поездов и предельные условия эксплуатации. На линии «Мангейм – Штутгарт» (39 км)

радиусы кривых были нормированы до 5 000 м, что обеспечивало баланс между безопасностью, плавностью хода и техническим обслуживанием. Результаты испытаний подтвердили необходимость соблюдения оптимального диапазона радиусов для стабильности движения, комфорта пассажиров и снижения эксплуатационных затрат [15].

На ранее построенных ВСМ Японии не было жестких ограничений по максимальному радиусу кривых, что позволяло использовать значения свыше 10 000 м. Однако в ходе испытаний новой ВСМ для скорости 350 км/ч было рекомендовано ограничить радиус 8 000 м (с хордой 10 м). Это связано с техническими и эксплуатационными факторами, упрощающими обслуживание и ремонт инфраструктуры.

Для диагностики состояния пути и контактной сети на всех линиях Синкансэн применяется Shinkansen Electric Track Doctor Yellow Type 923 («Желтый Доктор»). Этот специализированный поезд оснащен высокоточным оборудованием, позволяющим контролировать рельсы и контактную сеть в реальном времени. Рабочая скорость диагностики достигает 270 км/ч, что обеспечивает выявление дефектов без значительного замедления движения [16].

Сравнительный анализ: совмещенные и выделенные линии высокоскоростных магистралей

Инженерные аспекты. Совмещенные магистрали требуют более консервативных параметров трассы по сравнению с чисто пассажирскими ВСМ. В частности, радиусы кривых делаются максимально возможными, а уклоны – минимальными, чтобы удовлетворить потребности самого медленного и тяжелого поезда на линии. В итоге трасса получается менее гибкой: ее сложнее вписать в стесненный коридор. Например, полностью выделенная ВСМ может позволить себе отклонение трассы с меньшим радиусом или пойти по более крутому склону, тогда как на совмещенной линии такие отклонения недопустимы без снижения скорости. Так, во Франции новая пассажирская ВСМ в гористой местности может следовать по уклону 35 ‰, а аналогичная линия, рассчитанная на грузовые поезда, вынуждена была бы идти по длинному тоннелю для ограничения уклона $\approx 12\text{--}18\text{ ‰}$ [1].

Как видно, инженерная цена компромисса – более протяженные искусственные сооружения (тоннели, виадуки) и, как правило, большая стоимость строительства совмещенной линии. С другой стороны, такая линия универсальна и может заменить собой две отдельные трассы. Выделенные ВСМ позволяют достичь максимальных скоростей и оптимального профиля для пассажирских поездов, но требуют либо наличия параллельной сети для грузовых, либо отказа от перевозки грузов в данном коридоре.

Кроме геометрии пути, важно устройство путевого развития и стрелочные переводы. На чисто высокоскоростной линии обычно меньше станций и ответвлений – только крупные узлы, оборудованные скоростными стрелками (например, перевод типа 1:26,5 или 1:33, позволяющий сход на 160–230 км/ч). На совмещенных линиях может потребоваться больше соединений с обычной сетью (для того чтобы грузовые поезда заходили на магистраль или сходили с нее), возможно, выделение обгонных путей на станциях для пропуска скоростных поездов мимо медленных. Стрелочные переводы для тяжелых грузовых потоков должны обладать повышенной прочностью (например, закаленные крестовины) – это усложняет конструкцию скоростных стрелок. Часто проблему решают снижением скорости на боковые пути для грузовых составов (например, боковой путь с ограничением 100 км/ч через стрелку, тогда как пассажирский по прямому продолжает движение +300 км/ч). В целом, по инженерной части выделенная ВСМ оптимизирована под однородный трафик, тогда как совмещенная – это всегда компромисс прочности и плавности хода.

Экономические аспекты. Развитие совмещенных линий и отдельных ВСМ имеет как преимущества, так и недостатки с точки зрения экономики. Строительство совмещенной магистрали зачастую дороже в расчете на километр, поскольку требуется соблюдать более строгие параметры трассы (большие радиусы, малые уклоны), а это ведет к удлинению пути и к строительству дополнительных тоннелей, эстакад, укрепленных сооружений. По оценкам, снижение уклонов с 30 до 12 % и увеличение радиусов кривых почти вдвое повышает стоимость строительства на 15–20 % за счет объема земляных работ и искусственных сооружений. Однако при этом совмещенная линия обеспечивает два вида перевозок. Если бы строились

отдельные параллельные линии (пассажирская ВСМ и традиционная грузовая), суммарные затраты были бы значительно выше. Таким образом, в коридорах с невысоким пассажиропотоком совмещение может экономически оправдываться: инвестиции в одну линию окупаются и за счет грузового трафика тоже [10].

Операционные затраты и доходы также отличаются. Выделенная ВСМ, не испытывающая влияния медленных поездов, может поддерживать высокую среднюю скорость движения, что сокращает потребность в подвижном составе (меньше составов и бригад для выполнения расписания). Кроме того, техническое обслуживание пути можно планировать в ночные окна, когда пассажирские поезда не ходят. На совмещенной линии данная возможность отсутствует: если планируется грузовое движение ночью, то окна для ремонта придется назначать короткими фрагментами днем или ранним утром, либо периодически приостанавливать грузовое движение. Это усложняет логистику и может повышать эксплуатационные расходы на содержание инфраструктуры (ночной труд, «вскрытие» пути чаще). С другой стороны, совмещенная магистраль приносит дополнительный доход от грузовых перевозок. В ночные часы, когда пассажиропоток отсутствует, дорогостоящая инфраструктура не простаивает, так как по ней идут грузовые поезда, генерируя выручку и повышая коэффициент использования капитала. Например, на британской HS1 доходы от грузовых операторов пусть и невелики, но снижают расходы на содержание линии. В то же время во Франции по пассажирским ВСМ грузовые поезда почти не ходят, и инфраструктура ночами фактически используется только для профилактики и ремонта. Если пассажиропоток высокий, то выделенная линия окупается за счет пассажиров, если же он умеренный, то добавление грузового трафика может улучшить экономику проекта.

Еще один фактор – износ и ремонт. Совмещенная линия изнашивается быстрее из-за тяжелых осевых нагрузок и частых циклов нагрузок (от грузовых и пассажирских составов). Это ведет к более частому ремонту рельсов, частой подбивке пути, усиленному содержанию контактной сети (тяжелые поезда значительно растягивают контактный провод при проходе). Расходы на электроэнергию тоже могут возрасти, если грузовые поезда тяжелые и

требуют тяговых усилий на подъемах. Выделенная пассажирская линия в этом смысле экономичнее: она рассчитана на легкие поезда, реже нуждается в тяжелом ремонте (например, рельсы могут служить дольше, поскольку нагрузка 17 т/ось против 25 т при грузовых перевозках). Впрочем, при грамотном планировании (ограничение нагрузки на ось грузовых поездов, применение высокопрочных материалов) совмещенная линия может обслуживаться с приемлемыми затратами.

Стоимость подвижного состава косвенно тоже относится к экономическим аспектам. При раздельном движении нужны разные типы поездов для разных линий, а при совмещенном можно унифицировать часть парка. Но на практике различие скоростей столь велико, что и подвижной состав разный: например, на совмещенной линии будут и дорогие высокоскоростные поезда, и обычные локомотивы под груз, поэтому экономии от унификации нет. Скорее наоборот, могут потребоваться специальные локомотивы с повышенной мощностью для езды по крутым уклонам ВСМ (если грузовым все же надо на них идти). В целом же экономическая эффективность совмещенных линий проявляется там, где плотность движения не слишком высока ни в одном из сегментов, в этом случае единая инфраструктура обслуживает оба. Если же пассажирский трафик очень интенсивный (как на токайдо-синкансэне в Японии или линии Париж – Лион во Франции), то любой грузовой поезд будет мешать, и выгоднее строить отдельную линию.

Эксплуатационные аспекты. При совместном ведении быстрого и медленного движения возникают сложности с организацией графика. Пропускная способность линии снижается из-за разницы скоростей: между скоростным и тихоходным поездом приходится держать больший интервал. Для минимизации этого эффекта обычно выделяют «периодические окна» для грузовых составов: например, несколько часов ночью идут только грузовые, днем – только пассажирские. Либо строят раздельные пути на отдельных перегонах (обгонные пункты), где скорый поезд может обойти грузовой. В любом случае, обеспечить столь же частое движение экспрессов, как на чисто пассажирской линии, не получится, так как грузовые «съедают» часть пропускной способности. Надежность графика тоже страдает: поломка или задержка грузового

поезда на совмещенной линии задержит и пассажирские (и наоборот, внештатная ситуация с экспрессом остановит следование грузовых). На выделенной ВСМ эти риски разделены.

Управление движением на совмещенной магистрали гораздо сложнее. Необходимо учитывать разные маршруты и приоритеты: диспетчеризация должна гибко реагировать, чтобы при отклонении графика быстро назначать обгоны либо вводить задержки таким образом, чтобы минимизировать суммарный ущерб. Современные системы (ETCS Level 2/3, диспетчерские центры) в целом способны автоматизированно регулировать смешанный поток, но требования к ним высокие – нужно точно рассчитывать расстояния между поездами с учетом их разной динамики. На выделенных ВСМ все поезда примерно равносторонные, интервал между ними постоянен (например, 5–10 мин) и управление сводится к поддержанию этого такта, поэтому чисто пассажирские линии считаются более надежными в эксплуатации: любая внештатная ситуация окалится в пассажирском сегменте и не влияет на грузовой трафик на других линиях. В то же время, совмещенная линия предоставляет большую гибкость сети: в случае ремонта или аварии на соседней грузовой линии, по ней можно пропустить грузовой поток в обход, что повышает устойчивость всей системы перевозок. Так, если отдельная пассажирская ВСМ закрыта на ремонт, то скоростные поезда приходится или отменять, или переводить на старую линию с сильным увеличением времени хода. Если же линия совмещенная, всегда есть альтернативный вариант пропуска: по тому же пути, хоть и с уменьшенной скоростью. Таким образом, оперативная гибкость выше у совмещенной инфраструктуры, а графиковая устойчивость – у обособленной [17].

Техничность обслуживания – еще один аспект. На выделенной ВСМ обычно установлена единая система сигнализации и связи, ориентированная на высокие скорости (например, кабина локомотива получает сигналы напрямую, как ETCS или ТВМ). На совмещенных линиях часто приходится поддерживать две системы: современную для скоростных поездов и традиционную для обычных (чтобы грузовые локомотивы без новейшей системы могли двигаться). Это усложняет инфраструктуру и требует двойного комплекта оборудова-

ния (например, и автоблокировка, и радиоблок). Также разнятся требования по электроснабжению: высокоскоростные поезда потребляют большие мощности за короткое время (разгон до 300 км/ч), тогда как грузовые – длительно тянут на подъеме. Энергосистема совмещенной линии должна быть рассчитана на суммарную нагрузку, что может означать более мощные подстанции. На выделенной пассажирской все оптимизировано под расписание экспрессов. Ремонтные «окна» на совмещенной линии, как уже отмечалось, труднее организовать. В итоге эксплуатационно отдельная ВСМ проще и предсказуемее, а совмещенная требует высококлассного планирования и управления, но взамен предоставляет универсальность использования.

Уровень комфорта и надежности для разных типов поездов. Пассажиры на выделенных ВСМ получают максимально плавную и быструю поездку. На совмещенных линиях могут быть вынужденные ограничения скорости в некоторых местах, что увеличивает время в пути. Кроме того, присутствие грузовых поездов может снижать комфорт: грузовые чаще создают вибрации пути, от которых страдает плавность хода для следующих за ними экспрессов (особенно если путь не успевают поправить). Разница не критична, но статистика показывает, что на линиях с интенсивным грузовым движением показатели ровности пути хуже, и поэтому даже современные поезда испытывают там больше микроударов. Также важен фактор аэродинамики: при встрече двух высокоскоростных поездов создается сильная ударная волна, ради чего на ВСМ увеличивают междупутное расстояние и ставят ветровые экраны [18], а при обгоне скорым поездом медленного грузового из-за большой разницы скоростей могут возникать турбулентные завихрения вокруг грузового состава, влияющие на проходящий экспресс. Безопасность движения при этом не нарушается, но пассажиры высокоскоростного поезда могут ощутить резкий толчок при обгоне длинного грузового состава. На выделенной линии таких ситуаций нет (поезда обгоняют только стоящие на станциях составы).

Надежность подвижного состава также подвергается разным влияниям. Высокоскоростные поезда, эксплуатируемые на отдельных ВСМ, обычно имеют более мягкие режимы нагрузок – постоянное движение на больших

скоростях, но без частых остановок и экстремально больших тяговых усилий. На совмещенных линиях возможны торможения и разгоны из-за графика (например, догнали грузовой – пришлось притормозить, потом вновь разогнаться), что повышает износ оборудования (тормозных колодок, токоприемников при повторных наборах скорости и т.д.). У грузовых поездов надежность на таких линиях тоже может страдать: им приходится работать на пределе сцепления на подъемах, а при спусках сильнее изнашиваются тормоза. В целом, отдельная специализация линий позволяет оптимально настроить подвижной состав под конкретные условия и поддерживать их, а совмещение – это всегда некоторый компромисс в режимах эксплуатации техники.

По уровню комфорта для грузового сегмента можно отметить, что на выделенной традиционной линии грузовые поезда движутся медленно, но без длинных простоев, тогда как на совмещенной их могут ставить на обочинные пути с целью обгона, что увеличивает время доставки и требует дополнительных маневров. Для скоростных грузовых поездов (контейнерных экспрессов), наоборот, наличие выделенной высокоскоростной линии критично: только тогда они могут реализовать свой потенциал скорости. Если же выпускать их на загруженную обычную сеть, они потеряют время в «пробках». Следовательно, совмещенное движение имеет двойкий эффект: с одной стороны, универсальность, с другой – взаимное влияние, которое может понижать заложенные преимущества высоких скоростей и большой грузоподъемности.

Заключение

Совмещенное движение на ВСМ – сложная, но в определенных случаях оправданная практика. Мировой опыт демонстрирует, что при скорости движения до ≈ 250 – 300 км/ч и умеренных уклонах вполне возможно успешное совмещение пассажирских и грузовых поездов (немецкие и швейцарские новые линии, часть испанских участков). Однако на скоростях 350–400 км/ч требования к пути настолько высоки, что любое включение тяжелых составов ведет к серьезным компромиссам по трассе и эффективности. Большинство стран предпочли строить отдельные ВСМ для пассажирского движения, совмещенные участки делают лишь там,

где без этого не обойтись технически или экономически (горные перевалы, тоннели, мосты, низкий трафик).

Для России с ее огромными расстояниями и высокими объемами грузоперевозок вопрос совмещения особенно актуален. С одной стороны, новые пассажирские ВСМ (Москва – Санкт-Петербург, Москва – Казань и др.) разумно строить по возможности обособленными, чтобы достичь максимального сокращения времени пути и не ограничивать будущий рост пассажиропотока. Такой подход соответствует лучшим мировым практикам и требованиям комфорта и безопасности: отдельная инфраструктура, рассчитанная под скорость 360–400 км/ч, позволит реализовать все современные технологии без оглядки на «медленные» поезда [19]. Одновременно существующая сеть освободится от части пассажирских поездов, что увеличит ее пропускную способность для грузов (например, запуск ВСМ Москва – Санкт-Петербург позволит перераспределить грузопоток на старую линию [20]). Таким образом достигается стратегическое разделение потоков: скоростные пассажирские – по новым линиям, грузовые – по высвобожденным мощностям старых линий. В условиях России, где доля грузового движения очень высока, это представляется целесообразным для основных магистралей.

С другой стороны, совмещенное движение может найти нишу в проектах регионального характера и в скоростной грузовой логистике. Рекомендуется рассмотреть возможность строительства линий двойного назначения там, где пассажиропотоки недостаточны для окупаемости чисто пассажирской ВСМ, но есть потенциальный грузовой спрос (например, коридор Урал – Сибирь, либо международные маршруты «Север – Юг»). На таких линиях разумно ограничить расчетную скорость до 250–300 км/ч, что позволит заложить радиусы $\approx 4\,000$ м и уклоны ≈ 12 – 15% – параметры, совместимые с движением легких грузовых поездов без кардинального удорожания проекта [2]. Также перспективно развитие скоростных грузовых поездов (рефрижераторных, почтово-курьерских), способных двигаться со скоростью 160–200 км/ч и вписываться в график пассажирских ВСМ. Их запуск по уже построенным линиям даст синергетический эффект –

увеличит загрузку инфраструктуры и сократит сроки доставки грузов. В то же время движение традиционных тяжеловесных поездов целесообразно сохранить на отдельных путях.

Подводя итог, можно сказать, что для России первоочередной задачей является создание сети выделенных высокоскоростных линий для пассажирского сообщения (Москва – Санкт-Петербург, Москва – Казань и далее до Екатеринбурга, возможна ВСМ в Сибири между крупными агломерациями). Проектирование этих линий должно выполняться с прицелом на максимальные скорости и комфорт (радиусы $\approx 8\,000$ – $10\,000$ км, уклоны до 25% и т.д.), без закладывания ограничений под грузовые поезда (последние при необходимости можно будет пустить с пониженной скоростью в ночные окна или по отдельным параллельным путям на сложных участках). По мере развития сети ВСМ следует параллельно модернизировать существующую сеть для ускорения грузовых перевозок (электрификация и повышение скоростей на транзитных коридорах до 120–160 км/ч), что частично компенсирует отсутствие грузов на ВСМ.

В перспективе, когда опорная сеть ВСМ сформируется и технологии высокоскоростного движения будут отработаны, можно вернуться к идее их частичной универсализации. К этому времени появятся специальные образцы грузового подвижного состава под ВСМ (как отмечают в РЖД, такие поезда станут актуальны после ввода второй и третьей линий ВСМ [13]). Тогда станет возможным более широкое совмещенное использование, например отправка контейнерных экспрессов по ночам со скоростью 200 км/ч по маршруту Европа – Китай через Россию. Подобные решения позволят максимально задействовать потенциал инфраструктуры ВСМ без ущерба для основного – пассажирского – трафика. В целом же, исходя из российских условий, рекомендуется придерживаться принципа: «раздельно там, где можно, и совмещенно там, где нужно», т.е. при проектировании новых линий приоритизировать чисто высокоскоростное сообщение, но в обоснованных случаях (низкая загрузка, дороговизна дублера, стратегическая необходимость) закладывать возможность совместного движения, опираясь на международный опыт и современные технические средства для его обеспечения.

Список литературы

1. Трансъевропейские высокоскоростные железные дороги. Исследование Генерального плана. Общие сведения, необходимые для дополнительного обоснования требуемых исследований. Этап 2 // UN-iLibrary : site. URL : <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210054973/read> (access date: 31.03.2025).
2. Týfa L. Key Attributes of the High Speed Rail System Project // Transactions on transport sciences. 2008. Vol. 1. Iss. 2. P. 87–94. DOI 10.5507/tots.2008.012.
3. Кожевников В.В. Определение величины радиуса круговых кривых при проектировании высокоскоростных магистралей // Современные вызовы транспортной отрасли: новые возможности : материалы межвуз. науч.-практ. конф. транспортных вузов. СПб., 2023. С. 50–55.
4. Deutschlands längster Eisenbahntunnel // FrankfurterRundschau : site. URL : <https://www.fr.de/rhein-main/deutschlands-laengster-eisenbahntunnel-11676448.html> (дата обращения 31.03.2025).
5. Внедрение новых конструкций безбалластного пути // Железные дороги мира. Путь на плитном основании. 2007. № 2. С. 70–73.
6. Picard J.-F., Beltran A. D'où viens tu TGV? Témoignages sur les origines des trains à grande vitesse français // Archivchemindefer : site. URL : <http://archivchemindefer.free.fr/dossierTGV/DouvienTGV.pdf> (дата обращения 01.04.2025).
7. Кожевников В.В., Целихов Е.О. Грузовые перевозки с использованием высокоскоростных железнодорожных магистралей // Аспирантские чтения : сб. науч. ст. аспирантов РУТ (МИИТ). М., 2021. Вып. 4. С. 106–112.
8. Mercitalia Fast: from October, goods will travel at high speed // Ferrovie dello Stato Italiane : site. URL : <https://web.archive.org/web/20181117233926/https://www.fsitaliane.it/content/fsitaliane/en/Media/press-releases-and-news/2018/4/6/mercitalia-fast--from-october--goods-will-travel-at-high-speed.html> (access date: 01.04.2025).
9. Treno ad alta velocità Le Frece // Interrail eurail : site. URL : <https://www.interrail.eu/it/plan-your-trip/tips-and-tricks/trains-europe/high-speed-trains/le-frece> (access date: 01.04.2025).
10. Морозова О.С., Шкурников С.В. Опыт совмещенного высокоскоростного пассажирского и грузового движения в странах Европейского союза // Бюллетень результатов научных исследований. 2017. № 4. С. 32–40.
11. Кожевников В.В., Парамонов М.А. Мировой опыт развития высокоскоростных железнодорожных магистралей // Аспирантские чтения : сб. науч. ст. аспирантов РУТ (МИИТ). М., 2021. Вып. 4. С. 112–118.
12. Шкурников С.В., Булакаева О.С., Анисимов В.А. Сложная пространственная геометрия криволинейных участков трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 2. С. 164–178.
13. Грузовые высокоскоростные поезда: нужны ли они? // ROLLINGSTOCK : сайт. URL : <https://rollingstockworld.ru/lokomotivy/gruzovye-vysokoskorostnye-poezda-nuzhny-li-oni/> (дата обращения: 02.04.2025).
14. Rakoczy A.M., Wilson N., Li D. Cant Excess for Freight Train Operations on Shared Track. Washington : Office of Research, Development and Technology, 2020. 52 p.
15. Nunno R. Fact Sheet: High Speed Rail Development Worldwide // Environmental and Energy Study Institute (EESI) : site. URL : <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-high-speed-rail-development-worldwide#:~:text=Japan%3A%20The%20Birth%20of%20High,Rail> (access date: 01.04.2025).
16. Сморчкова К.С., Кожевников В.В. Высокоскоростное железнодорожное сообщение в Японии // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки : материалы VII Всерос. конф. с междунар. участ. М., 2022. С. 171–173.
17. Сидраков А.А. Организация скоростных пассажирских перевозок в дальнем сообщении : дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 182 с.
18. Родченко В.А., Зандарашвили Д.С. Высокоскоростное железнодорожное движение. Мировой опыт и перспективы в России. М. : МГУПС (МИИТ), 2015. 116 с.
19. Поставка первых поездов для ВСМ Москва – Петербург планируется в 2028 году // ТАСС : сайт. URL : https://tass.ru/ekonomika/21878167?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 02.04.2025).
20. Что дадут экономике высокоскоростные магистрали // RGRU : сайт. URL : <https://rg.ru/2023/08/27/chto-dadut-ekonomike-vysokoskorostnye-magistrali.html> (дата обращения: 02.04.2025).

References

1. Trans'evropeiskie vysokoskorostnye zheleznye dorogi. Issledovanie General'nogo plana. Obshchie svedeniya, neobkhodimye dlya dopolnitel'nogo obosnovaniya trebuemykh issledovaniy. Etap 2 [Trans-European Railway High-Speed. Master Plan Study. A general background to support further required studies. Phase 2]. Available at: <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210054973/read> (Accessed March 31, 2025).
2. Týfa L. Key Attributes of the High Speed Rail System Project // Transactions on transport sciences, 2008, Vol. 1, iss. 2, pp. 87–94.
3. Kozhevnikov V.V. Opredelenie velichiny radiusa krugovykh krivykh pri proektirovanii vysokoskorostnykh magistralei [Determination of the radius of circular curves in the design of high-speed highways]. *Materialy Mezhevuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii transportnykh vuzov «Sovremennye vyzovy transportnoi otrasli: novye vozmozhnosti»* [Proceedings of the Interuniversity Scientific and Practical Conference of Transport Universities «Modern challenges of the transport industry: new opportunities»]. Saint Petersburg, 2023, pp. 50–55.
4. Deutschlands längster Eisenbahntunnel (electronic resource). Available at: <https://www.fr.de/rhein-main/deutschlands-laengster-eisenbahntunnel-11676448.html> (Accessed March 31, 2025).
5. Vnedrenie novykh konstruksii bezballastnogo puti [Introduction of new ballast-free track designs]. *Zheleznye dorogi mira. Put' na plitnom osnovani* [Railways of the world. The track is on a slab base], 2007, no 2, pp. 70–73.

6. Picard J.-F., Beltran A. D'où viens tu TGV? Témoignages sur les origines des trains à grande vitesse français (electronic resource). Available at: <http://archivchemindefer.free.fr/dossierTGV/DouviensTGV.pdf> (Accessed April 1, 2025).
7. Kozhevnikov V.V., Tselikhov E.O. Gruzovye perevozki s ispol'zovaniem vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistraley [Freight transportation using high-speed railways]. *Sbornik nauchnykh statei aspirantov RUT (MIIT) «Aspirantskie chteniya»* [Proceedings Ph.D. students' of the Russian University of Transport (MIIT) «Ph.D. students readings»]. Moscow, 2021, iss. 4, pp. 106–112.
8. Mercitalia Fast: from October, goods will travel at high speed (electronic resource). Available at: <https://web.archive.org/web/20181117233926/https://www.fsitaliane.it/content/fsitaliane/en/Media/press-releases-and-news/2018/4/6/mercitalia-fast--from-october--goods-will-travel-at-high-speed.html> (Accessed April 1, 2025).
9. Treno ad alta velocità Le Frece (electronic resource). Available at: <https://www.interrail.eu/it/plan-your-trip/tips-and-tricks/trains-europe/high-speed-trains/le-frecc> (April 1, 2025).
10. Morozova O.S., Shkurnikov S.V. Opyt sovmeshchennogo vysokoskorostnogo passazhirskogo i gruzovogo dvizheniya v stranakh Evropeiskogo soyuza [The experience of combined high-speed passenger and freight traffic in the countries of the European Union]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2017, no 4, pp. 32–40.
11. Kozhevnikov V.V., Paramonov M.A. Mirovoi opyt razvitiya vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistraley [World experience in the development of high-speed railways]. *Sbornik nauchnykh statei aspirantov RUT (MIIT) «Aspirantskie chteniya»* [Proceedings Ph.D. students' of the Russian University of Transport (MIIT) «Ph.D. students readings»]. Moscow, 2021, iss. 4, pp. 112–118.
12. Shkurnikov S.V., Bulakaeva O.S., Anisimov V.A. Slozhnaya prostranstvennaya geometriya krivolineinykh uchastkov trassy vysoko-skorostnykh zheleznodorozhnykh magistraley [Complex spatial geometry of curved sections of high-speed railway routes]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2022, no 2, pp. 164–178.
13. Gruzovye vysokoskorostnye poezda: nuzhny li oni? (elektronnyi resurs) [High-speed freight trains: are they needed? (electronic resource)]. Available at: <https://rollingstockworld.ru/lokomotiv/gruzovye-vysokoskorostnye-poezda-nuzhny-li-oni/> (April 2, 2025).
14. Rakoczy A.M., Wilson N., Li D. Cant Excess for Freight Train Operations on Shared Track. Washington: Office of Research, Development and Technology, 2020. 52 p.
15. Nunno R. Fact Sheet: High Speed Rail Development Worldwide. Available at: <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-high-speed-rail-development-worldwide#:~:text=Japan%3A%20The%20Birth%20of%20High,Rail> (Accessed April 1, 2025).
16. Smorchkova K.S., Kozhevnikov V.V. Vysokoskorostnoe zheleznodorozhnoe soobshchenie v Yaponii [High-speed railway communication in Japan]. *Materialy VII Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya otraslevoi nauki»* [Proceedings of the VII All-Russian Conference with international participation «Current state, problems and prospects of development of branch science»]. Moscow, 2022, pp. 171–173.
17. Sidrakov A.A. Organizatsiya skorostnykh passazhirskikh perevozok v dal'nem soobshchenii [Organization of high-speed long-distance passenger transportation]. Ph.D.'s theses. Moscow, 2012. 182 p.
18. Rodchenko V.A., Zandarashvili D.S. Vysokoskorostnoe zheleznodorozhnoe dvizhenie. Mirovoi opyt i perspektivy v Rossii [High-speed railway traffic. World experience and prospects in Russia]. Moscow: MGUPS (MIIT) Publ., 2015. 116 p.
19. Postavka pervykh poezdov dlya VSM Moskva – Peterburg planiruetsya v 2028 godu (elektronnyi resurs) [Delivery of the first trains for the Moscow – Petersburg high-speed railway is planned in 2028 (electronic resource)]. Available at: https://tass.ru/ekonomika/21878167?utm_source=chatgpt.com (Accessed April 2, 2025).
20. Chto dadut ekonomike vysokoskorostnye magistrali (elektronnyi resurs) [What high-speed highways will give to the economy (electronic resource)]. Available at: <https://rg.ru/2023/08/27/cto-dadut-ekonomike-vysokoskorostnye-magistrali.html> (Accessed April 2, 2025).

Информация об авторах

Кожевников Владимир Владимирович, старший преподаватель кафедры проектирования и строительства железных дорог, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва; e-mail: kozhevnikov@v-vladimir.ru.

Information about the authors

Vladimir V. Kozhevnikov, Assistant Professor of the Department of Design and Building of Railways, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, e-mail: kozhevnikov@v-vladimir.ru.