

## СОЦИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ ЭКСПРЕССОВ: ВОЗДЕЙСТВИЕ КОЛЕБАНИЙ НА ПАССАЖИРА

Кандидат техн. наук **Крютченко В.Е.**

## EXPRESS TRAIN'S SOCIOLOGICAL ECOLOGY: OSCILLATION'S INFLUENCE ON PASSENGER

Ph. D. (Tech.) **Kryutchenko V.E.**

*Рельсовые и левитирующие экспрессы, экология, воздействие инфразвуковых колебаний на пассажира, шумовое загрязнение окружающей среды, критерий комфорта.*

*Rail and levitation express train, oecology, infra-sound oscillation's influence on passenger, noise pollution on surrounding, comfort criterion.*

*В статье изложены экологические проблемы, связанные с воздействием на пассажиров инфразвуковых колебаний и шумового фона рельсовых и левитирующих экспрессов; анализируется дискомфорт, вызываемый этими воздействиями, указан критерий комфорта скоростного транспорта.*

*The article describes the environmental problems associated with the impact of infrasonic vibrations and noise background of rail and levitating express trains on passengers; the discomfort caused by these influences is analyzed, the criterion of comfort of high-speed transport is indicated.*

### Обозначения

СЖТ – скоростной железнодорожный транспорт,

МЛТ – магнитолевитирующий транспорт,

ЭМЛ – электромагнитная левитация,

ЭДЛ – электродинамическая левитация.

### Социологическая экология скоростного транспорта

В 1851 г. была закончена первая железная дорога в России, по которой “всенародный поезд” за 18 часов совершил переезд из Петербурга в Москву со скоростью 37,5 версты в час (39,8 км/ч). Уже в 1876 г. курьерский поезд сократил время пребывания в пути до 12-ти часов при средней скорости 53,4 км/ч. Это была одна из начальных фаз битвы на рельсах за скорость.

При опытных рекордных поездках на железных дорогах разных государств, с использованием различных средств тяги за период с 1829 г. до конца XX века среднегодовой темп прироста скорости составил 2,4 км/ч.

В 1960-е годы для скоростного железнодорожного движения на линии Ленинград - Москва был создан электропоезд ЭР -200, технические характеристики которого соответствовали мировому уровню [1]. В 1971 г. скорость движения на этой линии составляла 160 км/ч. При всех существующих проблемах, магистраль между двумя столицами остаётся лучшим участком пути РЖД для организации высокоскоростного движения.

Железнодорожная линия была реконструирована и переведена на тяжёлый тип рельсов Р 75 (поставку рельсов осуществила японская металлургическая компания).

В 1970-е годы из-за отсутствия финансирования все работы по скоростному движению были свёрнуты. Только с 1976 г. начались испытательные поездки электропоезда серии ЭР 200, который достиг максимальной скорости 220 км/ч. Экспресс постоянно курсировал на линии с 1984 г. (один рейс в неделю из Ленинграда в Москву и обратно), но из-за неудовлетворительного

состояния пути только на одном участке достигал скорости 200 км/ч.

Целый ряд проблем возникает из-за того, что высокоскоростное движение организовано по общим с обычными поездами железнодорожным путям. В России накоплен негативный опыт совмещения скоростного движения поезда ЭР 200 и грузовых перевозок на одном пути. Из-за переменных нагрузок от лёгких пассажирских поездов и тяжеловесных товарных возникает бесконечный ремонтный цикл восстановления параметров плана и профиля пути. Несоответствие скоростных характеристик не позволяет оптимизировать пропускную способность трассы. В результате оказывается парализованной деятельность старой железной дороги и обречена на неработоспособность скоростная линия. В связи с этим было принято решение о строительстве первой в России высокоскоростной железнодорожной магистрали, предполагалось, что между двумя столицами поезда смогут курсировать со скоростью до 400 км/ч.

На смену устаревшим электричкам ЭР 200, которые эксплуатировались с 1984 г., в 2010 г. пришёл модернизированный немецкий мотор - вагонный электропоезд Intercity – Express (ICE). Компания Siemens сконструировала поезд Velaro RUS («Сапсан») на базе стандартной платформы Velaro, которая использовалась для изготовления поездов для Испании и Китая. Максимальная скорость экспресса составляет 300 км/ч, на российских дорогах скорость ограничена 250 км/ч. Первоначальное время поездки между столицами (650 км) составляло 3 ч. 45 мин., что на 10 мин меньше, чем лучшее время поезда ЭР200 на этой линии. Сейчас время в пути варьируется от 3 ч 30 мин до 4 ч 45 мин. Большую часть маршрута “Сапсан” следует с максимальной скоростью 200 км/ч, на одном участке маршрута она достигает 250 км/ч. С 2010 г. оборот экспресса увеличен до 5 пар поездов в сутки. “Сапсан” за 5 лет (2009 – 2013 гг.) перевёз 10 млн. пассажиров. С 2014 г.

запущен сдвоенный поезд “Сапсан”, состоящий из 20 вагонов вместимостью 1050 пассажиров, длина состава более 500 м. В 2016 г. был установлен рекорд количества перевезенных пассажиров за день – почти 18 тыс. пассажиров было перевезено при помощи 15 пар поездов, из которых 3 пары поездов сдвоенных. Важно, чтобы с введением регулярного движения экспрессов процент занятых мест в них не стал снижаться. Для рентабельности наполняемость вагонов должна быть не ниже 80 %. Использование экспресса “Сапсан” на других направлениях РЖД не оправдано: поезд не может развивать свои эксплуатационные скорости ввиду технических ограничений по состоянию пути. В целом, РЖД перевозит 1,3 млрд. пассажиров в год. В России, по данным 2004 г., в основном уложены мало пригодные для скоростного движения рельсы Р 65 (94,3%), небольшую часть составляют лёгкие рельсы Р 50 (3,5%) и тяжёлые рельсы Р 75 (1,2 %).

На сегодня железнодорожный транспорт – наипопулярнейший, лидер по количеству перевозимых пассажиров. Но с увеличением скорости движения железная дорога постепенно утрачивает репутацию самого удобного вида путей сообщений. Чем быстрее движется поезд, тем больше уровень вредного воздействия колебаний подвижного состава на пассажиров. Динамические нагрузки на пассажиров экспрессов в ряде случаев приводят к проблемам, решение которых требует особого внимания.

На тенденцию развития технологии перевозок всё более чётко накладывают свой отпечаток социологические аспекты экологии, в частности, небезопасным оказывается взаимодействие людей с искусственной средой, созданной руками человека, – транспортной техникой. Прямым следствием несовершенства технологии перевозок является высокий уровень “транспортной усталости” пассажиров и вредное воздействие на людей, живущих вблизи магистралей.

### **Концепции развития экспрессов: рельсовые или левитирующие**

#### ***Рельсовые экспрессы***

В настоящее время рельсовые экспрессы являются основными перевозчиками на средние расстояния до 2000 - 3000 км. Страны ЕС, Япония и Китай сегодня имеют самый большой опыт использования СЖТ.

Для китайцев трудно переоценить социальную функцию транспорта. Благодаря продуманной ценовой политике именно бедные слои населения составляют основу пассажиропотоков – наполненность скоростных поездов высокая. Рельсовый скоростной транспорт в Китае производится по иностранным лицензиям: импортируются лучшие образцы транспортной техники из стран ЕС, активно идёт строительство сети скоростных железных дорог. К 2020 г. планирует с их помощью соединить 70 % крупных китайских городов. Самая длинная в мире скоростная линия Пекин – Гуанчжоу запущена в 2012 г.: расстояние в 2298 км поезд преодолевает за 8 часов, делая при этом 35 остановок, маршрутная скорость 285 км/ч. Раньше пассажир преодолевал эту дистанцию за 22 часа с маршрутной скоростью 105 км/ч.

Поучителен опыт японских железнодорожников, который возник в ходе эволюции СЖТ и который виден на примере одной из самых совершенных скоростных трасс – Нью-Токайдо. Магистраль представляет почти идеальную прямую длиной 556 км, поезд со средней

скоростью 220 - 240 км/ч проходит дистанцию Токио - Осака (с остановками в Киото и Нагоя) за 2 ч 49 мин. На трассе 280 поездов ежедневно перевозят 360 тыс. пассажиров.

Тем не менее, при эксплуатации даже такой совершенной магистрали возникают трудности:

во-первых, исчерпана пропускная способность – число поездов в 1 час увеличено с 11 до 15, что близко к допустимому пределу;

во-вторых, стареет оборудование со времени открытия линии прошло полвека, необходим ремонт или замена 3000 мостов, 66 тоннелей, 114 км эстакад.

Чем выше скорость движения и чем больше вес поезда, тем отчётливее проявляются недостатки, заложенные в системе “колесо - рельс”. Рост скоростей движения оказывает негативное воздействие на все технические характеристики: уменьшается коэффициент сцепления колеса с рельсом, возрастают нагрузки на подвижной состав и путь, увеличивается износ рельсов и подвижного состава. Как показала длительная эксплуатация японской системы Shincansen, экспрессы при скорости выше 200 км/ч быстро изнашивают ходовую часть подвижного состава и полотно дороги; усиливается динамика их взаимодействия и ухудшается устойчивость движения. Повышенный износ рельсов на скоростных магистралях объясняется частыми разгонами и торможениями, а также нестабильностью характеристик сцепления колеса с рельсом при изменении метеоусловий и при разных нагрузках.

Магистральный электротранспорт – один из самых чутких к инженерным новациям видов транспорта, в том числе и в области защиты окружающей среды. Прокладка скоростных трасс сопряжена с трудностями из-за ужесточения экологических требований. В ФРГ в результате протестов экологов руководители “Deutsche Bahn” вынуждены были пойти на увеличение стоимости прокладки трасс. Так, на линии Манхейм – Штутгарт, протяженностью около 100 км, из-за дополнительного строительства 15 тоннелей и 90 мостов, стоимость прокладки каждого километра оказалась в 4 раза выше, чем на линии Париж – Лион.

Требования социологической экологии по защите населения, живущего вблизи скоростных магистралей, вынуждают создавать специальные зоны безопасности вдоль линии, что ведёт к отчуждению больших площадей и требует дополнительных финансовых затрат. Из-за шума и усиления низкочастотных колебаний ухудшается комфорт поездки. Под давлением сторонников защиты окружающей среды, компания British Rail рассмотрела проект скоростной рельсовой линии Лондон – тоннель под проливом Ла-Манш, дополнительно построив несколько тоннелей и шумоподавляющих устройств по всей трассе, а также сократила скорость движения экспрессов.

#### ***Левитирующие экспрессы***

В результате длительных разработок конструкторы создали магнитолевитирующий транспорт (МЛТ) как альтернативу рельсовым экспрессам. Этот вид транспорта основан на принципиально новых подходах, не свойственных железнодорожному транспорту. МЛТ, как объект проектирования, представляет собой комплексную систему, отличающуюся многовариантностью технических решений по отдельным подсистемам (электромагнитным, криогенным, механическим, аэро-

динамическим) и многообразием связей между ними. В таких случаях существенен интегральный эффект, проявляющийся в свойствах системы в целом и не характерный для каждой из подсистем в отдельности. Для реализации интегрального эффекта с помощью композиционного синтеза необходимо сформировать наилучшую по принятым критериям функциональную и экономическую эффективность системы.

Обеспечение заданных характеристик (левитационного зазора и грузоподъёмности) требует оптимизации параметров различного рода – геометрических, кинематических, динамических, магнитных, температурных, – в пределах принятой принципиальной компоновки экипажа. Улучшение технических параметров должно сочетаться с минимальными затратами энергоресурсов и магнитных материалов без увеличения материалоемкости.

Проведенный поиск таких технических решений позволил выявить потенциальные возможности систем ЭМЛ и ЭДЛ, а их осуществимость – подтвердить результатами полигонных испытаний немецкого экипажа Transrapid системы ЭМЛ и японского экипажа MLU системы ЭДЛ. Тяга обоих экипажей осуществляется с помощью линейного синхронного двигателя (ЛСД). Подвижная часть ЛСД, размещённая на экипаже, может линейно перемещаться со скоростями до 500 – 600 км/ч вдоль неподвижной части – разомкнутого магнитопровода, уложенного в путевую структуру.

Практические работы по экспрессу Transrapid, начатые в 1969 г. в ФРГ, завершились через 20 лет созданием промышленного образца поезда TR 07.

Система ЭДЛ появилась в США в 1960-е годы как одна из новых областей применения сверхпроводимости (СП). Транспортная технология ЭДЛ вначале оценивалась как чрезмерно сложная и дорогая, реальная разработка такой системы прогнозировалась на XXI век. Трудности в реализации ЭДЛ заключались в отсутствии необходимого опыта в области криогенной технологии по созданию лёгких, компактных, герметичных и надёжных транспортных СП – магнитов. Разработчиков отпугивала необходимость применения техники глубокого охлаждения с помощью жидкого гелия (без которого невозможно проявление эффекта сверхпроводимости). В основе транспорта с магнитной левитацией лежат нетрадиционные подходы к конструированию экипажа на стыке разных технологических дисциплин, где практически каждый элемент выполнен на уровне изобретений и открытий.

Японским инженерам и учёным удалось в течение 1975 - 1998 гг. реализовать идею ЭДЛ. Созданные ими СП-магниты, обеспечивающие большие скорости поступательного движения и значительную высоту левитации, достигли стадии, приемлемой для коммерческой эксплуатации. Если раньше, на предыдущих этапах разработок, необходимо было доказывать реальность самой идеи левитирующего полёта, то в настоящее время всё решается с позиции практического применения. Наступил этап, когда все вопросы необходимо решать комплексно, органически увязывая такие частные проблемы, как характеристики СП-магнитов, рефрижераторов-компрессоров, подвижного состава, путевого хозяйства и наземного оборудования, системы управления движением поездов. Работы в области создания

экспрессов системы ЭДЛ уже вышли за рамки теоретических и лабораторных исследований: разработаны экспериментальные и промышленные образцы магнитопоездов, проведены их полигонные испытания.

Быстроходный транспорт – это значит, более сложный подвижной состав, более прочный путь, более совершенные и дорогие средства управления движением поездов, больший расход энергии. Последний критерий является важным, но не определяющим, для выбора того или иного вида транспорта. Необходимо учитывать расходы, зависящие не только от потребления энергии, но и от эффекта, связанного с повышением скорости. Если учитывать зависимость от скорости, то энергетические затраты у магнитопоезда при скорости 400 км/ч в 2 раза меньше, чем у автомобиля при скорости 150 км/ч.

Левитирующий поезд – один из самых экономичных и экологичных видов транспорта – потребляет на 20 % меньше энергии, имеет более низкие показатели вредных выбросов в атмосферу (в среднем на 29 %), чем обычные поезда. Достигнутые успехи в создании “летающих” поездов стимулируют строительство магнитных дорог. Но для коренной реконструкции скоростных путей сообщения высоких технологий недостаточно. Есть ещё проблема доступности и привлекательности таких поездок для населения: только большие масштабы перевозок помогут окупить огромные капиталовложения в экспрессное движение.

Несмотря на очевидные успехи в пассажирских перевозках по железной дороге, Япония и Китай собираются кардинально реконструировать пути сообщения на базе инновационной технологии МЛТ.

В Японии параллельно железнодорожной линии Токио – Нагоя – Осака (на линии будут сохранены грузовые перевозки), строится коммерческая магнитная дорога Токио – Нагоя. Проведены полигонные испытания экипажа MLX 01 системы ЭДЛ на линии Яманаси (первый участок магистрали Токио – Осака длиной 42 км). Цели испытаний состояли в следующем:

во-первых, обеспечить устойчивость движения экипажа со скоростью км/ч;

во-вторых, достичь заданной регулярности движения и высокой пропускной способности (в часы пик – 10 тыс. человек в 1 час в один конец). После завершения строительства дистанция между Токио и Осака будет преодолевать менее чем за 1 час.

Магнитные дороги предполагают использовать как альтернативу СЖТ и авиации (на местных линиях) для региональных сообщений с расстояниями между станциями до 500 км на маршрутах длиной до 2000 - 3000 км.

Опираясь на накопленный опыт эксплуатации поезда Shanghai Maglev Train системы ЭМЛ, китайская государственная железнодорожная корпорация приступила к строительству магнитной дороги Пекин – Шанхай длиной в 1302 км. Сейчас на преодоление этой дистанции уходит: 5,5 часов – на СЖТ, 4,5 часа – на самолёте (с учётом подготовки к полёту). Планируется завершить испытания и в 2021 г. запустить в коммерческую эксплуатацию экспресс с максимальной скоростью 600 км/ч, который “долетит” за 3,5 часа из Пекина в Шанхай. Такое время поездки достаточно длительно, чтобы было необходимо оценить степень “транспортной усталости”.

## Колебания рельсовых экспрессов. Критические скорости

Внешние возмущения регулярного и нерегулярного характера – спутники пассажиров на разных видах транспорта. Частоты 60 Гц – 40 кГц вибраций реактивных двигателей, применяемых в авиации, аэродинамический шум (150 Гц – 40 кГц) постоянно сопровождают авиапассажиров и причиняют беспокойство во всём звуковом диапазоне. Неудобство в полёте создают колебания, связанные с деформированием конструкции фюзеляжа самолёта с частотой 1 – 40 Гц, а также “ухабы” – провалы в воздушные ямы, которые возникают из-за турбулентного характера обтекания самолёта воздушным потоком.

При морском путешествии, помимо вибраций двигательной установки (20 Гц – 10 кГц) и колебаний, связанных с деформированием корпуса корабля (1 – 40 Гц), особое неудобство доставляет качка судна. Значительные по амплитуде колебания низкой частоты, возникающие при качке, плохо воспринимаются организмом человека и способствуют укачиванию.

На железной дороге, помимо возмущений, которые носят случайный и неупорядоченный характер (толчки, поддёргивание, тряска, шум), постоянными возмущениями являются ритмические “ухабы” с упорядоченными динамическими показателями. При достаточно высокой скорости прямолинейное движение колёс вагона по рельсам становится неустойчивым, возникают поперечные колебания и реборды колёс начинают ударяться о боковые поверхности рельсов, достаточно упругих стальных брусьев, что способствует усилению колебаний вагонов. Этот процесс является автоколебательным, поскольку на систему не действуют внешние периодические возмущения, а источником энергии является движущийся экипаж.

При критических скоростях движения, когда невозможное движение экипажа становится неустойчивым, амплитуды боковой качки, виляния, подпрыгивания и галопирования кузова вагона возрастают и оказывают влияние на формирование вертикальных и горизонтальных сил в элементах, входящих в систему “экипаж - путь”. Из-за виляния и бокового отбоя вагон

иногда “мотает” из стороны в сторону, и пассажиры испытывают трудности при передвижении по салону. Поперечные колебания с большими амплитудами пассажиры воспринимают особенно болезненно на боковых верхних полках плацкартного вагона. Раскачивающий эффект, действующий на вагон, зависит не только от скорости движения. Этот вид колебаний усиливается в случае большого износа подвижного состава и пути. Просевшие стыки рельсов повышают уровень колебаний подвижного состава и динамических ударных нагрузок, что, в свою очередь, приводит к ослаблению устойчивости балластной призмы и других компонентов пути.

Динамические характеристики кузова и подвески экипажа зависят от упругости соединений, создающих восстанавливающие силы при перемещениях и поворотах колёсных пар относительно рамы тележек, а тележек – относительно кузова. Критическую скорость движения вагона, при которой возникает неустойчивость, можно изменить, увеличив жесткость подвесок, препятствующих повороту тележек относительно вертикальных осей. Демпфирование колебаний поворота не дает существенных результатов, не помогает и усиление рельсошпальной решётки. Жёсткость буксового подвешивания подбирают так, чтобы собственные колебания обрессоренной части экипажа на рельсовых нитях и колебания необрессоренных масс были разнесены по частоте. Чем больше скорость, тем вероятнее сближение этих частот. Как следствие, растут поперечные и вертикальные ускорения, бортовая и продольная качка. Существенно взаимовлияние этих видов колебаний.

Вагоны электропоезда ЭР-200 снабжены двойным рессорным подвесом как в вертикальном, так и в горизонтальном поперечном направлении. Во второй ступени подвешивания установлены пневматические рессоры, допускающие и вертикальные, и поперечные горизонтальные перемещения кузова относительно рам тележек. Низкочастотные колебания поезда ЭР 200 подробно изучены в работах [1,2]. В таблице 1 приведены частоты различных видов колебаний кузова, возникающих при критических скоростях движения в диапазоне 45 - 200 км/ч.

Таблица 1.

Вид колебаний	Частота, Гц	Критические скорости в диапазоне скоростей, км/ч			
		45-69	70-99	100-149	150-200
Подпрыгивание кузова	1,04		93,6		
Продольная качка кузова	1,29	58		116	
Подпрыгивание тележек	4,65	46;52;59		104;139 111;147	
Продольная качка тележек	4,94	55; 63	74; 89		
I тон изгибных колебаний кузова (симметричный)	7,09	53; 58	71;80;91		159
II тон изгибных колебаний кузова (кососимметричный)	19,9				162; 179; 199

В интервале 45 – 69 км/ч действуют практически одновременно подпрыгивание тележек, продольная качка кузова и тележек, I тон изгибных колебаний кузова. В интервале 70 – 99 км/ч действуют одновременно продольная качка тележек и I тон изгибных колебаний кузова, а с увеличением скорости, - подпрыгивание кузова. В интервале 100 - 149 км/ч взаимодействуют подпрыгивание тележек, продольная качка кузова и тележек. Для интервала 150 – 200 км/ч характерны изгиб-

ные колебания кузова (I и II тон). Данные таблицы 1 для наглядности представлены на рисунке 1 частотами  $f$  компонент спектра разных видов колебаний (в виде условных обозначений стрелками), зарегистрированных в исследуемом диапазоне скоростей  $v$ . Штриховыми линиями отмечены одинаковые частоты, которые соответствуют разным критическим скоростям.

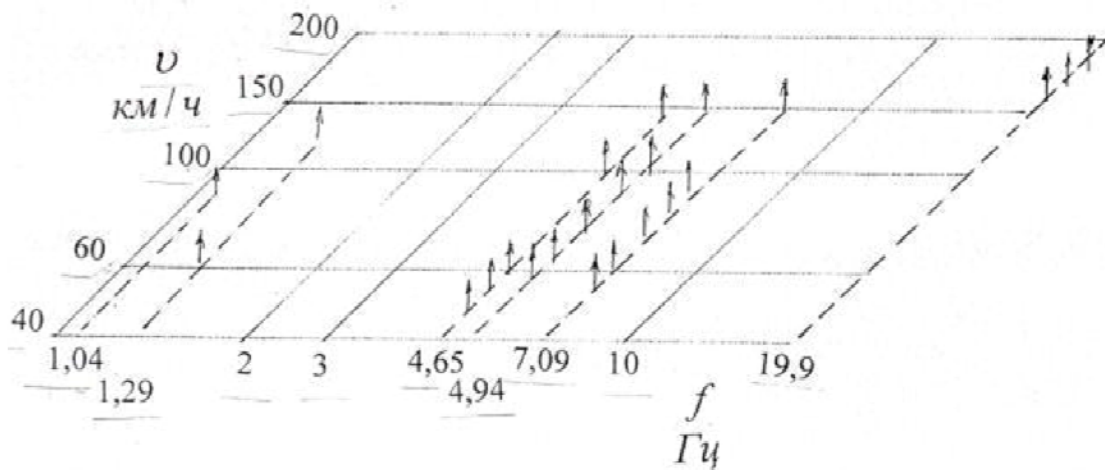


Рисунок 1

Пассажиры поезда ЭР 200 в диапазоне скоростей 45 - 200 км/ч находятся под непрерывным воздействием низкочастотных колебаний и испытывают дискомфорт, связанный с преодолением, по меньшей мере, 23 критических скоростей. Как видно из графического представления на рис.1, достаточно сложно подобрать скорость движения, благоприятную по удобству для пассажиров, т. е. без низкочастотных колебаний кузова вагона. Среди «частотола» компонент спектра, соответствующих критическим скоростям, не просто найти просвет для такой скорости движения, при которой пассажир чувствовал бы себя комфортно. При проектировании экипажа возникает конфликтная ситуация из-за того, что требование технологии перевозок приходит в противоречие с требованием комфорта поездки. В разрешении этой ситуации конструктор не свободен в своём выборе. Очевидно, что при проектировании поезда ЭР 200 проблема комфорта не считалась первоочередной.

Для конкретного транспортного объекта частотный режим колебаний не является чем-то предопределённым. Существует простое средство изменения этого режима – вариация скоростей движения для избирательного воздействия на компоненты спектра исходя не только из требований технологии перевозок, но и из соображений комфорта.

Низкочастотные колебания рельсового экипажа существенно усиливаются с ростом скоростей движения. В частности, спектральный анализ динамических прогибов буксового подвешивания, полученный при испытаниях поезда ЭР 200, показал, что на скорости 200 км/ч энергия колебаний, приходящаяся на компоненты спектра в диапазоне частот 5,5 – 7,5 Гц, связанные с колебаниями кузова как деформируемого тела, в 1,55 раза больше, чем при скорости 150 км/ч. В подвижном составе, изготовленном из лёгких сплавов, трудно обеспечить достаточную жёсткость вагона. Чем легче материалы, тем ниже частоты изгибных колебаний кузова. Натурные испытания показали, что опытные образцы удлинённых пассажирских вагонов поезда ЭР 200, изготовленные из алюминиевых сплавов, не обеспечивают требуемого уровня комфорта: частота первого тона изгибных колебаний кузова составляет 6 – 7 Гц, плавность хода неудовлетворительная [2].

### Колебания левитирующих экспрессов

На современном этапе развития путей сообщения появились научно-технические разработки, позволившие стимулировать развитие конструкций экспрессов нового поколения. За прошедшие десятилетия виды экспрессов претерпели кардинальные трансформации от мощных тяжёлых паровозов до бесконтактных воздушных аппаратов, парящих над путевой структурой. Особые свойства левитационного способа перевозки пассажиров приводят к глубинным изменениям в проектировании подвижного состава. Возникновение подъёмной силы в значительной мере зависит от аэродинамической формы экипажа. Так, впервые для наземного транспорта приходится совершенствовать аэродинамику поезда на основе детального анализа воздушных потоков, обтекающих экипаж, при бесконтактном взаимодействии с путевой структурой. Обтекаемой формы пассажирские модули сочленённых левитирующих экипажей слиты в единое целое и имеют больше общего с фюзеляжем самолёта, чем с вагоном. Сложности в проектировании связаны не только с разработкой уникальной аэродинамической формы поезда, но и с огромным ростом взаимосвязей между аэродинамическими свойствами экипажа и обеспечением требований прочности и надёжности конструкции, устойчивости движения и, не в последнюю очередь, с учётом обострившихся экологических проблем, созданием комфортабельных условий поездки.

Ввиду бесконтактного характера движения у левитирующего экипажа нет тех видов механических колебаний, которые свойственны рельсовому поезду. Правда, свой вклад в спектр колебаний может вносить путевая структура, а именно, периодичность неровностей пути, связанная с просадкой навесной эстакады между опорами. Согласно опубликованным данным [3], состояние современной строительной техники позволяет иметь пути с допуском просадки 5 мм между опорами, установленными на расстоянии 15 м. Такая длинная неровность, действуя на экипаж, движущийся со скоростями 300 – 400 км/ч, создаёт возмущения частотой 5,5 - 7,4 Гц. Если увеличить скорость до 500 км/ч, то наибольшее значение спектральной плотности сдвигается к частоте 9,3 Гц. Аэромагнитная подушка толщиной всего в

несколько сантиметров, благодаря отличному амортизационному качеству, защищает пассажира “летающего” поезда от подобных воздействий со стороны пути, поездка осуществляется в более комфортных условиях, чем на железной дороге.

Вместе с тем, появляются другие, необычные для наземного транспорта виды колебаний, свойственные, скорее, самолёту. Турбулентность воздушной среды, или пульсации магнитного поля, которые поддерживают магнитоплан в “полёте”, могут быть источниками низкочастотных колебаний.

По весовому совершенству левитирующий экипаж приближается к авиационным конструкциям и потому обладает большой поперечной гибкостью. Например, зарегистрированы низкие частоты изгибных колебаний немецкого экипажа TR 06 системы ЭМЛ (I тон - 6,5 Гц, II тон - 10,7 Гц) [4].

Влияние скорости движения на частоты и амплитуды колебаний МЛТ имеет сложный характер. Для японского экипажа ML-500 системы ЭДЛ частота вертикаль-

ных колебаний и колебаний угла наклона пассажирского модуля меняется в пределах 1,3 - 1,7 Гц и зависит от скорости движения [5].

Как следует из результатов измерений при полигонных испытаниях (таблица 2), с увеличением скорости от 200 км/ч до 500 км/ч перемещения и ускорения вагона трансформируются следующим образом:

а) Амплитуды перемещений уменьшаются: в 1,61 раза - вертикальные колебания в конце вагона; в 1,5 раза - горизонтальные колебания в конце вагона; в 1,46 раза - горизонтальные колебания в центре вагона. Исключение составляют амплитуды перемещений вертикальных колебаний в центре вагона, которые не уменьшаются, а увеличиваются в 1,2 раза.

б) Амплитуды ускорений увеличиваются: в 1,06 раза - вертикальные колебания в конце вагона; в 1,11 раза - горизонтальные колебания в конце вагона; в 1,32 раза - вертикальные колебания в центре вагона; в 1,1 раза - горизонтальные колебания в центре вагона.

Таблица 2.

Скорость движения, км/ч	Место измерения	Амплитуда перемещений, мм		Амплитуда ускорений, % от ускорения силы тяжести g	
		Вертик.	Горизонт.	Вертик.	Горизонт.
200	Центр кузова	9,3	29,1	6,8	19
	Конец вагона	29,3	40,7	17,9	27
500	Центр кузова	11,2	19,9	8,95	21
	Конец вагона	18,2	27,1	19	30

В ходе испытаний ML 500 было установлено, что при скорости выше 300 км/ч растёт влияние аэродинамических сил на высоту подвеса и угловую продольную качку - клиренс составил 100 мм для скорости 500 км/ч, на меньшей скорости вертикальные и горизонтальные клиренсы уменьшились до 50 мм. Такие клиренсы в значительной мере выбиралась горизонтальными (30 - 40 мм) и вертикальными перемещениями (30 мм) в конце вагона.

#### Частотная избирательность действия колебаний на пассажира

Источником колебаний могут быть любые явления, связанные с движением поезда. Из-за работы электродвигателей, машин, механизмов, конструкций подвижного состава на СЖТ регистрируются вибрации в широком спектре частот (0,1 Гц - 40 кГц). Хотя и в разной степени, эти источники имеют достаточную интенсивность, чтобы причинить неудобства пассажирам.

Когда вагон проезжает над стыком рельсов, то его колеса испытывают удар в вертикальном направлении. Этот удар не передается непосредственно на пассажира благодаря податливости рессорного подвешивания. Под действием удара рессоры деформируются, что приводит к свободным колебаниям вагона и подпрыгиванию пассажиров вверх и вниз. Эти колебания быстро затухают, но если отключить демпферы подвески ваго-

на, то пассажиры будут ощущать медленно затухающие качания, напоминающие качку корабля на волнах, и возможна реакция похожая на морскую болезнь.

На рисунке 2 представлена зависимость от скорости движения частоты ударов на стыках рельсов двух типов: длиной  $l_p = 12,5$  м и  $l_p = 25$  м. Для пути, уложенного из коротких рельсов, частота  $f = 1,25$  Гц соответствует скорости  $v = 56,4$  км/ч, а из длинных рельсов - скорости  $v = 113$  км/ч. Чем больше скорость, тем ближе частота двойных ударов колёс тележек на стыках к зоне неблагоприятных для организма человека внешних возмущений. Например, при движении со скоростью 225 км/ч по пути, уложенному из коротких рельсов, частота ударов на стыках рельсов составляет 5 Гц и воспринимается болезненно.

Колебания причиняют неудобства и могут быть вредным фактором, нарушающим комфорт поездки, а при определённых условиях вызывают опасное для организма человека состояние. Хотя чёткие рекомендации по возможной реакции пассажира сложно сформулировать, некоторое представление о физиологических эффектах, которые можно ожидать при возбуждении в человеческом теле колебаний с различными частотами, даёт таблица 3, где “шум” означает вибрацию воздушного происхождения.

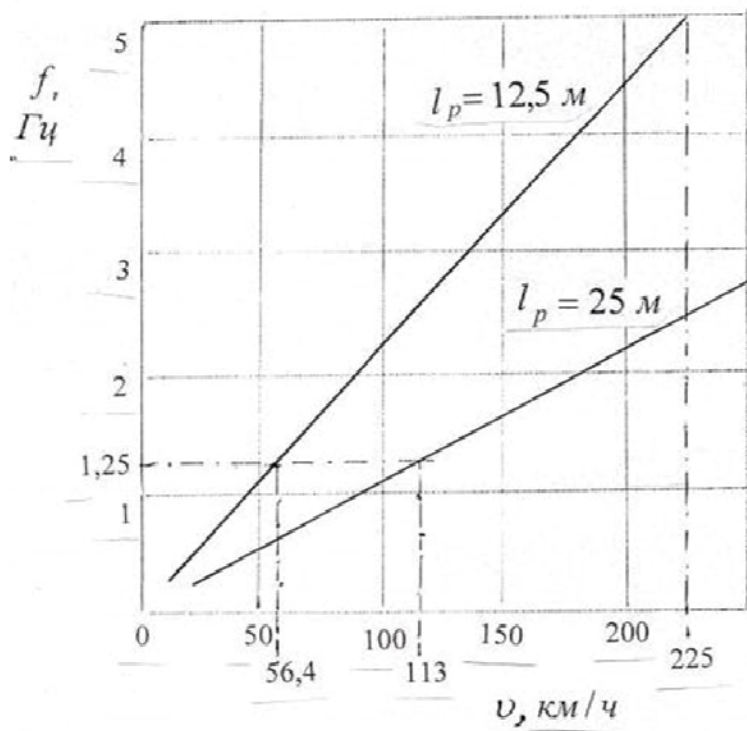


Рисунок 2

Таблица 3.

Вид вибраций	Частота, Гц	Физиологический эффект
Аэродинамический шум при высоких скоростях движения поезда	$16 \cdot 2 \cdot 10^4$ $10^2 - 5 \cdot 10^3$	Головокружение Нарушение восприятия сообщений
Турбулентность, порывы ветра	$10^3 - 5 \cdot 10^3$ 0,1-5	Повреждение слуха Головокружение и неустойчивость
-----	-----	-----
Вибрации механического происхождения	0,1-1,25 3-16 $1 \cdot 10^2$ $10^4 - 10^6$	Укачивание, “морская” болезнь Дыхание затруднено, боль в туловище Нарушение зрительных восприятий Тепловое действие, повреждение клеток

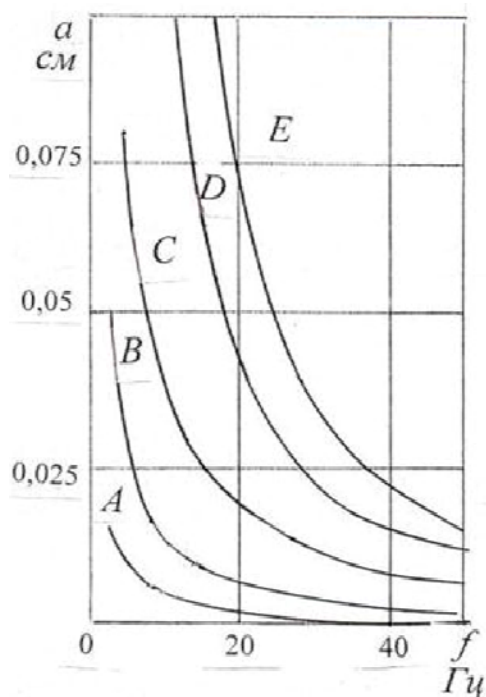


Рисунок 3

Чувствительность тела человека к вертикальным колебаниям малой амплитуды описывает семейство кривых на рисунке 3; их использование оказалось полезным для оценки комфортности поездки на железнодорожном транспорте. В координатах “частота  $f$  - амплитуда  $a$ ” указаны различные уровни чувствительности человека:

- А) колебания едва ощутимы;
- В) колебания заметно ощутимы;
- С) колебания весьма ощутимы и оказывают раздражающее воздействие;
- Д) колебания вызывают неприятное состояние;
- Е) колебания вызывают болезненное состояние [6].

Численные данные табл. 3 и графики на рис. 3 сугубо приближённые и не могут дать чётких рекомендаций о степени чувствительности, в том числе, из-за существенных различий между людьми.

Сильное неблагоприятное воздействие на пассажира могут оказать механические колебания вагона на частотах, таких как само человеческое тело и отдельные органы (тело – 6 Гц, грудная клетка – 5-8 Гц, голова – 20-30 Гц). Например, сидя в кресле, совершающем вертикальные колебания, пассажир остро реагирует на

частоту около 5 Гц, при которой нарушение нормального состояния связано с интенсивными колебаниями плечевого пояса, такая частота ударов на стыках соответствует движению со скоростью 225 км/ч по участку, составленному из рельсов длиной  $l_p = 12,5$  м (см. рис.2).

Частота 12 Гц может вызвать неприятные ощущения, приступ “морской болезни” и головокружение.

### **Инфразвуковые частоты и физиология человека**

Перед разработчиками скоростных видов путей сообщения возникают разнообразные и исключительно сложные задачи анализа колебаний подвижного состава и разработки мер специальной защиты от их воздействия на пассажира. Колебания объединяет общая физическая природа, но они существенно различаются по частоте, по заключенной в них энергии, характеру распространения и затухания, и, вследствие этого, по воздействию на человека. Физиологическая реакция людей на колебания зависит от многих факторов – направления и места приложения перегрузки, интенсивности и продолжительности действия перегрузки, но наиболее важным фактором остаётся частота. Хотя на пассажира действуют вибрации в широком частотном диапазоне, сверхнизкие частоты особо влияют на самочувствие и здоровье человека.

Неблагоприятное воздействие инфразвуковых колебаний, зарождающихся при приближении землетрясения, цунами, низкочастотных волн на поверхности океана (“мертвая зыбь”), проявлялось на всем протяжении существования человечества.

Человеческое ухо является тонким прибором для распознавания колебаний, но только в диапазоне частот 16 Гц – 18 кГц. В ходе эволюции человек утратил важную способность воспринимать инфразвук, но низкочастотные возмущения активно влияют на организм, особенно на мозг. У людей под воздействием колебаний с частотой ниже 10 Гц, возникает неосознанное чувство страха и подавленности. Неслышимые для человека, мощные инфразвуковые колебания изменяют ритм сердца и дыхания, увеличивают кровеносное давление, ослабляют функции слуха и зрения, повышают утомляемость.

Организмы людей представляют собой тонко настроенную резонансную систему электромагнитных полей. Реально регистрируемые виды биоплазменных электромагнитных полей показывают чрезвычайную сложность их образования и проявления. Биополе имеет специфическую пространственную организацию в живом организме. Отличительной особенностью биополя является его интегральный характер, это – своеобразная суперпозиция различных видов физических полей, начиная от электронных состояний атомов и кончая полями макромолекулярных комплексов и тканей. В биоплазменном поле представлены частоты в диапазоне  $10^0$ - $10^{15}$  Гц. Практический интерес представляет биополе, которое является низкочастотным электромагнитным излучением в диапазоне 0,1 - 30 Гц и может фиксироваться на расстоянии нескольких метров от биологического объекта.

Многие процессы в живом организме представляют собой автоколебания, например, дыхание и работа сердца. Ритму биения сердца, дыханию, биотоку мозга и речи – всему этому присущи инфразвуковые частоты в диапазоне 0,1 - 10 Гц. Биотоки в живых организмах

играют роль линий связи, по которым в мозг передается информация о внешнем мире, а ответные сигналы мозга – мышцам и внутренним органам.

Все разнообразные ритмы работы органов и тканей человека синхронизируются центральной нервной системой. Роль синхронизатора выполняет ритмическая активность мозга, сопровождающаяся определенными биоэлектромагнитными явлениями. Ритм и интенсивность электрических колебаний коры головного мозга существенно зависят от физического состояния человека. Основной ритм биопотенциалов головного мозга (частота альфа-ритма 10 Гц) связан с частотой пульсаций магнитного поля Земли (8 - 16 Гц). Амплитуда магнитоэнцефалографического сигнала альфа-ритма составляет 4 нТ. Это самые слабые биомагнитные поля, порождаемые активностью нервной системы, но ритм магнитных явлений активно влияет на психофизиологические процессы.

Физиологические реакции организма человека, сопровождающие эти геопатогенные явления, - сравнительно слабые, но они активно усиливаются при резонансных колебаниях, вызванных совпадением частот внешнего возбудителя и внутренних органов человека. Наряду с естественными биомагнитными полями возможно воздействие внешних электромагнитных волн и связанных с механическими колебаниями. Внешнее электромагнитное поле частотой 10 Гц увеличивает мощность альфа-волн и бета-волн электроэнцефалограмм. В результате возникает биоэлектромагнитное поле “механического” происхождения [7].

Накоплена разнообразная информация о влиянии инфразвуковых колебаний на центральную нервную систему человека. Под воздействием инфразвуковых частот существует реальная угроза расстройства “биологических часов” организма, десинхронизация работы полушарий головного мозга, что чревато тяжелыми заболеваниями и даже смертью.

### **Роль амплитуды инфразвуковых компонентов спектра**

Механические колебания с частотами ниже 16 Гц относят к числу неблагоприятных воздействий на пассажира, причём важную роль при оценке условий комфорта поездки имеет не только частота, но и амплитуда колебаний. Человеческое тело может выдерживать весьма большие амплитуды перемещений, если изменения направления движения происходят не слишком часто. Медленные колебания большой амплитуды сами по себе не опасны. Однако с увеличением частоты проблема может стать более серьезной, и тому яркий пример - морская болезнь. При одинаковой частоте человеческое тело “предпочитает” меньшие амплитуды колебаний.

Пассажир испытывает неудобства в вагоне, который из-за автосцепки с соседними вагонами колеблется в поезде, как составная часть единого целого. Степень дискомфорта зависит от того, где размещён вагон в поезде: амплитуда виляний вагонов в хвосте поезда существенно больше, чем в головных вагонах. Восприимчивость к процессу укачивания под влиянием медленных колебаний большой амплитуды зависит от атмосферных условий замкнутого пространства вагона (высокая температура и большая влажность), а также от состояния пассажира, когда ослаблены защитные реакции организма. Воздействие инфразвука может повли-



ять не только на физическое состояние, но и на психику пассажира.

Необходимо анализировать частоты колебаний, сопровождающих пассажира в поездке, и амплитуды соответствующих компонентов спектра. Перегрузки на инфразвуковых частотах регламентируются, так как в этом диапазоне оказываются собственные частоты важных органов человека. Полностью изолировать пассажира от низкочастотных колебаний сложно, поэтому желательно ограничить предельный уровень ускорений в диапазоне частот, наиболее болезненных для человека. Удовлетворительно переносимый организмом человека предел знакопеременных ускорений при инфразвуковых частотах составляет 3 – 4,4 % g (в процентах от ускорения силы тяжести g). Это означает, что при гармоническом характере неровностей пути амплитуда колебаний вагона на возмущающей частоте не должна превышать микроскопическую величину 0,09 мм. Не существует аналитических методов для надёжной оценки этой величины в условиях непрерывного взаимодействия разных видов колебаний. Поэтому первоочередную роль приобретает экспериментальная проверка возможности устойчивого движения с соблюдением ограничений по перемещениям и ускорениям вагона.

На некоторых межстанционных перегонах и путях станций применяют бесстыковой путь – сварные плети из рельсов, достигающие 800 м и более в длину. Однако и бесстыковые рельсовые нити имеют периодические неровности (волнистость, длинная неровность), которые не позволяют создать “бархатный” путь. В железнодорожной практике всегда существуют малые отклонения рельсовой нити от прямолинейной формы. В результате непостоянства упругих свойств верхнего строения пути в продольном направлении возникают кручение и изгиб рельсовых нитей. Каждый из двух рельсов может иметь вертикальные и горизонтальные перемещения, а также угловой поворот вокруг оси. Подвижной состав с низкими частотами собственных колебаний (до 1 Гц в горизонтальной плоскости) вызывает при скорости 300 км/ч периодические расстройств пути с длиной волны неровностей 83 м. Знакопеременные силы создают раскачивающий эффект, что способствует усилению колебаний вагонов на низких частотах и снижает комфорт поездки.

Эффективное демпфирование низкочастотных компонентов спектра значительной амплитуды не всегда экономически оправдано. Более удачным решением может оказаться изоляция пассажирского салона от низкочастотных колебаний с помощью вспомогательной подвески. Например, такой, как в электричках Hyundai категории Rotem (Южная Корея), защищающей пассажиров от периодических возмущений со стороны пути. Разгоняется и тормозит состав неслышно, автоматизация управления делает движение поезда плавным и при трогании, и при торможении. Пассажир не испытывает дискомфорта при движении со скоростями до 120 – 160 км/ч: не ощущает сильных вибраций, низкочастотных колебаний большой амплитуды, резкого изменения ускорений при разных режимах движения, а также движения по кривой на большой скорости. Устроившись в удобные сидения с ортопедической спинкой, пассажир отдыхает во время поездки, поэтому в меньшей степени испытывает “транспортную усталость”. Во время движения поезда в вагоне

можно стоять, не держась за поручни, и только при ходьбе по салону пассажир ощущает лёгкое (боковое) покачивание вследствие воздействия “длинных” неровностей рельсовой нити.

Рельсовый путь с большой длиной волны неровностей существенно влияет на комфортность скоростного движения, а их устранение особенно важно для скоростного движения. С увеличением скорости для обеспечения тех же условий комфортности поездки нужно снизить величину допустимых расстройств пути, определяемых на основании измерений такого параметра, как волнообразный износ поверхности катания головки рельса. Если нарушена эта норма содержания пути, то никакое совершенство подвески не защитит пассажира от воздействия инфразвуковых колебаний.

#### Диагностика реакции пассажира на колебания

Для оценки комфортности поездки необходимо диагностировать реакцию пассажира на инфразвуковые колебания. Сведений о влиянии низкочастотных колебаний на самочувствие пассажира очень мало. Изучение влияния механических колебаний на организм человека проводилось за последние десятилетия в основном в авиационно-космической сфере. Диапазон частот колебаний, представляющий интерес для авиастроителей и ракетчиков, достаточно широк (обычно 1 – 35 Гц), но возможности использования инженером-транспортником результатов таких исследований большей частью ограничены. Результаты, полученные для одних условий испытаний, приходится экстраполировать на совершенно другие условия.

Определённый интерес представляет информация, полученная при изучении самочувствия людей под влиянием низкочастотных (0,1 – 5 Гц) колебаний зданий и сооружений, вызванных воздействием турбулентности и порывов ветра. Например, можно воспользоваться данными работы [8], где для частот ниже 1 Гц предложены соотношения между различными уровнями дискомфорта и вызывающими их горизонтальными низкочастотными ускорениями (таблица 4).

Таблица 4.

Уровень дискомфорта горизонтальных колебаний	Ускорение, в процентах от ускорения силы тяжести g
Неощутимые колебания	0,5
Ощутимые колебания	0,5 - 1,5
Раздражающие колебания	1,5 – 5,0
Крайне раздражающие колебания	5,0 – 15,0
Непереносимые колебания	> 15,0

В работе [9] приведены результаты экспериментов по установлению границ осязательности для периодических колебаний с частотами от 0,067 до 0,2 Гц. Моделирование на динамических стендах было проведено для оценки влияния на пороги осязательности колебаний следующих факторов: ориентации, перемещений, позы тела человека и степени восприимчивости к колебаниям участников эксперимента. Согласно опубликованным данным, пороги осязательности приблизительно составляли для частот: 0,067 Гц – 1 % g, 0,1 Гц - 0,9 % g, 0,2 Гц – 0,6 % g. В пределах рассмотренного диапазона частот порог осязательности колебаний уменьшается по мере увеличения частоты.

Данные, приведенные в таблицах 3, 4, дают некоторое представление о физиологических эффектах, которые можно ожидать при возбуждении в человеческом организме колебаний с разными частотами, а их сопоставление с таблицей 1 позволяет диагностировать реакцию пассажира в зависимости от скорости движения поезда. Например, пассажир электропоезда ЭР 200 испытывает укачивание на скорости 58 км/ч из-за продольной качки кузова, аналогичная физиологическая реакция будет при скорости 116 км/ч. При скоростях 71 км/ч и 80 км/ч пассажир может испытывать боль в туловище и затрудненное дыхание в результате изгибных колебаний кузова, болезненный эффект сильнее проявляется у пассажиров на верхних полках вагона.

Пассажир японского экипажа ML-500 системы ЭДЛ в диапазоне скоростей движения 200 - 500 км/ч будет испытывать укачивание, вызванное частотами 1,3 - 1,7 Гц вертикальных колебаний и колебаний угла наклона кузова.

У пассажира немецкого экипажа TR-06 системы ЭМЛ частота 6,5 Гц первого тона изгибных колебаний кузова может вызвать боль в туловище.

Очень мало информации о длительном воздействии колебаний на пассажира магнитопоезда, так как в постоянной эксплуатации находится единственный китайский экспресс Shanghai Maglev Train, который разгоняется до 431 км/ч и проходит дистанцию “Шанхай – аэропорт” (30 км) за 7,5 минут.

Для восполнения недостающей информации о воздействии колебаний на пассажира МЛТ можно воспользоваться опытом виртуальной тренировки вертолётчиков, в частности, моделировать воздействие колебаний на пассажиров с помощью компьютеров и различных периферийных устройств. Таким способом можно без непосредственного участия в физическом эксперименте создавать при разнообразных режимах “полёта” ощущения пассажира в виртуальном пространстве левитирующего экипажа: воздействие ударов, колебаний разных частот и амплитуд, тяжесть перегрузки. Моделировать можно разные аварийные и опасные ситуации, в том числе и такие, которые в натурных испытаниях осуществить невозможно либо технически, либо из соображений безопасности для пассажиров. Эта необычная для МЛТ идея была осуществлена в США в виде программы для ЭВМ, которую разработала корпорация M - 2000 совместно с Национальным центром авиации и транспорта. Компьютерная программа моделирует продольный и поперечный профили магнитной дороги на 32-километровом участке Титусвилль – порт Канаверал. “Виртуальная” езда продолжается 9 мин и фиксирует изменение скорости, движение на кривых, углы наклона кузова при движении поезда.

### Экспрессы: шумовое загрязнение окружающей среды

Организм человека чувствителен не только непосредственно к отдельным компонентам в низкочастотной части спектра возмущений разного вида колебаний, но и к изменению частотного фона - высокочастотным вибрациям, создаваемым поездами. Своеобразным загрязнителем окружающей среды является шум, производимый СЖТ, - акустические звуковые колебания различной физической природы, со случайным изменением амплитуды и частоты. Важной характеристикой является спектральный состав, получаемый в ре-

зультате разложения шума на простые гармонические составляющие. Для акустических шумов характерен сплошной спектр с равномерным непрерывным распределением акустической энергии в более или менее широкой частотной области. Часто на сплошной спектр шума могут накладываться отдельные дискретные компоненты.

От спектра частот зависит характер восприятия звука органами слуха.

Звуковые волны, частоты которых заключены в диапазоне 16 Гц - 20 кГц, являются слышимыми. Наибольшей чувствительностью человеческое ухо обладает в области частот 1 - 5 кГц. Звуковое давление, основная количественная характеристика звука, изменяется с частотой, равной частоте звуковой волны. Для характеристики звука применяется уровень звукового давления  $L$ , пропорциональный десятичному логарифму отношения эффективного давления  $P_{эф}$  этой волны к условному порогу слышимости - звуковому давлению  $P_o = 2 \cdot 10^{-5}$  Па (при частоте 1 кГц):

$$L = 20 \lg \left( P_{эф} / P_o \right) \text{ (дБ)}.$$

Субъективной характеристикой звука, связанной с его интенсивностью, является громкость, которая, как мера силы слухового ощущения, зависит от частоты звука и эффективного его давления. Человек ощущает звуковое давление в воздухе в диапазоне от  $2 \cdot 10^{-5}$  Па (вблизи порога слышимости) до  $10^3$  Па (при самых громких звуках, например, при шумах реактивного двигателя). Под воздействием громкого звука слуховой аппарат подвергается утомлению и все воспринимаемые звуки казались бы более слабыми, если не было бы предшествующего утомления. Уровень утомляющего тона (частотой 800 Гц) равен 94 дБ над порогом слышимости.

Отметим для сопоставления, насколько сильно отличаются от уровней звукового раздражения, влияющего пагубно на здоровье, благоприятные виды шумов: спокойное дыхание - 5 - 10 дБ, шум листьев - 20 дБ, “тикание” будильника - 25 дБ. Допустимый уровень шума в жилых помещениях составляет до 55 дБ - днём, до 45 дБ - ночью; на прилегающих к жилым домам территориях - днём - до 70 дБ, ночью - до 60 дБ.

Техногенный шум угнетает важные процессы в живом организме, разрушает слуховой аппарат и приводит к потере слуха. Сильный резкий звук вызывает усиленное сердцебиение, повышает кровяное давление. При чрезмерном звуковом давлении или значительной длительности шума может возникнуть перевозбуждение клеток коры головного мозга, вызывающее охранительное торможение и изменение ответной реакции. Шум мешает восприятию речи, нормальному отдыху и работе. Он отрицательно влияет на работоспособность, притупляет внимание, замедляет реакцию человека на раздражители, мешает восприятию полезных сигналов, что особенно опасно на работах, связанных с движением транспорта, так как создаёт предпосылки для несчастных случаев.

Уровни аэродинамического шума для различных видов транспорта и степени дискомфорта территории, прилегающей к трассе, сведены в таблицу 5 и иллюстрируют некоторые последствия влияния техногенного шума на здоровье человека. По существующей

классификации, звуковые раздражители с уровнем шума  $> 80$  дБ при многократном воздействии являются причиной неблагоприятных последствий и тяжёлых хронических заболеваний: нервных болезней, язвенной болезни, расстройства эндокринной и сердечнососудистой системы.

В промышленных густонаселённых районах звуковое давление шума значительно превысило благоприятную норму – 25 - 30 дБ и уже достигло уровня 95 дБ, а в некоторых городах - даже 100 дБ. Шум такого уровня опасен для людей, если учесть, что болевой порог человека равен 160 дБ, а смертельные последствия вызывает шум с уровнем звукового давления  $> 180$  дБ. Верхняя граница интенсивности звука, воспринимаемой ухом человека, болевой порог, слабо зависит от частоты, и составляет  $\sim 1 \text{ Вт/м}^2$ .

Одной из актуальных и сложных представляется задача по снижению вредного воздействия шума на пассажиров высокоскоростных поездов. Главный источник шума СЖТ - процесс взаимодействия колёс с рельсами.

Возникающий в результате этого взаимодействия шум зависит от типа опорно-ходовых тележек подвижного состава и конструкции верхнего строения пути. При волнообразном износе поверхности катания головок рельсов уровень шума по сравнению с неизношенными рельсами возрастает на 15 дБ. Высокотональный шум (“визг”) возникает в кривых из-за бокового проскальзывания колеса по головке рельса. На электрифицированных линиях СЖТ источниками шума также являются работающие тяговые электродвигатели, преобразователи электрических или электромагнитных колебаний в механические [10]. Для анализа шумового воздействия ведутся измерения уровня звукового давления на различных расстояниях и высоте от источника шума – движущегося поезда. Зная частоты и амплитуды гармоник спектра шума, можно сопоставить эти величины с допустимыми уровнями звукового давления.

Государственным стандартом США по ограничению допустимого уровня шума (1972 г.) предельный уровень звукового давления внешнего шума при движении локомотива установлен в  $L_{\text{MAX}} = 90$  дБ на расстоянии 30 м от оси пути. Близкие по уровню допустимого шума ограничительные величины приняты и в других странах. Однако на магистралях СЖТ эти нормы не соблюдаются. Уровень шума при проходе экспрессов по линии Париж – Лион со скоростью 272 км/ч составлял 97 дБ на расстоянии 25 м от оси пути; на линии уложен бесстыковой путь на железобетонных шпалах и щебёночном балласте. По данным немецких исследователей, шум от междугородного экспресса ICE/V (с пониженным уровнем шума) при скоростях до 250 км/ч обусловлен исключительно качением колёс по рельсам. Уровень шума внутри пассажирского салона составляет 60 - 75 дБ при скорости 200 - 300 км/ч, а на расстоянии 25 м от магистрали достигает: 86 дБ для скорости 200 км/ч, и 93 дБ - для скорости 300 км/ч.

Уровень шума, измеренный в салоне вагона поезда ICE/V при движении в тоннеле со скоростью 250 км/ч, составил : 73 дБ – на отрезке пути со щебёночным балластом; 75 дБ - на отрезке пути со звукопоглощающим покрытием; 78 дБ - на отрезке пути с жёстким подрельсовым основанием без звукопоглощающего покрытия.

Разница в уровнях внутреннего шума в салоне при щебёночном и жёстком подрельсовом основании срав-

нительно мала, что объясняется улучшенной звукоизоляцией вагонов поезда ICE/V [11].

С повышением скоростей поезда ICE/V растёт влияние аэродинамического шума, который при 300 км/ч становится доминирующим, и примерно соответствует уровню шума поезда IC при скорости 200 км/ч. Опыт ФРГ свидетельствует, как сложно решить задачу разработки экспресса с пониженным уровнем шума, а полученные результаты малоэффективны.

СЖТ вносит новые аспекты в экологические проблемы. Оказалось, что уровень шума в случае земляного полотна ниже, чем на эстакаде; архаичная конструкция пути с земляной балластной подушкой удовлетворяет требованиям экологии в большей степени, чем одна из самых совершенных форм путевой структуры – эстакада, последняя не соответствует нормам по допустимому уровню шума. Установлено, что уровень шума в большей степени зависит от конструктивных элементов пути и рельефа местности, чем от скорости. Так, на железных дорогах Японии рост скорости с 80 до 300 км/ч привёл к увеличению уровня звукового давления шума только на 17 дБ. В то же время, конструктивные элементы пути (мосты, эстакады, тоннели, насыпи и выемки), а также рельеф местности оказывают существенное влияние на спектральный состав и интегральный уровень шума. В тоннелях, на мостах и эстакадах в низкочастотном интервале отмечен уровень шума, близкий к предельно допустимому.

В случае эстакадной прокладки магистрали существенно растёт шумовое воздействие и на пассажиров, и на жителей прилегающих территорий. Накоплен негативный опыт отношения людей, проживающих вблизи скоростной трассы, к проблеме шумового загрязнения. В Японии жалобы на шум, сотрясения и вибрации, вызываемые поездами Shincansen, постоянно поступают от жителей, живущих вблизи эстакадных дорог, а они находятся в эксплуатации ещё с 1960-х годов [12].

Для экипажа с ЭМЛ источники шума, свойственные рельсовым экспрессам, отсутствуют, исключение составляет шум, возникающий вследствие трения токо съёмника, скользящего по токонесущему рельсу. При скоростях до 250 км/ч уровень шума остаётся в допустимых пределах. По теоретическим прогнозам, для поезда TR 06 длиной 100 м и высотой 3,7 м, при скорости 250 км/ч уровень шума на расстоянии 25 м от пути должен составлять 80 – 84 дБ. Практические измерения, проведенные при испытаниях со скоростью 260 км/ч, дали результат на 6 дБ больше прогнозируемой величины [13].

Чем выше источник шума, тем сложнее организовать защиту от него.

Мероприятия по защите от шума экспрессов с ЭМЛ весьма трудоёмки, так как поезд мчится по эстакаде высотой 5 м и более. Установление шумозащитных экранов вдоль всей трассы создаёт такие же неудобства для пассажиров, как и при движении в тоннеле, ибо лишает обзора из окон поезда.

При скоростях более 300 км/ч доминирующую роль играют источники шума, связанные с образованием и отрывом вихрей при обтекании экипажа потоком воздуха и появления ударной волны. Во время полигонных испытаний экипаж TR- 07, движущийся со скоростью 435 км/ч, производил грохот, сравнимый с “рёвом” реактивных двигателей взлетающего самолёта, уровень шума составил 95 дБ.

Экологические проблемы скоростных путей сообщения требуют тщательного исследования. Обеспечение звукового комфорта для пассажиров остаётся одним из важных критериев в разработке проектов экспрессов. Требуется к улучшенной обтекаемости формы кузова имеет целью довести до минимума сопротивление воздушной среды, а улучшение аэродинамических качеств экспресса должно привести к снижению уровня шума.

Значительный аэродинамический шум, создаваемый магнитопоездом Transrapid системы ЭМЛ на высоких скоростях движения, является одной из острых экологических проблем, требующих специального анализа, причём решение оказывается непростым из-за многогранного характера взаимодействия левитирующего экипажа с окружающей средой. Высокий уровень шума, производимого поездом Transrapid, возникает из-за малого зазора (10 - 15 мм) между днищем экипажа и путевой структурой и косвенным образом влияет на область эксплуатационных скоростей рационального использования систем ЭМЛ и ЭДЛ. С этой точки зрения система ЭДЛ предпочтительнее для сверхвысоких скоростей, ибо обладает несомненным преимуществом: большой воздушный зазор между днищем экипажа и направляющей путевой структурой позволяет снизить шум, связанные с втеканием воздушной струи в щель под вагоном. Чем больше зазор, тем меньше уровень шума. Уровень шума производимого японским магнитопоездом MLU системы ЭДЛ (зазор составляет 100 - 300 мм), в 2 - 5 раз меньше, чем у рельсового экспресса, что делает экологически обоснованной эстакадную прокладку путепровода магнитной дороги. Учитывая эти достоинства (бесшумность движения и скорость магнитопоезда), многие префектуры Японии заявили о желании содействовать строительству магнитных дорог на своих землях. Такое отношение резко отличается от реакции населения на строительство рельсовых скоростных магистралей в ФРГ или Великобритании.

### Критерии комфорта

Подготовка мероприятий по вопросам охраны окружающей среды рассматривается как основная часть исследовательских работ по любому проекту высокоскоростных линий. Предусматривается обязательное проведение экологической экспертизы разрабатываемых экспрессов, которые должны не только удовлетворять требованиям прочности и надёжности, обеспечивать безопасностью движения, но и обладать хорошими динамическими качествами, плавным, спокойным ходом, а также полностью отвечать требованию их пригодности к нормальной эксплуатации в условиях непрерывного воздействия колебаний на пассажиров (таблица 5) [3 - 13].

Требование комфорта в общих чертах можно сформулировать следующим образом: поезд должен быть спроектирован так, чтобы колебания подвижного состава во время движения не вызывали у пассажира неприятных ощущений. Чем быстрее движется экспресс, тем вероятнее появление динамически неустойчивых режимов, способствующих росту колебаний. Следует ожидать появления с некоторой регулярностью различных уровней дискомфорта, вызванных действием колебаний, а поэтому нужно учитывать соответствующую реакцию пассажира. Конструктор должен уже на стадии разработки проекта выявить наличие скоростей, при которых потенциально возможны дискомфортные условия поездки.

Вид транспорта, условия движения	Уровень шума, дБ	Степень дискомфорта территории
1) МЛТ типа ЭДЛ (MLU) на расстоянии 25 м от пути, клиренс 110 мм, скорость 500 км/ч	40	Комфортная
2) Железнодорожный поезд	60 - 65	Относит. комфортная, нарушение сна
3) Метрополитен (открытые линии)	70 - 85	Относит. дискомфортная, притупляется слух
4) Скоростной трамвай	85 - 92	Дискомфортная, нарушение работы сердца
5) МЛТ типа ЭМЛ (TR06):		
а) на расстоянии 15 м от пути	89	То же
б) на расстоянии 25 м от пути: скорость 200 км/ч	70	Относит. дискомфортная, притупляется слух
скорость 300 км/ч	84	То же
6) СЖТ (Shincansen) на расстоянии 100 м от пути, скорость 200 км/ч	82 - 91	Дискомфортная, нарушение работы сердца

Особое внимание уделяют выявлению тех критических скоростей, при которых регистрируются экстремумы динамических нагрузок. Для предупреждения возможного ухудшения ходовых качеств разрабатываются конструктивные мероприятия по снижению амплитуд колебаний на частотах, неблагоприятных для пассажира. Условия отсутствия или минимального уровня таких колебаний часто являются одним из требований при проектировании экспрессов и нужно предпринимать специальные меры для их выполнения. Кратковременные колебания причиняют пассажиру меньше неудобств, чем воздействия длительного характера. В понятие комфорта входит минимизация времени, в течение которого пассажир подвергается воздействию колебаний. Уровень дискомфорта зависит от параметров колебаний, их повторяемости и длительности воздействия.

В результате сотрудничества между инженерами-транспортниками, физиологами и психологами-экспериментаторами оказалось возможным собрать информацию, полезную для обобщения реакций пассажира на воздействие колебаний. Критерии комфорта должны основываться на знаниях о том уровне, до которого пассажиры готовы мириться с дискомфортом, связанным с действием колебаний.

Для формулировки критериев важно установить параметры, характеризующие различные уровни дискомфортных условий. Уровень дискомфорта недопустим, если установлено, что слишком высока вероятность появления сверхнормативных амплитуд ускорений инфразвуковых частот. Положения, устанавливающие максимально допустимые средние вероятности появления различного уровня ускорений сверхнизких частот, известны как критерии комфорта.

Применительно к проектированию подвижного состава СЖТ в критериях комфорта целесообразно сослаться на подходящий параметр, значения которого соответствуют различным уровням дискомфорта. При

рассмотрении колебаний экспрессов таким параметром является ускорение вагона, а в критериях, характеризующих пригодность к нормальной эксплуатации, - частота и амплитуда ускорений, а также длительность и регулярность их проявления при многократном воздействии.

Проверка соответствия проекта экспресса требованиям, сформулированным в критериях комфорта, включает два этапа. Во-первых, должны быть определены скорости движения, при которых интересующий параметр превысит значения, отвечающие критериям комфорта (такие скорости принято называть критическими). Во-вторых, на основе соответствующей информации нужно оценить, насколько регулярно появляются критические скорости. Необходимо, чтобы для разных уровней дискомфорта (или для значений соответствующих им параметров) были установлены максимально допустимые вероятности их появления. Если вероятность, определенная таким образом, выше максимально допустимой, то считается, что проект не удовлетворяет экологическим требованиям пригодности к нормальной эксплуатации.

### Заключение

Железнодорожный транспорт соответствует критериям качества перевозок в той или иной степени. Но уже теперь, а также в будущем, рельсовые экспрессы не смогут обеспечить требуемый комфорт перевозок. И дело тут не в преимуществах МЛТ, а в неустраняемых пороках СЖТ.

В процессе эволюции традиционных транспортных технологий всё отчетливее проявляются некоторые их отрицательные стороны. СЖТ оказывает неблагоприятное воздействие не только на все звенья биосферы: атмосферу, водный бассейн, почву, но и на людей. Одним из существенных недостатков СЖТ является дискомфорт поездки. Низкочастотные колебания, труднопереносимые организмом человека, разного рода скрипы, тряска, дребезжание, аэродинамический и механический шумы могут значительно усилить ощущение дискомфорта. Прямым следствием несовершенства технологии перевозок является высокий уровень "транспортной усталости" пассажиров.

Защищать от вредных колебаний приходится не только пассажиров.

Шум является источником беспокойства для населения, проживающего вблизи транспортных магистралей. Жители территорий, перенасыщенных промышленностью и транспортными сетями, оказались в катастрофически загрязненной окружающей среде, в том числе, опасным уровнем шума.

Ужесточение требований к защите пассажиров от неблагоприятного воздействия колебаний обуславливает необходимость строго придерживаться мировых экологических стандартов при решении транспортных проблем по существу. Нужны огромные капиталовложения и время, измеряемое десятилетиями, для реализации жестких экологических требований к традиционным транспортным технологиям. Реально оценивая ситуацию на базе доступной информации, надо признать, что существующее состояние транспорта не может быть исправлено быстро. В особенности это касается тех регионов, где планируется прокладка скоростных трасс.

Ультрасовременные рельсовые экспрессы, качественно новые по конструкции пути и подвижного состава,

добротности и надёжности, как правило, для скоростного движения морально устарели. Причина в том, что и французский поезд TGV, и японский поезд Shincansen, и европейская электричка ICE опираются на традиционный элемент контактной системы движения – звено "колесо - рельс" со всеми его недостатками.

В перспективе МЛТ позволяет достичь скоростей в 500 – 600 км/ч, сочетая в себе скорости авиации с достоинствами железной дороги: комфортом и надёжностью, регулярностью движения вне зависимости от погоды, большой вместимостью составов и, соответственно, массовостью перевозок при приемлемых затратах. МЛТ выдерживает самую строгую проверку защитников окружающей среды, являясь, в определённой степени, панацеей от грядущих экологических бед на транспорте. Задача разработчиков состоит в том, чтобы свести к минимуму вредное воздействие колебаний на пассажиров, тем самым, способствуя привлекательности поездки. Не подлежит сомнению, что на психологию потенциального пассажира повлияют невиданные ранее возможности "летать" на большие расстояния по наземным магистралям в комфортабельных суперэкспрессах.

### Литература

1. Исследования высокоскоростного электропоезда ЭР-200./ Ред. Иноземцев В.Г. // Труды ВНИИЖТ. - М.: Транспорт, 1989. – С. 1 - 83.
2. Солодков С.П. Динамико-прочностные испытания алюминиевого кузова моторного вагона электропоезда ЭР-200. // Вестник ВНИИЖТ, 1978. - №6. – С. 36 - 39.
3. Zeuge H. Baurchnische Planungskriterien fur die Neubaustresken der Deutschen Bundesbahn im Bahnen der Zielsetzungendes Europaischen Infrastrukturr – Leitplans // Schienen der Welt. – 1975. - № 3. – S. 153 -178.
4. Miller L. Das einatzfahrzeug TR 06 П. // Electro-technische Zeitschrift. - 1987. – 108, № 9. – S. 372 - 376.
5. Hitashi N., Nobuyki N. Maglev test Vehicle ML-500 running on inverted T- shape guideway. // Hitachi Review. - 1981. – V.30, № 2. - P. 93 – 96.
6. Бишоп Р. Колебания. – М.: Наука, 1979. – 160 с.
7. Rohracher H. Mechanische Microschwingungen des menschlicher Korpers Wien, 1949.
8. Chang F.K. "Human Response to Motion in Tall Buildings" // J. Struct. Div., ASCE. - 98, № ST6 (June 1973) – P. 1259 – 1272.
9. Chen P.V. and Robertson L E "Human Perception Thresholds of Hori - zontal Motion" // J. Struct. Div., ASCE. - 97, № ST8 (Aug. 1972) – P. 1681 – 1695.
10. Wayson R. L., Bowlby W. Noise and Air Pollution of High-Speed Rail Systems/ // Journal of Transportation Engineering. - 1989. – 115, № 1. - P.20 – 36.
11. Holzl G., Kellerman Ch. Der Hochgeschwindigkeitzug ICE/V – schneller und leizer. // ETR: Eisenbahntechn. Rdsch. - 1989. – 38, № 1-2. – S. 47 - 49.
12. Mochizuki A. Speedap of the Shinkansen // Quart. Rept. Railway Techn. Rec. Inst. - 1988. – 29, № 3. - P.97 – 102.
13. Schallprognosen zur Magnetschnellbahn. // ETR: Eisenbahntechn. Rdsch. - 1988. – 37, № 4. – S. 241 - 242.

### Сведения об авторе

**Крютченко Владлен Ефимович**, кандидат техн. наук  
Адрес: 49005, Украина, г. Днепр, ул. В.Жуковского, 4, кв. 12.

Телефон (дом): 46 20 18.

E-mail: aks24lm@gmail.com.