

УДК 534-16

OECD 01.03.UV

Проблема оценки вибрационных полей поверхностных волн Рэлея, создаваемых высокоскоростными железнодорожными линиями

Рассошенко Ю.С.^{1*}, Иванов Н.И.², Крылов В.В.³¹ К.т.н., старший научный сотрудник, старший преподаватель кафедры «Экология и безопасность жизнедеятельности», БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова² Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Экология и безопасность жизнедеятельности», БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова³ Д. ф.-м.н., профессор, Кафедра авиационной и автомобильной техники, Университет Лафборо^{1,2} РФ, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская. д.1³ Великобритания, LE11 3TU, Лестершир, Лафборо

Аннотация

В статье рассмотрены типы волн вибрации, создаваемых поездами, обозначены основные характеристики каждого из них. Описан процесс образования и распространения волн Рэлея с указанием основных проблем по их снижению и возможностью резкого увеличения вследствие достижения поездом соразмерной скорости движения. По результатам обнародованных исследований систематизированы факторы, влияющие на уровни вибрации, сделаны выводы об отсутствии теоретического исходного спектра, применимого как эталонного для предсказания уровней вибрации. Описаны методы прогнозирования вибрационного воздействия в Российской Федерации и зарубежных странах, а также приведен краткий перечень виброзащитных мероприятий, практикуемый на действующих железных дорогах.

Ключевые слова: вибрация, высокоскоростной поезд, волны Рэлея, методика, оценка, прогнозирование.

The problem of estimating the vibrational fields of Rayleigh surface waves produced by high-speed railways

Rassoshenko I.S.^{*1}, Ivanov N.I.², Krylov V.V.³¹ PhD, Senior Researcher, Senior Lecturer, Department 'Ecology and life safety' BSTU 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov² DSc, Professor, Head of the Department 'Ecology and life safety' BSTU 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov³ DSc, Professor, Department of Aeronautical and Automotive Engineering, Loughborough University^{1,2} Russia, St. Petersburg, 1-st Krasnoarmeyskaya str., h.1³ UK, LE11 3TU, Leicestershire, Loughborough

Abstract

The article examines the types of vibration waves generated by trains; major characteristics of each of them are indicated. The process of generation and propagation of Rayleigh waves is described stating the main issues of their reduction and possibility of a sharp increase when the train reaches a commensurate speed. According to the findings of the published studies, the factors affecting vibration levels are systematized, conclusions are made about the absence of a theoretical initial spectrum applicable as a reference for vibration level prediction. Methods of vibration impact prediction in the Russian Federation and foreign countries are described; vibration protection measures applied in practice on existing railways are also briefly listed.

Key words: vibration, high-speed train, Rayleigh waves, method, estimating, prediction.

*E-mail: iulia.boyko@gmail.com (Рассошенко Ю.С.)

Введение

Высокоскоростной железнодорожный транспорт в современном мире развивается крайне быстро, создавая конкуренцию авиационному транспорту, и соединяя не только города внутри одного государства, но и страны между собой. Так, в Китае с 2010 г. эксплуатируются поезда серии CRH со скоростью движения до 350 км/ч; во Франции поезда серии TGV могут достигать 320 км/ч, при этом в 2007 г. на экспериментальном участке TGV POS установил рекорд скорости [1] для поездов в 574 км/ч. Из-за высоких объемов транспортных потоков и стоимости автомобильного транспорта, в Японии основной акцент сделан на железные дороги, в том числе известные во всем мире высокоскоростные поезда Shinkansen. В России в настоящее время проектируется первая высокоскоростная железнодорожная линия, которая будет соединять г. Москва и г. Казань с эксплуатационной скоростью 360 км/ч.

Однако такое стремительное развитие высоких скоростей движения вызывает повышение сопутствующих воздействий физических факторов на прилегающие территории. Так, максимальные уровни звука на расстоянии 25 м от оси железнодорожного пути могут достигать 95 дБА [2], что на 25 дБА выше норм в дневное время суток в Российской Федерации согласно СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [3] и Японии согласно Technical Regulatory Standards on Japanese Railways [4], на 15 дБА выше норм в Испании согласно 37/2003 Noise Law [5]. Не смотря на то, что во многих европейских странах максимальный уровень звука не нормируется, превышения по эквивалентным уровням в зависимости от интенсивности движения также могут достигать 20 дБА и более.

С оценкой вибрации вопрос является не менее острым, в первую очередь в связи со сложностью ее оценки и прогнозирования из-за влияния множества факторов, в числе которых тип верхнего строения пути, вид и температура грунта, масса и скорость движения поезда, глубина залегания подземных вод и др. В России нормирование вибрации осуществляется по СН 2.2.4/2.1.8.566-96 [6], однако, следует отметить, что данные санитарные нормы регламентируют уровни виброскорости и виброускорения только внутри нормируемых объектов (жилых помещениях, палатах больниц, санаториев, административно-управленческих помещениях и др.), и не предъявляют требования к уровням вибрации на прилегающей селитебной территории, т.е. на площадках отдыха, а также на территории перспективной жилой застройки.

В РФ нормируемыми параметрами вибрации согласно СН 2.2.4/2.1.8.566-96 [6] являются при частотном (спектральном) анализе – средние квадратические значения виброскорости и виброускорения или их логарифмические уровни, измеряемые в 1/1 и 1/3 октавных полосах частот, при интегральной оценке по частоте – скорректированное значение виброскорости и виброускорения или их логарифмические уровни, измеряемые с помощью корректирующих фильтров.

Согласно СН 2.2.4/2.1.8.566-96 [6] допустимый уровень вибрации в жилых и общественных зданиях – это уровень фактора, который не вызывает у человека значительного беспокойства и существенных изменений показателей функционального состояния систем и анализаторов, чувствительных к вибрационному воздействию. Скорректированный уровень вибрации представляет собой одночисловую характеристику вибрации, а эквивалентный (по энергии) скорректированный уровень – скорректированный уровень постоянной во времени вибрации [6].

Общие принципы оценки вибрации в европейских странах представлены в ISO 2631 [7, 8], в Британии BS 6472 [9], BS 6841 [10], в Германии DIN 4150-2 [11], DIN 45669-1 [12]. Так, для оценки вибрации в стандартах зарубежных стран применяются такие показатели как пиковое значение виброскорости, среднеквадратичное значение скорректированной виброскорости с использованием

иных функций коррекции, доза вибрации, параметры статистического распределения значений скорректированной виброскорости при виброускорении.

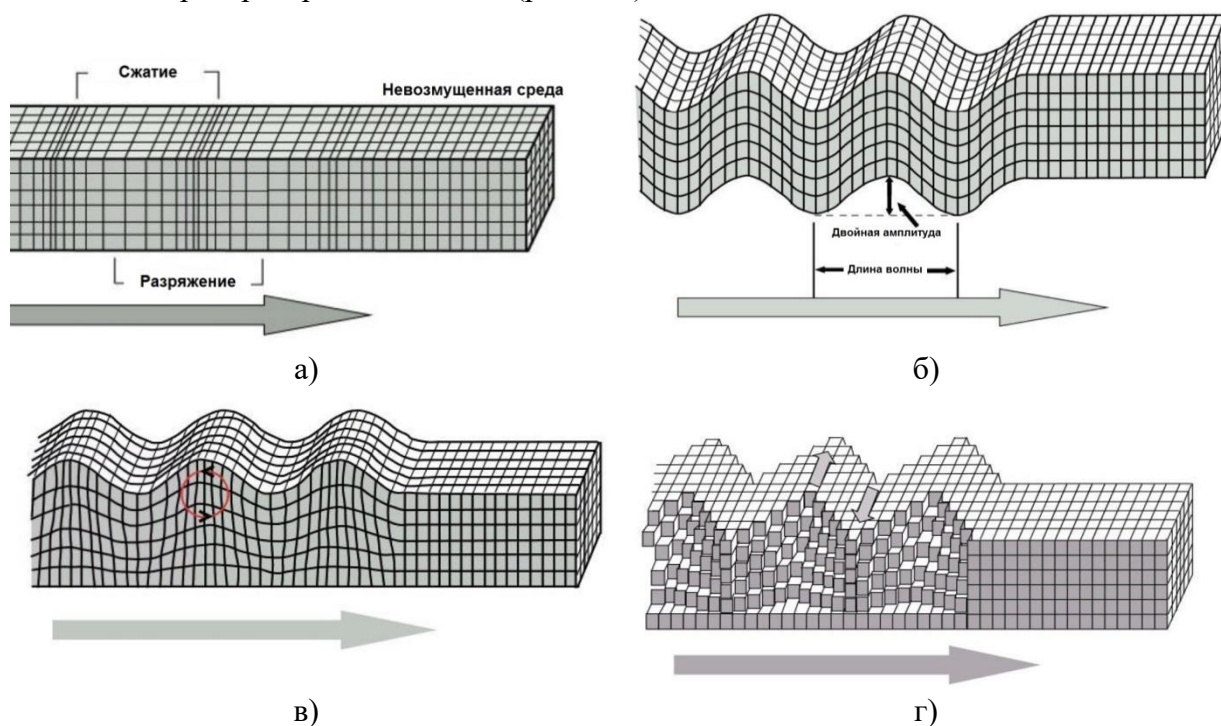
В работе [13] также выдвигались предложения по дополнительному нормированию в РФ максимальных скорректированных значений виброскорости или виброускорения или их логарифмических уровней, но в настоящее время данные характеристики в перечень нормируемых параметров в РФ не включены.

1. Образование и распространение вибрации при движении поездов

Изучением вибрации от поездов, в том числе скоростных, занимались многие исследователи (см. например [14-26]).

Как известно, выделяют четыре основных типа волн вибрации в грунтах [14, 15]:

- волны сжатия (продольные волны), с движением частиц в виде колебаний в направлении распространения волны (рис. 1, а);
- волны сдвига (поперечные волны), с движением частиц в виде колебаний в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны (рис. 1, б);
- волны Рэлея (поверхностные волны), с эллиптическим движением частиц в вертикальной плоскости, проходящей по направлению распространения волны и затухающие с глубиной (рис. 1, в);
- волны Лава (горизонтально поляризованные поверхностные волны распространяющиеся в слоистой среде), с движением частиц в виде колебаний в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны (рис. 1, г).



а) волны сжатия (продольные волны), б) волны сдвига (поперечные волны)
в) волны Рэлея, г) волны Лава

Рис.1. Виды волн вибрации в грунте [15]

При рассмотрении идеального случая, когда грунт является условно однородной эластичной средой, продольные и поперечные волны распространяются во

всех направлениях и затухают за счет пройденного расстояния и поглощающих свойств грунта. Волны Рэлея затухают за счет пройденного расстояния в меньшей степени чем продольные и поперечные (объемные) волны, т.к. их амплитуды обратно пропорциональны квадратному корню из пройденного расстояния, в то время как для объемных волн амплитуды обратно пропорциональны пройденному расстоянию.

Волны Рэлея являются самыми медленными волнами, однако могут содержать большую часть передаваемой энергии, чем другие волны. Скорость их распространения определяется упругостью и плотностью грунта и находится в пределах от 50 до 300 м/с (до 130 м/с – для мягких почв, до 300 м/с – для твердых почв). При этом мягкие почвы могут быть укреплены за счет свай и насыпей из более твердых материалов. Результаты исследований [16] показывают, что наклонные поверхности балласта и насыпи вместе со сваями создают эффект ловушки, с помощью которого вызванные поездом волны, особенно высокочастотные, падающие на наклонные поверхности, оказываются в «ловушке» и рассеиваются в системе «насыпь-свайное основание», таким образом значительно уменьшая амплитуды вибрации за пределами насыпи. Другим существенным фактором является то, что высокие частоты затухают гораздо быстрее, чем низкие, так что низкие частоты доминируют в спектре на расстоянии более нескольких метров от источника.

В реальных же условиях грунт представлен неоднородным составом, в котором могут выделяться отдельные слои различной плотности, и тогда вибрационные волны будут распространяться по границе определенного слоя (волны Стоунли) и преобразовываться при переходе из одного типа волн в другие.

Также, как было отмечено ранее, вибрация зависит от массы поезда, скорости движения, геологических условий, устройства верхнего строения пути (типа и материала шпал, материала балластного слоя, толщины песчаной подушки) и др.

В работе [15], являющейся одним из отчетов Шведского национального испытательного и научно-исследовательского института, были выделены дефекты колеса, приводящие к нестабильному движению транспортного средства (подпрыгивание, раскачивание, бросание и колебания вокруг вертикальной оси) и влияющие на базовое поле напряжений под поездом: эксцентричное колесо, несбалансированное колесо, колесо с выбоинами. Более того, статический вес поезда обеспечивает основное поле напряжений, создаваемое поездом, в то время как неподрессоренные массы и характеристики подвески подвижного состава, связанные с их скоростью, будут определять, в какой степени характеристики путей и подвижного состава усилят это поле напряжений [15].

Наглядно оценить влияние исходных параметров на уровни вибрации можно по рисунку 2. Так, одним из американских документов [17], посвященных оценке уровней шума и вибрации при движении высокоскоростных поездов, и разработанном при поддержке Департамента транспорта США, в качестве примера был представлен спектральный состав вибрации различных поездов [17]: TGV при скорости движения 290 км/ч (Франция), X2000 при скорости движения 185 км/ч (Швеция), Pendolino при скорости движения 195 км/ч (Италия). Как видно из рисунка 2 даже при небольшой разности в скорости (10 км/ч между поездами X2000 и Pendolino), разница в уровнях может достигать 15 дБ, и в то же время на некоторых частотах уровни вибрации при разности скорости движения в 100 км/ч на некоторых частотах могут быть сопоставимы, что объясняется различиями исходных параметров при проведении экспериментов (модели и массы поезда, наличия дефектов колесных пар, прямолинейности участка, геологических условий, состояния железнодорожного пути и т.д.). Более того, например, износ или неровности колесной пары или волнообразный

износ рельс могут увеличивать уровни вибрации до 10 дБ, в то время как безбалластная конструкция пути – уменьшать ее на 3 дБ. Таким образом, никакой спектр не должен приниматься за «типичный» уровень вибрации, производимый поездами.

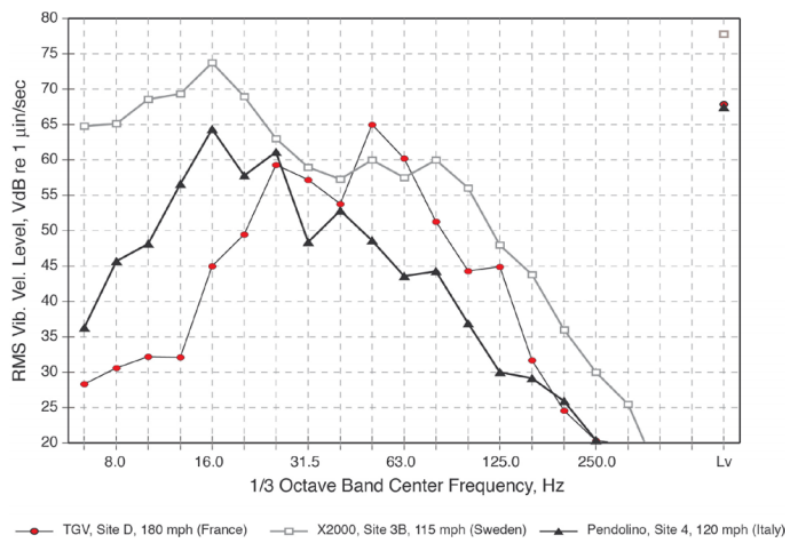


Рис. 2. Сравнение третьоктавных спектров вибрации различных поездов на расстоянии 30,5 м от оси железнодорожного пути [17]

Воздействие вибрации становится особенно заметным, когда скорость поезда достигает «критического» значения и превышает волновую скорость Рэля в опорном грунте, в результате чего может произойти резкий рост вибрации грунта, как следствие резонансно-подобного явления, называемый «вибрационный удар», теоретически предсказанный соавтором статьи Крыловым В.В. в 1994-1996 гг. При этом «критическая» скорость может регулироваться высотой насыпи. Исследовательская работа [18] по изучению вибрации, проведенная на китайской скоростной железной дороге Пекин → Шанхай с тестовыми скоростями поездов CRH380AL и CRH380BL 300-425 км/ч, также подтвердила наличие пиковых значений вибрации на безбалластном участке железной дороги, сосредоточенных в основном в диапазоне 20-60 Гц.

Добавочное усиление вибрации при наличии вибрационного удара может происходить при наличии изгиба железнодорожного пути [19, 21].

2. Методы прогнозирования и снижения вибрации при движении поездов

Согласно ГОСТ Р ИСО 14837-2007 (ISO 14837-1:2005) [20] все прогностические модели можно разделить на параметрические, эмпирические (локальные и глобальные) и полуэмпирические. Точность прогностической модели зависит от полноты учета всех влияющих факторов и комплектности используемых в расчете параметров.

В настоящее время в РФ ведется разработка СП «Защита от вибрации железнодорожных линий. Правила проектирования», проект которого доступен на официальном сайте Росстандарта РФ (общественные слушания проходили в июне-августе 2018 г., в соответствии с пунктом 5 Постановления Правительства Российской Федерации №624 от 1 июля 2016 г «Об утверждении Правил разработки, утверждения, опубликования, изменения и отмены сводов правил»), где предлагаются две прогностические методики: оценочная и детальная. Оценочная методика приводит формулу для вычисления виброскорости, исходя из измеренного (эмпирическая

модель) или рассчитанного (параметрическая модель) октавного спектра вертикальной составляющей скорости колебаний поверхности грунта и поправочных коэффициентов, учитывающих количество одновременно движущихся поездов; скорость движения поезда; износ пути, колесных пар; наличие стрелочных переводов; наличие систем виброизоляции; вид фундамента; резонанс ограждающих поверхностей помещений; изменение колебаний по высоте. Детальная методика основывается на разработке конкретной математической модели, путем применения метода конечных элементов, метода граничных элементов или их совмещения.

Аналогичный подход используется в американском документе [17], где представлены два способа расчета вибрации: предварительный (ориентировочный) и детальный.

В предварительной (ориентировочной) модели [17] выделяются два типа поездов: маглев и колесные подвижные составы. В модели представлены поправки на ряд факторов: скорость, тип колес (для колесных поездов), износ рельс (для колесных поездов), тип верхнего строения пути, наличие подбалластных матов, геологические условия, конструкция и этажность строения, внутри которого оценивается вибрация, Опорной скоростью поездов являются 240 км/ч, отклонения от которых дают поправку от +6 дБ до -6 дБ для колесных поездов и +14 дБ до -10 дБ при скорости движения поезда 120 км/ч и 480 км/ч соответственно.

Детальный метод [17] также направлен на изучение и исследование максимального количества исходных данных и состоит из трех этапов: обследование существующих вибраций, прогнозирование будущих вибраций и их воздействия, разработка виброзащитных мероприятий.

При разработке собственных прогностических моделей соавтор статьи Крылов В.В. использовал метод функций Грина в своих работах [21-23]. Решение было основано на положениях: поезд аппроксимирован набором нагрузок постоянной величины, движущихся по рельсам, представленных как последовательность изменяющихся во времени эквивалентных сосредоточенных сил, направленных вертикально вниз в полупространство. Вертикальная скорость перемещения поверхности, вызванная эквивалентной силой, была найдена с помощью функции Грина, а поле вибрации, создаваемое движущимся поездом, было рассчитано с помощью наложения полей, создаваемых каждой эквивалентной силой. Описание результатов расчета вибрации методами конечных и граничных элементов различных размеров, а также сравнение с методом Крылова В.В. представлено в статье Pham-Ngoc Thach, Han-Long Liu и Gang-Qiang Kong [16].

Отдельными малоисследованными вопросами являются процессы шумообразования при прохождении высокоскоростного поезда в туннелях и на эстакадах.

Методы борьбы с вибрацией зависят в первую очередь от преобладающего механизма возбуждения. Так, может применяться устройство траншей или «подземных экранов» между защищаемым объектом и железнодорожными путями (рис. 3) [24-26], эффект которых зависит от частоты вибрации и параметров сооружения/ сооружений (глубина, ширина, материал заполнения). Согласно проведенным исследованиям эффективность данного мероприятия может достигать до 10 дБ на высоких частотах [14].

Другими методами снижения вибрации являются применение механизмов, препятствующих распространению волн путем придания жесткости мягкому грунту, и механизмов, повышающих жесткость основания железной дороги, что особенно актуально для высокоскоростных железных дорог [14].

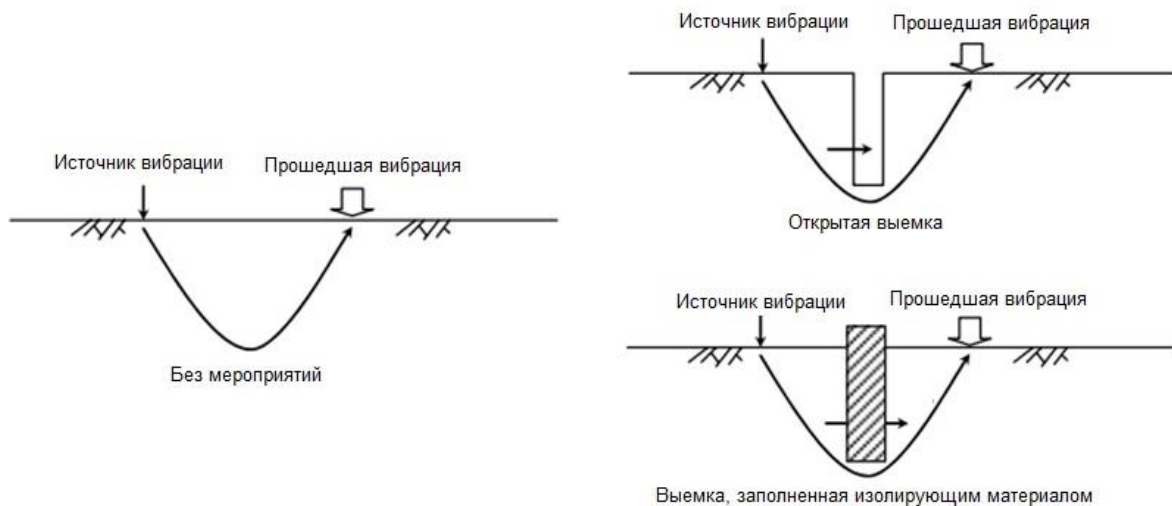


Рис. 3. Устройство виброизолирующих траншей [26]

Заключение

Прогнозирование вибрации на прилегающей к железным дорогам, в частности и в особенности, высокоскоростным, селитебной территории, является крайне важным, как для соблюдения санитарно-гигиенических норм внутри жилых помещений, так и для оценки уровней воздействия и обеспечения целостности конструкций близлежащих зданий и сооружений. Сложность оценки вибрации, в большей степени волн Рэлея, вызванная влиянием множества факторов, индивидуальных для каждого конкретного рассматриваемого случая, не позволяет разработать типовую модель для расчета вибрации. Должны учитываться тип грунта, тип подвижного состава, верхнее строение пути, скорость движения поезда, повороты железной дороги и другие факторы для проведения корректной оценки вибрационных полей. Более того, крайне важно учитывать явления вибрационного удара на высоких скоростях движения поезда, особенно в мягких грунтах. Таким образом, обнародованные исследования по изучению образования и распространения волн Рэлея при движении высокоскоростных поездов не могут быть напрямую использованы при прогнозировании уровней вибрации при проектировании новых железных дорог без предварительной адаптации под конкретные условия, как минимум путем проведения лабораторных исследований грунта и особенностей подвижного состава.

Литература

1. Fernando Puent. Francia acelera hasta los 574 Km/h. Интернет-ресурс: https://elpais.com/tecnologia/2007/04/03/actualidad/1175588881_850215.html/ Режим доступа: свободный. Дата посещения – 01.11.2018.
2. The problem of high-speed railway prediction and reduction/ Ivanov N.I., Boiko I.S., Shashurin A.E/ (2017) Procedia Engineering, 189, pp. 539-546. / Transportation Geotechnics and Geocology, TGG 2017, 17-19 May 2017, Saint Petersburg, Russia
3. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»
4. Technical Regulatory Standards on Japanese Railways. Railway Bureau. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, March, 31, 2012/ Online resource:

- http://www.mlit.go.jp/english/2006/h_railway_bureau/Laws_concerning/14.pdf/
Access: free. Visit Date – 28.11.2016.
5. Royal Decree 1367/2007, October 19, 37/2003 Noise Law, of November 17, National State Bulletin (BOE) num. 254, of October 23, 2007.
 6. СН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий»
 7. ISO 2631–1: 1997, Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – General requirements. International Organization for Standardization.
 8. ISO 2631–2: 2002, Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). International Organization for Standardization
 9. BS 6472: 1992, Evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz), British Standards Institution.
 10. BS 6841: 1987, Measurement and evaluation of human exposure to whole-body vibration, mechanical vibration and repeated shock. British Standards Institution.
 11. DIN 4150–2: 1999, Structural vibration – Part 2: Human exposure to vibration in buildings, (English version). Deutsches Institut fur Normung
 12. DIN 45669–1: 1995, Mechanical vibration and shock measurement – Part 1: Measuring equipment, (English version). Deutsches Institut fur Normung.
 13. Цукерников И.Е., Шубин И.Л., Невенчанная Т.О. Особенности нормирования и оценки вибрации от рельсового транспорта в помещениях жилых и общественных зданий/ NOISE Theory and Practice, Vol. 4, No 3, стр. 22-29.
 14. David Thompson, Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means, Elsevier, First edition 2009 , ISBN-13: 978-0-08-045147-3
 15. S.A. Suhairy, Prediction of ground vibration from railways, SP Swedish National Testing and Research Institute Acoustics, SP REPORT 2000:25, Boras 2000, ISBN 91-7848-823-0, ISSN 0284-5172, 103 p.
 16. Pham-Ngoc Thach, Han-Long Liu, Gang-Qiang Kong. Vibration analysis of pile-supported embankments under high-speed train passage/ Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 55 (2013), p. 92–99
 17. High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment, DOT/FRA/ORD-12/15
 18. Wanming Zhai, Kai Wei, Xiaolin Song, Minghe Shao. Experimental investigation into ground vibrations induced by very high speed trains on a non-ballasted track/ Soil Dynamics and Earthquake Engineering 72 (2015), p. 24–36
 19. V.V. Krylov. Focusing of ground vibrations generated by high-speed trains/ Proceedings of ISMA2014 including USD2014, pp.2007-2015
 20. ГОСТ Р ИСО 14837-2007 (ISO 14837-1:2005) «Вибрация. Шум и вибрация, создаваемые движением рельсового транспорта. Часть 1. Общее руководство».
 21. V.V. Krylov. Focusing of ground vibrations generated by high-speed trains travelling at trans-Rayleigh speeds, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 100, 389-395 (2017)
 22. V.V. Krylov. Generation of ground vibration by superfast trains, Applied Acoustics, 44: 149-164 (1995).
 23. V.V. Krylov, Vibrational impact of high-speed trains. I. Effect of track dynamics, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 100, No. 5, American

-
- Institute of Physics (1996), pp. 3121-3134; Erratum, Vol. 101, No. 6, (1997), pp. 3810.
24. F.E. Richart, J.R. Hall, and R.D. Woods. *Vibrations of Soils and Foundations*. Prentice Hall International Series in Theoretical and Applied Mechanics, 1970
 25. Schiappa F., Domingues O., Castro J. & Sequeira S. High speed trains in Portugal. *Vibration Impact Assessment*. 39th Intern. Congress on Noise Control Engineering, 2010. Lisbon, Portugal, 2010, pp. 4417–4429.
 26. Kiyoshi Hayakawaa. The Latest Ground Vibration Countermeasure by using Isolation Wave Barrier/ INTER-NOISE 2006, 3-6 December 2006, Honolulu, Hawaii, USA