

УДК: 699.842

OECD: 02.00.00/02.01.00

## Прогнозирование вибрации рельсового транспорта в помещениях жилых и общественных зданий

Цукерников И.Е.<sup>1\*</sup>, Шубин И.Л.<sup>2</sup>, Невенчанная Т.О.<sup>3</sup>, Тихомиров Л.А.<sup>4</sup><sup>1</sup> Д.т.н., профессор, главный научный сотрудник<sup>2</sup> Д.т.н., член-корреспондент, директор<sup>3</sup> Д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник<sup>4</sup> Научный сотрудник<sup>1,2,3,4</sup> НИИСФ РААСН, г. Москва, РФ

### Аннотация

Рельсовый транспорт является источником повышенной вибрации, которая распространяется по грунту, передается на конструкции жилых и общественных зданий, расположенных в окрестности транспортной линии, и сказывается как на техническом состоянии зданий, так и на условиях пребывания в них людей. В настоящей работе рассматриваются особенности методов прогнозирования по сводам правил СП 23-105-2004, СП 465.1325800.2019 для линий метро и СП 441.1325800.2019 для железнодорожных линий. Отмечается, что методы по СП 441.1325800.2019 применимы в основном для действующих железнодорожных линий. Рассматривается инновационный подход к прогнозированию вибрации для проектируемых железнодорожных линий, основанный на введении понятия вибрационной характеристики поезда и разработке метода ее экспериментального определения. Подход может быть применен также для открыто проходящих участков метро.

**Ключевые слова:** метрополитен, железная дорога, вибрация, вибрационная характеристика поезда, здание, прогнозирование, оценка.

### *Prediction of rail transport vibration in the premises of residential and public buildings*

Tsukernikov I.E.<sup>1\*</sup>, Shubin I.L.<sup>2</sup>, Nevenchannaya T.O.<sup>3</sup>, Tikhomirov L.A.<sup>4</sup><sup>1</sup> D.Sc., professor, chief scientist officer<sup>2</sup> D.Sc., correspondent member, director<sup>3</sup> D.Sc., professor, leading researcher<sup>4</sup> Researcher<sup>1,2,3,4</sup> NIISF RAACS, Moscow, Russia

### Abstract

Rail transport is a source of increased vibration, which spreads along the ground, is transmitted to the structures of residential and public buildings located in the vicinity of the transport line and affects both the technical condition of buildings and the conditions for people stay in them. The paper discusses the features of forecasting methods established by the codes of rules SP 23-104-2004, SP 465.1325800.2019 for metro lines and SP 441.1325800.2019 for railway lines. It is noted that the methods according to SP 441.1325800.2019 are applicable mainly to existing railway lines. An innovative approach to vibration prediction for projected railway lines is considered, based on the introduction of the concept of the vibration characteristic of a train,

---

\*E-mail: 3342488@mail.ru (Цукерников И.Е.)

and the development of a method for its experimental determination. The approach can also be applied to openly passing subway sections.

**Keywords:** subway, railway, vibration, train vibration characteristic, building, prediction, estimation.

## Введение

Рельсовый транспорт (железнодорожные линии, линии метрополитена мелкого заложения или проходящие на отдельных участках открыто) является источником повышенной вибрации, которая распространяется по грунту и передается на фундаменты жилых и общественных зданий, расположенных в окрестности линии. Колебательное движение распространяется по несущим конструкциям здания и вызывает колебания стен и перекрытий, которые сказываются на состоянии зданий и на условиях нахождения в них людей [1-5].

Действующие на территории РФ санитарные правила ограничивают величины вибрации и уровней шума в помещениях жилых и общественных зданий. Это требует выполнения прогнозирования уровней вибрации и порождаемого вибрацией структурного шума в помещениях зданий с целью оценки прогнозируемых величин на соответствие нормативным значениям и, при необходимости, разработки мероприятий по снижению вибрации.

Вибрация, создаваемая в помещениях жилых и общественных зданий от движения рельсового транспорта, носит непостоянный прерывистый характер с существенным выделением сигнала в частотном диапазоне 1-250 Гц [1, 6]. Период повторения определяется графиком движения поездов. На практике рассматривают более узкий диапазон октавных полос со среднегеометрическими частотами ( $f_{ср}$ ) 4-63 Гц [7].

Первые систематизированные исследования по разработке методики прогнозирования вибрации от линий метро были выполнены в 90-х годах прошлого – начале настоящего столетий сотрудниками акустической лаборатории ООО «Тоннельная ассоциация России». Был проведен анализ литературных источников, обобщен опыт эксплуатации линий метрополитена, выполнены натурные экспериментальные исследования. Результаты исследований обсуждены на отечественных и международных конференциях и опубликованы в отечественной и международной литературе [8-15]. В 1998 г. по ним подготовлено руководство [16], которое было апробировано на линиях Московского метрополитена, и в результате был разработан и в 2004 г. введен в действие свод правил СП 23-105-2004 [17], содержащий методику оценки вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена.

Следующий этап исследований был выполнен в период с 2015 г. по 2019 г. лабораторией защиты зданий от вибрации и структурного звука института строительной физики (НИИСФ РААСН). Работы включали теоретические и экспериментальные исследования по распространению колебаний в грунте и конструкции зданий, а также оценку эффективности виброизолирующих и вибродемпфирующих устройств [18-23]. По результатам исследований были разработаны два свода правил: СП 441.1325800.2019 [24] по защите от вибраций железнодорожного транспорта и СП 465.1325800.2019 [25] по защите от вибраций метрополитена.

В соответствии с действовавшими во время разработки сводов правил санитарными нормами СН 2.2.4/2.1.8.566-96 [26] в качестве оцениваемых параметров

во всех сводах правил использовали виброскорость или ее уровень (по отношению к опорному значению  $5 \times 10^{-8}$  м/с). Основания для выбора виброскорости в качестве оцениваемого параметра указаны в СП 441.1325800.2019 [24] и немецком стандарте [27].

В связи с введением в 2021 году правилами и нормами СанПиН 1.2.3685-21 [28] и отменой норм [26] в качестве единственного нормируемого параметра вибрации в настоящее время следует использовать эквивалентное скорректированное виброускорение  $a_w$ , м/с<sup>2</sup>. В результате принятый в СП 441.1325800.2019 и СП 465.1325800.2019 для рабочих мест подход перехода от оценочного значения виброскорости к оценочному значению виброускорения должен быть распространен также и на остальные объекты прогнозирования.

## 1. Прогнозирование вибрации от поездов метрополитена

В соответствии с СП 23-105-2004 [17] прогнозирование вибрации от поездов метро в прилегающих к линиям зданиях и подбор виброзащитных мероприятий предлагают проводить в следующей последовательности [17]:

а) оценивают величины вибрации обделок тоннелей и лотковой части пути метрополитена в соответствии с положениями подразделов 3.2, 3.3;

б) задают или определяют в соответствии с разделом 4 исходное для расчета геологическое строение верхней части грунта (число и толщины слагающих слоев) общей толщиной  $H \geq h + 10$  м, где  $h$  – расстояние от поверхности грунта до лотка, м;

в) определяют массовые, динамические упругие и диссипативные параметры слагающих грунтов: плотность, скорости продольных и поперечных волн, коэффициент затухания в каждом слое;

г) рассчитывают ожидаемые значения виброскорости поверхности грунта у здания, расположенного вблизи линии метрополитена в соответствии с подразделом 3.4;

д) проверяют условия соответствия нормативным значениям и в случае их невыполнения подбирают виброзащитные мероприятия в соответствии с п. 3.1.5.

В указанных структурных элементах СП [17] приведены соответствующие формулы и порядок выполнения расчетов.

Расчеты проводят в трех нормируемых октавных полосах с  $f_{cr} = 16, 31,5$  и  $63$  Гц. Динамические характеристики, необходимые для расчета величин вибрации (перечисление *в*), определяют в процессе геологических изысканий или в соответствии с разделом 4 СП [17] на основе прямых акустических измерений. Приближенные значения параметров различных типов грунтов даны в приложении А СП [17].

В качестве исходных данных в [17] приняты вертикальная и горизонтальная виброскорости лотковой части в октавных полосах частот, сигнал в которых на поверхности грунта превалирует над уровнем фоновой вибрации. Эти величины определяют сначала посредством натуральных измерений для тоннеля выбранной конструкции верхнего строения пути с известными размерными и упругими параметрами, а также известными динамическими параметрами прилегающего грунта. В СП 23-105-2004 такие значения приведены в табл. 3.2 п. 3.2.3 для цилиндрического тоннеля с типовой обделкой. По ним рассчитывают требуемые исходные данные для оцениваемого тоннеля. Выражения и правила для выполнения расчета виброскорости лотковой части, как и остальных величин в соответствии с описанной выше последовательностью прогнозного расчета приведены в соответствующих структурных элементах свода правил.

На стадии разработки проектной документации подземных сооружений метро допускается оценивать виброскорость лотковой части посредством натуральных измерений.

Измерения следует выполнять на действующих сооружениях, имеющих аналогичную конструкцию помещения и верхнего строения пути, которые находятся в аналогичных проектируемому объекту, инженерно-геологических условиях. При этом различия свойств грунта и скоростей движения поездов должно составлять не более 10-15% [17].

Сравниваемое с нормами оценочное значение виброскорости вычисляют по формуле [17]:

$$v_{eq}^{корр} = \sqrt{\frac{1}{T_r} \sum_j^N T_{ej} (v_{eq,j}^{корр})^2}, \quad (1)$$

где  $T_r$  – время оценки воздействия (16 часов днем, 8 часов ночью), с;  $T_{ej}$  – частичное время воздействия вибрации, соответствующее реализации  $j$ -го режима движения поездов, с;  $N$  – число режимов обращения поездов за время оценки;  $v_{eq,j}^{корр}$  – эквивалентное скорректированное значение виброскорости, характеризующее интенсивность вибрации за время  $T_{ej}$ , м/с (в СП суммирование проводится по максимальным значениям  $v_{max,j}^{корр}$  виброскорости, однако должны использоваться определенные в СП эквивалентные значения  $v_{eq,j}^{корр}$ ).

Значения величин  $T_{ej}$  определяют согласно графику движения поездов рассматриваемой линии метро. В приложении И СП 23-105-2004 приведены сведения по графику движения поездов линий Московского метрополитена.

Аналогичная формула применима для расчета оценочных значений эквивалентного скорректированного виброускорения и оценочных значений эквивалентных скоростей и ускорений в полосах частот.

В разработанном НИИСФ РААСН и введенном в 2020 году СП 465.1325800.2019 [25] прогнозирование вибрации проводится не для грунта, а для помещений рассматриваемых зданий с оценкой передачи колебаний на фундамент здания, распространения колебаний по несущим конструкциям, а также с учетом резонансных свойств ограждающих поверхностей (стен, перекрытий) помещений здания. Это позволяет выполнять наряду с оценкой вибрационного воздействия также прогнозный расчет и оценку создаваемого вибрациями структурного шума в помещениях.

Расширено назначение свода правил [25] за счет введения требований по прогнозированию, оценке и разработке виброзащитных мероприятий по снижению воздействия на несущую способность зданий и сооружений, включая тоннельную обделку, элементы конструкций станционных комплексов и транспортно-пересадочных узлов, а также на высокоточное технологическое оборудование, установленное в помещениях зданий. Диапазон рассматриваемых частотных полос расширен до семи с включением двух низкочастотных полос с  $f_{cr} = 4$  Гц и 8 Гц (в этих полосах сигнал от прохождения поездов метрополитена выделяется над фоновым сигналом в зданиях), и двух полос с  $f_{cr} = 125$  Гц и 250 Гц (для прогнозирования и оценки структурного шума). Прогнозный расчет предлагается проводить в 1/3 октавных полосах частот (в виду наличия данных по эффективности средств виброзащиты, как правило, в терциальных полосах частот). 1/3-октавные значения преобразуют в значения в октавных полосах посредством энергетического суммирования величин вибрации для терциальных полос, входящих в соответствующую октавную полосу. Для оценки воздействия вибрации на несущую способность зданий и сооружений и технологическое оборудование определяют среднеквадратичные и пиковые значения виброскорости в третьоктавных полосах с  $f_{cr} = 1-100$  Гц.

В результате приведенную выше последовательность работ по прогнозированию вибрации дополняют работами по расчету вибрации в точках фундамента, несущих

конструкций и ограждающих поверхностях помещений рассматриваемого здания и по расчету уровней структурного шума в помещениях. В случае несоответствия полученных оценочных значений нормативным требованиям, проводят подбор и проектирование виброзащитных мероприятий в соответствии с разделом 7 (виброизоляция верхнего строения пути) или 8 (виброизоляция здания) и, наконец, оценивают эффективность запроектированных виброзащитных мероприятий, посредством выполнения повторного расчета и, при необходимости, корректируют выбранные средства виброзащиты.

Виброскорости  $v$ , м/с, несущих и (или) ограждающих конструкций зданий и сооружений рассчитывают посредством выражения [25]:

$$v = v_{u(p)} \cdot k_{trains} \cdot k_{speed} \cdot k_{rail} \cdot k_{edge} \cdot k_{fund} \cdot k_{rez} \cdot k_h, \quad (2)$$

где  $v_{u(p)}$  – измеренные (рассчитанные) октавные значения составляющих виброскорости колебаний поверхности грунта на абрисе фундамента здания или сооружения, м/с;  $k_{trains}$  – поправочный коэффициент, учитывающий возможность одновременного движения по параллельным путям на рассматриваемом участке, определяют по 5.2.2.3 СП 441.1325800.2019;  $k_{speed}$  – поправочный коэффициент, учитывающий скорость движения подвижного состава, определяют по таблице 5.2 СП 441.1325800.2019;  $k_{rail}$  – поправочный коэффициент, учитывающий износ пути, колёсных пар, наличие стрелочных переводов, переездов и прочих особых элементов пути, приводящих к существенному изменению динамической нагрузки на верхнее строение пути, определяют по таблице 5.1 СП 441.1325800.2019;  $k_{edge}$  – частотно-зависимая функция, учитывающая наличие систем виброизоляции (в конструкции верхнего строения пути или здания), в случае её отсутствия принимается равной единице в заданном частотном диапазоне;  $k_{fund}$  – частотно-зависимая функция, характеризующая передачу вибрации с грунта на фундамент здания, определяют по 5.5;  $k_{rez}$  – частотно-зависимая функция, соответствующая резонансному увеличению колебаний ограждающими поверхностями помещений, определяют по 5.7;  $k_h$  – частотно-зависимая функция, учитывающая изменение колебаний по высоте здания, определяют по 5.6.

В указанных структурных элементах свода правил приведены рекомендации для вычисления входящих в выражение (2) величин.

Рассматривают два этапа проведения прогнозного расчета. Этап I, на котором следует пользоваться описанными выше подходами СП 23-105-2004 в соответствии с рекомендациями и оценочными выражениями, приведенными в подразделах 5.2-5.7 СП 465.1325800.2019 [25]. Этап II, на котором следует разрабатывать детальные расчетные математические модели, например, на базе метода конечных элементов, метода граничных элементов или других апробированных методов строительной механики. В [25] указано, что этап II применяют в случае наличия незначительных (до 1 дБ) в низкочастотной области (ниже октавной полосы с  $f_{cr} = 31,5$  Гц) или существенных (свыше 20 дБ) в октавной полосе с  $f_{cr} = 16$  Гц превышений вибрации, полученных при расчетах по 5.2-5.7. Такой же подход рекомендован для детальной разработки проектной документации и детального проектирования систем виброизоляции верхнего строения пути или здания. Допускается совмещение указанных методов в рамках единой расчетной модели.

В п. 4.1.6 СП 465.1325800.2019 указано, что с нормативными значениями следует сравнивать оценочные значения нормируемых параметров вибрации и структурного шума. Вместе с тем, выражения, аналогичные (1), для оценочных значений в СП 465.1325800.2019 отсутствуют.

По полученным с помощью выражения типа (1) оценочным виброскоростям  $v_{eq}$ , м/с, в октавных полосах частот следует определить соответствующие оценочные

эквивалентные значения виброускорения  $a_{eq}$  из выражения:

$$a_{eq} = 2\pi f_{cr} v_{eq}, \quad (3)$$

где  $f_{cr}$  – среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц.

Сравниваемое с нормами оценочное эквивалентное корректированное виброускорение  $a_{w,eq}$  определяют из выражения:

$$a_{w,eq} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 (w_i a_{eq,i})^2}, \quad (4)$$

где  $w_i$  – значение функции частотной коррекции для среднегеометрической частоты  $i$ -й октавной полосы, определяемое по ГОСТ 31191.1 [29] и ГОСТ ИСО 8041-2006 [30].

## 2. Прогнозирование вибрации от железнодорожных линий

Прогнозирование вибрации от железнодорожных линий проводят в соответствии с правилами, установленными СП 441.1325800.2019 [24]. Расчеты выполняют в октавных полосах частот с  $f_{cr} = 4 - 250$  Гц. Последовательность работ по прогнозированию соответствует принятой в СП 465.1325800.2019. Однако в качестве исходных данных используют либо результаты измерения виброскорости  $v(r)$  на поверхности грунта на абрисе фундамента проектируемого или строящегося здания, либо вблизи железнодорожной линии  $v(r_0)$  на расстоянии  $r_0$  (не менее 8 м) от оси ближнего к зданию железнодорожного пути. Во втором случае значение виброскорости  $v(r)$  на поверхности грунта на абрисе фундамента здания определяют расчетом с помощью выражения:

$$v(r) = v(r_0) \cdot C \cdot D, \quad (5)$$

где  $C$  – коэффициент геометрического ослабления вибрации при распространении в грунте;  $D$  – коэффициент демпфирования материала грунта. Параметры  $C$  и  $D$ , входящие в выражение (5), оценивают по следующим зависимостям (ГОСТ Р ИСО 10137-2016 [31], приложение В):

$$C = \left(\frac{r_0}{r}\right)^n, \quad (6)$$

$$D = e^{-2\rho\pi f_{cr}(r-r_0)}, \quad (7)$$

где  $n$  – коэффициент, выбираемый в зависимости от типа механизма распространения волн (в СП принято  $n = 0,25$ );  $\rho = \eta/c$  – параметр, определяемый по таблице 5.5 СП или вычисляемый исходя из результатов динамических испытаний грунта по [31], с/м;  $\eta = \delta/\pi$  – коэффициент потерь грунта;  $\delta$  – логарифмический декремент колебаний;  $c$  – скорость продольной волны в грунте, м/с.

Необходимо отметить, что для проектируемых линий такой подход требует выполнения измерений на линии-прототипе с таким же графиком движения поездов и аналогичными в пределах указанной выше погрешности динамическими характеристиками грунта. Зачастую подобрать такую линию-прототип не представляется возможным. В работе [32] предложен альтернативный подход. Введено понятие вибрационной характеристики поезда как собственной характеристики источника вибрации в виде значения виброскорости  $v(r_0)$  на опорном расстоянии  $r_0$  от оси ближнего пути, принимаемой в качестве места действия эквивалентного линейного источника вибрации

от проходящего поезда. Определены также критерии выбора значения  $r_0$  из условия независимости  $v(r_0)$  от демпфирующих свойств грунта на расстоянии  $r_0$  и показано, что в пределах принятой в своде правил 15% погрешности максимальное значение  $r_0$  должно быть выбрано равным 1 м для выполнения данного условия во всем рассматриваемом диапазоне частот.

Так как выполнение непосредственных измерений  $v(r_0 = 1 \text{ м})$  является сложной задачей, в работе [33] предложен метод определения этого параметра из натуральных измерений скорости вибрации на произвольном расстоянии от транспортной линии и дан пример его практической реализации для определения вибрационных характеристик пригородных поездов. Приведены регрессионные зависимости между вибрационными характеристиками в виде скорректированных максимальных  $v_{w,max}$  и эквивалентных  $v_{w,eq}$  значений виброскорости в направлении оси  $X$ , перпендикулярной железнодорожной линии, и скоростью движения поезда  $V_{tr}$ ,

$$v_{w,max} = 19,8V_{tr} + 921, \quad v_{w,eq} = 12,3V_{tr} + 674,3 \quad (8)$$

Зависимости (8) получены по результатам статистической обработки измерений виброскорости в направлении оси  $X$ , вблизи 87 пригородных поездов, движущихся с различными скоростями в диапазоне 30-60 км/ч. В [33] отмечено, что значения коэффициента корреляции для полученных уравнений равны 0,99 и 0,97 соответственно. Это свидетельствует о достаточно хорошей линейной зависимости между рассматриваемыми величинами.

По определенным значениям вибрационных характеристик измеренных пригородных поездов могут быть рассчитаны спектральные коэффициенты связи между скорректированными значениями вибрационных характеристик и их значениями в октавных полосах частот, позволяющие получить регрессионные зависимости типа (8) в октавных полосах частот нормируемого частотного диапазона.

### Заключение

Правила, изложенные в СП 23-105-2004, СП 465.1325800.2019 и СП 441.1325800.2019, позволяют выполнять прогнозирование вибрации и структурного шума в помещениях жилых и общественных зданий, расположенных в окрестности транспортных линий, сопоставлять полученные в результате прогноза значения с нормативными величинами и разрабатывать обоснованные виброзащитные мероприятия.

Для проектируемых железнодорожных линий и открыто проходящих участков метрополитена целесообразно в своды правил ввести понятие вибрационной характеристики поезда и дополнить их соответствующими регрессионными зависимостями между значениями вибрационных характеристик и скоростями движения поездов.

### Список литературы

1. Handbook of noise and vibration control / Edited by Malcolm J. Crocker // John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, USA. — 2007, Chapter 12.
2. Руднева Е.А. Анализ результатов измерений уровней вибрации в жилых домах при движении поездов метрополитена, выполненных специалистами ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Москве» в период с 2014-2017 гг. // Материалы междунаучно-практич. конф. «Проблемы экологической безопасности, энергосбережение в строительстве и ЖКХ», Москва-Кавала. — 2017. — С. 22-26.

3. Okumura Y. Statistical Analysis of Field Data of Railway Noise and Vibration Collected in an Urban Area / Okumura Y. and Kuno K // *Appl. Acoust.* – 1991. Vol. 33. – P. 263-280.
4. Fields J M Railway Noise and Vibration Annoyance in Residential Areas // *Sound Vib.* – 1979. Vol. 66, № 3. - P. 445-485.
5. Duarte M. L. M. Perception Threshold of People Exposed to Sinusoidal Vibration / Duarte M. L. M. and Filho M. R. // *Proceedings of the Tenth International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden.* – 2003. – P. 3791-3798.
6. ISO 14837-1:2005 Mechanical vibration - Ground-borne noise and vibration arising from rail systems Part 1 General guidance. – 2005.
7. Tsukernikov I. Features of normalization and evaluation of vibration from rail transport in premises of residential and public buildings / Tsukernikov I., Shubin I., Nevenchannaya T. // *Akustika.* – 2019. Vol. 32, March. – P. 288-292.
8. Костарев С.А. Модовая структура акустического поля, возбуждаемого колебаниями цилиндрической оболочки в сплошной среде / Костарев С.А., Махортых С.А. // *Техническая акустика.* – 1996, № 12. – С. 1-15.
9. Tsukernikov I.E. Modern ideas of normalizing, measurement and estimation of vibration in buildings generated by underground trains / Tsukernikov I.E., Rybak S.A., Kostarev S.A. // 12-th Int. Fase Symp. "Transport noise and vibration", St.-Petersburg, Russia, 1996.
10. Tsukernikov I. E. A new approach to underground train noise estimation in dwelling buildings / Tsukernikov I. E., Rybak S. A., Kostarev S. A. // Int. EAA/EEAA Symp. "Transport noise and vibration", Tallinn, Estonia, 1998.
11. Цукерников И.Е. Современные представления по нормированию, измерению и оценке вибрации в жилье от движения поездов метрополитена / Цукерников И.Е., Рыбак С.А., Костарев С.А. // III Всерос. науч.-практич. конференция с международным участием «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности». Т. 1, С-Пб. МЦЭНТ, 1998.
12. Цукерников И.Е. Выбор нормируемого параметра при оценке вибрации в жилье от движения поездов метрополитена / Цукерников И.Е., Костарев С.А., Некрасов И.А. // IV Всерос. науч.-практич. конференция с международным участием «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности». Т.2, С-Пб, БГТУ, 1999.
13. Kostarev S.A. Choice of a controlled parameter when assessing underground train passing vibration in building Kostarev S.A., Rybak S.A, Tsukernikov I.E... 5-th Int. Symp. "Transport noise and vibration", S.-Petersburg, Russia, – 2000.
14. Kostarev S.A. Measurement and estimation of under, ground train passing vibration in residential and administrative buildings / Kostarev S.A., Nekrasov I.A., Rybak S.A., Tsukernikov I.E.// Int. Congr. InterNoise, Nice, France. – 2000.
15. Костарев С.А. Проблемы акустической экологии, порождаемые подземным и наземным транспортом в условиях современного мегаполиса. Разработка нормативных документов, регламентирующих измерение и оценку вибрации и шума / Костарев С.А., Махортых С.А., Рыбак С.А., Цукерников И.Е. // Международная науч-практич. конф. «Градоформирующие технологии XX века», М. – 2001.
16. Руководство по оценке вибрации в помещениях жилых и общественных зданий от движения поездов метрополитена // Комплекс нормативных документов по оценке шума и вибрации от метрополитена. М., ТИМР. – 1998.
17. СП 23-105-2004 Свод правил по проектированию и строительству. Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена. Госстрой России, ФГУП ЦПП. – 2004.

18. Смирнов В.А. К вопросу прогноза уровней вибрации перекрытий жилых зданий, вызванных движением метропоездов / Смирнов В.А., Цукерников И.Е. // Жилищное строительство. – 2016, №7, С. 35-38.
19. Tsukernikov Ilya, Smirnov Vladimir, Shubin Igor, Nevenchannaya Tatiana. Underground railway vibration measurement, analysis and reduction in adjacent residential building // 24th International Congress on Sound and Vibration. ICSV 24, London. – 2017.
20. Цукерников И.Е. Измерения и анализ вибрации, вызванной движением поездов метрополитена на близлежащие здания, и разработка мероприятий по их снижению / Цукерников И.Е., Смирнов В.А. // Сборник трудов II Всероссийской акустической конференции, совмещенной с XXX сессией Российского акустического общества. 6-9 июня 2017, Нижний Новгород, ИПФ РАН. – 2017. – С. 1376-1386.
21. Smirnov Vladimir. To the question of vibration levels prediction inside residential buildings caused by underground traffic / Smirnov Vladimir, Tsukernikov Ilya // Procedia Engineering. – 2017, 176. – P. 371–380.
22. Smirnov Vladimir Vibration Isolation System Influence on Structural Stiffness of Buildings Adjacent to Metro Lines / Smirnov Vladimir, Tsukernikov Ilya // 13th International Conference on Theoretical and Computational Acoustics. ICTCA 2017. Vienna, 30. Juli - 03. August 2017. Book of Abstracts. Institute of Mechanics and Mechatronics, Faculty of Mechanical and Industrial Engineering, Institute of Building Construction and Technology, Faculty of Civil Engineering, TU Wien, Vienna, Austria. – 2017. – P. 266.
23. Смирнов В.А. Анализ вибраций в жилом здании, находящемся в технической зоне метрополитена / Смирнов В.А., Филиппова П.А., Цукерников И.Е. // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2017, 3. – С. 87-95.
24. СП 441.1325800.2019 Защита зданий от вибрации, создаваемой железнодорожным транспортом. Правила проектирования // Стандартиформ, М. – 2019.
25. СП 465.1325800.2019. Здания и сооружения. Защита от вибрации метрополитена. Правила проектирования // Стандартиформ, М. – 2020.
26. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы // М.: Информационно-издательский центр Минздрава России – 1997.
27. DIN 4150, Teil 2. Erschütterungen in Bauwesen. Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden. Deutsche Norm // DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin. – 1992.
28. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания // [электронный ресурс] – круглосуточно.  
URL: <https://minjust.consultant.ru/special/documents/document/25814?items=1&page=469> (дата обращения 05.03.2023).
29. ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997). Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка её воздействия на человека. Общие требования – 2004.
30. ГОСТ ИСО 8041-2006 Вибрация. Воздействие вибрации на человека. Средства измерений. – 2006.
31. ГОСТ Р ИСО 10137 — 2016 Основы расчета строительных конструкций. Эксплуатационная надежность зданий в условиях воздействия вибрации. – 2016.
32. I. E. Tsukernikov Vibration Characteristics of Railway Transports / I. E. Tsukernikov, I. L. Shubin and T O Nevenchannaya // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. Vol. 1079.
33. Ilya Tsukernikov. Method of railway trains vibration characteristic determination based on field measurements / Ilya Tsukernikov, Tatiana Nevenchannaya, Leonid Tikhomirov,

Natalia Shchurova // Akustika.- 2021. Vol. 39, April. — P. 223-225.

### References

1. Handbook of noise and vibration control / Edited by Malcolm J. Crocker // John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, USA. — 2007.
2. Rudneva E.A. Analysis of the results of measurements of vibration levels in residential buildings during the movement of metro trains, performed by specialists of the FBUZ "Center for Hygiene and Epidemiology in the City of Moscow" in the period from 2014-2017 // Materialy int. scientific and practical. conf. "Problems of environmental safety, energy saving in construction and housing and communal services", Moscow-Kavala. — 2017. — P. 22-26.
3. Okumura Y. Statistical Analysis of Field Data of Railway Noise and Vibration Collected in an Urban Area / Okumura Y. and Kuno K // Appl. Acoust. — 1991. Vol. 33. — P. 263-280.
4. Fields J. M. Railway Noise and Vibration Annoyance in Residential Areas // Sound Vib. — 1979. Vol. 66, № 3. — P. 445-485.
5. Duarte M.L.M. 2003 Perception Threshold of People Exposed to Sinusoidal Vibration / Duarte M.L.M., Filho M.R. // Proceedings of the Tenth International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden. — P. 3791-3798.
6. ISO 14837-1:2005 Mechanical vibration - Ground-borne noise and vibration arising from rail systems Part 1 General guidance. — 2005.
7. Tsukernikov I. Features of normalization and evaluation of vibration from rail transport in premises of residential and public buildings / Tsukernikov I. , Shubin I., Nevenchannaya T. // Akustika. — 2019. Vol. 32, March. — P. 288-292.
8. Kostarev S.A. Modal structure of an acoustic field excited by vibrations of a cylindrical shell in a continuous medium/ Kostarev S.A., Makhortykh S.A. // Technical acoustics.- 1996, No. 12. — P. 1-15.
9. Tsukernikov I.E. Modern ideas of normalizing, measurement and estimation of vibration in buildings generated by underground trains / Tsukernikov I.E., S.A. Rybak, S.A. Kostarev // 12-th Int. Fase Symp. "Transport noise and vibration", St.-Petersburg. Russia — 1996.
10. Tsukernikov I.E. A new approach to underground train noise estimation in dwelling buildings / Tsukernikov I.E., Rybak S.A., Kostarev S.A. // Int. EAA/EEAA Symp. "Transport noise and vibration", Tallinn, Estonia — 1998.
11. Tsukernikov I.E. Modern concepts of standardization, measurement and assessment of vibration in housing from the movement of metro trains / Tsukernikov I.E., Rybak S.A., Kostarev S.A. // III All-Russian scientific-practical conference with international participation "New in ecology and life safety", St. Petersburg. MCENT. — 1998. V. 1.
12. Tsukernikov I.E. The choice of the normalized parameter in assessing the vibration in housing from the movement of underground trains / Tsukernikov I.E., Kostarev S.A., Nekrasov I.A. // IY All-Russian scientific-practical. conference with international participation "New in ecology and life safety". Vol. 2, St.Petersburg, BSTU. — 1999.
13. Kostarev S.A. Choice of a controlled parameter when assessing underground train passing vibration in building / Kostarev S.A., Rybak S.A., Tsukernikov I.E. // 5-th Int. Symp. "Transport noise and vibration", S.-Petersburg, Russia- 2000.
14. Kostarev S.A. Measurement and estimation of under, ground train passing vibration in residential and administrative buildings / Kostarev S.A., Nekrasov I.A., Rybak S.A., Tsukernikov I.E. // Int. Congr. InterNoise, Nice, France — 2000.

15. Kostarev S.A. Problems of acoustic ecology generated by underground and surface transport in a modern metropolis. Development of normative documents regulating the measurement and assessment of vibration and noise / Kostarev S.A., Makhortykh S.A., Rybak S.A., Tsukernikov I.E. // International scientific-practical Conference "City-forming technologies of the XX century", М. – 2001.
16. Guidance for the assessment of vibration in the premises of residential and public buildings from the movement of metro trains // A set of regulatory documents for assessing noise and vibration from the subway- М.: TIMR – 1998.
17. SP 23-105-2004. Code of rules for design and construction. Vibration assessment in the design, construction and operation of metro facilities // Gosstroy of Russia, FGUP TsPP.–2004.
18. Smirnov V.A. On the issue of predicting the levels of vibration of floors of residential buildings caused by the movement of metro trains / Smirnov V.A., Tsukernikov I.E. // Housing construction - 2016 - No. 7.
19. Tsukernikov Ilya. Underground railway vibration measurement, analysis and reduction in adjacent residential building / Tsukernikov Ilya, Smirnov Vladimir, Shubin Igor, Nevenchannaya Tatiana // 24th International Congress on Sound and Vibration. ICSV 24, London – 2017.
20. Tsukernikov I.E. Measurement and analysis of vibration caused by the movement of metro trains to nearby buildings and development of measures to reduce them / Tsukernikov I.E., Smirnov V.A. // Proceedings of the II All-Russian Acoustic Conference, combined with the XXX session of the Russian Acoustic Society., Nizhny Novgorod, IAP RAS. – June 6-9. – 2017. – P. 1376-1386.
21. Smirnov Vladimir. To the question of vibration levels prediction inside residential buildings caused by underground traffic / Smirnov Vladimir, Tsukernikov Ilya // Procedia Engineering 176 -2017. – P. 371–380.
22. Smirnov Vladimir. Vibration Isolation System Influence on Structural Stiffness of Buildings Adjacent to Metro Lines / Smirnov Vladimir, Tsukernikov Ilya // 13th International Conference on Theoretical and Computational Acoustics. ICTCA 2017 Vienna, 30. Juli - 03. August 2017. Book of Abstracts. Institute of Mechanics and Mechatronics, Faculty of Mechanical and Industrial Engineering, Institute of Building Construction and Technology, Faculty of Civil Engineering, TU Wien, Vienna, Austria. – 2017. – P. 266.
23. Smirnov V.A. Analysis of vibrations in a residential building located in the technical zone of the subway / Smirnov V.A., Filippova P.A., Tsukernikov I.E. // Biospheric compatibility: man, region, technology. – 2017, Vol. 3, – P. 87-95.
24. SP 441.1325800.2019. Protection of buildings from vibration generated by railway transport. Design rules // Standartinform, М. – 2019.
25. SP 465.1325800.2019. Buildings and structures. subway vibration protection. Design rules // Standartinform, М. – 2020.
26. CH 2.2.4/2.1.8.566-96. Industrial vibration, vibration in the premises of residential and public buildings. Sanitary norms // Information and publishing center of the Ministry of Health of Russia. – 1997.
27. DIN 4150, Teil 2. Erschütterungen in Bauwesen. Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden. Deutsche Norm. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin – 1992.
28. SanPiN 1.2.3685-21 Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. [electronic resource] - around the clock. - URL: <https://minjust.consultant.ru/special/documents/document/25814?items=1&page=469> (date of the application 05.03.2023).
29. GOST 31191.1-2004 (ISO 2631-1:1997). Vibration and shock. Measurement of

---

general vibration and assessment of its impact on a person. General requirements. – 2004.

30. GOST ISO 8041-2006 Vibration. The effect of vibration on a person. Measuring instruments. – 2006.

31. ISO 10137:2007 Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations. – 2016.

32. I. E. Tsukernikov. Vibration Characteristics of Railway Transports / I. E. Tsukernikov, I. L. Shubin and T O Nevenchannaya // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. Vol. 1079.

33. Ilya Tsukernikov. Method of railway trains vibration characteristic determination based on field measurements / Ilya Tsukernikov, Tatiana Nevenchannaya, Leonid Tikhomirov, Natalia Shchurova // Akustika.- 2021. Vol. 39, April. – P. 223-225.