

УДК: 699.842
OECD: 02.01.IM

Оценка неопределенности измерений вибрации железнодорожного транспорта по результатам суточного мониторинга

Канев Н.Г.¹, Прокофьева П.Е.^{2*}, Московец М. Е.³

¹ Доцент, к. ф-м. н. ² Студент ³ Магистр

^{1,2,3} Кафедра «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Баумана,
г. Москва, РФ

Аннотация

Приведены результаты суточных измерений вибрации, возникающей от движения поездов различных типов, проходящих по двухпутному и многопутному железнодорожному полотну. Выполнен анализ нормируемого параметра - максимального скорректированного значения виброскорости - в соответствии с методикой, установленной действующими нормативными документами, а также вспомогательных параметров - значений виброскорости в октавных полосах частот. Показано, что рекомендованное количество событий прохождения поезда, которое необходимо измерить, не позволяет получить статистические достоверные результаты измерений. Во-первых, имеют место существенные девиации параметров вибрации в течение суток, и результат измерений может зависеть от времени проведения измерений. Во-вторых, измеренные значения параметров вибрации оказываются ниже, чем максимальные значения, зафиксированные в течение суток, поэтому параметры, характеризующие максимальную вибрацию, оказываются недооцененными. В-третьих, установлено, что распределение измеренных параметров вибрации не описывается гауссовым законом распределения вероятности. В связи с этим применение подходов к выражению неопределенности измерений, основанных о предположении о гауссовом распределении измеренных значений, является некорректным и требует уточнения. Полученные данные показывают необходимость совершенствования действующих методик измерений вибраций от железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: вероятность, вибрация, виброскорость, железнодорожный транспорт, методика измерений, неопределенность измерений.

Measurement uncertainty evaluation based on the results of daily rail transport vibration monitoring

Kanev N. G.¹, Prokofyeva P. E.^{2}, Moskovets M. E.³*

¹ Associate professor, Candidate of Physico-Mathematical Sciences

² Student ³ Master

^{1,2,3} Department of Ecology and Industrial Safety, BMSTU, Moscow, Russia

Abstract

This paper is focused on the results of daily vibration monitoring caused by various types of trains passing on multiple- or double-track railways. Federal standards provide a guidance for evaluating frequency weighted velocity, according to which current analysis has been conducted. Furthermore, a number of additional parameters has been assessed, including octave band vibration velocity. It has been indicated that a recommended number of observed train passages was considered as insufficient for veracious measurement

results. Firstly, significant deviations have been occurring throughout a day, therefore, an outcome may be dependent on the time of day. Secondly, measured vibration parameters appeared to be lower than peak ones recorded during the day. Thus, appraised values that determine maximal vibration are believed to be underestimated. Finally, it was established that a distribution of measured vibration parameters cannot be described by Gaussian probability distribution. Consequently, current approaches to assess measurement uncertainty, based upon an assumption of Gaussian distribution of measured values, cannot be applied due to inaccuracy and a lack of clarifying. The acquired data illustrates a necessity of improvements in current rail transport vibration assessment guidelines.

Keywords: vibration, vibration velocity, rail transport, measurements uncertainty, measuring procedures, probability.

Введение

Вибрации, вызываемые движением поездов, оказывают негативное воздействие на человека. Нормируемые параметры вибрации и их предельно-допустимые значения для жилых и общественных зданий, а также для рабочих мест, устанавливаются документами [1,2]. Неточности формулировок [1] дают возможность различных трактовок положений, касающихся нормирования непостоянной вибрации, что приводит к противоречивым оценкам одного и того же вибрационного воздействия разными специалистами [3]. На необходимость уточнения требований [1] в части нормирования непостоянной вибрации обращено внимание в работах [4,5], также это отмечено в решениях конференции «Интерметро-2019» [6].

В 2019 г. введен в действие новый свод правил [7], предлагающий в качестве нормируемых параметров непостоянной вибрации, создаваемых поездами в зданиях, эквивалентное и максимальное скорректированное значение виброскорости. Предложены однозначные определения нормируемых параметров, их предельно-допустимые значения, а также методика измерений.

Опыт показывает, что измерение и оценка эквивалентных значений, т.е. средних значений за дневное или ночное время в жилье, а также средних значений за время нахождения в административном здании, параметров вибрации не вызывает трудностей: достаточен период наблюдений, включающий проезд нескольких поездов каждой категории. Однако для оценки максимального значения виброскорости, характеризующее кратковременное воздействие во время прохождения поезда, требуется фиксация большого количества событий прохождения поездов разных категорий, поскольку существует достаточно сильный разброс значений параметров вибрации для разных проездов [8]. Свод правил [7] рекомендует выполнение измерений не менее 20 проездов каждой категории. Очевидно, что при интенсивном движении поездов возможна зависимость измеренного значения и параметра, характеризующего неопределенность измерения [9], от совокупности зафиксированных проездов.

Оценка неопределенности является важным фактором, характеризующим возможный разброс значений параметров вибрации. Важно, что этот разброс не связан с точностью измерительной аппаратуры, а вызван отличием между отдельными проездами поездов, связанных со скоростью поездов, загруженностью, изношенностью колесных пар и некоторыми другими факторами [10]. Значения неопределенности используются для расчета вибрационных полей в грунте и зданиях, проводимых при прогнозировании вибрации в зданиях, проектируемых вблизи железнодорожных путей [11-13].

В настоящей работе проводится анализ длительного мониторинга вибрации,

проведенного вблизи железнодорожных путей с движением пассажирских и грузовых поездов. Выполнен анализ измеренных значений нормируемого параметра вибрации в соответствии с методикой, установленной [7], а также оценена неопределенность измерений.

1. Измерение максимального значения виброскорости

Свод правил [7] рекомендует следующую методику определения максимального значения скорректированного значения виброскорости по измеренным значениям для всех поездов. В первую очередь вычисляется среднее максимальное значение виброскорости потока поездов для каждой категории

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (1)$$

где v_i – максимальное скорректированное значение виброскорости при i -м прохождении поезда, n - число поездов в рассматриваемой категории.

В качестве руководства по выражению неопределенности измерений свод правил [7] рекомендует применение стандарта [9]. Измеряемой величиной является среднее значение (1); стандартной неопределенностью среднего значения согласно [9] является выборочное стандартное отклонение среднего значения, рассчитываемое по формуле

$$u(\bar{v}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}. \quad (2)$$

Расширенная неопределенность определяется следующим образом

$$U(\bar{v}) = k_p u(\bar{v}) \quad (3)$$

где k_p – коэффициент охвата при заданном уровне доверия p . Для определения значения k_p требуется точное знание закона распределения вероятностей, которое заведомо неизвестно. В подобных случаях [9] допускает принимать упрощенный подход, при котором считается, что распределение близко к нормальному, тогда значение $k_p = 2$ соответствует уровню доверия 95%, значение $k_p = 3$ соответствует уровню доверия 99%.

Результат измерения записывается в виде $\bar{v} \pm U(\bar{v})$, для нормативной оценки используется значение, соответствующее верхней границе этого интервала, т.е. $\bar{v} + U(\bar{v})$.

За максимальное значение виброскорости за время оценки принимается наибольшее из значений для всех категорий поездов, вычисленных по формуле (1) с учетом расширенной неопределенности (3). Аналогичная методика применяется для определения максимальных значений виброскорости в октавных полосах частот.

2. Двухпутная дорога

Рассмотрим результаты суточных измерений вибрации поездов на полу подвала здания на расстоянии 25 м от путей, приведенные в [8]. По двухпутной железной дороге происходит движение поездов одного типа - пассажирских электропоездов (категория 3 согласно классификации [7]). Известно [14], что на фундаментах зданий вибрации в вертикальном направлении, т.е. перпендикулярном поверхности фундамента, значительно выше, чем в горизонтальных, поэтому далее рассматриваются параметры вибрации только в вертикальном направлении. На рис. 1 приведены результаты суточного мониторинга в следующем виде: каждому событию прохождения поезда соответствует точка на графике, ее абсцисса – это время прохождения, ордината – максимальное скорректированное значение виброскорости для этого проезда. Общее количество событий $N = 181$. Среднее значение виброскорости по всем событиям составляет 37.2 мкм/с, среднее квадратическое отклонение составляет 16.1 мкм/с. При этом проезды разделяются на две группы со значениями виброскорости в интервалах 10-30 мкм/с и 35-65 мкм/с. Это разделение соответствует движению поездов по разным путям.

Далее применим процедуру определения максимального измеренного значения виброскорости и его расширенной неопределенности по выборкам, состоящим из 20 последовательных проездов.

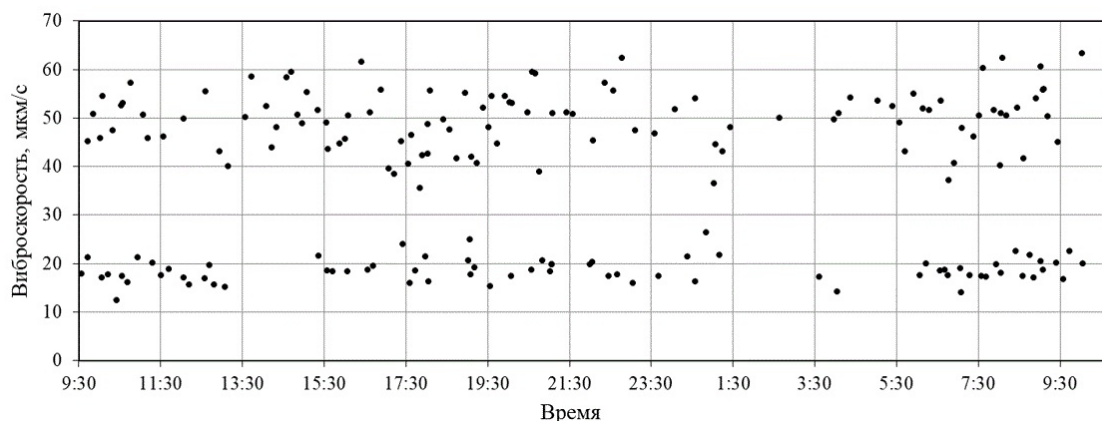


Рис. 1. Результаты суточных измерений вибрации поездов в здании на расстоянии 25 м от двухпутной железной дороги, каждая точка соответствует одному проезду поезда

Пусть v_i – максимальное значение виброскорости, измеренное для i -го проезда поезда, при этом $i = 1, 2, \dots, N$. Выборка с номером j составляется из 20 проездов с номерами от j до $j + 19$, таким образом, общее количество выборок составляет $N - 19$, т.е. индекс j принимает значения от 1 до 162. Согласно (1) рассчитаем среднее значение для каждой выборки

$$\bar{v}_j = \frac{1}{20} \sum_{i=j}^{j+19} v_i. \quad (4)$$

Из (2) и (3) вычислим расширенную неопределенность с коэффициентом охвата $k_p = 2$ для каждой выборки

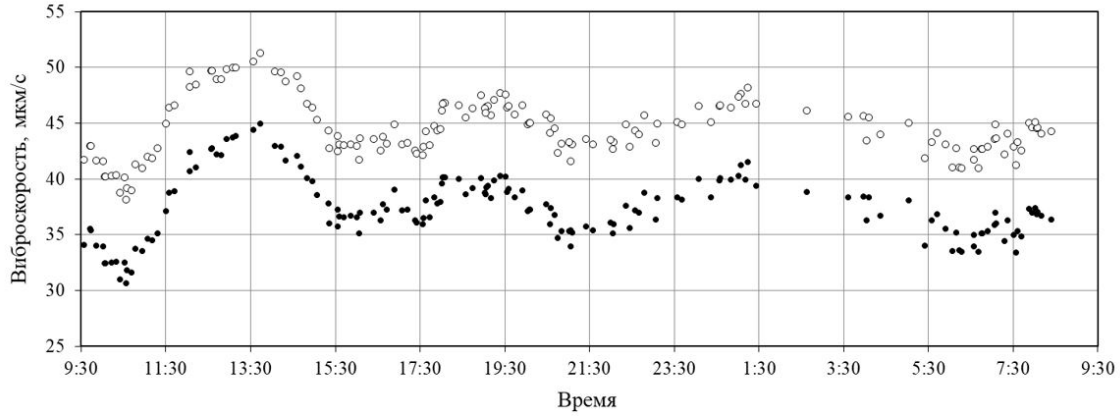


Рис. 2. Среднее значение \bar{v}_j по выборкам из 20 последовательных проездов на рис. 1 (●) и оно же с расширенной неопределенностью $\bar{v}_j + U(\bar{v}_j)$ (○)

$$U(\bar{v}_j) = 2 \sqrt{\frac{1}{20 \cdot 19} \sum_{i=j}^{j+19} (v_i - \bar{v}_j)^2}. \quad (5)$$

На рис. 2 представлены результаты расчета среднего значения \bar{v}_j и среднего значения с расширенной неопределенностью $\bar{v}_j + U(\bar{v}_j)$ для всех выборок; время, присвоенное каждой выборке, соответствует времени первого проезда в ней. Измеренные значения виброскорости по отдельным выборкам достаточно сильно отличаются и зависят от времени измерений. Наибольшие значения достигаются в период 12³⁰ – 14⁰⁰, когда движение поездов происходит по одному пути. При этом поезда, движущиеся именно по этому пути, излучают более интенсивные вибрации. Наименьшие значения наблюдается около 10³⁰, когда большее количество поездов движутся по противоположному пути.

Для оценки разброса полученных значений по выборкам введем максимальное и минимальное измеренные значения виброскорости, возможные для этого суточного наблюдения

$$\bar{v}_{max} = \max_j [\bar{v}_j + U(\bar{v}_j)], \quad (6)$$

$$\bar{v}_{min} = \min_j [\bar{v}_j + U(\bar{v}_j)], \quad (7)$$

а также относительные параметры, характеризующие величину разброса

$$\delta = \frac{\bar{v}_{max}}{\bar{v}_{min}}, \quad \Delta = \frac{\bar{v}_{max} - \bar{v}_{min}}{\bar{v}_{min}} \cdot 100\%. \quad (8)$$

В таблице 1 приведены значения, рассчитанные согласно (6), (7) и (8), для скорректированного значения виброскорости, а также для значений виброскорости в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 8, 16, 31.5 и 63 Гц.

Таблица 1
Статистические параметры виброскорости

Параметр	Корректированное значение	Значение в полосе частот, Гц			
		8	16	31.5	63
\bar{v}_{max} , мкм/с	51.3	17.3	32.5	30.6	20.8
\bar{v}_{min} , мкм/с	38.1	14.7	21.0	21.3	15.7
δ	1.35	1.17	1.55	1.43	1.32
Δ , %	35	17	55	43	32

Таким образом, возможный разброс измеренных значений, вызванный выбором времени измерения, для нормируемых параметров вибрации может достигать 35%, для октавных полос частот – 55%. При этом наибольшая возможная оценка максимального корректированного значения виброскорости составляет 51.3 мкм/с, хотя наиболее интенсивные проезды создают вибрацию более 60 мкм/с.

В рассмотренном случае методика измерения, предложенная [7], не позволяет получить надежную оценку максимального значения виброскорости. Во-первых, в течение суток обнаружены существенные девиации измеряемого параметра, при этом выборка по 20 проездов оказывается недостаточной для отслеживания этих девиаций. Во-вторых, в рассмотренном случае движение поездов по одному пути создает значительно более интенсивные вибрации, чем при движении по другому пути. При сопоставимом количестве проездов по каждому пути среднее значение по выборке из 20 проездов по обоим путям дает заниженную оценку вибрации, поскольку примерно половина проездов дает низкие значения виброскорости по сравнению с остальными проездами, интенсивность которых близка к максимальной.

Кроме этого, предположение о виде вероятностного распределения для выбора значения коэффициента охвата оказалось неверным: гистограмма распределения измеренных значений v_i , построенная с интервалом 5 мкм/с, имеет два максимума (рис. 3). Для сравнения на рис. 3 приведен график плотности вероятности для нормального распределения с математическим ожиданием 37.2 мкм/с и средним квадратическим отклонением 16.1 мкм/с, т.е. параметрами, определенными по всем N проездам. Интересно, что максимум нормального распределения оказывается в минимуме гистограммы. Диапазон возможных измеренных значений отмечен значениями v_{min} и v_{max} . При этом 43 проезда, т.е. 24% всех проездов, создали более интенсивную вибрацию, чем дает наибольшая оценка v_{max} .

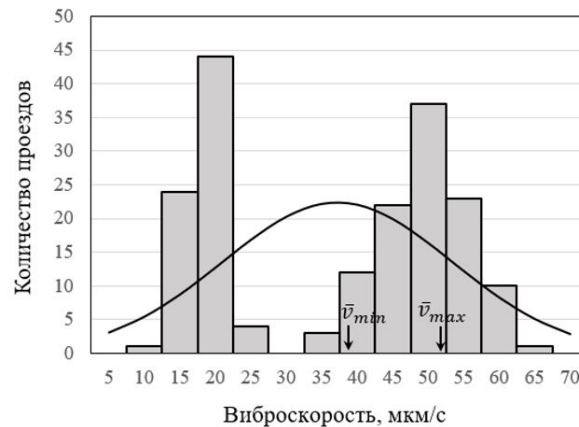


Рис. 3. Гистограмма измеренных значений виброскорости v_i с интервалом 5 мкм/с, кривая соответствует нормальному распределению

Измеренные средние значения виброскорости с расширенной неопределенностью имеют разброс, характеризуемый гистограммой, построенной по 162 значениям $\bar{v}_j + U(\bar{v}_j)$ с интервалом 2 мкм/с (рис. 4). Результат измерения виброскорости по 20 проездам поездов также является в некотором смысле случайной величиной, ее наиболее вероятное значение – 44.5 мкм/с, что значительно ниже значений виброскорости от отдельных проездов.

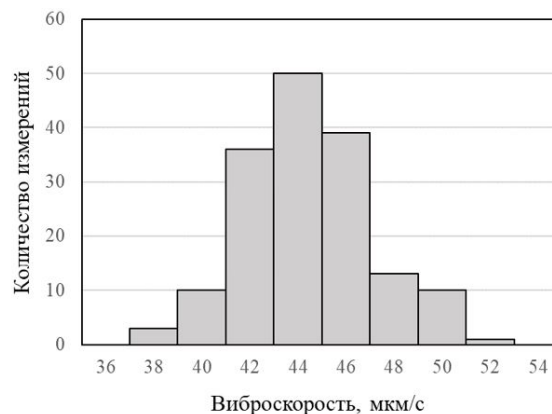


Рис. 4. Гистограмма средних по 20 проездам значений виброскорости с расширенной неопределенностью $\bar{v}_j + U(\bar{v}_j)$ с интервалом 2 мкм/с

3. Многопутная железная дорога

Рассмотрим пример суточного мониторинга вибрации поездов, движущихся по многопутной железной дороге. Общее количество путей – 7, при этом два из них проходят в тоннеле ниже уровня грунта. Измерения проведены на поверхности грунта на расстоянии 50 м до ближайшего пути и 86 м до самого удаленного. По железной дороге происходит движение поездов двух типов – грузовых поездов и пассажирских электропоездов (категории 2 и 3 соответственно согласно классификации [7]). Общее количество событий прохождения поездов составило 384, из которых 157 пассажирских, 227 – грузовых. На рис. 7 приведены результаты суточных измерений. Интенсивность вибрации, создаваемой грузовыми поездами, значительно выше по сравнению с вибрациями от пассажирских поездов, что приводит к более негативному воздействию на человека [15].

Согласно [7] вибрации от поездов разных категорий должны анализироваться отдельно. Поэтому вычислим максимальное измеренное значение виброскорости (4) и его расширенную неопределенность (5) по выборкам, состоящим из 20 последовательных проездов. На рис. 6 представлены результаты расчета среднего значения с расширенной неопределенностью $\bar{v}_j + U(\bar{v}_j)$ для всех выборок. Измеренные значения виброскорости для пассажирских поездов мало изменяются в течение суток, а для грузовых поездов наблюдается достаточно сильная суточная девиация. Наибольшие значения достигаются в период 19⁰⁰ – 20⁰⁰, наименьшие – в ночное время около 5⁰⁰ и днем в районе 13⁰⁰.

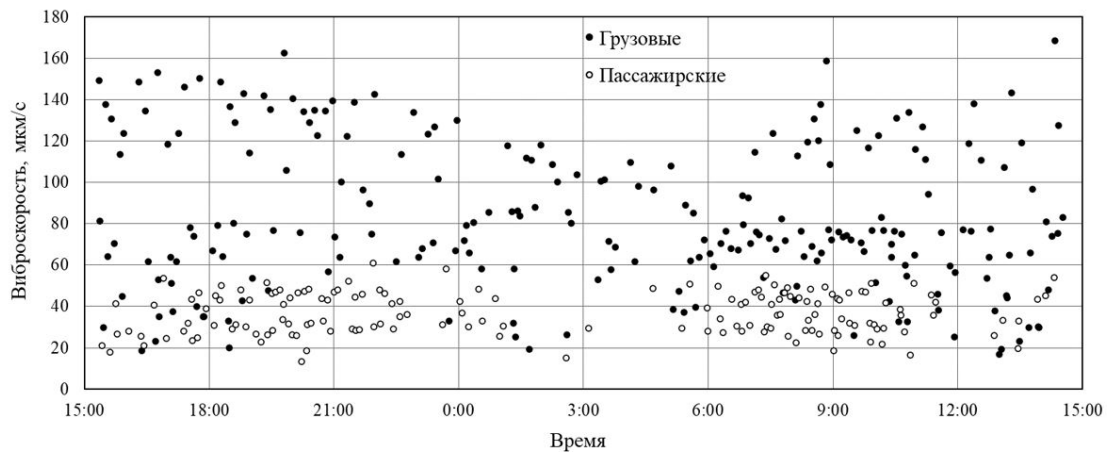


Рис. 5. Результаты суточных измерений вибрации поездов в здании на расстоянии 50 м от ближайшего пути многопутной железной дороги, каждая точка соответствует одному проезду поезда

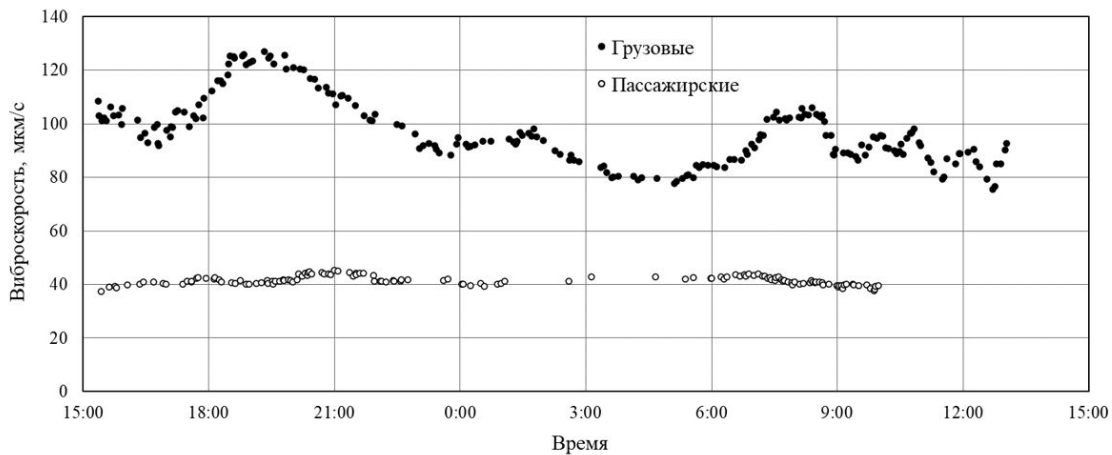


Рис. 6. Среднее значение виброскорости с расширенной неопределенностью $\bar{v}_j + U(\bar{v}_j)$ по выборкам из 20 последовательных проездов, приведенных на рис. 5

Для оценки возможного разброса измеренных значений в течение суток вычислим параметры по формулам (6), (7) и (8) по выборкам для пассажирских и грузовых поездов, значения которых приведены в таблице 2.

Таблица 2

Статистические параметры виброскорости по выборкам для пассажирских и грузовых поездов

Параметр	Корректированное значение	Значение в полосе частот, Гц			
		8	16	31.5	63
Пассажирские поезда					
v_{max} , мкм/с	45.3	13.7	23.0	37.9	8.3
v_{min} , мкм/с	37.5	11.3	18.7	28.1	6.2
δ	1.21	1.21	1.23	1.35	1.33
Δ , %	21	21	23	35	33
Грузовые поезда					
v_{max} , мкм/с	127.0	60.5	89.9	72.1	14.4
v_{min} , мкм/с	75.6	28.9	52.1	43.6	8.2
δ	1.68	2.09	1.73	1.65	1.76
Δ , %	68	109	73	65	76

Таким образом, возможный разброс измеренных значений для нормируемого параметра вибрации, вызванной движением пассажирских поездов, может достигать 21%, для виброскоростей в октавных полосах частот – 35%. Отметим, что этот разброс оказался меньше по сравнению с первым рассмотренным случаем пассажирских поездов (таблица 1). Для грузовых поездов, напротив, разброс оказался существенно выше: для нормируемого параметра – 68%, для виброскоростей в октавных полосах частот – 109%. При этом наибольшая возможная оценка максимального корректированного значения виброскорости составляет 127.0 мкм/с, хотя наиболее интенсивные проезды создают вибрацию более 160 мкм/с.

Как и в первом рассмотренном случае, выбор времени измерения может сильно сказаться на его результатах. При этом определение (4) параметра, характеризующего максимальное вибрационное воздействие, не позволяет достоверно оценить вибрационное воздействие от поездов, создающих самую интенсивную вибрацию в течение суток наблюдения.

На рис. 7 приведены гистограммы, в которых измеренные значения v_i сгруппированы с интервалом 5 мкм/с для пассажирских поездов и 10 мкм/с для грузовых поездов. Для обоих типов поездов гистограммы имеют два максимума. Пассажирские поезда двигались преимущественно по двум путям, поэтому максимумы на рис. 7а достаточно «острые». Максимумы на рис. 7б более сглаженные, что связано с тем, что, во-первых, движение поездов осуществляется по большему количеству путей, а, во-вторых, их масса может сильно отличаться в зависимости степени загрузки состава и объемной плотности перевозимых грузов. Распределение измеренных значений, как и на рис. 4, не подчиняется нормальному закону.

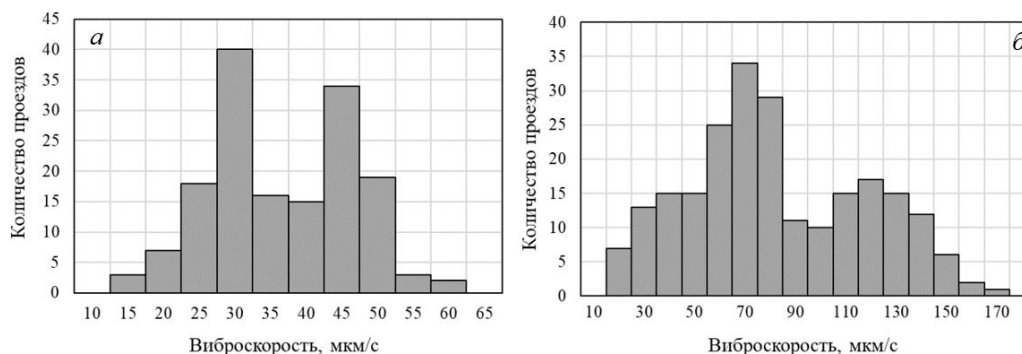


Рис. 7. Гистограммы измеренных значений виброскорости v_i для пассажирских (а) и грузовых (б) поездов

Заклучение

Статистический анализ измеренных в течение 24 часов параметров вибрации, создаваемой железнодорожным транспортом, позволил сделать ряд выводов, касающихся методик измерения. Максимальное скорректированное значение виброскорости, определенное по 20 проездам, существенно зависит от времени измерения: в течение суток измеренные значения могут отличаться на 68%. Таким образом, неудачный выбор времени проведения обследования может привести к серьезной недооценке вибрационного воздействия. Аналогичная ситуация имеет место в случае вибрации метрополитена [16].

Установлено, что однотипные поезда, движущиеся по двум разным, хотя и близкорасположенным, путям могут создавать существенно отличающиеся вибрации. При одинаковой интенсивности движения по обоим путям усреднение по 20 проездам также приводит к занижению измеренного значения относительно фактических максимальных значений параметров вибрации, создаваемых отдельными проездами.

Распределения измеренных параметров вибрации (рис. 3 и 7) не подчиняются нормальному закону распределения, справедливость которого предполагается при выборе коэффициента охвата для выражения расширенной неопределенности измерений [9]. В связи с этим оценка неопределенности по [9] не может считаться достаточно надежной.

Рассмотренные случаи показали, что объем рекомендованной выборки в 20 проездов недостаточен для достоверной оценки максимального значения виброскорости. При этом наиболее интенсивная вибрация в двух рассмотренных случаях имела место в разное время, поэтому невозможно определить наиболее подходящее время для проведения натурных измерений. В связи с этим предлагается на этапе обследования проводить предварительную оценку возможного суточного разброса измеряемых параметров, а также устанавливать статистические законы распределения вибрационных параметров по выборке, значительно превышающей 20 событий, точные сведения о которых требуются для оценки неопределенности измерений. Для этого необходимо проводить мониторинг вибрации в течение 24 часов, аналогичный приведенным в настоящей работе.

Список литературы

1. 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.

2. СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 2017.
3. Канев Н.Г. Проблемы прогнозирования вибрации метрополитена, связанные с противоречиями нормативных требований и неопределенностью исходных данных // Труды Международной выставки-конференции «ИНТЕРМЕТРО-2019», 12-14 декабря 2019, г. Москва. С. 45-50.
4. Цукерников И.Е., Шубин И.Л., Невенчанная Т.О. Анализ правил нормирования и гигиенической оценки шума и вибрации на рабочих местах и в условиях проживания в жилых зданиях и помещениях // Жилищное строительство. 2017. № 6. С. 3-7.
5. Канев Н.Г. Вибрационное воздействие на человека в жилых домах от движения рельсового транспорта и особенности его нормирования // Безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 64. № 11. С. 16-20.
6. Решения конференции // Труды Международной выставки-конференции «ИНТЕРМЕТРО-2019», 12-14 декабря 2019, г. Москва. С. 108.
7. СП 441.1325800.2019. Защита зданий от вибрации, создаваемой железнодорожным транспортом. Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2019.
8. Васильев М.Д., Канев Н.Г. Неопределенность измерений при гигиенической оценке вибрационного воздействия от железнодорожного транспорта // Труды конференции «Будущее машиностроения России», 24-27 сентября 2019, г. Москва. С. 612-618.
9. ГОСТ 34100.3–2017. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерений. М.: Стандартинформ, 2017.
10. Jones S., Kuo K., Hussein M., Hunt H. Prediction uncertainties and inaccuracies resulting from common assumptions in modelling vibration from underground railways // Journal of Rail and Rapid Transit. 226. No.5. P. 501–512. 2012
11. Auersch L. Simple and fast prediction of train-induced track forces, ground and building vibrations // Rail Eng. Science. 2020. 28. No 3. P. 232-250.
12. Рассошенко Ю.С., Иванов Н.И., Крылов В.В. Проблема оценки вибрационных полей поверхностных волн Рэлея, создаваемых высокоскоростными железнодорожными линиями // Noise Theory and Practice. 2018, 2 (4), С. 21-29.
13. Hanson C. E., Towers D. A., Meister L. D. Transit Noise and Vibration Impact Assessment FTA-VA-90-1003-06 // U.S. Department of Transportation Federal Transit Administration, 2006. – 261 p.
14. Московец М.Е., Канев Н.Г. Оценка передачи вибрации рельсового транспорта с грунта на фундамент здания // Сборник трудов Четвертой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания», 24 мая 2019, г. Москва. С.142-149.
15. Waddington D, Woodcock J, Smith MG, et al. CargoVibes: human response to vibration due to freight rail traffic // Int. J. Rail Transp. 2015. 3. No 4. P.233-248.
16. Канев Н.Г. Методологические проблемы измерения вибрации рельсового транспорта и пути их решения // Сборник трудов III Всероссийской акустической конференции, 21-25 сентября 2020, г. Санкт-Петербург. С.400-407.

References

1. SN 2.2.4/2.1.8.566-96. Industrial vibration, vibration in the premises of residential and public buildings. Sanitary norms. Moscow: Information and publishing center of the Ministry of health of Russia, 1997.

2. SanPiN 2.2.4.3359-16. Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace. Sanitary and epidemiological rules and regulations. Moscow: Information and publishing center of the Ministry of health of Russia, 2017.
3. Kanev N. G. Problems of predicting ground borne vibrations, associated with the contradictions of regulatory requirements and uncertainty of input data // Proceedings of the International exhibition-conference "INTERMETRO-2019", 12-14 December 2019, Moscow. S. 45-50.
4. Tsukernikov I. E., Shubin I. L., Nevenchannaya T. O. Analysis of the rules of regulation and hygienic assessment of noise and vibration in the workplace and in living conditions in residential buildings and premises // Housing construction. 2017. No. 6. P. 3-7.
5. Kanev N. G. Vibration impact on a person in residential buildings from the movement of rail transport and features of its rationing // Life safety. 2018. Vol. 64. No. 11. P. 16-20.
6. Conference materials // Proceedings of the International exhibition-conference "INTERMETRO-2019", 12-14 December 2019, Moscow. P. 108.
7. SP 441.1325800.2019. Protection of buildings from vibration caused by railway transport. The rules of design. M.: Russian Ministry Of Construction, 2019.
8. Vasiliev M. D., Kanev N. G. measurement uncertainty in the hygienic assessment of vibration impact from railway transport // Proceedings of the conference "the Future of machine building in Russia", September 24-27, 2019, Moscow. P. 612-618.
9. ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). Geneva: ISO/IEC; 2008. .
10. Jones S., Kuo K., Hussein M., Hunt H. Prediction uncertainties and inaccuracies resulting from common assumptions in modelling vibration from underground railways // Journal of Rail and Rapid Transit. 226. No.5. P. 501–512. 2012
11. Auersch L. Simple and fast prediction of train-induced track forces, ground and building vibrations // Rail Eng. Science. 2020. 28. No 3. P. 232-250.
12. Rassoshenko Yu. S., Ivanov N. I., Krylov V. V. The problem of estimation of vibrational fields of Rayleigh surface waves created by high-speed railway lines // Noise Theory and Practice. 2018, 2 (4), P. 21-29.
13. Hanson C. E., Towers D. A., Meister L. D. Transit Noise and Vibration Impact Assessment FTA-VA-90-1003-06 // U.S. Department of Transportation Federal Transit Administration, 2006. – 261 p.
14. Moskovets M., Kanev N. Assessment of rail vibration transmission from the ground to the foundation of a building // MATEC Web of Conferences, 2020, 320, 00005.
15. Waddington D, Woodcock J, Smith MG, et al. CargoVibes: human response to vibration due to freight rail traffic // Int. J. Rail Transp. 2015. 3. No 4. P.233-248.
16. Kanev N.G. Methodological problems of measuring vibration rail transport and ways to solve them // Proceedings of 3rd All-Russian acoustic conference, 21-25 September 2020, Saint-Peterburg. P.400-407.