

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВИБРАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА НЕГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Ю.В. Василевич¹⁾, Е.А. Мойсейчик¹⁾, Е.Ю. Неумержицкая²⁾, Л.Н.Беляцкая¹⁾, В.А. Чигарев¹⁾,

¹⁾Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь, vasilevich.bntu@mail.ru

²⁾Академия последипломного образования
ул. Некрасова, 20, г. Минск, Беларусь

Аннотация: Выполнены натурные экспериментальные исследования по вибрационному взаимодействию тоннелей метрополитена неглубокого заложения. Закономерность влияния параметров вибрационного поля, создаваемого подвижным составом, движущимся по одному тоннелю, на уровень колебаний близ расположенного тоннеля, востребована необходимостью прогноза виброакустической обстановки в зданиях и сооружениях, расположенных в технической зоне метрополитена и планируемых для застройки объектов. Прогнозные показатели уровней вибрации подлежат сравнению с предельно допустимыми уровнями виброускорения (виброскорости, виброперемещения), предусмотренными санитарными нормами Республики Беларусь по вибрации для жилых, общественных и других зданий и сооружений; после чего принимается решение о необходимости осуществления виброзащитных мер.

Ключевые слова: вибрация, тоннель, лоток, децибел, виброзащита, среднегеометрические частоты октавных полос.

Решение проблемы по виброзащите зданий и сооружений, подвергающихся интенсивным вибрационным полям, приобретает в настоящее время актуальное значение, в связи с бурно развивающейся инфраструктурой наземных и подземных транспортных коммуникаций. По принятому закону об экологической безопасности в Республике Беларусь все строящиеся объекты должны быть «экологически чистыми» по уровням вибрации и шума; указанные уровни не должны превышать утвержденные Главным государственным санитарным врачом Республики Беларусь гигиенические нормы вибрации и шума. Обеспечение вибро- и шумобезопасности в строительстве – важная задача, имеющая не только социальное и гигиеническое, но и большое технико-экономическое значение.

Для решения задачи по оценке виброакустической взаимозависимости между тоннелями метрополитена неглубокого заложения выполнены экспериментальные исследования в тоннелях Минского метрополитена. Тоннели расположены на глубине 10 м и на таком же расстоянии друг от друга. Грунт в технической зоне тоннелей является неоднородным. Конструкция тоннелей имеет круглое очертание и одинаковое верхнее строения пути.

Регистрация вибросигналов осуществлена виброметром, анализатором спектра Экофизика - 110В (Белая), поверенным в установленном порядке в Республиканском Институте метрологии. Виброметр изготовлен в фирме Октава, г. Москва.

В некоторых моделях приборов, к которым относятся приборы фирмы Октава, используемые при проведении экспериментальных исследований, опорное значение для виброускорения составляет 10^{-6} м/с^2 и логарифмические уровни относительно данного опорного значения превышают на 50дБ логарифмические уровни относительно опорного значения $3 \times 10^{-4} \text{ м/с}^2$, принятому в Республике Беларусь. Поэтому для сравнения с

гигиеническими нормативами, в этом случае из измеренных уровней виброускорения вычитают 50 дБ.

Запись вибросигналов виброметрам производилась одновременно с трех датчиков в трех взаимно перпендикулярных направлениях, совпадающих с направлениями вертикальной составляющей Z (канал 3) виброускорения, дБ, поперечной горизонтальной Y (канал 2) компоненты виброускорения, дБ, продольной горизонтальной X (канал 1) составляющей виброускорения, дБ, (совпадающей с направлением продольной оси тоннеля) при движении подвижного состава. Датчики были установлены на лотке вблизи рельса в тоннеле под номером 1. На боковой стенке тоннеля напротив датчиков был закреплен виброметр, регистрирующий вибросигналы от подвижного состава поступающие как из тоннеля 1, так и из тоннеля 2, расположенного в 10 м от тоннеля 1.

В таблицах 1–3 содержится информация об уровнях виброускорения лотка тоннеля 1 при движении подвижного состава поэтому же тоннелю и тоннелю 2. Разность уровней виброускорения дает возможность оценить взаимодействие вибрационного поля, создаваемого тоннелями.

Таблица 1. Уровни горизонтальной продольной составляющей виброускорения, дБ, лотка тоннеля в октавных полосах со среднегеометрическими частотами от 2 до 63 Гц при движении подвижного состава.

Время измерения	Вибрация (октавы), 2.0 Гц; X Канал К1	Вибрация (октавы), 4.0 Гц; X Канал К1	Вибрация (октавы), 8.0 Гц; X Канал К1	Вибрация (октавы), 16.0 Гц; X Канал К1	Вибрация (октавы), 31.5 Гц; X Канал К1	Вибрация (октавы), 63.0 Гц; X Канал К1
1	2	3	4	5	6	7
08:02:35	61.51	55.97	55.97	56.23	60.94	63.91
08:02:36	62.45	56.49	55.43	56.52	61.56	64.81
08:02:37	63.13	57.11	56.06	57.12	62.56	65.82
08:02:38	63.32	58.01	56.34	57.13	63.31	65.81
08:02:39	63.23	58.44	56.48	57.41	63.79	65.35
08:02:40	62.39	59.37	56.29	57.38	63.52	64.72
08:03:51	63.59	60.75	60.11	61.55	76.86	96.46
08:03:52	65.41	63.93	64.36	61.88	78.50	97.95
08:03:53	65.68	66.61	65.66	62.47	79.05	98.52
08:03:54	69.46	68.49	66.82	63.14	78.36	97.82
08:03:55	76.00	72.51	67.29	62.64	77.63	96.80
08:03:56	77.36	73.37	67.07	60.87	76.18	96.09
08:09:36	62.22	58.52	57.23	56.71	60.28	63.20
08:09:37	62.63	58.71	57.55	56.73	61.43	64.12
08:09:38	62.60	58.33	58.03	57.00	62.10	64.51
08:09:39	63.18	57.73	58.03	57.04	63.14	64.86
08:09:40	62.34	59.97	58.13	56.79	63.48	65.07
08:09:41	62.70	60.46	57.86	57.00	63.55	64.36
08:09:42	62.78	60.75	57.46	56.82	63.10	63.47
08:11:06	66.77	60.14	60.04	59.89	75.77	95.31
08:11:07	66.86	61.73	61.61	60.63	77.65	97.02
08:11:08	67.25	63.00	64.84	62.29	78.98	98.26

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
08:11:09	65.50	64.19	67.20	62.89	79.74	98.41
08:11:10	68.86	72.12	68.26	63.66	78.80	96.86
08:11:11	71.51	73.36	68.75	63.08	77.85	95.93
08:16:43	60.01	59.27	57.59	55.95	61.18	63.88
08:16:44	60.21	59.32	57.14	56.40	62.50	65.30
08:16:45	60.25	59.33	57.59	56.57	63.57	65.82
08:16:46	59.82	58.67	57.00	56.38	64.46	65.99
08:16:47	60.18	58.59	57.17	56.99	64.65	65.77
08:16:48	59.20	57.70	57.03	57.19	64.52	65.06
08:16:49	57.79	58.43	57.25	57.01	64.09	63.57
08:18:03	65.75	59.76	59.11	58.47	74.52	93.86
08:18:04	63.74	60.70	61.06	59.50	76.36	96.45
08:18:05	63.43	62.83	62.50	60.86	77.35	98.30
08:18:06	62.44	66.93	62.99	61.14	78.63	99.06
08:18:07	65.25	68.39	63.83	61.36	78.47	98.37
08:18:08	68.77	71.00	64.77	61.59	77.27	97.52
08:18:09	69.96	71.70	64.20	60.95	75.86	95.65
08:18:10	72.82	72.28	63.94	60.04	75.11	92.40
08:18:11	77.80	71.63	63.07	59.00	72.61	89.57
08:23:47	58.37	58.02	57.64	56.45	60.06	63.06
08:23:48	57.61	58.43	57.23	55.75	60.91	64.45
08:23:49	59.12	57.89	57.10	56.72	61.91	65.05
08:23:50	59.63	58.22	56.61	56.90	63.06	65.51
08:23:51	59.75	57.16	56.03	57.44	63.44	65.56
08:23:52	60.39	56.63	55.48	57.71	63.58	64.90
08:23:53	59.93	56.70	55.59	58.30	63.66	64.05
08:23:54	58.50	57.17	55.33	58.29	63.06	63.18
08:25:04	65.03	60.86	58.71	58.07	67.85	90.80
08:25:05	64.79	60.67	59.17	58.12	73.68	93.92
08:25:06	66.19	60.70	63.15	60.16	75.97	95.78
08:25:07	65.37	64.74	64.05	61.43	77.04	96.86
08:25:08	65.45	65.91	66.82	63.46	78.37	97.93
08:25:09	65.54	67.73	67.85	63.89	78.84	97.55
08:25:10	69.59	73.50	68.09	64.51	77.85	96.47
08:25:11	74.11	73.74	67.75	63.87	76.55	94.94
08:25:12	75.61	75.14	67.36	63.19	75.37	93.13

В таблице 1 содержится информация об уровнях виброускорения в децибелах лотка тоннеля метрополитена с железобетонной обделкой круглого очертания, вызванных в разное время подвижным составом в двух тоннелях. В одном из тоннелей на лотке вблизи рельса были установлены три координатные датчики и регистрирующий вибросигналы прибор. По каналам К1, К2, К3 соответствующим компонентам виброускорения X, Y и Z

вибросигналы регистрировал виброметр при движении подвижного состава как в тоннеле с находящейся в нем измерительной аппаратурой, так и от проходящих поездов в соседнем тоннеле. В таблице содержатся время прохождения каждого подвижного состава по обоим тоннелям и уровни вызванной ими вибрации лотков. Анализ данных показал, что наибольшие уровни виброускорения зафиксированы на лотке тоннеля, в котором проводились измерения (его обозначили цифрой 1, а дальний тоннель - цифрой 2). Максимальные уровни виброускорения зарегистрированы на лотке тоннеля 1 в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5 и 63 Гц; их уровни соответственно равны 79 дБ и 98дБ. В октавах этих же частот при движении составов по дальнему тоннелю 2 в тоннеле 1 зафиксированы максимальные уровни 64дБ и 66дБ, т.е. уровни виброускорения уменьшились на 15дБ и 32 дБ.

Таблица 2. Уровни горизонтальной поперечной составляющей виброускорения, дБ, лотка тоннеля в октавных полосах со среднегеометрическими частотами от 2 до 63 Гц при движении подвижного состава.

Время измерения	Вибрация (октавы), 2.0 Гц; Y Канал К2	Вибрация (октавы), 4.0 Гц; Y Канал К2	Вибрация (октавы), 8.0 Гц; Y Канал К2	Вибрация (октавы), 16.0 Гц; Y Канал К2	Вибрация (октавы), 31.5 Гц; Y Канал К2	Вибрация (октавы), 63.0 Гц; Y Канал К2
1	2	3	4	5	6	7
08:02:35	62.37	57.34	56.51	56.70	65.52	71.36
08:02:36	64.43	58.41	55.49	57.43	67.28	73.25
08:02:37	63.89	58.65	55.66	57.35	68.16	74.39
08:02:38	63.55	58.30	55.71	56.60	68.83	74.89
08:02:39	64.05	58.74	56.38	57.25	70.02	74.70
08:02:40	63.50	60.34	56.23	57.28	70.03	74.04
08:02:41	61.94	60.87	56.00	56.71	69.27	72.55
08:03:50	64.89	66.74	64.91	69.52	79.74	93.17
08:03:51	66.05	67.99	72.94	72.21	81.08	93.91
08:03:52	67.51	71.05	75.98	72.81	81.67	95.36
08:03:53	68.69	73.34	76.29	73.14	82.25	95.93
08:03:54	71.54	80.95	76.99	75.84	83.50	95.11
08:03:55	77.45	81.94	78.80	75.57	81.96	93.86
08:03:56	82.76	83.13	77.88	74.82	81.09	93.13
08:09:37	61.85	58.43	56.57	57.63	66.64	72.96
08:09:38	62.63	59.16	56.58	57.49	67.25	73.42
08:09:39	63.35	59.59	57.04	56.83	68.08	73.90
08:09:40	62.44	60.13	57.00	56.72	69.17	74.29
08:09:41	62.87	60.31	57.20	56.36	70.09	73.36
08:09:42	62.69	60.60	56.76	55.91	69.75	72.01
08:11:05	69.21	64.16	62.77	60.99	73.34	91.52
08:11:06	68.88	63.34	63.07	69.18	78.07	93.13
08:11:07	68.69	64.36	71.61	70.54	79.47	94.57
08:11:08	68.38	69.21	73.76	72.49	81.27	96.01
08:11:09	68.85	73.55	76.84	73.29	82.03	95.98

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
08:11:10	70.49	82.14	77.37	74.56	83.16	94.66
08:11:11	78.43	82.99	79.81	74.26	82.25	93.59
08:11:12	85.09	83.86	79.66	73.75	81.52	91.70
08:16:43	64.34	58.24	57.98	56.54	66.12	72.04
08:16:44	63.76	58.41	58.28	56.87	67.96	74.13
08:16:45	63.26	58.87	57.52	56.75	69.36	74.89
08:16:46	62.87	59.71	57.83	56.46	70.76	75.39
08:16:47	62.35	60.09	58.13	56.28	71.36	75.31
08:16:48	62.09	60.65	56.85	55.82	71.45	74.58
08:16:49	62.22	60.72	57.52	55.83	70.72	72.74
08:16:50	61.70	60.36	57.66	55.86	69.43	70.30
08:18:03	69.50	63.51	65.46	65.62	74.74	91.59
08:18:04	69.28	66.97	66.32	67.12	77.21	94.06
08:18:05	69.35	68.33	70.54	69.02	78.25	96.09
08:18:06	68.92	71.44	72.41	70.25	79.39	96.82
08:18:07	69.97	76.06	73.43	70.43	81.08	96.15
08:18:08	70.68	77.89	76.45	71.98	81.38	95.39
08:18:09	80.50	78.62	77.15	71.79	80.62	93.72
08:18:10	82.32	80.41	76.95	70.87	80.36	91.53
08:23:48	63.34	59.27	57.29	56.87	65.94	72.29
08:23:49	62.93	59.46	57.06	56.78	67.39	73.98
08:23:50	63.05	59.42	56.71	56.73	68.23	74.66
08:23:51	62.65	59.42	56.81	57.07	68.73	74.73
08:23:52	61.75	59.74	56.79	56.31	69.86	74.59
08:23:53	61.36	60.88	57.12	56.18	69.90	73.45
08:23:54	61.64	60.89	57.82	56.14	69.20	71.70
08:25:05	67.37	65.33	64.71	64.37	74.11	91.63
08:25:06	66.34	66.86	68.60	66.62	76.20	93.28
08:25:07	66.44	67.45	73.25	68.54	78.34	94.39
08:25:08	67.16	75.16	76.94	70.42	79.95	95.52
08:25:09	67.38	80.99	77.66	71.00	81.14	95.43
08:25:10	71.16	82.47	77.77	72.28	82.06	94.20
08:25:11	78.04	84.14	79.02	72.11	82.21	92.92
08:25:12	84.15	85.17	78.25	71.70	81.64	91.27

Проведя аналогичные рассуждения по анализу полученных данных таблицы 2, как для таблицы 1, можно сделать следующие выводы для составляющей Y виброускорения:

- в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5 и 63Гц средние максимальные уровни виброускорения лотка тоннеля 1 соответственно равны 82дБ и 95дБ;

- в октавах этих же частот при движении составов по тоннелю 2 в тоннеле 1 зафиксированы максимальные уровни 70дБ и 74дБ, т.е. уровни виброускорения уменьшились на 12дБ и 21 дБ.

Таблица 3. Уровни вертикальной составляющей виброускорения, дБ, лотка тоннеля в октавных полосах со среднегеометрическими частотами от 2 до 63 Гц при движении подвижного состава

Время измерения	Вибрация (октавы), 2.0 Гц; Z Канал К3	Вибрация (октавы), 4.0 Гц; Z Канал К3	Вибрация (октавы), 8.0 Гц; Z Канал К3	Вибрация (октавы), 16.0 Гц; Z Канал К3	Вибрация (октавы), 31.5 Гц; Z Канал К3	Вибрация (октавы), 63.0 Гц; Z Канал К3
1	2	3	4	5	6	7
08:02:35	60.05	58.68	60.25	59.24	71.76	77.31
08:02:36	60.64	58.61	60.01	59.16	73.93	78.64
08:02:37	60.70	59.86	59.74	59.59	75.09	79.68
08:02:38	60.23	60.79	60.18	60.16	76.16	80.11
08:02:39	59.39	60.80	60.46	60.45	77.32	79.36
08:02:40	59.81	61.67	60.25	60.68	77.23	78.34
08:03:50	61.39	62.80	62.98	61.83	84.98	104.45
08:03:51	61.80	63.71	65.15	63.01	86.67	105.28
08:03:52	61.99	65.84	71.24	64.23	88.17	106.89
08:03:53	62.21	70.28	71.96	66.24	88.84	107.37
08:03:54	61.91	75.31	73.36	67.36	87.91	106.63
08:03:55	64.92	77.79	74.02	67.14	87.03	105.49
08:09:38	63.30	60.43	60.07	61.25	74.23	78.73
08:09:39	63.24	59.76	59.62	61.12	76.00	79.29
08:09:40	62.79	60.00	59.84	61.26	77.21	79.56
08:09:41	61.69	60.98	60.35	60.83	77.80	78.52
08:09:42	61.62	61.64	60.49	60.44	77.33	77.32
08:09:43	62.04	61.38	61.26	60.12	76.63	75.73
08:11:06	59.73	64.85	61.96	62.05	84.65	104.36
08:11:07	63.18	66.06	66.42	63.49	86.76	106.16
08:11:08	63.54	66.04	67.54	66.82	88.17	107.44
08:11:09	63.11	68.37	70.22	67.48	88.95	107.45
08:11:10	63.64	72.47	71.68	68.02	88.05	106.07
08:11:11	67.73	77.78	72.77	68.14	87.10	105.14
08:16:45	63.25	61.60	58.11	57.45	76.49	80.83
08:16:46	62.45	61.48	58.39	58.07	78.16	81.30
08:16:47	62.41	61.36	58.82	58.55	78.79	81.02
08:16:48	62.42	61.68	59.23	59.39	78.62	80.14
08:16:49	60.45	61.38	59.66	59.83	77.80	78.32
08:18:03	62.45	63.69	62.27	60.44	83.66	103.48

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
08:18:04	62.96	63.95	63.79	62.19	85.71	105.96
08:18:05	63.00	64.53	67.12	63.54	86.68	107.66
08:18:06	62.92	69.68	69.20	65.69	87.93	108.32
08:18:07	61.59	72.27	70.77	66.14	87.75	107.55
08:18:08	63.92	74.05	71.27	66.43	86.52	106.64
08:18:09	71.27	75.20	71.20	65.89	84.90	104.62
08:23:48	58.04	63.36	59.74	59.57	72.49	77.90
08:23:49	57.73	62.70	60.25	59.55	74.29	79.16
08:23:50	59.47	61.77	59.63	59.87	75.46	80.05
08:23:51	59.27	62.18	59.97	60.70	76.06	80.25
08:23:52	61.71	61.39	60.23	60.45	76.99	79.77
08:23:53	62.38	60.68	60.15	60.36	76.80	78.37
08:25:05	64.02	60.28	61.36	59.24	83.11	103.07
08:25:06	63.91	60.07	65.43	61.55	85.19	104.89
08:25:07	63.47	62.16	70.30	67.18	86.37	106.02
08:25:08	63.11	68.74	74.76	67.98	87.86	107.17
08:25:09	61.68	75.95	75.41	68.50	88.57	107.02
08:25:10	62.02	77.39	76.16	68.93	87.54	105.93
08:25:11	72.32	79.60	76.55	68.61	86.46	104.57

Анализ данных таблиц 1–3 показывает, что определяющей составляющей виброускорения лотка тоннеля является вертикальная компонента Z , численное значение которой является наибольшим по сравнению с численными значениями горизонтальных составляющих. Проведя аналогичные рассуждения по анализу полученных данных таблиц 1, 2 можно сделать следующие выводы для составляющей Z виброускорения:

- в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5 и 63Гц средние максимальные уровни виброускорения лотка тоннеля 1 соответственно равны 88дБ и 106дБ;
- в октавах этих же частот при движении составов по тоннелю 2, отстоящего от исследуемого тоннеля 1 на расстоянии 10м зафиксированы максимальные уровни 76дБ и 79дБ, т.е. уровни виброускорения уменьшились на 12дБ и 27 дБ.

Выводы. Результаты выполненных исследований являются основой оценки вибрационного взаимодействия тоннелей метрополитена неглубокого заложения. Исходя из полученных уровней виброускорения лотка тоннеля можно осуществлять прогноз виброакустической обстановки в технической зоне проектируемых и строящихся участков и линий метрополитена с целью необходимости эффективной виброзащиты зданий и сооружений, подвергающихся интенсивной вибрации.