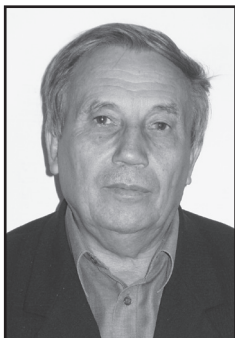




Воздействие на здания при проходке тоннелей



Евгений КУРБАЦКИЙ
Evgeny N. KURBATSKY

Всеволод ЕЛГАЕВ
Vsevolod S. ELGAEV



*Курбацкий Евгений Николаевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Подземные сооружения» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).
Елгаев Всеволод Сергеевич — аспирант кафедры «Подземные сооружения» МИИТ.*

При строительстве тоннелей неглубокого заложения в условиях городской застройки возникает проблема оценки вибраций, создаваемых щитовыми механизмами. Разработана методика, позволяющая оценивать пиковые значения скоростей колебаний точек поверхности грунта. Предлагаются предельные значения скоростей, которые используются в зарубежных нормах.

Ключевые слова: тоннели, щитовая проходка, динамические воздействия, старинные здания, пиковые скорости колебаний частиц, волны напряжений.

В Москве в связи с осложнением транспортных проблем (приближающимся транспортным коллапсом) намечается ускоренное строительство линий метрополитена. Подземные транспортные линии в условиях плотной городской застройки — реальное средство решения задачи транспортного обеспечения населения.

В целях удешевления стоимости объектов предполагаются трассы неглубокого заложения. В этом случае большое количество зданий (более 200) могут попасть в зону возможных динамических воздействий при щитовой проходке линий метрополитена.

Как следует из анализа строительства и эксплуатации таких объектов (в Лондоне, Канаде, США и др.), возникают проблемы, которые необходимо решать ещё на стадии проектирования.

Этими проблемами являются:

- вибрации, создаваемые рабочими органами щита при разработке породы, которые могут передаваться фундаментам зданий, а в некоторых случаях вызывать разжижение грунтов;

- вибрации от подвижного состава, возникающие при эксплуатации тоннелей метро мелкого заложения;

- чрезмерные осадки поверхности грунта при проходке тоннелей, которые могут повредить ближайшие здания.

В данной работе оценивается динамическое воздействие на здания и другие сооружения, имеющее место при проходке тоннелей щитовым способом.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Динамические воздействия во многих нормативных документах классифицируются по следующим признакам:

- кратковременные воздействия (взрывные),

- воздействия умеренной продолжительности,

- продолжительные воздействия.

К кратковременным воздействиям относятся такие, которые не успевают вызвать резонансные колебания сооружений.

Воздействия умеренной продолжительности могут ввести сооружения в состояние резонанса.

Продолжительные воздействия способны не только ввести сооружения в состояние резонанса, но и вызвать разжижение грунтов, привести к неравномерным осадкам.

Воздействия, создаваемые щитом, можно отнести к воздействиям умеренной продолжительности и длительной продолжительности.

2. РЕГЛАМЕНТИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ И НОРМАТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Современные здания из стали и железобетона в меньшей мере чувствительны к вибрационным воздействиям. Старинные постройки: церкви, дворцы и другие сооружения, представляющие историческую ценность, могут быть повреждены, если вибрации фундаментов превысят опасный уровень. Поэтому при проходке тоннелей в исторической черте города необходимо уметь определять уровни воздействий на такие сооружения.

От источников вибраций в грунте распространяются волны напряжений,

параметры которых не должны превышать критических величин. Ввиду того, что напряжения и скорости колебания частиц при распространении волн связаны простыми соотношениями:

$$\sigma = \rho \alpha V \text{ и } \tau = \rho \beta V, \quad (1)$$

в нормах многих стран в качестве регламентируемых параметров используются «пиковые значения скоростей».

Эти параметры приняты, например, в Великобритании (BS), Германии (DIN), Швейцарии (SN), США (USBM).

Отметим, что скорость продольной волны через модуль Юнга определяется выражением:

$$\alpha = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho},$$

$$\text{где } \lambda + 2\mu = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}. \quad (2)$$

Допустим, для каменной кладки в европейских нормах принято следующее определение для критического значения скорости:

$$\sigma_{din} = \sigma_{max} / 2 = 50 \cdot 10^3 \text{ N} / \text{m}^2, \lambda + 2\mu = 1 \cdot 10^{10} \text{ N} / \text{m}^2, \rho = 2000 \text{ kg} / \text{m}^3.$$

Из него следует:

$$V_{cr} = \sigma / \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho} = 0.011 \text{ m/c} = 11 \text{ mm/c}.$$

Для элементов конструкций, выполненных из разных материалов, можно получить допускаемые предельные скорости.

Таким образом, наиболее подходящим критерием для оценки динамических воздействий служит максимальное (пиковое) значение скорости.

В качестве ориентировочных значений можно использовать данные, представленные в таблице 1 [1].

Исследования показали, что кроме значения скорости важным параметром является также частота колебаний. Эти частоты необходимо знать для оценки взаимодействия волн с фундаментами зданий.

Уровни вибраций в элементах зданий зависят от архитектурной конструкции. Многими исследователями отмечено, что уровни вибраций на верхних этажах могут значительно превышать уровни





Таблица 1

Максимальное (пиковое) значение скорости

Материал	Модуль Юнга в ГН/м ²	Плотность ρ кг/м ³	Допускаемые напря- жения MN/м ²	Предельная ско- рость
Сталь	210	7850	200	2000
Бетон	25	2400	2	104
Каменная кладка	10	2000	0.1	9
Штукатурка	1	1800	0.015	4
Дерево	10	600	10	1600

колебаний фундаментов. Поэтому для точной оценки воздействия вибраций на здания следует использовать какой либо из программных комплексов.

В нормативных документах европейских стран регламентируются пиковые значения амплитуд скоростей колебаний грунта на уровне фундаментов зданий. В дальнейшем для упрощения этот параметр будем обозначать PV.

В США и Англии значение PV для железобетонных конструкций ограничивается величиной 50 мм/с.

Для сооружений, более чувствительных к вибрациям, эти предельные параметры не должны превышать 4 мм/с при частоте 4 Гц и могут возрастать до 20 мм/с при увеличении частоты до 15 Гц и до 50 мм/с при частотах от 15 Гц до 40 Гц.

Следует отметить и такой факт, что департамент транспорта штата Калифорния в США и лаборатория транспортных проблем в Англии рекомендовали огра-

ничивать предельные продолжительные внешние воздействия на исторические сооружения и памятники величиной PV=2 мм/с.

Подобные требования приняты в Германии и Швейцарии. В соответствии с DIN4150 для продолжительных вибраций приняты следующие предельные значения скоростей колебаний частиц в горизонтальном направлении:

- 2,5 мм/с для продолжительных вибраций,
- 3 мм/с для частот 1–10 Гц для кратковременных вибраций,
- от 3 мм/с при частоте 10 Гц до 8 мм/с при частоте 50 Гц,
- от 8 мм/с при частоте 50 Гц до 10 мм/с при частоте 100 Гц.

На верхних этажах зданий величина PV ограничивается значением 8 мм/с.

В нормах Швейцарии (SN 640 312) рекомендуется ограничивать значения PV величиной 8 мм/с при частотах от 10 Гц до 60 Гц и использовать предель-

Таблица 2

Категории повреждений сооружений при динамических воздействиях

№	Название (тип) категории	Описание повреждений
1	Нет повреждений	Не образуются заметных трещин
2	Начальные повреждения (косметические повреждения)	Образуются трещины, разрушается, падает штукатурка, открываются и удлиняются старые трещины, ослабляются узлы, смещаются незакреплённые объекты и т.д.
3	Слабые повреждения	Прочные конструкции не повреждаются. Появляются трещины в перегородках и оконных проёмах. Происходит обрушение неармированного раствора.
4	Серьёзные повреждения	Образование значительного количества больших трещин. Существенное ослабление конструкций. Смещение фундаментов, Обрушение каменной кладки и т.д.

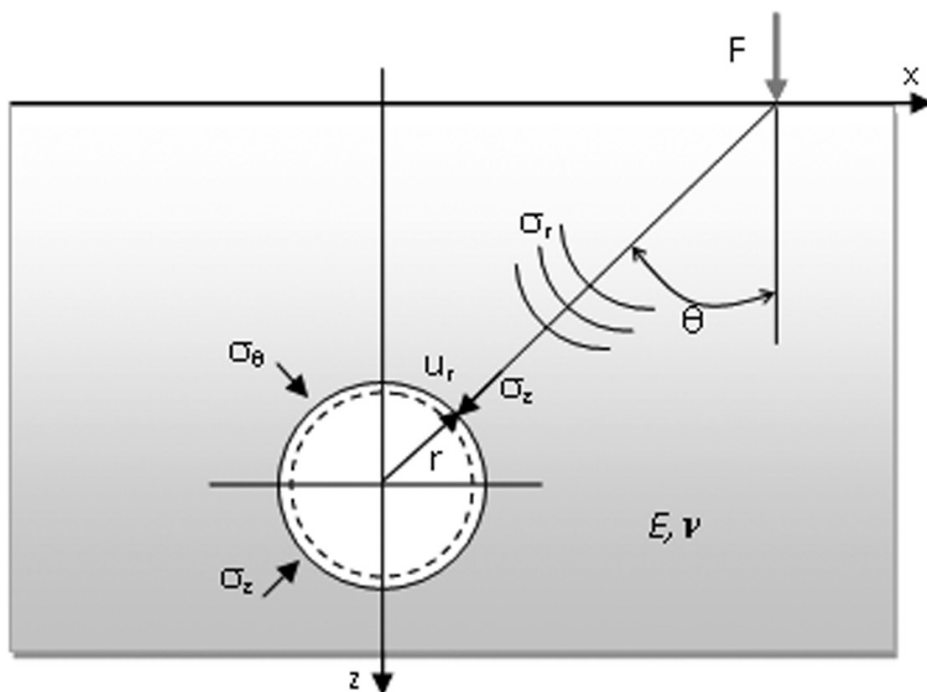


Рис. 1. Расчетная схема для определения перемещений стенок цилиндрической полости при действии вертикальной силы на поверхности.

ные значения величинами от 8 мм/с до 12 мм/с для частот от 60 Гц до 90 Гц.

Подчеркнем, что эти рекомендации разработаны для зданий, представляющих историческую ценность.

Для оценки повреждения сооружений, вызванного вибрациями, в нормативных документах многих стран повреждения подразделяются на категории.

При описании категорий повреждений будет использоваться термин «косметические повреждения» (cosmetic damage), который пока ещё не принят в российской технической литературе, хотя у нас широко представлено определение «косметический ремонт» сооружений.

В заключение этого параграфа отметим, что в российских нормативных документах отсутствуют предельные значения PV и рекомендации по расчёту и оценке сооружений на динамические воздействия при проходке тоннелей.

Таким образом, для оценки воздействий необходимо научиться оценивать уровни вибраций, создаваемых механизмами щитов при проходке тоннелей.

3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЕЙ КОЛЕБАНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА

При определении уровней колебаний поверхности при щитовой проходке используются теорема взаимности и известные решения о воздействии сосредоточенной силы на упругое полупространство.

Теорема взаимности берется нами в следующей формулировке [2,3].

Если сила $F(t)$, приложенная в направлении α в некоторой точке A упругого, анизотропного, неоднородного пространства, вызывает в другой точке B в направлении β перемещение, равное $u(t)$, тогда эта же сила $F(t)$, приложенная в точке B в направлении β , вызовет в точке A в направлении α перемещение, равное $u(t)$.

Для определения напряжений σ_r в грунте воспользуемся решением [4] о воздействии сосредоточенной силы на упругое полупространство.

Аппроксимируем волну сжатия, создаваемую этой силой плоской волной с перемещениями, определяемыми выражением:



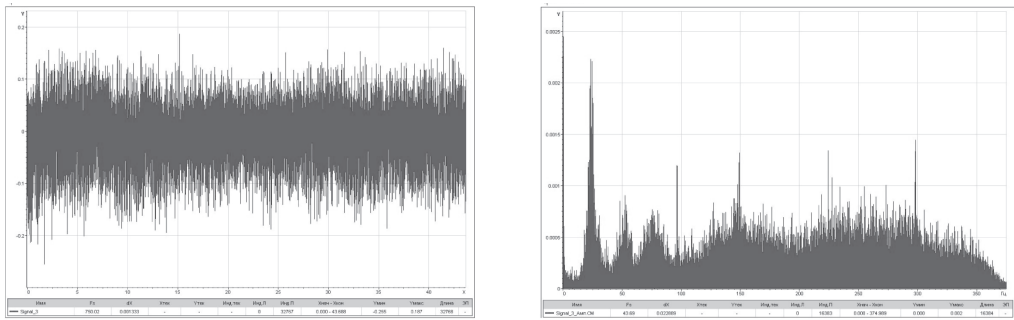


Рис. 2. Акселерограмма и спектр вертикальных колебаний оболочки щита.

$$u_r = \left(F_0 / 2\pi\rho\alpha^2 r \right) \cos\theta e^{i\omega(t-r/\alpha)}. \quad (1)$$

Напряжения при распространении таких волн определяются зависимостью:

$$\sigma_r = \rho\alpha\dot{u}_r = \left(F_0(i\omega) / 2\pi\rho\alpha r \right) \cos\theta e^{i\omega(t-r/\alpha)}, \quad (2)$$

где F_0 - амплитуда гармонической силы.

Нормальные напряжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях:

$$\text{вдоль оси тоннеля } \sigma_z = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_r \text{ и перпендикулярно направлению } \theta: \sigma_\theta = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_r.$$

Радиальные перемещения контура при действии нормальных напряжений перпендикулярно оси цилиндрической полости:

$$u_r = \frac{a\sigma_r}{E} (1 + 2\cos 2\theta) \text{ при } \theta = 0. \quad (3)$$

Радиальные перемещения контура при действии нормальных напряжений перпендикулярно оси цилиндрической полости:

$$u_r = \frac{a\sigma_r \nu}{E(1-\nu)} (1 - 2\cos 2\theta) \text{ (угол } \theta \text{ заменяется на угол } \theta + \pi). \quad (4)$$

Радиальные перемещения контура при действии нормальных напряжений вдоль оси цилиндрической полости:

$$u_r = \frac{a\sigma_z}{E} \nu \Rightarrow u_r = \frac{a\sigma_r}{E} \frac{\nu^2}{1-\nu}; \quad (5)$$

$$u_r = \frac{a\sigma_r}{E} (1 + 2\cos 2\theta) + \frac{a\sigma_r \nu}{E(1-\nu)} (1 - 2\cos 2\theta) + \frac{a\sigma_r}{E} \frac{\nu^2}{1-\nu}. \quad (6)$$

Последнее выражение удобно преобразовать к виду, куда входит отношение скорости распространения поперечных волн $\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ к скорости распространения продольных волн $\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$.

Отметим, что отношение скоростей распространения можно выразить через коэффициент Пуассона ν :

$$\delta^2 = \frac{\beta^2}{\alpha^2} \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} = \frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}$$

(при $\nu = 0.25: \delta^2 = 1/3$). С учётом принятого обозначения получим:

$$u_r = \frac{a\sigma_r}{2\mu} \left[1 + \frac{8(1 - \delta^2)\delta^2}{3 - 4\delta^2} \cos 2\theta \right]. \quad (7)$$

Учитывая выражение (2), получим:

$$u_r = \frac{aF_0 h(i\omega)}{4\mu\pi\rho\alpha r^2} \left[1 + \frac{8(1 - \delta^2)\delta^2}{3 - 4\delta^2} \cos 2\theta \right] e^{i\omega(t-r/\alpha)} \quad (8)$$

В соответствии с теоремой взаимности вертикальные перемещения точки поверхности грунта, определяемые координатами x, z и углом $\cos\theta$ при действии вертикальной силы, приложенной к контуру полости, будут определяться выражением:

$$u_r = -\frac{aF_0(i\omega)\cos\theta}{4\mu\pi\alpha r} \left[1 + \frac{8(1 - \delta^2)\delta^2}{3 - 4\delta^2} \cos 2\theta \right] e^{i\omega(t-r/\alpha)}. \quad (9)$$

Принимая во внимание, что в нормативных документах регламентируется пиковое значение скорости, определим модуль производной функции перемещения по времени:

$$V_{pic} = |\dot{u}_r| = \frac{F_0 \omega^2 a h}{4 \mu \pi \alpha r^2} \left[1 + \frac{8(1-\delta^2)\delta^2}{3-4\delta^2} \cos 2\theta \right]. \quad (10)$$

Поскольку колебания передаются и поперечными волнами, можно, используя аналогичный вывод, получить выражение, аналогичное уравнению (9) и для поперечных волн:

$$u_\theta = \frac{a F_0(i\omega)(1-\delta^2)\sin 2\theta}{2\pi \rho \beta^3 r(3-4\delta^2)} e^{i\omega(t-\frac{r}{\beta})}. \quad (11)$$

Тогда пиковое значение скорости будет:

$$V_{pic} = \frac{a F_0(\omega)(1-\delta^2)\sin 2\theta}{2\pi \rho \beta^3 r(3-4\delta^2)}. \quad (12)$$

Амплитудные значения силы F_0 определяются по акселерограммам колебаний при работе щитового комплекса. Для этой цели записываются ускорения корпуса щита, вычисляется спектр колебаний и по спектру фиксируется доминирующая гармоника.

На рис. 2 приводятся пример акселерограммы колебаний щита и модуль преобразования Фурье этой акселерограммы, полученной во время проходки сточной линии Новокосино.

При глубине заложения тоннеля 20 метров щит диаметром 6,28 метра будет создавать колебания на поверхности грунта с пиковыми скоростями, равными 72 мм/с. Такой уровень вибраций для многих сооружений не допустим. Величина этих пиковых скоростей существенно зависит от грунтов, в которых ведётся проходка, и глубины заложения тоннеля (в нашем случае исполь-

зовались параметры, соответствующие мягким глинам).

ВЫВОДЫ

1. Вибрации грунта, создаваемые рабочими механизмами щита, могут вызвать повреждения зданий, если проходка ведётся на небольшой глубине.

2. Воздействия при щитовой проходке можно отнести к вибрациям умеренной продолжительности, которые способны ввести сооружения в состояние резонанса.

3. Продолжительные воздействия могут не только ввести сооружения в состояние резонанса, но и вызвать разжижение грунтов и привести к неравномерным осадкам.

4. Для оценки динамических воздействий необходимо разработать критерии оценки повреждаемости зданий, как это принято во многих европейских нормах.

5. В качестве регламентируемых параметров целесообразно использовать значения предельных допускаемых скоростей колебаний частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Peter Ruge. Expert statement to damage due to tunneling works. Dresden University of Technology, 2008.
2. Timoshenko, S.P., Goodier J. N. Theory of Elasticity. — N.-Y.- Toronto-London, McGraw-Hill, 1951.
3. Курбацкий Е. Н. Использование теоремы взаимности для оценки уровней вибраций поверхности упругого полупространства от точечного источника, расположенного внутри полупространства. // Вестник МИИТа. — 2005. — № 13.
4. Miller, G. F., Pursey H.: The Field and Radiation Impedance of Mechanical Radiators on the Free Surface Semi-Infinite Isotropic Solid // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Volume 223, Issue 1155, 1954, pp. 521–541. ●

IMPACT ON THE BUILDINGS DURING TUNNEL BORING

Kurbatsky, Evgeny N. – D.Sc. (Tech), professor, head of the department of underground installations of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

Elgaev, Vsevolod S. – Ph. D. student at the department of underground installations of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The authors consider the problem of assessment of vibrations produced by shield machines during the construction of the shallow tunnels in urban areas. They have developed a technique to assess the peak values of velocity of soil surface spots. The authors put forward the limit values of velocity, used in foreign standards.

Key words: tunnels, shield tunneling, dynamic action, dynamic impact, ancient building, particle bounce's peak velocity, stress waves.

Координаты авторов (contact information): Курбацкий Е.Н. – usd.miit@gmail.com, Елгаев В.С. – elgaev-v@mail.ru

