

ОБ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ДОПУСТИМОСТИ ВЛИЯНИЯ НАДЗЕМНОГО И ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ТРАМВАЙНЫЕ ПУТИ

ON THE ANALYTICAL EVALUATION OF THE PERMISSIBILITY OF THE EFFECTS OF SURFACE AND UNDERGROUND CONSTRUCTION ON TRAMWAY

М. Л. ХОЛМЯНСКИЙ

При строительстве в стесненных городских условиях неизбежно устройство котлованов и траншей, а также прокладка тоннелей и подземных коммуникаций вблизи линий трамвая. «Правилами технической эксплуатации трамвая» для ограничения негативного влияния ограничивается перекос пути. В связи с этим поставлены и решены задачи по разработке простых формул для оценки перекоса трамвайных путей. Рассмотрены устройство котлована вблизи пути и проходка тоннеля перпендикулярно пути при различных положениях конечных точек тоннеля. Получены простые конечные формулы, дан пример расчета.

Excavation of pits and trenches and tunneling near tram lines in constrained urban conditions is unavoidable. "Rules of tram technical operation" limit tramway skew to avoid negative effects. In this connection some problems are stated and solved to obtain simple formulas to evaluate tramway skew. Trench excavation near tramway and tunneling perpendicular to it at different positions of start and final points are considered. Simple resulting formulas are obtained; a worked example is given.

Ключевые слова:

Влияние строительства на существующие сооружения, котлованы, трамвайные пути, перекос трамвайного пути, прокладка тоннелей, траншеи

Key words:

Effects of construction on existing structures, pits, tramway, tramway skew, trenches, tunnelling

Введение

При строительстве в условиях городов важнейшей задачей является обеспечение сохранности существующей застройки. К настоящему времени в этом направлении выполнены масштабные исследования [1, 2, 5, 7–10], позволившие разработать практические методы расчета. В нормы вошли рекомендации по прогнозу влияния строительства и его оценке как для промышленных и гражданских зданий, так и для подземных инженерных коммуникаций [6].

В то же время неотъемлемой частью городской инфраструктуры являются транспортные коммуникации, протяженность которых обуславливает близкое расположение со многими объектами строительства. Среди них следует выделить линии наземного рельсового транспорта, чувствительные к неравномерным деформациям основания, в том числе трамвайные пути.

Правила технической эксплуатации трамвая [3] не содержат точных и исчерпывающих указаний по ограничению деформаций трамвайного пути. Отклонение двух рельсовых нитей от установленной нормы на коротком протяжении (перекос пути) ограничивается предельно допускаемым значением 10 мм на 10 м [3].

Для определенности в настоящей работе принимается, что перекас пути

$$j = b_r \rho, \quad (1)$$

где $b_r = 2B_r$ — ширина колеи;

$\rho = d\psi/dx$ — кручение (производная от угла ψ поворота пути относительно собственной оси по координате x вдоль пути).

Ввиду недостаточно высокой точности прогноза влияния строительства представляется целесообразным максимально упростить постановку задачи — при получении решений в конечной форме легче рассматривать различные сочетания исходных данных.

Постановка задач

Для прогноза перекаса трамвайного пути последний рассматривается как протяженная конструкция, взаимодействующая со смещающимся грунтовым основанием. Это позволяет добиться упрощений в постановке задачи или даже привести к конечным формулам, что может не только значительно облегчить сами расчеты, но и привести к пониманию механизмов соответствующих процессов и облегчить проектирование.

Ранее упрощения были получены для сооружений, обладающих протяженной зоной контакта с грунтом, когда одно из измерений ее значительно меньше другого: здания на ленточных фундаментах, подземные трубопроводы, транспортные тоннели и т.п. [8–10].

Дополнительные деформации трамвайного пути вызываются перемещениями грунтового массива, которые, в свою очередь, определяются изменением его напря-

женно-деформированного состояния при строительстве. Деформации трамвайного пути при заданных перемещениях грунтового массива можно определять с учетом взаимодействия грунта с конструкцией пути. Поэтому предлагается следующая последовательность задач:

- Прогноз перемещений грунтового массива на основе моделирования изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива при различных видах воздействия строительства:
 - устройство котлована;
 - передача нагрузки от веса здания;
 - проходка тоннеля
- Расчет деформаций конструкции трамвайного пути при неравномерных вертикальных перемещениях (осадках) грунта.

Расчет деформаций конструкции трамвайного пути при перемещениях грунта имеет исходными данными результаты прогноза перемещений грунтового массива.

Расчет деформаций конструкции трамвайного пути при неравномерных осадках грунта

Для расчета взаимодействия трамвайного пути с грунтом принимается модель местных упругих деформаций грунта (модель Винклера). Эта модель применялась в аналогичных задачах об осадках (поступательных вертикальных перемещениях) сооружений [2, 5, 8–10]. В случае удлиненных сооружений и кручения применение этой модели представляется более оправданным ввиду более высокой степени локализации деформации и, соответственно, меньшей распределительной способности основания.

Для вывода основных уравнений деформирования пути с абсолютно жесткими шпалами при перемещениях грунта используются обозначения, приведенные на рис. 1.

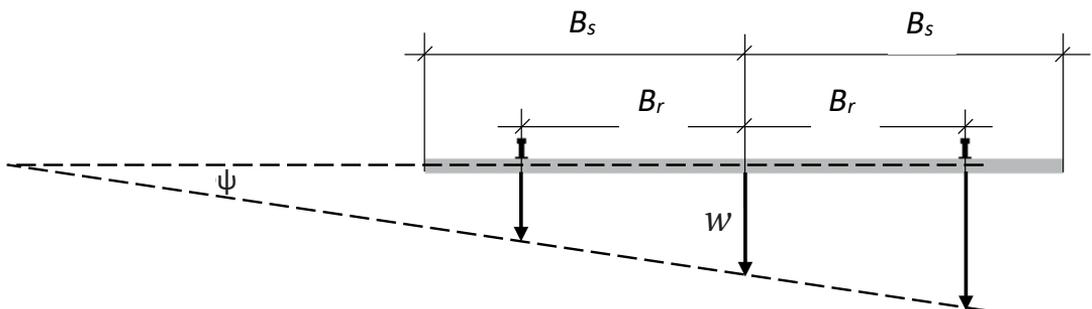


Рис. 1. Условные обозначения

Запишем выражение для потенциальной энергии деформирования (на единицу длины пути):

$$U = EI(d^2w/dx^2)^2 + CB_r w^2 + EIB^2(d^2\psi/dx^2)^2 + (CB^3/3)\psi^2, \quad (2)$$

где EI — изгибная жесткость одного рельса;

w — осадка центра шпалы;

C — коэффициент жесткости основания Винклера.

При выводе уравнения (2) в запас не учитывается собственная крутильная жесткость рельса. В (2) два слагаемых в правой части зависят только от w , а два других — только от ψ . Поэтому выводимые из (2) дифференциальные уравнения для w и ψ независимы. Выпишем уравнение для интересующего нас угла поворота ψ :

$$EIB_r^2 d^4\psi/dx^4 + (CB/3)\psi = M, \quad (3)$$

где M — крутящий момент.

Уравнение (3) может быть преобразовано к более удобному для решения виду:

$$d^4\psi/dx^4 + 4\alpha^4\psi = M/(EIB_r^2); \quad (4)$$

значение α дается формулой

$$\alpha = \{K/(2b_r^2EI)\}^{1/4}, \quad (5)$$

где K — жесткость основания при кручении (на единицу длины пути).

Уравнения (3) и (4) имеют нулевые правые части, так как расчет ведется на заданные крутильные перемещения грунта $\psi_g(x)$. При этом при вычислении второго члена левой части, обусловленного деформациями основания, вместо ψ следует подставить $\psi - \psi_g(x)$. В итоге имеем

$$d^4\psi/dx^4 + 4\alpha^4\psi = 4\alpha^4\psi_g(x). \quad (6)$$

Оценка зависимости крутильного перемещения грунта $\psi_g(x)$ от координаты x вдоль трамвайного пути может оказаться весьма сложной. Поэтому в запас можно предположить наиболее опасный вид зависимости — скачкообразный. Такая зависимость задается ступенчатой функцией, характеризуемой единственной величиной — значением скачка. На практике в качестве такой величины можно принимать максимальное крутильное перемещение грунта ψ_0 .

Поскольку перекося связан с ρ — производной от угла поворота пути по координате x вдоль пути, продифференцируем (6) и получим с учетом вида правой части:

$$d^4\rho/dx^4 + 4\alpha^4\rho = 4\alpha^4\Psi_0\delta(x), \quad (7)$$

где $\delta(x)$ — дельта-функция Дирака.

При бесконечной протяженности пути уравнение (7) имеет, как можно убедиться, следующее решение:

$$\rho(x) = (\Psi_0\alpha/2) \exp(-\alpha|x|) [\cos(\alpha|x|) + \sin(\alpha|x|)]. \quad (8)$$

Таким образом, перекося

$$j(x) = (\Psi_0\alpha b_r/2) \exp(-\alpha|x|) [\cos(\alpha|x|) + \sin(\alpha|x|)]. \quad (9)$$

Максимум перекося достигается при $x = 0$:

$$j_0 = (\Psi_0\alpha b_r/2). \quad (10)$$

Для получения окончательного результата необходимо определить жесткость основания при кручении на единицу длины пути. Она определяется в линейной стадии работы основания на основе модуля деформации E_s и коэффициента Пуассона ν грунта. Воспользуемся формулой, следующей из результатов [4] для плоской задачи о повороте жесткого гладкого штампа на полуплоскости:

$$K = \pi E_s b_s^2 / [16(1 - \nu^2)]. \quad (11)$$

После подстановки (11) в формулу (10) выражение для максимального перекося получает вид

$$j_0 = \Psi_0 \alpha \sqrt{\frac{\pi E_s b_s^2 b_r^2}{16(1 - \nu^2)EI}}. \quad (12)$$

Для оценки возможных неточностей расчета предлагается коэффициент условий работы $\gamma_d = 1,5$. Окончательно имеем

$$j_0 = \gamma_d \Psi_0 \alpha \sqrt{\frac{\pi E_s b_s^2 b_r^2}{16(1 - \nu^2)EI}}. \quad (13)$$

Пример расчета влияния разработки траншей на трамвайные пути

При проектировании крепления вертикальных стенок траншей для устройства тепловой магистрали в г. Москве возникла задача о прогнозе дополнительных деформаций существующих трамвайных путей, расположенных в непосредственной близости от нее.

Предусматривается выполнение работ по устройству трассы открытым способом с креплением стенок траншеи. Глубина траншеи — до 3,8 м. Крепление осуществляется при помощи неизвлекаемых металлических труб $\varnothing 219 \times 10$ мм, длиной 6,6 м, погружаемых с шагом 0,5 м. На уровне поверхности земли устраивается обвязочный пояс из двутавра №30 и распорки из труб $\varnothing 219 \times 10$ мм с шагом 6,0 м. Выполняется деревянная забирка из досок толщиной 60 мм. Расстояние от оси труб ограждения траншеи до оси ближнего рельса трамвайного пути составляет 1,2 м и более.

Определение перемещений грунтового массива в поперечном сечении траншеи, удаленном от забоя, производится по двумерной расчетной схеме в условиях плоской деформации с использованием программы Plaxis. Расчетная схема и перемещения грунта после завершения разработки траншеи показаны на рис. 2. При этом максимальный угол поворота пути $\psi_0 = 0,7 \cdot 10^{-4}$.

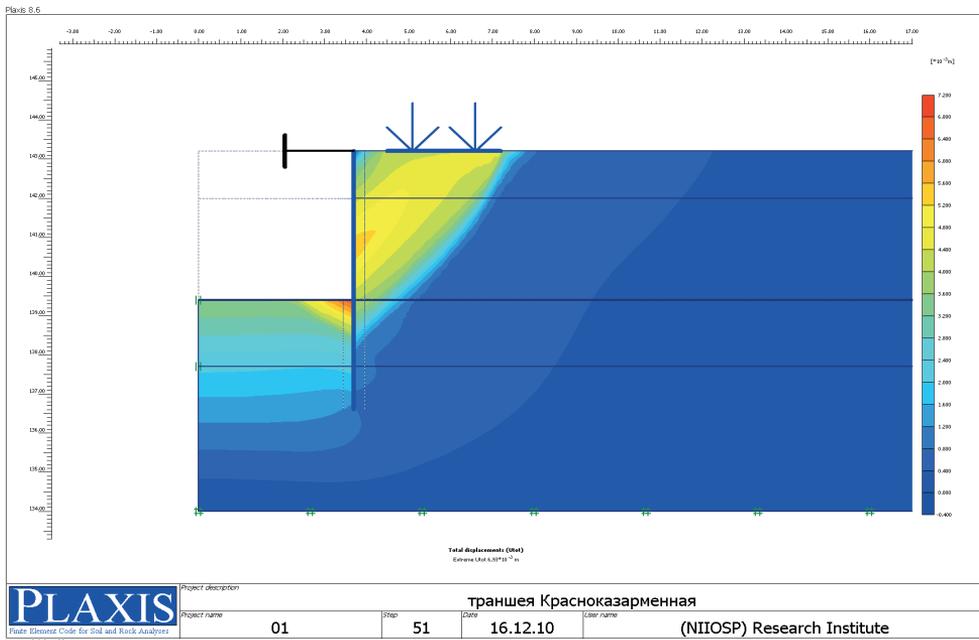


Рис. 2. Расчетная схема и перемещения грунта после завершения разработки траншеи

Для расчета перекоса пути на основе исходных материалов и литературных источников принимаются следующие исходные данные:

$$E_s = 50 \text{ МПа};$$

$$b_s = 2,7 \text{ м};$$

$$b_r = 1,5 \text{ м};$$

$$\nu = 0,25;$$

$$E = 206 \text{ 000 МПа};$$

$$I = 3547 \text{ см}^4 \text{ (для рельса Т62)}.$$

Из формулы (13) имеем

$$j_0 = 97 \cdot 10^{-6} < 10^{-3}. \quad (14)$$

Условие допустимости перекоса [3] выполняется. Заметим, что при расчете с увеличенным до 1 м шагом труб условие допустимости перекоса не выполняется.

Определение перемещений грунтового массива при проходке тоннеля

Для расчета перемещений грунтового массива при проходке тоннеля перпендикулярно оси трамвайного пути применяется известная [9] формула для осадок поверхности полупространства при проходке тоннеля с учетом положения начальной и конечной точек тоннеля (при отсутствии сооружения):

$$w = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}} e^{\frac{-x^2}{2i^2}} \left\{ G\left(\frac{y-y_i}{i}\right) - G\left(\frac{y-y_f}{i}\right) \right\}, \quad (15)$$

где V_s — перебор грунта;

i — параметр ширины мульды оседания;

x, y — координаты;

ось y — проекция оси тоннеля на поверхность грунта;

ось x — перпендикулярна оси y и совпадает с осью трамвайного пути;

y_i и y_f — координаты y начальной и конечной точек тоннеля;

$$G(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\alpha} e^{-\frac{\beta^2}{2}} d\beta = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{\sqrt{2}}\right). \quad (16)$$

При расположении начальной точки тоннеля вдали от трамвайного пути ($y_i = -\infty$) имеем

$$w = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}} e^{\frac{-x^2}{2i^2}} \left\{ 1 - G\left(\frac{y-y_f}{i}\right) \right\}. \quad (17)$$

Для определения перекоса пути можно в запас пренебречь жесткостью пути (не учитывать взаимодействие грунта с его конструкцией); в этом случае угол поворота поверхности грунта определяется на основе (17) и дается формулой

$$j = b_r \rho = b_r \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{b_r V_s x}{2\pi i^4} e^{-\frac{x^2+y_f^2}{2i^2}}. \quad (18)$$

Искомое кручение пути при произвольном положении конечной точки тоннеля y_f находится по формуле

$$j = b_r \rho = b_r \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{b_r V_s x}{2\pi i^4} e^{-\frac{x^2+y_f^2}{2i^2}}. \quad (19)$$

Легко видеть, что кручение, даваемое формулой (19), является нечетной функцией x . Его экстремальные значения находятся приравниванием нулю производной $\partial j/\partial x$; они достигаются в точках $x = \pm i$; их абсолютные значения

$$j_0 = \frac{b_r V_s}{2\pi\sqrt{ei^3}} e^{-\frac{y_f^2}{2i^2}}. \quad (20)$$

Наибольшее значение достигается при $y_f = 0$ (конечная точка тоннеля расположена под осью трамвайного пути):

$$j_0 = \frac{b_r V_s}{2\pi\sqrt{ei^3}}. \quad (21)$$

Вывод

Получены формулы для определения перекоса трамвайного пути, определяющего допустимость эксплуатации трамвая при надземном и подземном строительстве вблизи путей. При различных упрощающих предположениях рассмотрены влияние разработки котлована и проходки тоннеля.

Выведены обыкновенные дифференциальные уравнения (вместо уравнений в частных производных). Исследованы два простых предельных случая. При устройстве котлована вблизи пути задается скачкообразное изменение угла поворота грунта и учитывается взаимодействие пути с его основанием. При проходке тоннеля перпендикулярно пути при различных положениях конечной точки тоннеля взаимодействие пути с основанием не учитывается. Получены простые конечные формулы; дан пример расчета.

Библиографический список

1. Ильичев В.А., Петрухин В.П., Колыбин И.В., Мещанский А.Б., Бахолдин Б.В. Геотехнические проблемы строительства ТРК «Манежная площадь // НИИОСП им. Н. М. Герсванова – 70 лет. Труды института. М., 2001. — С. 31-39.
2. Ильичев В. А., Никифорова Н. С., Тушиков М. М. Расчет осадок зданий при прокладке мелкозаглубленных коммуникационных тоннелей и меры по их снижению // Строительство и реконструкция. Известия ОрелГТУ. — 2010. — № 6 (32). — С. 13-20.
3. Правила технической эксплуатации трамвая. Министерство транспорта Российской Федерации.
4. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи теории упругости. Основные уравнения. Плоская теория упругости. Кручение и изгиб. Изд. 5-е, испр. и доп. — М.: Наука, 1966.
5. Пушилин А.Н., Шейнин В.И. Оценка усилий в конструкциях здания, возникающих из-за проходки подземной выработки // Сб. тр. НИИОСП «75 лет НИИОСП им. Н.М. Герсванова». — М., 2006.

6. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений.
7. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Геотехническое сопровождение развития городов. — СПб: Стройиздат Северо-Запад: Группа компаний «Геореконструкция», 2010.
8. Холмянский М.Л., Шейнин В.И. Метод численного анализа взаимодействия протяженного сооружения со смещающимся грунтовым массивом // Строительная механика и расчет сооружений. – 2013. – №6. – С. 59–63.
9. Attewell P.B., Yeates J., Selby A.R. Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures. — Glasgow: Blackie, 1986.
10. Klar A., Vorster T.E.B, Soga K., Mair R.J. Soil-pipe-tunnel interaction: comparison between Winkler and elastic continuum solutions. / Technical Report of the University of Cambridge CUED/D-SOILS/TR 332. Cambridge, 2004.

Автор:

Михаил Львович ХОЛМЯНСКИЙ, ведущий научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений НИИОСП им. Н. М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Mikhail KHOLMYANSKY, leading researcher, Laboratory of geomechanics of underground structures, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: mlkholmyansky@yandex.ru

тел.: +7 (499) 170-27-09