

В. И. ПЕТРЕНКО (ОАО «Киевметрострой»), В. Д. ПЕТРЕНКО (ДИИТ),  
Г. К. САВИНКОВ (НТЦ «Криптон», Киев)

## НАДЁЖНОСТЬ СПОСОБОВ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ КИЕВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

В статті розглянуто основні положення надійності способів закріплення ґрунтів при експлуатації перегінних тунелів Київського метрополітену.

*Ключові слова:* тунель метрополітену, слабкий ґрунт, обводнений ґрунт, спосіб закріплення, силікатизація.

В статье рассмотрены основные положения надёжности способов закрепления грунтов при эксплуатации перегонных тоннелей Киевского метрополитена.

*Ключевые слова:* тоннель метрополитена, слабый грунт, обводненный грунт, способ закрепления, силикатизация.

In the article the basic provisions of technology reliability of soils stabilization during exploitation of the Kiev underground railway running tunnels are considered.

*Key words:* underground tunnel, soft ground, water-saturated ground, method of fixing, silicatization.

В процессе эксплуатации перегонных тоннелей Сырецко-Печерской линии метрополитена в г. Киеве, заложенных на глубине 15...20 м, были обнаружены деформации водонасыщенных несвязных песчаных и супесчаных грунтов в виде осадков поверхности в 10...20 см, обусловленные известным явлением виброползучести грунта в основании зданий и др. сооружений, включая тоннели. Причем наибольшие проявления виброползучести наблюдались на участках движения поездов со скоростью в пределах 50...60 км/час. При этом были выявлены осадка грунта под тоннелями и его выпирание с обеих сторон тоннелей.

В течение последних десятилетий, рядом исследователей обосновывались различные интерпретации происходящего явления виброползучести под действием динамических нагрузок, как слабых, возникающих вследствие движения неуравновешенных частей машин, так и сильных кратковременных однократных и многократных, существенно сказывающихся на свойствах несвязных (сыпучих) грунтов и несколько меньше грунтов связных (глинистых) [1 – 10]. Причем перемещения грунтов оснований при колебаниях и волновых воздействиях на сооружения, включая тоннели и их основания, и возникающие в них динамические напряжения вызывают деформации и приводят к значительным неравномерным осадкам основания. Как отмечал проф. М. Н. Гольдштейн [1], цикличе-

ские динамические воздействия существенно понижают прочность грунтов. При этом, если в грунте одновременно с колебаниями действуют интенсивные сдвигающие напряжения, то может развиваться его вязкопластическое течение – виброползучесть, а водонасыщенные пески при динамическом нагружении переходят в разжиженное состояние и растекаются.

Особенно опасно поведение плавунных грунтов, которые обладают свойством потери прочности при нарушении структуры, и поэтому очень чувствительны к динамическим воздействиям. При таких условиях они уплотняются, а вода, заполняющая поры грунта, получает большую подвижность и создает гидродинамическое давление, превосходящее суммарный вес твердых частиц грунта.

В результате грунт разжижается и, превращаясь в вязкую тяжелую жидкость, перемещается в направлении гидравлического градиента [4].

Для повышения прочности и устойчивости плавунных грунтов применяют осушение грунтов путем водопонижения иглофильтрами или с помощью электроосмоса. Кроме того, ограждают выработки противофильтрационными завесами, ледогрунтовыми стенками или закрепляют плавун силікатизацією і електрохімічними способами.

Особого внимания заслуживает изучение виброползучести грунтов, обусловленной ди-

намическими воздействиями на них движущимися поездами метрополитенов [5, 9].

При динамическом нагружении несвязного водонасыщенного грунта, вызываемым периодическим неуравновешенным давлением на рельсы, шпалы и обделку тоннеля проходящим поездом, происходит образование волн, распространяющихся вдоль тоннеля концентрически. При этом волны вовлекают частицы грунта в движение по вертикали и выталкивают часть их в горизонтальном направлении. В результате грунтовое основание оседает под действием всей достаточно жесткосвязанной конструкции «рельс – шпала – обделка тоннеля» и движущегося поезда.

Рассмотрим некоторые теоретические положения, касающиеся данной проблемы. Согласно исследованиям проф. Н. М. Герсеванова [3], разжижение грунта в основаниях фундаментов может быть, если

$$P + P_t > \gamma_{взв} h(2\lambda\pi + 1), \quad (1)$$

где  $P$  – постоянная нагрузка на грунт основания, равная  $P = \gamma h$ ,  $\text{кН/м}^3$ ;  $P_t$  – мгновенная

нагрузка на грунт, определяемая как  $P_t = \frac{P_v}{b_k \cdot 1}$ ,  $\text{кН/м}^3$ ;  $\gamma_{взв}$  – удельный вес грунта с учётом взвешивающего действия воды,  $\text{кН/м}^3$ , определяемый по выражению  $\gamma_{взв} = \frac{\gamma_{вк} - 10}{1 + \varepsilon}$ ,  $\text{кН/м}^3$ ;

$h$  – глубина заложения тоннеля до шельги свода, м;  $P_v$  – вес четырехосного вагона метрополитена, кН, [11];  $b_k$  – ширина колеи метрополитена, м;  $\gamma_{вк}$  – удельный вес скелета грунта,  $\text{кН/м}^3$ ;  $\varepsilon$  – коэффициент пористости;  $\lambda$  – коэффициент бокового давления, равный  $\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu}$ ;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Выполнив соответствующие преобразования, получим выражение неравенства (1) в следующем виде:

$$\gamma h + \frac{P_v}{b_k \cdot 1} > \frac{\gamma_{вк} - 10}{1 + \varepsilon} h \left( 2\pi \frac{\mu}{1 - \mu} + 1 \right). \quad (2)$$

Приняв согласно [11] вес вагона метро в 600 кН, ширину колеи равной 1,52 м, удельный вес скелета песчаного грунта в  $25 \text{ кН/м}^3$ , коэффициент Пуассона 0,25 и коэффициент пористости 0,5, получим, что в действительности величина левой части неравенства для разжиженных грунтов будет существенно больше правой. Следовательно, в условиях перегона

станции «Харьковская» – станция «Бориспольская» участка Сырецко-Печерской линии Киевского метрополитена в разжиженных грунтах были объективные условия для появления эффекта виброползучести и осадки грунтов под тоннелями до поверхности.

Для того чтобы определить виброосадки с некоторой постоянной скоростью, воспользуемся формулой Стокса [3]:

$$V = \frac{\sqrt{\pi} P \sqrt{F}}{8v}, \quad (3)$$

где  $v$  – коэффициент вибровязкости, Па·с;  $P$  – статическое давление на грунт, определяемое как

$$P = \gamma(h + D) + P_{обд}, \quad (4)$$

где  $D$  – диаметр тоннеля, м;  $P_{обд}$  – вес 1 пог.м обделки,  $\text{кН/м}^3$ ;  $F$  – площадь 1 пог.м опирания обделки на грунт, равная  $F = D \cdot 1$ ,  $\text{м}^2$ ;  $\gamma$  – ускорение вибрации при условии, что, при прохождении поезда с одинаковой скоростью, виброколебания, передаваемые на грунт, будут близки гармоническим и, следовательно, согласно [1], максимальное или пиковое ускорение равно произведению амплитуды на квадрат частоты и при  $\omega t + \varphi = \pi/2$

$$\gamma = \omega^2 A, \quad (5)$$

где  $\omega$  – частота колебаний,  $\text{с}^{-1}$ ;  $A$  – амплитуда колебаний, м;  $\varphi$  – начальная фаза в момент времени  $t = 0$ .

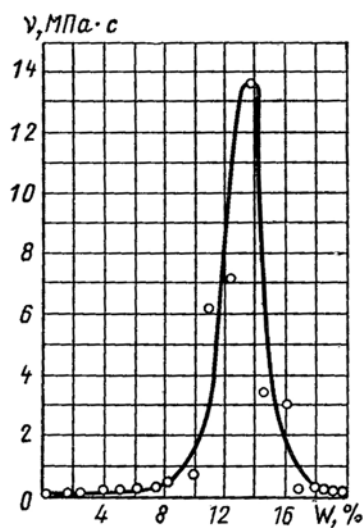


Рис. 1. Зависимость коэффициента вибровязкости песка от влажности

Определим из анализа рис. 1 (рис. 7.8 в работе [2]) зависимость коэффициента вибровязкости от влажности песчаного грунта по Д. Д. Баркову. В результате статистической обработки получено следующее выражение:

$$v = v_0 + \frac{B}{\sigma_W \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \exp \left\{ -2 \frac{(W - \bar{W})^2}{\sigma_W^2} \right\}, \quad (6)$$

где  $v_0$  – начальная вибровязкость, равная  $v_0 = 65$  Па·с;  $B$  – показатель критической влажности;  $W$  – текущее значение влажности;  $\bar{W}$  – среднее значение влажности при максимальной вибровязкости;  $\sigma_W$  – среднеквадратическое отклонение величины  $W$ .

Подставляя полученные параметры в формулу (3) и решая полученное уравнение, получим, что скорость виброосадки равнялась нескольким см/с.

Следовательно, процесс осадок тоннеля происходил за весьма короткие промежутки времени, что и наблюдалось в реальных условиях.

В ряде работ [5, 7, 9] исследователями предлагаются различные решения данной проблемы:

а) укладка бетонного фундамента под тоннелями толщиной, обусловленной величиной затухания энергии волн, не создающей осадки грунта под тоннелем проходящим поездом;

б) соединение тоннельных секций металлическими стяжками;

в) строительство способом «стена в грунте» параллельных ограждающих конструкций по бокам участков тоннелей с целью воспрепятствовать выпиранию грунта на поверхность;

г) обустройство по бокам тоннелей способом струйного закрепления конструкций в виде грунтоцементных свай и др.

Одним из эффективных технологических решений проблемы борьбы с виброползучестью является строительство специальных грунтоцементных завес, что обеспечивается путём струйного закрепления грунта при нагнетании в скважины вяжущего и создания заполненной щели, образованной без вращения монитора.

Строительство же способом «стена в грунте» закрытых конструкций, даже без армокаркаса, по бокам тоннеля является, безусловно, дорогостоящим мероприятием.

Для решения указанной проблемы специалистами НТЦ «Криптон» совместно с производителями ЗАО «Киевметрострой» пред-

ложено закреплять несвязный грунт под тоннелем на глубину до 4 м методом тампонажа с использованием новой технологии динамического воздействия на разжиженный массив.

Данная технология основывается на подаче в грунт путём нагнетания через мониторы высокопроникающих цементных или силикатных растворов, которые могут обеспечить максимально прочное закрепление водосодержащих мелкодисперсных песков. Она обеспечивает значительно больший радиус закрепления по сравнению с обычными методами тампонажа, что важно, поскольку трасса строительства тоннелей проходит в зоне густой сети подземных коммуникаций.

Особого внимания заслуживает методика подбора тампонажного материала для проведения работ. Границы инъектирования различных рецептур растворов в те или иные грунты зависят от характеристик раствора, включая степень его дисперсности, типа грунта с учётом его минералогического состава, коэффициента фильтрации и химического состава грунтовых вод, а также назначения инъекции – повышение прочности или водонепроницаемости грунта.

Концентрацию инъекционных растворов необходимо выбрать в зависимости от гидродинамических характеристик упрочняемого грунтового массива.

Полный эффект укрепления грунтов в определённых инженерно-геологических условиях достигается в случае использования смеси, составленной из различных по типу растворов и нагнетаемых в грунт в последовательности, установленной опытным путем.

На основании разработанной методики было выполнено обоснование технологии закрепления грунтов на опытном участке перегона между станциями «Харьковская» и «Бориспольская» участка Сырецко-Печерской линии Киевского метрополитена. Прежде всего, были уточнены литологические и минералогические характеристики грунта. По данным гранулометрического анализа грунты на участке были представлены тонко- и мелкодисперсными разновидностями песков с содержанием кварца 90...95 % и глинистой фракции менее 5 %. Полевой шпат разной дисперсности встречается во всех фракциях песков.

В связи с тем, что в геологическом разрезе наблюдалась перемежаемость песков с разным гранулометрическим составом, рецептура тампонажного раствора была выбрана с учётом грунтов с самой низкой проницаемостью, т.е. тонкозернистых песков. В качестве технологии

с использованием высокопроницаемых закрепителей была принята силикатизация грунта раствором жидкого стекла. Этот метод высокоэффективен для закрепления тонкодисперсных песчаных грунтов с низким коэффициентом фильтрации ( $K_f < 20$  м/сутки).

При применении в опытных условиях для прочного закрепления указанных раздельно-зернистых грунтов (мелкозернистые пески, супеси, пльвуны) наиболее технологичным является инъекционное закрепление методом однорастворной силикатизации. Основным компонентом тампонажного раствора служит силикат натрия  $(Na_2O)_mSiO_2$ , где  $m$  – модуль жидкого стекла, равный 2,5...4.

Вторым компонентом чаще всего является хлористый кальций ( $CaCl_2$ ). Плотность указанной смеси при объемном соотношении 1:1 составляет 1,35...1,44 г/см<sup>3</sup> при вязкости 25...50 СантиПуаз. Прочность закрепленного этим способом грунта составляет 1,5...3,5 МПа.

Указанным способом был закреплён участок Сырецко-Печерской линии метрополитена от ПК 260+20 до ПК 263-80. Как показали наблюдения, в результате выполнения данных работ существенно улучшилось состояние перегонных тоннелей в связи с образованием в подошвенных грунтах прочного основания, и были остановлены опасные осадки грунтовых толщ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольдштейн, М. Н. Механика грунтов, основания и фундаменты [Текст] / М. Н. Гольдштейн, А. Д. Царьков, И. И. Черкасов. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с.

2. Цытович, Н. А. Механика грунтов [Текст] / Н. А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.

3. Бабков, В. Ф. Основания, грунтоведение и механика грунтов [Текст] / В. Ф. Бабков, В. М. Безрук. – М.: Высш. шк., 1986. – 239 с.

4. Далматов, Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты [Текст] / Б. И. Далматов. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. – 415 с.

5. Дашевский, М. А. Распространение волн при колебании тоннелей метро [Текст] / М. А. Дашевский // Строительная механика и расчет сооружений. – 1974. – № 5. – С. 29-34.

6. Великотный, А. П. Влияние величины вибродинамического воздействия на деформируемость глинистых грунтов [Текст] / А. П. Великотный // Вопросы земляного полотна и геотехники на железнодорожном транспорте. – Д.: ДИИТ, 1980. – Вып. 208/29. – С. 30-34.

7. Кудрявцев, И. А. Влияние динамических нагрузок на виброкомпрессию несвязных грунтов [Текст] / И. А. Кудрявцев. // Сб. науч. тр. «Основания и фундаменты», 1989. – С. 73-79.

8. Вознесенский, Е. А. Поведение грунтов при динамических нагрузках [Текст] / Е. А. Вознесенский. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 286 с.

9. Кудрявцев, И. А. Влияние вибрации на основания сооружений [Текст] / И. А. Кудрявцев. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 274 с.

10. Механика грунтов [Текст] / В. Г. Шаповал [и др.]. – Д.: Пороги, 2010. – 168 с.

11. ДБН В.2.3-7-2003. Споруди транспорту. Метрополітени [Текст]. – К.: Держбуд України, 2003. – 300 с.

Поступила в редколлегию 12.05.2010.

Принята к печати 27.05.2010.