

---

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

---

УДК 624.191.044

В. И. ПЕТРЕНКО<sup>1\*</sup>, В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup> Публичное акционерное общество «Киевметрострой», ул. Прорезная, 8, Киев, Украина, 01601, тел. +38 (044) 455 23 00, эл. почта petrenko@metrobud.kiev.ua

<sup>2\*</sup> Каф. «Тоннели, основания и фундаменты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (050) 708 60 59, эл. почта petrenko@diit.ua

### ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ХИМИЧЕСКОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ КИЕВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

**Цель.** Актуальным для тоннелей мелкого заложения является закрепление слабых водонасыщенных грунтов в их основаниях с помощью различных химических реагентов. В связи с этим принято широко использовать химическое армирование грунтов на основе бурсмесительной технологии. Ее сущность заключается в том, что в грунтах пробуриваются скважины, в которые погружаются иньекторы с вращающимся монитором, через которые осуществляется нагнетание вяжущих в виде смеси цемента, жидкого стекла и других компонентов. Это обеспечивает образование грунтоцементных или грунтосиликатных конструкций, которые существенно укрепляют грунтовые массивы, увеличивая их прочностные характеристики. **Методика.** Используя существующие положения о закреплении слабых грунтов химическими способами, необходимо аналитическим путем найти решение задачи о повышении несущей способности грунтовых массивов в условиях высокой степени обводненности. **Результаты.** На основе анализа данных исследований по закреплению грунтов установлено, что в современных условиях для усиления грунтовых слабых оснований необходимо использовать метод перемешивания грунта с вяжущими веществами, которые подаются под определенным давлением внутрь грунта. **Научная новизна.** Исследованы параметры несущей способности химически закрепленных грунтов для предотвращения погружения механизированного щита. **Практическое значение.** Химическое закрепление грунтов путем применения бурсмесительной технологии получило широкое распространение на практике для укрепления оснований и фундаментов в гидротехническом, промышленном, гражданском и транспортном строительстве.

**Ключевые слова:** несущая способность грунта; расчетное сопротивление грунта; химическое закрепление; котлован; механизированный щит

#### Введение

В течение последних десятилетий при переходе на мелкое заложение тоннелей метрополитена возникла проблема их строительства и дальнейшей эксплуатации в сложных инженерно-геологических условиях, особенно в слабых водонасыщенных грунтах. При этом такие грунты проявляют реологические свойства, оказывающие влияние на их просадочную способность особенно при строительстве.

В связи с этим принято широко использовать армирование грунтов с помощью бурсмешивающей технологии. Ее сущность заключается в том, что в грунтах пробуриваются скважины, в которые погружаются иньекторы с вращающимся монитором или же неподвижные, через которые осуществляется нагнетание

вяжущих в виде цемента, жидкого стекла и других компаундов, что обеспечивает образование грунтоцементных или грунтосиликатных конструкций, которые существенно укрепляют грунтовые массивы, увеличивая их прочностные характеристики. В данной бурсмесительной технологии для нагнетания использовалось низкое и среднее давление [1, 2], что отличает ее от новой технологии jet grouting [3], в которой значение давления составляет порядка сотен атмосфер. Поэтому бурсмесительная технология получила широкое распространение для укрепления оснований и фундаментов в гидротехническом, промышленном, гражданском и транспортном строительстве [4-6].

В современных условиях для усиления грунтовых конструкций, в том числе и на слабом основании, используется метод перемеще-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

вания на глубине слабого грунта с вяжущими веществами, которые подаются внутрь грунта. За счет этого происходит уплотнение. Наиболее часто, в качестве вяжущих веществ, применяется смесь жидкого стекла и цемента или извести с цементом. При этом создаются новые конструктивные элементы в виде несущих полужестких грунтовых колонн, которые называются стабилизационными.

Таким образом, суть метода заключается в том, что в слабом грунте при помощи специальной техники происходит изготовление упрочненных стабилизационных колонн, в результате чего получают несущие грунтовые элементы, которые воспринимают давление от вышерасположенных объектов.

### Цель

Вместе с тем, при строительстве тоннелей и метрополитенов эта технология начала применяться, но в ограниченных объемах. Кроме того, она недостаточно теоретически обоснована. Возник также ряд проблемных вопросов при движении механизированных тяжеловесных установок под землей в слабых грунтах. Поэтому в данной работе представлены исследования устойчивости проходческих щитов при движении, и особенно при выходе на трассу со слабыми грунтами из котлованов с устойчивым основанием, выполненным с помощью буринъекционной технологии, для проходки перегонных тоннелей.

### Методика

Стабилизация слабого грунта может выполняться путем устройства сплошных массивов или отдельных колонн стабилизации. При этом вяжущее вещество может быть внедрено в грунт двумя способами: 1) «сухим», когда сухой порошок взаимодействует химически с поровой водой, снижая влажность грунта; 2) «мокрым», когда используется гидросмесь (пульпа) вяжущего вещества и воды.

Преимущество такого метода заключается в экономии материала-заполнителя, поскольку слабый грунт не удаляется, а только смешивается с вяжущими материалами, в результате чего увеличивается жесткость и уменьшаются осадки до допустимых значений.

Таким образом, использование методов глубинной стабилизации позволяет решать задачи по усилению слабых грунтов.

### Изложение основного материала

При строительстве в г. Киеве Курневско-Красноармейской линии метрополитена возникла проблема ввода проходческих щитов типа «Херренкнехт» и «Вирт» в станцию и их вывода из станций. Проблема была обусловлена низкой плотностью и высоким уровнем обводненности плавучих супесей, насыщенных водой песков, суглинков мягкоплавучеplastичных и супесей плавучих, находящихся за пределами котлована. Это могло привести к неустойчивому поведению при продвижении щитов при прохождении этих участков. В результате было принято решение выполнить химическое закрепление четырех участков массивов за пределами «стены в грунте» станций по трассе станция «Демеевская» – станция «Выставочный центр».

На основании ранее проведенных исследований по химическому закреплению грунтов по трассе Сырецко-Печерской линии от станции «Харьковская» до станции «Бориспольская» с использованием комбинированного способа, включающего силикатизацию и цементацию путем инъектирования жидкого стекла, цемента и раствора хлористого кальция [7, 8], было принято решение об его применении на указанном участке трассы.

Отличие технологий закрепления заключалось в их целевом назначении. В первом варианте химическое закрепление выполнялось для исключения опасных осадков грунта под перегонными тоннелями за счет явления виброползучести. Во втором варианте реализации технологии необходимо было закрепить грунт за пределами станционных котлованов, огражденных «стеной в грунте», и исключить потопление щита при подходе к станции и выходе из нее. С этой целью на каждом участке с поверхности по трассе перегонных тоннелей были пробурены скважины станками УГБ-1ВС диаметром 95 мм и глубиной 16 м (рис. 1). Скважины в количестве 66 шт. на каждом участке располагали в 6 рядов в шахматном порядке на расстоянии 1,5 м друг от друга. После этого в скважину вставляли инъектор диаметром 42 мм с вращающимся на его конце монитором, по

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

которому подавался раствор жидкого стекла, хлористого кальция и цемента в соотношении 8,90:1,0:4,85 (рис. 2).

При этом происходила остановка подъема иньектора на пяти участках по 2 м каждый и интенсивное нагнетание раствора при враща-

ющемся мониторе. По данным технологической оценки вокруг каждой скважины образовывался цилиндр общей высотой 10 м с пятью выпуклостями, максимальный размер которых по горизонтали достигал 1400...1500 мм.

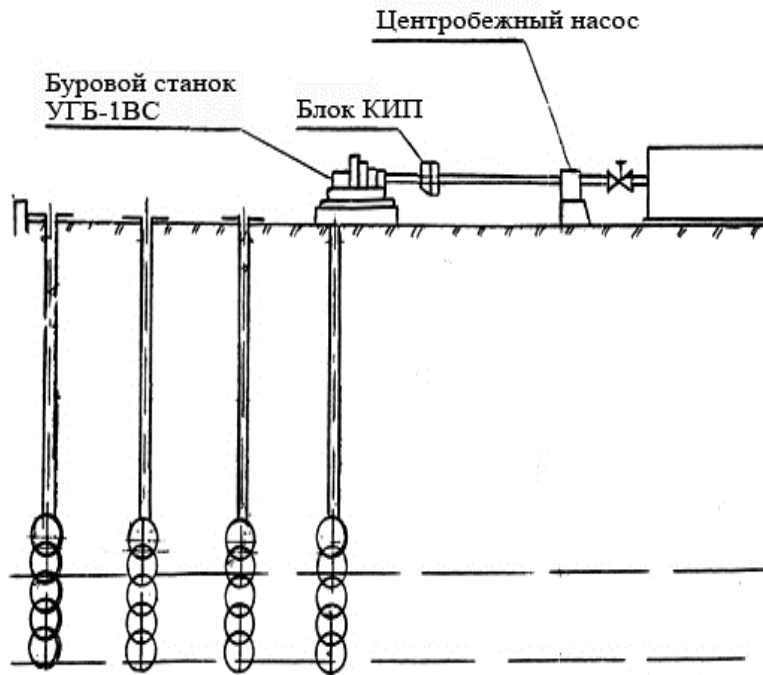


Рис. 1. Схема расположения скважин

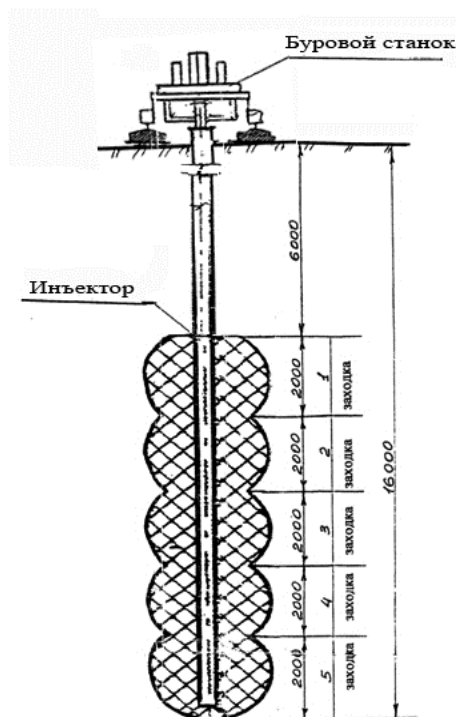


Рис. 2. Схема иньекционной скважины

Таким образом, происходило перекрытие цилиндров и образование закрепленных призм длиной 18 м, шириной 8 м и высотой 10 м (рис. 3). Это позволяет добиться увеличения прочности слабого грунта за счет повышения стабильности оснований и увеличения их несущей способности, что наиболее важно при щитовой проходке.

По технологическим условиям щит, выходя за пределы ограждения котлована в виде «стены в грунте», разрабатывал при этом укрепленный грунт и устойчиво продвигался далее по трассе. Таким образом, можно свидетельствовать об улучшении деформационных свойств слабых грунтов, снижении осадок поверхности, увеличении динамической жесткости и исключении такого явления как виброползучесть.

При этом средние расчетные характеристики армированного грунта имеют следующие значения:

- удельный вес грунта – 19,3 кН/м<sup>3</sup>;
- удельное сцепление – 36,15 кПа;
- угол внутреннего трения – 21°.

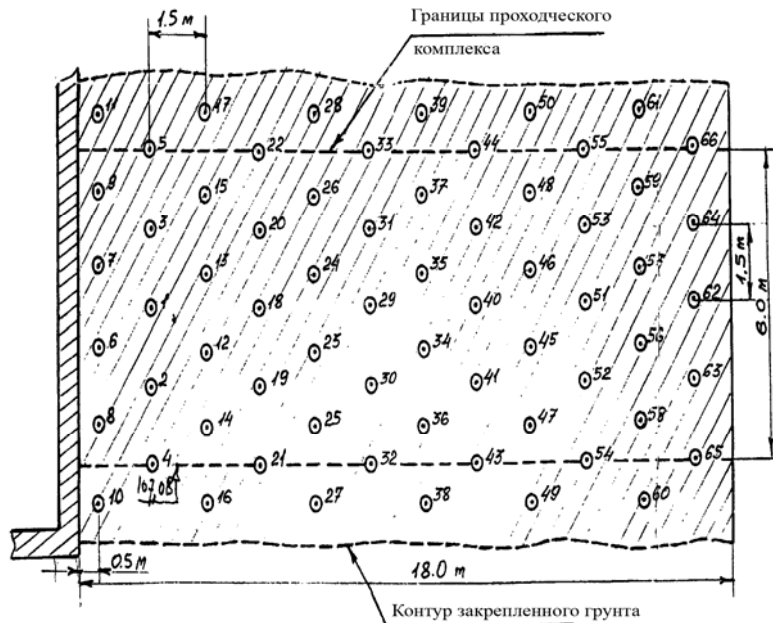


Рис. 3. Массив закрепленного грунта

Расчетное сопротивление нескального грунта под щитом можно определить по формуле из работы [9]:

$$R = 1,7 \{ R_0 [1 + K_1(b-2) + K_2\bar{\gamma}(d-3)] \} \quad (1)$$

где  $R_0$  – условное значение сопротивления сжатию грунта под щитом, кПа; принимается из таблицы работы [9] при показателе текучести  $I_L = 0,4 - R_0 = 147$  кПа;  $b$  – ширина нижней части, принимаемая равной диаметру щита  $b = D$  (при  $b > 6$  принимаем  $b = 6$  м);  $d$  – расстояние от поверхности до нижней части щита, м;  $\bar{\gamma}$  – среднее по пластам расчетное значение удельного веса грунта, определяемое по формуле  $\bar{\gamma} = \sum \gamma_i h_i / \sum h_i$ ;  $\gamma_i$  – значение удельного веса по  $i$ -ому пласту грунта, кН/м<sup>3</sup>;  $h_i$  – мощность  $i$ -ого пласта грунта, м;  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты, принимаемые из таблиц работы [9].

Определим среднее значение нагрузки на грунтовое основание под щитом по формуле:

$$P = \sum N \leq \frac{\gamma_c R}{\gamma_n}, \quad (2)$$

где  $\sum N$  – суммарная вертикальная нагрузка на грунтовое основание под щитом, включаю-

щая его вес и внешнюю нагрузку от вышележащего над щитом грунта:

$$\sum N = \gamma H + \frac{Q_{щ}}{A}, \quad (3)$$

где  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы, равный для слабых малосвязных грунтов 0,9;  $\gamma_n$  – коэффициент надежности, равный 1,2;  $Q_{щ}$  – вес щита, определяемый по формуле  $Q_{щ} = k(36D_{щ}^2 - 100)$ ;  $k$  – коэффициент запаса, равный для механизированных щитов 1,5;  $D_{щ}$  – диаметр щита «Херренкнехт», равный 6,3 м;  $A$  – площадь поверхности щита в плане, при длине щита 6,3 м равная

$$A = D_{щ} L_{щ} = 6,3 \times 6,3 = 39,69 \text{ м}^2.$$

Подставляя значения параметров в формулы (1) и (2), получим следующее:

$$P = 308 + 50 < \frac{\gamma_c R}{\gamma_n} = 1105,5 \frac{0,9}{1,2}. \quad (4)$$

Следовательно, среднее значение величины нагрузки на грунтовое основание под щитом  $P = 358$  кПа существенно меньше расчетного сопротивления грунта под щитом с учетом коэффициентов условий работы и надежности, равного  $R = 829$  кПа.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Следует отметить, что в современном ДБН по основаниям и фундаментам [10] величина расчетного сопротивления для маловлажных, влажных и насыщенных водой песков составляет 300...500 кПа, то есть в случае принятия табличных данных из ДБН величина нагрузки на грунтовое основание под щитом будет в пределах указанных данных.

**Результаты**

В результате выполненных исследований по обоснованию параметров химического закрепления грунтов при строительстве Киевского метрополитена установлено следующее:

1. В современных условиях для усиления грунтовых оснований находит широкое применение метод перемешивания на глубине слабого грунта с вяжущими веществами, которые подаются под давлением внутрь его.

2. Доказано, что стабилизация слабого грунта может выполняться путем устройства сплошных массивов или отдельных колонн в них. При этом вяжущее вещество нагнетается в грунт двумя способами: 1) «сухим», когда сухой порошок взаимодействует с поровой водой и при смешении с грунтом существенно его укрепляет; 2) «мокрым», когда используется гидросмесь (пульпа) вяжущего и воды и создается при ее внедрении в грунт и перемешивании усиленная смесевая конструкция.

**Выводы**

1. На основании ранее проведенных исследований по химическому закреплению грунтов по трассе Сырецко-Печерской линии с использованием комбинированного способа, включающего силикатизацию и цементацию путем инъецирования жидкого стекла, цемента и раствора хлористого кальция, было принято решение об его применении при строительстве Куреневско-Красноармейской линии метрополитена в г. Киеве.

2. Отличие технологий закрепления заключалось в их целевом назначении. В первом варианте химическом закреплении выполнялось для исключения опасных осадков грунта под перегонными тоннелями за счет явления виброползучести. Во втором варианте реализации технологии необходимо было закрепить грунт за пределами станционных котлованов, ограж-

денных «стенной в грунте», и исключить потопление щита при подходе к станции и выходе из нее.

3. На основании проведенных аналитических исследований установлено, что с учетом увеличения прочностных характеристики инъецированных грунтов и бокового давления на щит, что будет идти в запас прочности от погружения в грунт, было гарантировано нормальное прохождение щитов в слабых грунтах при их выходе из котлована, огражденного «стенной в грунте».

4. Таким образом, в современных условиях разработаны расчетные положения и реализована технология выхода механизированных щитов из монтажной камеры, находящейся в торце котлована, подготовленного для строительства станций мелкого заложения Киевского метрополитена.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Крыжановская, О. Г. Закрепление оснований инъецированием [Текст] / О. Г. Крыжановская // Труды Дальневосточного государственного технического университета, 2005. – № 139. – С. 203-207.
2. Оржеховский, Ю. Р. Инъекционное закрепление просадочных грунтов (метод контурной обоймы) [Текст] / Ю. Р. Оржеховский, В. В. Лушников, Р. Я. Оржеховская // Академический вестник УралНИИпроект РААСН, 2011. – № 3. – С. 70-73.
3. Shibazaki, M. State of Practice of Jet Grouting [Текст] / M. Shibazaki // Grouting and Ground Treatment: Proceedings of the Third International Conference. New Orleans, Louisiana, 2003. – Volume 1. – P. 198-217.
4. Harris, R. R. W. Construction of a jet mix cut-off of Thika Dam. Kenya. [Текст] / R. R. W. Harris, J. Morey // Proc. Conf. Grouting in the Ground. Bell A. L. ed. Inst. Of Civil Engineers. London. 2004. – P. 155-171.
5. Черняков, А. В. Струйная цементация грунтов при строительстве в условиях плотной городской застройки [Текст] / А. В. Черняков // Наука и техника в дорожной отрасли, 2011. – № 3. – С. 10-14.
6. Гришко, Д. А. Перспективы применения струйной цементации в городском подземном строительстве с целью снижения экологических рисков [Текст] / Д. А. Гришко, М. Н. Шуплик, Е. Ю. Куликова // Научный вестник Москов-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- ского государственного горного университета, 2011. – № 9. – С. 16-22.
7. Петренко, В. И. Надёжность способов закрепления грунтов при эксплуатации перегонных тоннелей Киевского метрополитена [Текст] / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, Г. К. Савинков // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна,, 2011. – Вип. 35. – С. 135-139.
  8. Петренко, В. И. Современные способы закрепления грунтов при эксплуатации перегонных тоннелей Киевского метрополитена [Текст] / В. И. Петренко, В. Д. Петренко // Тези 71 Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 14-15 квітня 2011 р., м. Дніпропетровськ. – Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна,, 2010. – С. 226.
  9. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. [Текст]. – Чинні від 2007-02-01. – К. : Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
  10. ДБН В.2.1-10-2009. Об'єкти будівництва та промислової продукції будівельного призначення. Основи та фундаменти будинків і споруд. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. [Текст]. – Чинні від 2009-01-07. – К. : Мін регіон буд. України, 2009. – 107 с.

В. І. ПЕТРЕНКО<sup>1\*</sup>, В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup> Публічне акціонерне товариство «Київметробуд», вул. Прорізна, 8, Київ, Україна, 01601, тел. +38 (044) 455 23 00, ел. пошта petrenko@metrobud.kiev.ua

<sup>2\*</sup> Каф. «Тунелі, основи і фундаменти», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (050) 708 60 59, ел. пошта petrenko@diit.ua

## ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ХІМІЧНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ ҐРУНТІВ ПРИ БУДІВНИЦТВІ КИЇВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ

**Мета.** Актуальним для тунелів мілкого закладення є закріплення слабких водонасичених ґрунтів в їх основах за допомогою різних хімічних реагентів. У зв'язку з цим прийнято широко використовувати хімічне армування ґрунтів на основі бурозмішувальної технології. Її суть полягає у тому, що в ґрунтах пробурюють свердловини, в які занурюються ін'єктори з монітором, що обертається, через які здійснюється нагнітання в'язучих у вигляді суміші цементу, рідкого скла і інших компонентів. Це забезпечує утворення ґрунтоцементних або ґрунтосилікатних конструкцій, які суттєво укріплюють ґрунтові масиви, збільшуючи їх міцнісні характеристики. **Методика.** Використовуючи існуючі положення про закріплення слабких ґрунтів хімічними способами, необхідно аналітичним шляхом знайти рішення задачі про підвищення несучої здатності ґрунтових масивів в умовах високого ступеня обводнює. **Результати.** На основі аналізу даних досліджень по закріпленню ґрунтів встановлено, що в сучасних умовах для посилення ґрунтових слабких основ необхідно використовувати метод перемішування ґрунту з в'язучими речовинами, які подаються під певним тиском всередину ґрунту. **Наукова новизна.** Досліджені параметри несучої здатності хімічно закріплених ґрунтів для запобігання зануренню механізованого щита. **Практичне значення.** Хімічне закріплення ґрунтів шляхом застосування бурозмішувальної технології набуло широке поширення на практиці для зміцнення основи і фундаментів в гідротехнічному, промисловому, цивільному і транспортному будівництві.

**Ключові слова:** несуча здатність ґрунту; розрахунковий опір ґрунту; хімічне закріплення; котлован; механізований щит

V. I. PETRENKO<sup>1\*</sup>, V. D. PETRENKO<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup> Public Joint-Stock Company «Kyivmetrobud», Prorizna Str., 8, Kiev, Ukraine, 01601, tel. +38 (044) 455 23 00, e-mail petrenko@metrobud.kiev.ua

<sup>2\*</sup> Dep. «Tunnels, basis and foundations», Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 60 59, e-mail petrenko@diit.ua

## GROUNDING OF PARAMETERS OF SOILS CHEMICAL GROUTING BY KYIV UNDERGROUND CONSTRUCTION

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

---

**Purpose.** For the tunnels of shallow contour interval fixing of the weak watersaturated soils in their bases by different chemical reagents is actual. In this connection it is accepted widely to use the chemical reinforcement of soils on the basis of drill-mixture technology. Its essence consists that mining holes are drilling in soils, in which injects with the revolved monitor are submerging through, which is carried out of astringent as the mixture of cement, liquid glass and other components. It provides formation of soil-cement or soil-silicate constructions which substantially strengthen the ground arrays, multiplying their strengthened descriptions. **Methodology.** Using existent positions about fixing of weak soils by chemical methods, it is necessary by an analytical way to find the decision of task about the increase of carrier capability of the ground arrays in the conditions of high degree of watercontent. **Findings.** On the basis of data analysis of researches on fixing of weak bases, it is set that in modern terms for strengthening of the ground weak grounds it is necessary to use the method of interfusion of soil with the astringent matters which are given under certain pressure into soil. **Originality.** The parameters of carrier capability of the chemically fastened soils for prevention of immersion of the mechanized shield are explored. **Practical value.** The chemical fixing of soils by application of drill-mixture technology got wide propagation in practice for strengthening of foundation and bases in hydrotechnical, industrial, civil and transporting building.

*Keywords:* carrier capability of soil; calculated resistance of soil; chemical fixing; foundation pit; mechanized shield

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. О. С. Распоповым (Украина).*

Поступила в редколлегию 20.11.2013.

Принята к печати 30.11.2013.