

УДК 624.159

### ВТОРИННЕ ОСІДАННЯ ПІДЗЕМНОЇ СПОРУДИ У ВОДОНАСИЧЕНОМУ МАСИВІ ПРИ ДЕФОРМУВАННІ ГРУНТОВОЇ ОСНОВИ З УТВОРЕННЯМ ПРИЗМИ СПОВЗАННЯ

С. М. Стівник, А. Л. Ган, Є. А. Загоруйко, Л. В. Шайдецька

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
вул. Борщагівська, 115/3, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: stansto@i.ua

Проаналізовано та узагальнено відомі наукові результати попередження деформацій обробок тунелів та оточуючого ґрунтового масиву. Проведено комп'ютерне моделювання напружено-деформованого масиву навколо обробки тунелю під дією ступінчатого навантаження з врахуванням динамічних навантажень від руху потягів метрополітену. Авторами роботи вперше визначено умови виникнення вторинного осідання підземної споруди. Стійкість підземних споруд у штучно намитих масивах визначається сукупною дією факторів: водонасиченням ґрунтового масиву та додатковими навантаженнями від експлуатації підземних споруд. Врахування вторинного осідання підземної споруди дозволяє забезпечити цілісність габаритів конструкції підземної споруди при експлуатації.

**Ключові слова:** намивні ґрунти, вторинне осідання, деформація, мульда сповзання, підземні споруди, напружений стан.

### ВТОРИЧНА ОСАДКА ПОДЗЕМНИХ СООРУЖЕНИЙ В ВОДОНАСЫЩЕННОМ МАССИВЕ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ С ОБРАЗОВАНИЕМ ПРИЗМЫ СПОЛЗАНИЯ

С. Н. Стівник, А. Л. Ган, Є. А. Загоруйко, Л. В. Шайдецька

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игора Сикорского»

ул. Борщаговская, 115/3, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: stansto@i.ua

Проанализированы и обобщены известные научные результаты предупреждения деформаций обделок тоннелей и окружающего ґрунтового массива. Проведено компьютерное моделирование напряженно-деформированного массива вокруг обделки тоннеля под действием ступенчатого нагружения с учетом динамических нагрузок от движения поездов метрополитена. Авторами работы впервые определены условия возникновения вторичной осадки подземного сооружения. Устойчивость подземных сооружений в искусственно намитых массивах определяется совокупным действием факторов: водонасыщением ґрунтового массива и дополнительными нагрузками от эксплуатации подземных сооружений. Учет вторичной осадки подземного сооружения позволяет обеспечить целостность габаритов конструкции подземного сооружения при эксплуатации.

**Ключевые слова:** намывные ґрунты, вторичная осадка, деформация, мульда сползания, подземные сооружения, напряженное состояние.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** При розташуванні підземних споруд в намивних масивах практично завжди спостерігається початкове осідання ґрунтів, що носить затухаючий характер у часі. Внаслідок замочування ґрунтової основи тунелю за рахунок коливання рівня підземних вод та впливу додаткових навантажень при експлуатації транспортних комунікацій змінюються властивості ґрунтів. А це в свою чергу ініціює розвиток процесу вторинного осідання підземних споруд, при чому цей процес може бути довготривалим та носити незатухаючий характер. На ділянках мілкового закладання Київського метрополітену досить поширене явище вторинного осідання, що приводить до порушення нормативного габариту наближення, і, як наслідок, обмеження і швидкості руху метропотягів. Заходи направлені на посилення ґрунтової основи за рахунок силікатизації пісків не мали позитивного результату. Тому виникла потреба проведення спеціальних досліджень вторинного осідання підземних споруд у намивному масиві [1–3].

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.** Методикою експериментів передбачалось виконання лабораторних досліджень зразків ґрунту та проведення чисельного моделювання стійкості системи «споруда-ґрунтова основа» [4, 5].

Безпосередньо з намивного масиву були відібрані проби зразків піщаних ґрунтів, що представлені супісками. Внаслідок визначення їх фізико-механічної характеристики встановлено, що при частковому замочуванні ґрунтів об'ємна вага змінюється в межах  $\gamma = 2,0 \dots 2,1 \text{ г/см}^3$ , при максимальному зволоженні -  $\gamma_{sw} = 3,49 \dots 4,61 \text{ г/см}^3$ . Режим замочування відповідав календарному періоду «весна-літо». Таким чином проби витримувались не менше однієї доби, далі з них були виготовлені зразки за допомогою різальних кілець для випробувань в сертифікованій лабораторії на компресійних приладах фірми «Wikeham Farran» (Великобританія) з титовим (модель WF-24001) (рис. 1).

Методика проведення експериментів включала наступні операції:

- встановлення зразка на перфорований штамп (для стоку віджатої води);
- налаштування індикатора вертикальних деформацій;
- контроль початкових показів приладів;
- навантаження зразка до визначеного рівня [6].



Рисунок 1 – Компресійні прилади з фронтальним навантаженням

На кожному рівні навантаження виконувалася реєстрація вертикальних деформацій в певній послідовності: початковий відлік – після прикладання навантаження, а далі через 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 30 хвилин і потім з інтервалом в одну годину на протязі робочого дня, в наступну добу - на початок і кінець робочого дня до моменту повної умовної стабілізації деформацій. За результатами досліджень побудовані навантажувально-деформаційні залежності ґрунтів у природному та водонасиченому станах (рис. 2).

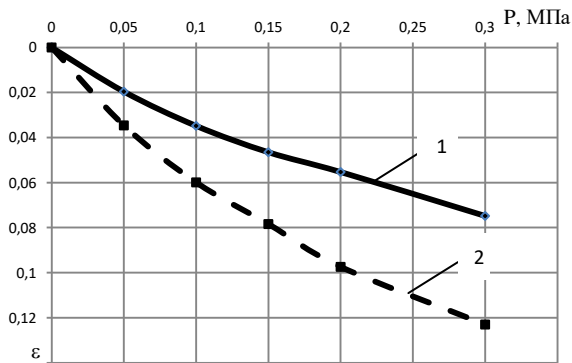


Рисунок 2 – Залежність  $\epsilon = f(p)$  для зразків у природних (1) та водонасичених станах (2)

У зразках природної вологості при максимальному навантаженні  $p = 0,3$  МПа вертикальна деформація становить  $\epsilon = 0,0748$ , а в водонасиченому стані відповідно  $\epsilon = 0,123$ , що на 60% більше, в той же час ступінь затухання градієнта деформування у водонасичених зразках у 2 рази менша, ніж у зразках природного стану.

Для підтвердження отриманих результатів також проведені дослідження деформування зразків у часі (рис. 3).

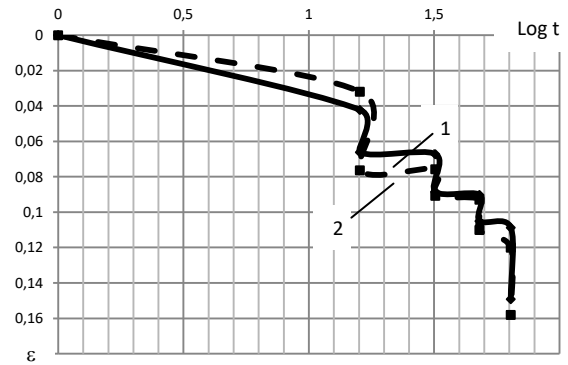


Рисунок 3 – Залежність  $\epsilon = f(t)$  для зразків природної вологості (1) та водонасичених холодною водою (2)

На досліджувані зразки прикладались наступні навантаження: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 і 3,0 кг. Кожне наступне навантаження на зразок прикладалося через 16 год. Як видно з графіка (рис. 3) відносні вертикальні деформації мають нелінійний характер, причому вони затухають з прикладанням наступного навантаження, крім останнього (3,0 кг), що свідчить про можливість створення таких умов у ґрунтовому масиві, коли деформації можуть мати незатухаючий характер.

На отриманих залежностях спостерігається суттєва різниця первинного та вторинного осідання. На початковому етапі осідання ґрунт природної вологості досягає стабілізації при деформаціях, що на 30% менше ніж у водонасичених зразках, а при повторному навантаженні - навпаки: при водонасиченні повна умовна стабілізація досягається при деформаціях, що становлять 120% відносно зразків природного стану. Таким чином експериментально підтверджено, що деформації повзучості у мінеральному скелеті інтенсивно розвиваються при збільшенні навантаження, а первинна і вторинна фільтраційна консолідації відбуваються одночасно, причому частка кожної з них у загальному осіданні ґрунтів основи змінюється у часі і залежить від величини деформацій.

В водонасичених ґрунтах при зростанні стискаючих навантажень спостерігається процес фільтраційної консолідації.

Для підтвердження отриманих результатів лабораторних досліджень додатково було проведено чисельне моделювання напружено-деформованого стану системи «споруда - ґрунтовий масив».

При моделюванні було поставлено задачу з визначення деформування масиву навколо обробки тунелю під дією ступінчатого навантаження з врахуванням динамічних навантажень від руху потягів метрополітену [7, 8]. Використані дані відповідали геометричним та силовим параметрам рухомого складу в умовах лінії мілкого закладання Київського метрополітену.

При початковому прикладанні навантаження від ваги конструкцій спостерігається утворення клиновидної зони ущільнення в основі тунелю (рис. 4).

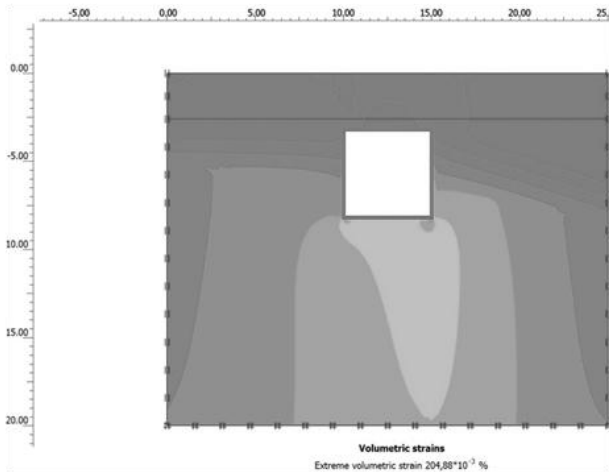


Рисунок 4 – Утворення зони початкового ущільнення в основі тунелю

Як видно з рис. 4 при початковому осіданні розподіл відносних деформацій ґрунтів основи має практично симетричний характер з глибиною та незначним зміщенням максимальних деформацій у бік ухилу рівня підземних вод. Причому відносні деформації розвиваються безпосередньо під подошвою підземної споруди у вигляді клиновидної форми.

Наступне 3D-моделювання масиву з урахуванням навантажень рухомого складу показало, що процес осідання інтенсифікується і в умовах замочування оточуючого масиву виникає часткове руйнування клину ущільнення в основі тунелю, а розвиток осідання основи формує навколо споруди призму сповзання нових обрисів з врахуванням перерозподілу навантажень (рис. 5).

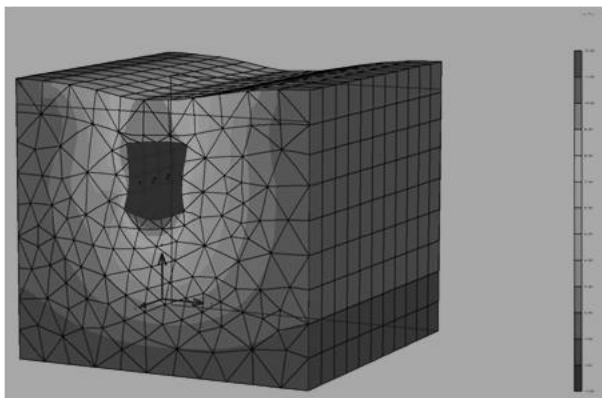


Рисунок 5 – Результати 3D-деформування водонасиченого масиву

Як видно з рис. 5 максимальні деформації при вторинному осіданні знаходяться під подошвою та над перекриттям підземної споруди і становлять  $120 \cdot 10^{-3}$  м. Дещо менші деформації виникають у бічних частинах масиву і складають від  $80 \cdot 10^{-3}$  м до  $100 \cdot 10^{-3}$  м. Власне розподіл деформацій має затухаючий характер в глибину масиву і обмежується приблизно навантаженням 1,0-1,5 до відносного габариту тунелю.

Відповідні зміни у формуванні призми сповзання також спостерігаються при розгляді осідання обробки у ґрунтах природної вологості під дією навантажень рухомого складу, але в меншому ступені, що додатково підтверджує рівномірний характер руйнування призми сповзання (рис. 6).

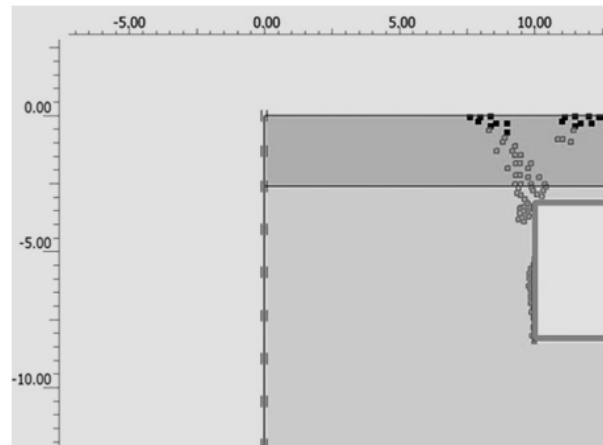


Рисунок 6 – Формування призми сповзання в масиві природної вологості

Як видно з рис. 6 при первинному осіданні над вузлами з'єднання перекриття і стінових панелей утворюється зона пластичних деформацій у вигляді початкової призми сповзання. В період вторинного осідання об'єм призми сповзання буде збільшуватися з охопленням бокових поверхонь тунелю, що в свою чергу приведе до додаткової зони ущільнення в основі підземної споруди [9, 10].

Аналіз отриманих результатів досліджень дозволив розробити модель деформування ґрунтового масиву, яка враховує не тільки первинне осідання, а також розвиток структурних елементів масиву (клина ущільнення, розвитку мульди осідання та призми сповзання) при вторинному осіданні ґрунтів (рис. 7). Дана модель враховує збільшення розмірів призми сповзання зі збереженням подібності самої форми, що дозволяє врахувати траєкторію переміщення у просторі самої підземної споруди.

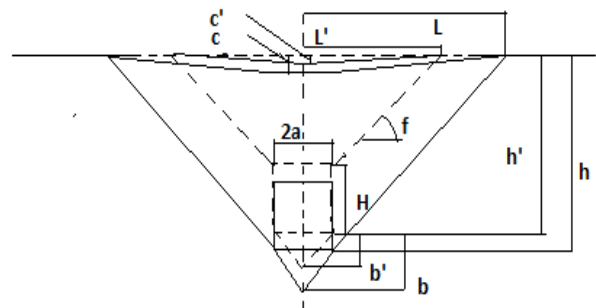


Рисунок 7 – Схема деформування масиву при інтенсифікації осідання ґрунтів

ВИСНОВКИ. Узагальнюючи отримані результати можна зробити наступний висновок, що стійкість підземних споруд у штучно намитих масивах визначається сукупною дією факторів: водонасиченням ґрунтового масиву та додатковими навантаженнями від експлуатації підземних споруд. При сукупності цих впливів стає можливим інтенсифікація вторинного осідання, яка характеризується руйнуванням зони ущільнення в основі споруди (до 40% за об'ємом) та збільшенням об'єму призми сповзання на 60%. Це осідання може переходити в незатухаючий режим і, відповідно, повинно бути враховано на стадії проектування транспортних комунікацій.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Самедов А.М. Расчет и проектирование геотехнических инженерных сооружений: монография. – К.: НТУУ «КПИ», 2013. – 908 с. – Библиогр.: С. 783–801.
2. Самедов А.М., Мани А.Д. Уширение подошвы сооружения для использования слабых подстилающих слоев в массиве под сооружением // Вісник НТУУ «КПИ» Серія «Гірництво». Зб. наукових праць. – 2015. – Вип. 27. – С. 8–15.
3. Стовпник С.Н., Пазюк Р.В. Исследование взаимодействия цельносекционной обделки мелкого заложения с водонасыщенным намывным массивом при динамическом влиянии метропоезда // Материалы международной научно-практической конференции «Строительство и архитектура-2015», 26-27 ноября 2015, ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет» – Ростов-на-Дону, 2015. – С. 390–393.
4. Білоус М.В., Шульц Р.В. Сучасні методи визначення просторових переміщень тунелів метрополітену // Вісник геодезії та картографії, 2009. – Вип. № 5 (62) – Київ. – С. 13–16.
5. Активізація деформаційних процесів в техногенних ґрунтах / Н.В. Зуєвська, Л.В. Шайдецька, К.О. Булітко // Збірник наукових праць НГУ. – Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2017. – № 50 – С. 309–315.
6. Добровольская А.О. Изучение деформационных характеристик техногенного грунта при разных вариантах замачивания // Материалы 10-й международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Перспективы развития строительных технологий», 21-22 апреля 2016 / Гос. Высшее учебное заведение «Нац. Горный Университет». – Днепропетровск, 2016. – С. 18–23.
7. Застосування сучасних програмних комплексів чисельного моделювання для визначення напружено-деформованого стану системи «масив ґрунту - паля» / Є.А. Загоруйко, Д.Л. Капінус, Т.Є. Усманова // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво». – 2011. – Вип. 21. – С. 28–33.
8. Дворник А.М. Чисельне моделювання взаємодії елементів системи «основа – фундамент – будівля» з урахуванням прояву додаткових деформацій основи, складеної водонасиченими піщаними ґрунтами // Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво. – Вип. 2 (44). – 2015. – ПолтНТУ. – С. 186–194.
9. Геомеханическая оценка эффективности крепления и охраны участковых выработок в условиях шахты «Партизанская» ГП «Антрацит» / Е.А. Сдвижкова, И.Н. Попович, И.В. Дудка, О.А. Кузьяева // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2014. – Випуск 4/2014 (87). – С. 129–133.
10. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: Издательство ДМК Пресс, 2007. – 595 с.

#### SECONDARY SEDIMENTATION OF UNDERGROUND STRUCTURES IN THE WATER-CONSISTENT MASSIVE WITH BASIS GROUND DEFORMATION WITH SLIP PRISM FORMATION

S. Stovpnyk, A. Han, E. Zahoruiko, L. Shaidetska

Department of Geochemistry and Mining Technologies

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»

vul. Borschagivska, 115/3, Kyiv, 03056, Ukraine.

**Purpose.** Definition of nature of the soil basis deformations development, taking into account the interaction of structural elements in the secondary settling down of the underground facility. **Methodology.** Laboratory studies on the precipitation of the sandy loam samples provided, taken from the alluvial massif in conjunction with mathematical modeling of the process of settling underground facilities. **Results.** After the initial subsidence, under the aggregate of engineering-geological influences, there is a redistribution at the level of structural elements, which leads to the intensification of secondary sedimentation of the underground facility. As a result, the distribution of the stress-strain state of soils around the underground facility changes. **Originality.** For the first time, the influence of the sand mass water saturation and an additional load from the movement of trains on the intensification of secondary sedimentation of shallow laid underground facilities has been determined. **Practical value.** As a result of periodic water saturation of soils there is an intensification of secondary sedimentation of underground facilities, which can have undamaged nature of the process should be taken into account when designing and operating transport communications.

**Key words:** Soils, secondary sediment, deformation, sliding mud, underground facilities, tense state.

## REFERENCES

1. Samedov, A.M. (2013), *Raschet i proyektirovaniye geotekhnicheskikh inzhenernykh sooruzheniy* [Calculation and design of geotechnical engineering structures: monograph], NTUU «KPI», Kiev, Ukraine.
2. Samedov, A.M., Mani, A.D. (2015), "Broadening of the sole structure to use weak base layers in the array at structure" [Usherenie podoshvy sooruzheniya dlya ispolzovaniya slabykh podstilayushchikh slojev v massive pod sooruzheniyem], *Visnyk NTUU "KPI"*. no. 27, pp. 18-23.
3. Stovpnyk, S.N., Pazuyk, R.V. (2015), "Investigation of the interaction of the whole-section lining of shallow ground with a water-saturated alluvial massif with the dynamic influence of the metro train" «*Stroitelstvo i arkhitektura-2015*». *Zbirnyk naukovykh prats mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsyy, FHBOU VPO*. [«Construction and Architecture -2015» Materials of the International Scientific and Practical Conference], - Rostov-na-Donu, November 26-27, 2015, pp.390-393.
4. Bilous, M.V., Schultz, R.V. (2009), "Modern methods of determining the spatial displacements of underground tunnels" [Suchasni metodi viznachennya prostorovikh peremishchen tuneliv metropolitenu], *Visnyk heodeziyi ta kartohrafiyi*, no. 5(62), pp. 13-16.
5. Zuevskaya, N.V., Shaidetska, L.V., Bulitko, K.O. (2017), "Activation of deformation processes in man-made soils" [Aktivizatsiya deformatsiy nykh protsesiv v tekhnogennikh gruntakh], *Zbirnyk naukovykh prats' NHU*, no. 50, pp. 309-315.
6. Dobrovolskaya, A. O. (2016), "Study of deformation characteristics of man-made soil under different soaking options" *Materyaly 10-y mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsyy molodykh uchenykh, aspyrantov y studentov «Perspektyvy razvytyya stroytel'nykh tekhnolohyy»* [Materials of the 10th International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Post-Graduate Students and Students "Prospects for the Development of Construction Technologies"], Dnepropetrovsk, , April 21-22, pp.18-23.
7. Zagoruiko, Y.A., Capinus, D.L., Usmanova, T.Y. (2011), "Application of modern software complexes of numerical simulation for the determination of the strained-deformed state of the "array of soil-pile" system" [Zastosuvannya suchasnykh programnykh kompleksiv chisel'nogo modelyuvannya dlya viznachennya napruzhenno-deformovanogo stanu sistemi «masiv gruntu - palya»], *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho Universytetu Ukrayiny "Kyivskyy politekhnichnyy instytut"*. Seriya "Hirnyctvo", no. 21, pp. 28-33.
8. Dvornyk, A.M. (2015), "Numerical simulation of the interaction of elements of the system "foundation - foundation - building" taking into account the manifestation of additional deformations of the base, composed of water-saturated sandy soils" [Chiselne modelyuvannya vzaemodii elementiv sistemi «osnova – fundament – budivlya» z urakhuvannyam proyavu dodatkovykh deformatsiy osnovi. skladenoï vodonasichenimi pishchanymi runtami], *Zbirnyk naukovykh prats'*. Seriya: *haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo, PoltNTU*, no. 2(44), pp. 186-194.
9. Sdvizhkova, E.A., Popovich, I.N., Dudka, I.V., Kuzyaeva, O.A. (2014), "Geomechanical assessment of the effectiveness of fastening and protection of excavations in the conditions of the mine "Partizanskaya" SE "Anratsit" [Geomekhanicheskaya otsenka effektivnosti krepleniya i okhrany uchastkovykh vyrabotok v usloviyakh shakhty «Partizanskaya» GP «Anratsit»], *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 4(87), pp. 129-133.
10. Perelmuter, A.V., Svilker, V.I. (2007), "Calculated models of structures and the possibility of their analysis" [Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza], *Izdatelstvo DMK.*, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 29.06.2017.