

Якість формування горизонтальних ґрунтоцементних армоелементів влаштованих за бурозмішувальною технологією

Роман САМЧЕНКО¹, Артем ЮХИМЕНКО²

Запорізький національний університет
226, просп. Соборний, Запоріжжя, Україна, 69006,

¹sektor3@ukr.net, orcid.org/0000-0003-1013-0047

²winner.wcar@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4231-9602

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.243-251

Анотація. У статті наведено результати комплексних експериментальних досліджень процесу формування горизонтальних ґрунтоцементних армуючих елементів (ГЦЕ), утворених за допомогою бурозмішувальної технології (БЗТ), яка активно впроваджується в сучасному будівництві при реконструкції та відновленні деформованих будівель і споруд. Метою дослідження було встановити закономірності зміни питомого опору зрушенню армованого ґрунтоцементу залежно від двох ключових технологічних параметрів — швидкості обертання бурозмішувача та його лінійної поступальної швидкості, що дозволяє оптимізувати технологічний процес та забезпечити підвищення надійності укріплених ґрунтів.

Для досягнення поставленої мети в рамках дослідження було виготовлено три дослідні зразки ГЦЕ в однакових ґрунтових умовах на експериментальному майданчику. У кожному зразку бурозмішувач працював з фіксованою швидкістю обертання, але з трьома різними лінійними швидкостями, що дозволило дослідити комбінований вплив цих факторів. Для об'єктивного вимірювання міцності ґрунтоцементу використано метод пенетраційного випробування з застосуванням мікропенетромметра МВ-2, що забезпечив можливість неінвазивного контролю питомого опору зрушенню в часі.

Результати показали, що при збільшенні швидкості обертання бурозмішувача питомий опір зрушенню зростає, що пов'язано з інтенсивнішим подрібненням ґрунту, покращенням проникнення цементного розчину та якіснішим перемішуванням суміші. Натомість зі збільшенням лінійної швидкості руху бурозмішувача відбувається зниження питомого опору, що свідчить про зменшення часу взаємодії між ґрунтом



Роман САМЧЕНКО

доцент кафедри
промислового та цивільного
будівництва
к.т.н.



Артем ЮХИМЕНКО

доцент кафедри
промислового та цивільного
будівництва
к.т.н.

та цементною суспензією, а отже, і про нижчу якість армування. Отримані дані підтверджують доцільність регулювання параметрів БЗТ залежно від технічних умов конкретного будівельного об'єкта та необхідного рівня підсилення ґрунтів.

Крім того, було проведено додаткову перевірку цілісності сформованих ГЦЕ з використанням акустичного методу на основі програмно-апаратного комплексу РІТ-В, що дозволило переконатися у відсутності розривів та визначити фактичну довжину елементів. Загалом результати досліджень мають високу практичну значущість, оскільки дозволяють вдосконалити методику формування горизонтальних ґрунтоцементних армоелементів, підвищити ефективність їх застосування в умовах щільної міської забудови, зокрема в підвальних приміщеннях, без порушення експлуатації існуючих будівель. Запропоновані рекомендації можуть бути враховані при розробці регламентів виконання робіт із укріплення основ фундаментів із використанням бурозмішувальної технології в різних умовах

будівельного виробництва.

Ключові слова. Армування ґрунтів, бурозмішувальна технологія, укріплення ґрунтів, бурозмішувач, швидкість обертання, лінійна швидкість, penetрація, опір зрушенню.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В останнє десятиріччя все ширше набуває впровадження ефективного способу укріплення ґрунтів армуванням за бурозмішувальною технологією (БЗТ). Сутність БЗТ полягає в тому, що спеціальним пристроєм – бурозмішувачем за допомогою бурового станка руйнується та подрібнюється структура ґрунту, яка одночасно просочується цементною суспензією, досконально перемішується, а після тужавіння перетворюється в ґрунтоцементний армуючий елемент. Ефективність даної технології полягає в простоті, багатогранності її застосування та економічності. Багатогранність полягає в її застосуванні в різних сферах будівельного комплексу: в капітальному будівництві для підготовки основ фундаментів; при реконструкції об'єктів, для підсилення основ при збільшенні навантажень на них; для укріплення ґрунтів основ деформованих будівель, споруд при їх відновленні; для зміцнення бортів котлованів; для укріплення укосів насипів та виїмок та ін. Укріплення ґрунтів за БЗТ може виконуватись в різних напрямках – вертикальному, похилому та горизонтальному (Степура та ін., 2009). Для реалізації цих технологій нами розроблені та виготовлені малогабаритні станки відповідно горизонтального буріння (Степура та ін., 2009) та вертикального і похилого буріння (Самченко та ін., 2012).

МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є – дослідження ролі та впливу технологічних чинників, а саме швидкості обертань та лінійної швидкості поздовжнього руху бурозмішувача на процес утворення горизонтальних ґрунтоцементних армуючих елементів та формування параметрів міцності ґрунтоцементу.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

БЗТ укріплення ґрунтів та ґрунтоцементний матеріал достатньо досліджені та висвітлені. Науковці та фахівці Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, Запорізького відділення ДП НДІБК, Дніпропетровського ООО НПО „Рембуд” на основі досліджень та розробок по даному питанню довели метод до широкого впровадження в різних напрямках будівництва. В роботі (Зоценко та ін., 2011) висвітлені питання залежності механічних характеристик ґрунтоцементу від вмісту цементу, від часу тужавіння, від щільності ґрунтоцементу та тощо. В (Великодний та ін., 2008) показаний вплив ґрунтоцементних закріплюючих елементів на механічні характеристики зміцненого ґрунту. В роботах (Zotsenko et al., 2013; Fan et al., 2018; Bruce, 2000) викладені основні принципи технологій по армуванню основ фундаментів. Але в науково-технічних джерелах недостатньо висвітлені питання впливу технологічних факторів на процес армування ґрунтів при підсиленні основ фундаментів за БЗТ.

Більшість технологій армування ґрунтів бурозмішувальним способом розроблено та застосовано для підсилення основ у вертикальному напрямку. Але часто виникають обставини, що потребують укріплення ґрунтів у горизонтальному напрямку. Це стосується в першу чергу об'єктів реконструкції та при захисті пошкоджених будівель від подальших деформацій, тобто при необхідності підсилення основ існуючих будівель.

На процес формування ґрунтоцементних елементів (ГЦЕ) взагалі впливають ряд факторів, основними з яких є: ґрунтові умови, вміст цементу у суміші ґрунт-цемент, умови тужавіння та твердіння ґрунтоцементної суміші, технологічні чинники та тощо. Оскільки при горизонтальному укріпленні ґрунтів їх армування відбувається в обмеженому шарі по товщині, тобто практично в ідентичних ґрунтових умовах, а вміст цементу визначається розрахунком в залежності від необхідних для проектування механічних характеристик, то процес утворення ГЦЕ в бі-

льшій мірі залежить від технологічних чинників – від конструктивних рішень бурозмішувача, швидкості його обертань та лінійної швидкості при руйнуванні структури ґрунту, ступеню подрібнення зруйнованого ґрунту, якості просочування подрібненого ґрунту водоцементним розчином, якості перемішування ґрунтоцементної суміші та тощо.

Дослідження впливу технологічних факторів на процес формування ГЦЕ проводились на експериментальній площадці ЗВ ДП НДІБК. Ґрунтові умови експериментальної площадки наведені в Табл. 1.

Табл. 1. Характеристики ґрунту експериментального майданчика.

Table 1. Soil characteristics of the experimental area.

Щільність ґрунту природного стану $\rho, \text{т/м}^3$	Щільність сухого ґрунту $\rho_d, \text{т/м}^3$	Щільність твердих часток ґрунту $\rho_s, \text{т/м}^3$	Вологість $w, \%$	Коефіцієнт пористості e	Число пластичності $I_p, \%$
1,472	1,344	2,629	10	0,97	9

Були виготовлені 3 дослідні ГЦЕ. Методика формування показана на схемі Рис. 1 і полягала в наступному. В першу чергу був утворений ГЦЕ №1, потім ГЦЕ №2 і в останню чергу – №3. Кожний ГЦЕ формувався при відповідній постійній швидкості обертань бурозмішувача по всій довжині. При цьому лінійна швидкість поздовжнього руху на кожній із трьох ділянок, на які розподілявся кожний ГЦЕ була своя – $v_1=0,44\text{м/хв}$, $v_2=0,68\text{м/хв}$, $v_3=0,92\text{м/хв}$. По закінченні проходки бурозмішувача на першій ділянці із лінійною швидкістю v_1 роботу бурового станка і розчинонасоса зупиняли (розчиномішалка працювала безперебійно для забезпечення незмінних кондицій водоцементного розчину на наступних ділянках) і задавали буровому станку наступну чергову лінійну швидкість v_2 і продовжували утворення ГЦЕ на другій ділянці (II), таким же чином послідовно формували ГЦЕ на ділянці III. По закінченні утворення ГЦЕ 1 приступали до формування ГЦЕ 2 та ГЦЕ 3, задаючи відповідно постійні швидкості обертань n_1 , n_2 і n_3 та зміни швидкості осьо-

вих рухів v_i^I , v_i^{II} , v_i^{III} . Таким чином, почерговим комбінуванням задавання постійних значень одних технологічних чинників і відповідних змінних значень других чинників формувалися ГЦЕ з різними характеристиками, відповідними тим чи іншим технологічним параметрам.

У якості критерія оцінювання впливу технологічних чинників на процес утворення ГЦЕ, у тому числі набору міцності ґрунтоцементу у часі, застосовували методику дослідження ґрунтів пенетрацією. Метод пенетрації полягає у визначенні величини питомого опору матеріалу (у нашому випадку

ґрунтоцементу) зрушенню шляхом занурення сталевго конуса, який має заданий кут при вершині $17^\circ 40'$, або 30° в залежності від характеристики пружини, якою наділений той чи інший варіант стандартного прибору „Пенітрометр”.

Пенетраційний метод визначення механічних характеристик ґрунтів не має обмежень. З використанням відповідних приборів даним методом можна досліджувати різні ґрунти від мулових до скальних порід.

Проф. М.Л. Зоценко зазначає (Зоценко та ін., 2003), що для зв'язних ґрунтів питомий опір зрушенню R є відношення зусилля пенетрації P до квадрата глибини занурення сталевго конуса h .

Спеціальним пристроєм мікропенетрометром МВ-2 показано на Рис. 2 у ГЦЕ занурюють сталевий конус на глибину h , який має заданий кут при вершині $17^\circ 40'$. За величиною силового впливу на конус визначається чисельна характеристика пенетрації – питомий опір зрушенню R по формулі (1) (Зоценко та ін., 2003):

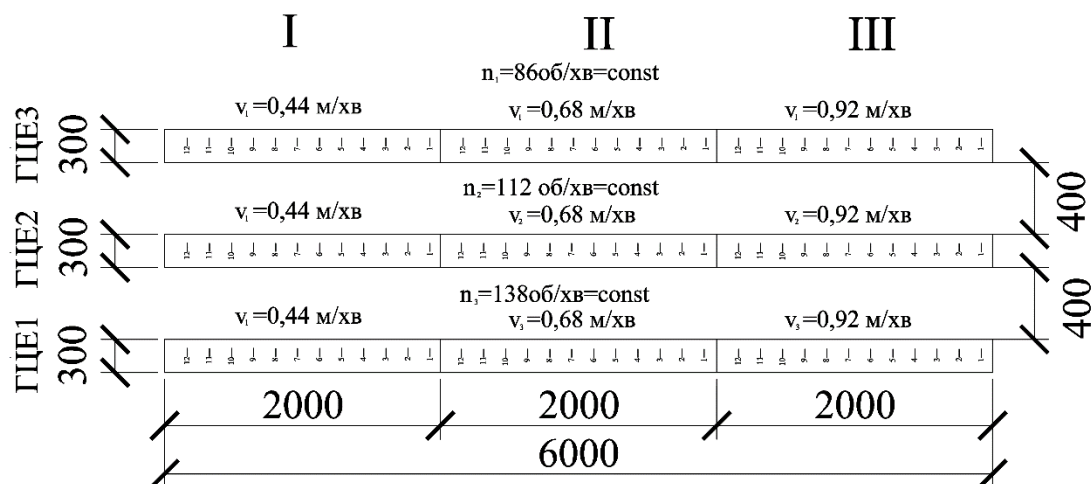


Рис.1. Схема розташування ГЦЕ та їх розмітка по ділянкам відповідно технологічним параметрам та точкам замірів характеристик.

Fig.1. Layout of HSCE and their segmentation into sections according to technological parameters and measurement points of characteristics.

$$R = \frac{P}{h^2}, \text{ МПа} \quad (1)$$

де: для заданих в технічних паспортних умовах приладу задається характеристика пружини пенетрометра $P=25,5\text{Н}$, h – глибина занурення сталевго конуса.

виконувалось в одних і тих же зонах ГЦЕ через кожні 7 діб, тобто виконано 4 етапи досліджень в часі до 28 діб твердіння. Процес вимірювання питомого опору зрушенню ГЦЕ показаний на рис. 4.

Визначення окремих значень питомого опору зрушенню R_i . На кожному етапі дослі-



Рис.2. Загальний вигляд пенетрометра.

Fig.2. General view of the penetrometer.

Дослідження ГЦЕ розпочалось на початковій стадії твердіння ґрунтоцементу. Для цього через 7 діб після утворення ГЦЕ вони були розкриті за допомогою екскаватора із подальшою ручною доробкою. Візуальний огляд розкритих ГЦЕ показав (рис. 3), що вони мають правильну круглу форму $\varnothing 300$ без порушення зовнішньої цілісності. Ділянки ГЦЕ були розмічені із інтервалами через 10см по всій довжині ГЦЕ.

Дослідження процесу набору міцності

джен, в кожній точці того чи іншого перерізу ГЦЕ зроблено по 5 уколів (занурень) сталевим конусом, по яким визначалось середньоарифметичне значення глибини занурення конуса у ґрунтоцемент – $h_{\text{іср}}$. Глибину занурення заміряли за допомогою голки, опущеної в лунку після уколу конуса. За середнім значенням $h_{\text{іср}}$ по формулі (1) визначались із середнім значенням питомого опору зрушенню $R_{\text{ср}}$. Всі ці значення заносились в таблиці.



Рис.3. Розкриті ГЦЕ.
Fig.3. Excavated HSCE.



Рис.4. Процес вимірювання питомого опору зрушенню пенетрометром.
Fig.4. The process of measuring shear resistance with a penetrometer.

Кожний ГЦЕ поділений на 3 ділянки довжиною по 2 м, які відповідають тій чи іншій швидкості лінійного переміщення бурозмішувача V_i при їх утворенні. Кожний із трьох ГЦЕ утворювався при відповідних трьох швидкостях обертань бурозмішувача n_i . Вище зазначене відображено на технологічній схемі показано на Рис.1. Кожна ділянка ГЦЕ з відповідною лінійною швидкістю розподілена на 12 інтервалів, на яких набиралася статистика по механічним характеристикам для

визначення впливу на них того чи іншого технологічного чинника.

На кожному етапі досліджень результати

вимірювань зводились у відповідні таблиці, будувались графіки зміни питомого опору зрушенню R при зміні лінійної швидкості $R=f[V]$ та при зміні швидкості обертань $R=f[n]$ бурозмішувача.

На рис. 5 наведений графік зміни питомого опору зрушенню після 28 діб твердіння ГЦЕ. Аналіз наведених графіків показує:

а) зі збільшенням кількості (швидкості) обертань бурозмішувача на всіх етапах твердіння питомий опір зрушенню R збільшується;

б) при підвищенні лінійної швидкості руху бурозмішувача питомий опір зрушенню R навпаки зменшується.

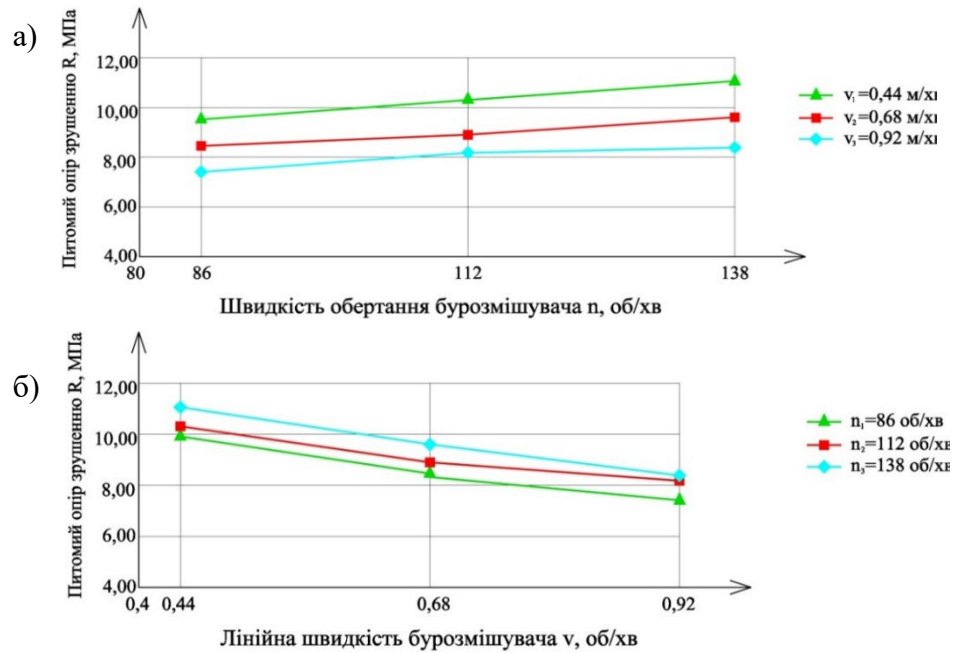


Рис.5. Графіки зміни питомого опору зрушенню: (а) в залежності від швидкості обертання бурозмішувача; (б) в залежності від лінійної швидкості бурозмішувача.

Fig.5. Graphs of the variation in specific shear resistance: (a) depending on the rotation speed of the drilling-mixing tool; (b) depending on the linear speed of the drilling-mixing tool.

Окрім того, досліджено питання набору питомого опору зрушенню горизонтальних ГЦЕ у часі. З цією метою побудовані графіки зміни питомого опору зрушенню у часі після твердіння на протязі 28 діб показано на Рис. 6. Аналіз графіків показує, що найбільша інтенсивність набору міцності відбувається впродовж 21 доби, потім зміцнення уповільнюється і після 24 діб питомий опір

зміцнення ґрунтоцементу, а через 5...7 діб твердіння можна виконувати роботи, наприклад по зведенню фундаментів.

Для перевірки якості утворених ГЦЕ здійснений контроль суцільності елементів та їх довжин акустичним методом із застосуванням програмно-технічного комплексу РІТ-В показано на Рис. 7. Даний комплекс розроблений в США і освоєний в ЗВ ДП НДІБК.

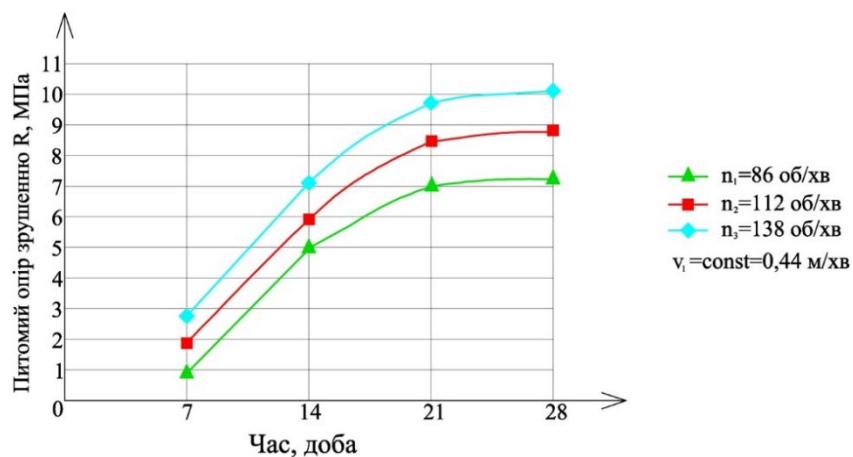


Рис.6. Набір питомого опору зрушенню ГЦЕ у часі.

Fig.6. Development of specific shear resistance of HSCE over time.

зрушенню досяг меж 8...10 МПа.

На основі даного графіка можна зробити висновки, що через 2...3 доби починається

Даний контроль показав, що порушення суцільності стовбура ГЦЕ не виявлені, а довжина елементів відповідає натурним вимірам.



а)



б)

Рис.7. Контроль якості ГЦЕ: (а) процес перевірки суцільності ГЦЕ; (б) загальний вигляд програмно-технічного комплексу РІТ-В.

Fig.7. Quality control of HSCE: (a) process of checking the integrity of soil-cement elements; (b) overall view of the PIT-W software and hardware complex.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Дослідженнями встановлено тенденції збільшення питомого опору зрушенню ґрунтоцементу до **11 МПа** при підвищенні швидкості обертання бурозмішувача до **138 об/хв**, а при збільшенні лінійної швидкості бурозмішувача до **0,92 м/хв** опір зрушенню навпаки зменшується до **7,8 МПа**.

Оптимальними технологічними параметрами технології горизонтального армування ґрунтів за БЗТ з урахуванням ґрунтових умов слід рахувати межі: швидкість обертання бурозмішувача **60...90 об/хв.**, лінійну швидкість бурозмішувача **0,4...0,7 м/хв.** з урахуванням ґрунтових умов, при яких досягаються потрібні механічні характеристики ґрунтоцементу та достатня продуктивність праці при підсиленні основ фундаментів.

Застосовано контроль якості ГЦЕ акустичним методом із застосуванням програмно-технічного комплексу РІТ-В, який показав, що порушення суцільності ствола ГЦЕ **не виявлені**, а довжина елементів **повністю** відповідає натурним вимірам.

ЛІТЕРАТУРА

1. Степура, І.В., Шокарев, В.С., Павлов, А.В., Трегуб, А.С., & Степура, С.І. (2009). Спосіб закріплення ґрунтів (Патент на ко-рисну модель №39173). Державний нау-ково-дослідний інститут будівельних конструкцій. Опубліковано в Бюлетені №3, 6
2. Степура, І.В., Шокарев, В.С., Павлов, А.В., Самченко, Р.В., Трегуб, А.С., & Степура, С.І. (2009). Установка для проходки в ґрунтах (Патент на корисну модель №42283). Державний науково-дослі-дний інститут будівельних конструкцій. Опубліковано в Бюлетені №19, 4 .
3. Самченко, Р.В., Степура, І.В., Шокарев, В.С., Павленко, В.П., Павлов, А.В., Юхи-менко, А.І., & Мунь, А.А. (2012). Буровий верстат (Патент на корисну модель №73991). Запорізька державна інженерна академія. Опубліковано в Бюлетені №19, 4.
4. Зоценко, Н.Л., Виников, Ю.Л., & Лар-цева І.І.(2011). Експериментальні дослі-дження, будівельні властивості ґрунтів.

Світ геотехніки, 3, 14-18.

5. Великодний, Ю.Й., Зоценко, М.Л., Ларцева, І.І., & Ягольник, А.М. (2008). Зміна характеристик міцності ґрунтів при їх закріпленні за допомогою цементації. *Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник*, 71(2), 51-60.
6. Zotsenko, M., Vynnykov, Y., Doubrovsky, M., Oganessian, V., Shokarev, V., Syedin, V., Shapoval, A., Poizner, M., Krysan, V., & Meshcheryakov, G. (2013). Innovative solutions in the field of geotechnical construction and coastal geotechnical engineering under difficult engineering-geological conditions of Ukraine. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 3, 2645-2648.
7. Fan, J., Wang, D., & Qian, D. (2018). Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 791-797.
8. Bruce, D.A. (2000). An introduction to the deep soil mixing methods as used in geotechnical applications (FHWA-RD-99-138). U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service, 143.
9. Зоценко М.Л., Коваленко В.І., Яковлєв А.В., Петраков О.О., Швець В.Б., Школа О.В., Біда С.В., & Виников Ю.Л. (2003). *Інженерна геологія: Механіка ґрунтів, основи і фундаменти* (Підручник). Полтава: ПНТУ. 446
- №42283). Derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut budivel'nykh konstrukttsii. Opublikovano v Byuleteni №19, 4 s. (in Ukrainian).
3. Samchenko, R.V., Stepura, I.V., Shokarev, V.S., Pavlenko, V.P., Pavlov, A.V., Yukhymenko, A.I., & Mun', A.A. (2012). Burovy verstak (Patent na korysnu model' №73991). Zaporiz'ka derzhavna inzhenerna akademiya. Opublikovano v Byuleteni №19, 4 s. (in Ukrainian).
4. Zotsenko, N.L., Vynnykov, Yu.L., & Lartseva, I.I. (2011). Eksperymental'ni doslidzhennya, budivel'ni vlastyosti hruntiv. *Svit heotekhniky*, 3, 14-18. (in Ukrainian).
5. Velykodnyi, Yu.Y., Zotsenko, M.L., Lartseva, I.I., & Yahol'nik, A.M. (2008). Zmina kharakterystyk mitsnosti hruntiv pry yikh zakriplenni za dopomohoiu tsementatsii. *Budivel'ni konstrukttsii: mizhvidomchyi nauково-tekhnichnyi zbirnyk*, 71(2), 51-60. (in Ukrainian).
6. Zotsenko, M., Vynnykov, Y., Doubrovsky, M., Oganessian, V., Shokarev, V., Syedin, V., Shapoval, A., Poizner, M., Krysan, V., & Meshcheryakov, G. (2013). Innovative solutions in the field of geotechnical construction and coastal geotechnical engineering under difficult engineering-geological conditions of Ukraine. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 3, 2645-2648.
7. Fan, J., Wang, D., & Qian, D. (2018). Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 791-797.
8. Bruce, D.A. (2000). An introduction to the deep soil mixing methods as used in geotechnical applications (FHWA-RD-99-138). U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service, 143 p.
9. Zotsenko M.L., Kovalenko V.I., Yakovlev A.V., Petrakov O.O., Shvets V.B., Shkola O.V., Bida S.V., & Vynnykov Yu.L. (2003). *Inzhenerna heolohiia: Mekhanika hruntiv*,

REFERENCES

osnovy i fundaments (Pidruchnyk). Poltava: PNTU. 446 s. (in Ukrainian).

Quality of formation of horizontal oil-cement elements components implemented by drilling-mixing technology

*Roman SAMCHENKO
Artem YUKHYMENKO*

Summary The article presents the results of comprehensive experimental studies on the formation process of horizontal soil-cement reinforcement elements (HSCEs), created using the deep soil mixing (DSM) technology, which is increasingly implemented in modern construction during the reconstruction and rehabilitation of deformed buildings and structures. In particular, the influence of two key technological parameters — the rotational speed of the mixing tool and its linear advancement speed — on the strength characteristics of the formed soil-cement elements is examined. The purpose of the study was to establish the patterns of change in the shear resistance of reinforced soil-cement depending on these parameters, enabling optimization of the technological process and improving the reliability of soil strengthening.

To achieve this goal, three test HSCEs were constructed under identical soil conditions on an experimental site. In each test element, the mixing tool operated at a fixed rotational speed but with three different linear advancement speeds, which allowed for the study of the combined influence of these factors. To objectively assess the strength of the soil-cement, a penetration test method was used with the micro penetrometer MV-2, which enabled non-invasive control of shear resistance over time. Tests were conducted at each section at 7-day intervals during the 28-day curing period of the soil-cement mixture, allowing the analysis of strength development dynamics and formation of reliable statistical dependencies.

The results showed that increasing the rotational speed of the mixing tool leads to higher shear resistance, which is associated with more intensive soil disaggregation, improved cement slurry penetration, and better mixing quality. In contrast, increasing the linear advancement speed results in a reduction in shear resistance, indicating shorter interaction time between the soil and the cement slurry, and therefore, lower reinforcement quality.

The obtained data confirm the feasibility of adjusting DSM parameters depending on the specific technical conditions of a construction site and the required level of soil reinforcement.

In addition, integrity testing of the formed HSCEs was carried out using an acoustic method based on the PIT-W hardware-software complex, which confirmed the absence of discontinuities and helped determine the actual length of the elements. Overall, the results of the study are of high practical significance, as they enable the improvement of the methodology for forming horizontal soil-cement reinforcement elements, enhance the efficiency of their use in dense urban environments, particularly in basement spaces, without disrupting the operation of existing buildings. The proposed recommendations may be taken into account when developing regulations for foundation soil strengthening works using deep soil mixing technology in various construction conditions.

Keywords. Soil reinforcement, deep soil mixing, ground improvement, mixing tool, rotational speed, linear speed, penetration test, shear resistance.