

## **ГРУНТОЦЕМЕНТ – КОНСТРУКТИВНИЙ І ГІДРОІЗОЛЯЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД**

Зоценко М.Л.

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка  
м. Полтава, Україна

**АНОТАЦІЯ:** В останні дається оцінка стану використання ґрунтоцементу як будівельного матеріалу в Україні. Розглянуто нові напрямки його впровадження при спорудженні основ, фундаментів і підземних споруд.

**АННОТАЦИЯ:** В статье приведена оценка состояния использования ґрунтоцемента как строительного материала в Украине. Рассмотрены новые направления его использования при строительстве оснований, фундаментов и подземных сооружений.

**ABSTRACT:** Assessment of the soil-cement usage as a structural material in Ukraine is given in this paper. New areas of soil-cement application in construction of bases, foundations and underground structures are considered.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ґрунтоцемент, роз'єднувальні екрани, армована основа, коефіцієнт корозійної стійкості, водонепроникність, розрахункова сейсмічність.

### **ВСТУП**

За останні роки ґрунтоцемент в Україні отримав широке розповсюдження як конструктивний матеріал при зведенні основ і фундаментів будівель й споруд. За цей час створені машини, переважно на базі бурових станків, для виготовлення ґрунтоцементу безпосередньо у масиві ґрунту, переважно бурозмішувальним способом, але серійне їх виготовлення в Україні не налагоджено. Використання закордонних зразків на сучасному етапі з точки зору економіки поки що недоцільне.

Проведені широкі дослідження фізико-механічних властивостей цього будівельного матеріалу, які встановили його достатню міцність, невелику стисливість, високі водонепроникність і корозійну стійкість, ефективність армування металевою арматурою тощо. Проектування і будівництво ґрунтоцементних основ і фундаментів передбачено державними будівельними нормами ДБН В.2.1-10-2009 зі змінами № 1 і № 2.

За неповними даними в Україні за останні 10 років на ґрунтоцементних основах і фундаментах побудовані більше 600 крупних об'єктів – багатопверхових житлових будинків, різного призначення силосів, окремих об'єктів гірничозбагачувальних комбінатів, об'єктів харчової промисловості, різних інженерних споруд тощо. Що торкається конструктивів основ і фундаментів, то це переважно армована основа просадочних і слабких ґрунтів, ґрунтоцементні набивні палі, утримуючі споруди зсувних і зсувонебезпечних схилів, різного призначення стіни у ґрунті тощо.

Накопичений досвід використання ґрунтоцементу, який виготовляється бурозмішувальним способом, у якості будівельного матеріалу показує, що ці можливості ще далеко не вичерпані.

Відомо, що в сучасних умовах будівництва в Україні перевагу має бурозмішувальний метод виготовлення ґрунтоцементу в масиві ґрунту [1,15,16,20]. Літературні дані свідчать про те, що механічні характеристики ґрунтоцементу, який виготовляється безпосередньо в масиві ґрунту, залежать від літології ґрунтів, вмісту цементу, показника води рН, водоцементного відношення ґрунтоцементної суміші, вмісту водорозчинних солей, гідрофобних добавок тощо [6]. Найбільш зручними для виготовлення ґрунтоцементу бурозмішувальним методом є лесові і лесовані ґрунти. Фізико-хімічні характеристики таких ґрунтів, а саме незначний вміст глинистих частинок, лужна реакція середовища, мала кількість легкорозчинних солей, швидка диспергація при водонасиченні за рахунок водорозчинних зв'язків між частинками – усі ці особливості лесових ґрунтів сприяють використанню їх при виготовленні ґрунтоцементу [11, 14, 17]. Механічні характеристики ґрунтоцементу, а саме призма міцність і модуль деформації, забезпечуються наявністю кристалізаційних зв'язків, які утворилися в процесі твердіння матеріалу. На швидкість затвердіння ґрунтоцементу суттєво впливає температура середовища. Модуль деформації залежить від щільності ґрунтоцементу. Експериментально доведено, що при однаковій призмівій міцності модуль деформації більший для зразків з більшою щільністю. Через два роки міцність ґрунтоцементу збільшується не менше, ніж в два рази в порівнянні з 28 добовим терміном. При твердінні ґрунтоцементу в повітряно-сухих умовах міцність його за два роки зменшується вдвічі. Цей ефект пояснюється процесом карбонізації  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при контакті з  $\text{CO}_2$

повітря з одного боку і припиненням твердіння суміші через відсутність води, яка необхідна при гідратації цементу. На підставі наведених даних можна зробити висновок про доцільність використання ґрунтоцементу тільки в підземних конструкціях, особливо при високому рівні ґрунтових вод [18, 19].

Фахівці матеріалознавці неодноразово відзначали, що ґрунтоцемент, незважаючи на його значну пористість, має аномально високу водонепроникність. Однак, за нашими відомостями, відсутні експериментальні підтвердження цього твердження. Для вивчення водонепроникності ґрунтоцементу к.т.н. Ларцевой І.І. [5] в лабораторних умовах були досліджені зразки ґрунтоцементу з лесового суглинку за методами «мокрої плями» і на приладі ВВ-2 типу «Агама». За результатами експерименту встановлено марка ґрунтоцементу за водонепроникністю W14. Коефіцієнт варіації при цьому склав  $v = 17,5\%$ , що відповідає загальним уявленням про неоднорідність властивостей ґрунтів. Відзначимо, що така висока водонепроникність ґрунтоцементу була досягнута при звичайному технологічному циклі його виготовлення, без внесення добавок і додаткового ущільнення. Слід зазначити, що значення водонепроникності ґрунтоцементу W14, певне методами «мокрої плями» і прискореним методом ВВ-2, співпало, що свідчить про достовірність отриманих експериментальних даних.

Зараз вже проведені дослідження використання ґрунтоцементу в конструкціях розділювальних екранів для нейтралізації впливу новобудов на існуючі будівлі і споруди; як гідроізоляційного матеріалу при облаштуванні амбарів для хімічно активних відходів буріння та експлуатації нафтогазових свердловин, каналізаційних колекторів і насосних станцій, побутових звалищ тощо; є проектні рішення ґрунтоцементних основ важких споруд в умовах районів будівництва з сейсмічною активністю 8...9 балів сейсмічності. Висока водонепроникність ґрунтоцементу відкриває широкі можливості для його використання при зведенні спеціальних споруд, які призначені для тривалого зберігання токсичних рідин в ємностях, які заглиблені нижче поверхні Землі.

Висвітленню вищенаведених шляхів використання ґрунтоцементу присвячена ця робота.

## **РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **Ґрунтоцементі роз'єднувальні екрани**

Канд. техн. наук Веденисовим А.В. [1, 2] проведено експериментальні і теоретичні дослідження впливу новобудов на існуючі будівлі в

умовах стисненої міської забудови з використанням ґрунтоцементних роз'єднувальних екранів на прикладі послідовного будівництва багатого поверхового чотирьох секційного житлового будинку, розташованого у центральній частині м. Полтави. Це Полтавське лесове плато з абсолютними відмітками поверхні Землі 155,0...156,0 м. Рівень водоносного горизонту знаходиться на глибині від 4,81 до 5,21 м, майданчик підтоплений. Просадка від власної ваги ґрунту відсутня. Житловий будинок складається з чотирьох семиповерхових окремих секцій. Кожна секція має цегляні несучі стіни і збірні залізобетонні перекриття. Секції розташовані впритул, відстань між крайніми осями секцій складає 800 мм. До будівництва кожної наступної секції приступали після завершення основних будівельних робіт на попередній. Будівництва першої секції розпочато у вересні 2006 року. Інженерно-геологічний розріз з будівлею наведені на рис. 1.

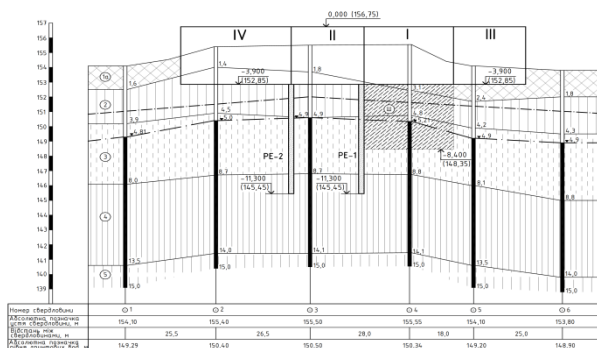


Рис. 1. Інженерно-геологічний розріз по I-I:  
I, II, III, IV – секції будинку; PE-1, PE-2 – роз'єднувальні екрани; III – штучна основа

Фундаменти цегляних стін стрічкові залізобетонні монолітні. Безпосередньо вони спираються на суглинок лесовий, жовто-бурий, твердий, високопористий, карбонатний, просадочний. Потужність шару під подошвою фундаменту 1,7...2,1 м. Модуль деформації суглинку  $E = 10,8$  МПа. Лише під секцією I цей шар підсилений шляхом армування його вертикальними ґрунтоцементними елементами, що виконано за бурозмішувальним методом. Внаслідок його модуль деформації за даними штампових випробовувань збільшився і склав  $E = 22,4$  МПа.

Роз'єднувальні екрани з січних ґрунтоцементних елементів довжиною 7,4 м були влаштовані між секціями I і II, а також II і IV, між секціями I і III екран не влаштовували. Таким чином сформовані три різні

умови взаємодії впливу новобудови на існуючу будівлю:

- новобудова (II) на природній основі, існуюча будівля (I) на поліпшеній основі, між ними є роз'єднувальний екран (PE-1);
- новобудова (IV) на природній основі, існуюча будівля (II) на природній основі, між ними є роз'єднувальний екран (PE-2);
- новобудова (III) на природній основі, існуюча будівля (I) на поліпшеній основі, між ними немає роз'єднувального екрану.

Польовий експеримент з визначення впливу новобудови на існуючі будівлі полягав у періодичному визначення осідань їх основ за допомогою нівелювання поверхневих марок за III класом точності. Для цього на усіх секціях будівлі у характерних місцях на рівні цоколя несучих стін були встановлені такі марки. На кожній станції нівелювання проводився контроль вимірювань шляхом визначення різниці перевищень, отриманих двічі, які не повинні бути більшими 2 мм. Допустима нев'язка ходу при кількості перевищень більше 15 не повинна перевищувати  $2,5\sqrt{n}$  мм, де  $n$  – кількість перевищень у ході одного напрямку. Довготривалі геодезичні спостереження за осіданнями будівель і споруд дозволяють чітко контролювати їх стан в залежності від тих чи інших факторів, а саме, однозначно оцінити фактор впливу новобудови на існуючу будівлю за зміною інтенсивності протікання осідань основи. Спостереження проводяться і зараз.

Дані проведених спостережень дозволили зробити такі висновки. Наявність роз'єднувального екрану знижує вплив новобудови на осідання існуючої будівлі, при цьому встановлено, що цей процес залежить від додаткових умов. Одна з них полягає у тому, що роз'єднувальний екран сідає разом з новобудовою і зменшити це осідання можливо лише зануренням його на усю стисливу товщу основи фундаменту, при цьому бажано спирати екран на нестисливий ґрунт. У нашому випадку при стисливій товщі стрічкового фундаменту біля 16 м, глибина закладення екрану склала лише 7,4 м. Інша полягає у тому, що підсилена основа відповідно сідає менше від природної при впливі новобудови. При наявності роз'єднувального екрану секція I на підсиленій основі отримала додаткове осідання удвічі менше (1,7 см) ніж секція II на природній основі (3,2 см).

На теперішній час з урахуванням впливу новобудов осідання секцій комплексу будівель склало I – 10,5 см; II – 13,9 см; III – 10,8 см; IV – 9,8 см. Слід враховувати, що секції III і IV не підпадали під вплив новобудов, термін впливу осідання у них менший, середній тиск під підшвою фундаментів цих секцій  $p = 180$  кПа, у той час як для секції I цей тиск складає  $p = 280$  кПа. Усе це свідчить про доцільність підсилення основи будівель і споруд з метою зниження впливу новобудов на існуючі будівлі і

споруди поряд з методом влаштування роз'єднувальних екранів.

При використанні аналітичного методу розрахунку впливу ново-будови на існуючу будівлю були встановлені деякі недоліки, які не дозволяють надійно використовувати метод для практичного проектування. На наш погляд, для цього слід використати метод скінчених елементів, з алгоритмом пружно-пластичної задачі нелінійної механіки ґрунтів. Для цього можливо скористатися одним з відомих програмних комплексів для персонального комп'ютера.

Результати обчислень за трьома розрахунковими схемами взаємодіями секції будівлі зведені у табл. 1 разом з результатами натурних вимірів осідань секцій будівлі. Наведені дані показують задовільну збіжність результатів довготривалих спостережень за осіданнями секцій багатопверхової житлової будівлі з даними розрахунків за програмним комплексом FEMAP with NX.Nastran [2].

Таблиця 1

Осідання фундаментів за моделюванням та даними спостережень

Об'єкти	№ марок	Осідання фактичне, $S_f$ , мм	Осідання за моделюванням, $S_m$ , мм
I-черга– II-черга	M110 M206	110	128
I-черга– III-черга	M102 M308	130	133
II-черга– IV-черга	M204 M410	120	129

Відхилення результатів, отриманих шляхом математичного моделювання та шляхом натурних спостережень складає 16,4 %, що свідчить про коректний вибір та побудову геометричних моделей реальних будівель.

Порівняння залежностей «осідання – навантаження», які отримані за даними розрахунків і експериментальним шляхом, показало достатній збіг результатів. Це свідчить про правомірність вибору і використання пружно-пластичної моделі ґрунту і підтверджує достовірність встановлених закономірностей зміни НДС основ існуючих будівель захищених ґрунто-цементними роз'єднувальними екранами, які виготовляються за бурозмішувальним методом. Використаний метод розрахунків дозволив виконати рішення поставлених задач за однією моделлю ґрунту без припущень, які раніше приймалися із експериментів.

## Грунтоцемент як гідроізоляційний матеріал при облаштуванні підземних сховищ хімічно агресивних і токсичних відходів

З метою підтвердження можливості використання ґрунтоцементу в якості протифільтраційного екрану підземних сховищ хімічно агресивних і токсичних відходів виробництва були проведені дослідження водонепроникності [3, 6], міцності та корозійної стійкості зразків ґрунтоцементу, витриманих у різних хімічних розчинах, та зроблено аналіз отриманих результатів.

Розглянемо це питання на прикладі влаштування шламових амбарів для буріння свердловин. У світовій практиці відомі такі типи протифільтраційних екранів шламових амбарів як: одно- та двошаровий глинистий, із залізобетонних плит, із полімербетону, бетоноплівковий, асфальтобетонний, бетон та плівка тощо. Але за рахунок багатшаровості таких екранів є додаткові витрати на матеріали (пісок, щебінь, бетон та ін.) та їх доставку на буровий майданчик, що є не економічним і не завжди надійним. Вдосконалення конструкцій протифільтраційних екранів вимагає пошуку нових рішень більш економічних та довговічних.

Для вирішення цієї проблеми була розроблена нова конструкція шламового амбару з протифільтраційним екраном із ґрунтоцементу, де стіни котловану шламового амбару ізолюють вертикальною протифільтраційною завісою з ґрунтоцементу, виготовленою за допомогою бурозмішувальної технології без виймання ґрунту.

Розглянемо конструкцію шламового амбару із ґрунтоцементним протифільтраційним екраном, що виготовляється за бурозмішувальним методом і наведена на рис. 2.

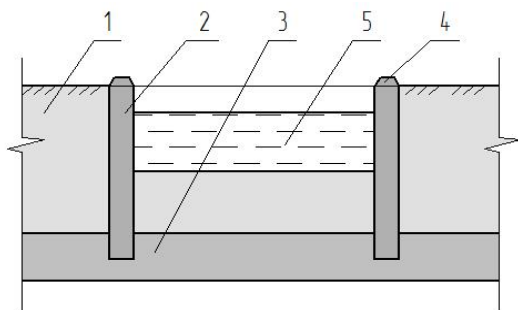


Рис. 2. Шламовий амбар з протифільтраційним екраном заглубленим у водотривкий шар ґрунту: 1 – ґрунт; 2 – вертикальна протифільтраційна завіса; 3 – водотривкий шар ґрунту; 4 – обвалування із мінерального ґрунту; 5 – буровий шлам

Така конструкція дає можливість не влаштувати горизонтальний протифільтраційний екран днища шламового амбару, функцію якого буде виконувати водотривкий шар ґрунту. Вертикальна протифільтраційна завіса виготовляється з січних ґрунтоцементних елементів у два і більше рядів.

Для обґрунтування надійності ґрунтоцементного протифільтраційного екрану були розглянуті хімічні складові відходів буріння та експлуатації нафтогазових свердловин, які контактують в шламових амбарах з ґрунтоцементним протифільтраційним екраном і можуть викликати II та III види його корозії. До II виду корозії відносяться процеси, що розвиваються під дією води, яка містить речовини, що вступають у хімічну реакцію з цементним камінням. Утворені при цьому продукти реакції виносяться водою, або виділяються на місці реакції у вигляді аморфних мас, які не володіють в'язучими властивостями. До III виду можуть бути віднесені, наприклад, процеси корозії, пов'язані з дією на бетоніти різних кислот і солей. До III виду корозії відносяться об'єднанні процеси корозії, що викликана обмінними реакціями зі складовими цементного каменю. Продукти таких реакцій кристалізуються у порах і капілярах і викликають руйнування цементного каменю. До цього ж виду відносять процеси корозії зумовлені відкладанням у порах каменю солей, які виділяються з розчинів, що випаровуються, та насичують ґрунтоцемент. Зазвичай на ґрунтоцементні конструкції одночасно діють багато агресивних факторів, але один з них є основним – це той, що викликають корозію II виду. Внаслідок проведеного аналізу у відходах буріння свердловин виділені три агресивних хімічних реагенти з максимальною концентрацією:

- 2,8 % розчин каустичної соди (NaOH);
- 4,0 % розчин кальцинованої соди (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>);
- 15,0 % розчин калію хлористого (KCl).

Ці хімічні речовини відносяться до III і IV класів екологічної небезпеки і вірогідно є найбільш руйнівними (агресивними) до ґрунтоцементу. Швидкість корозійних процесів залежить від багатьох факторів. Концентрація агресивного агента не однозначно впливає на швидкість корозії, але в більшості випадків з підвищенням концентрації корозія прискорюється.

Інженер Тимофєєва К.А. [9,10]. провела експериментальні дослідження хімічної стійкості ґрунтоцементу в лабораторних умовах. Дослідні зразки ґрунтоцементу були виготовлені з суглинку лесованого. Використовувався портландцемент марки ПЦ-П/Б-Ш-400 і гідро-карбонатна-кальцієва, слабо лужна вода з показником рН = 8. Уміст портландцементу М400 складав 20% від маси сухого ґрунту. Водоцементне відношення В/Ц



= 1,5. Зразки ґрунтоцементу формувалися у спеціальних металевих циліндричних формах з розмірами  $h = 15,0$  см,  $d = 15,0$  см та кубічних формах з розмірами  $3,0 \times 3,0 \times 3,0$  см. На другу добу після формування зразки витягалися з форм і зберігалися до випробування у воді протягом 28 діб (час набору міцності). Виготовлені зразки були розподілені на чотири групи по 30 зразків та розміщені у ємності з приготовленими хімічними розчинами найбільш агресивних складових бурового шламу, і для порівняння у ємність з водою. Після тужавіння ґрунтоцементу у воді на протязі 28 діб зразки були розміщені у такі ємності: I – з водопровідною водою ( $H_2O$ ); II – з 2,8 % розчином каустичної соди ( $NaOH$ ); III – з 4,0 % розчином соди кальцинованої ( $Na_2CO_3$ ); IV – з 15,0 % розчином калію хлористого ( $KCl$ ).

Визначення марки ґрунтоцементу за водонепроникністю (зразки циліндричної форми) проводилося стандартним методом «мокрої плями» на установці УВФ-6. Водонепроникність визначається граничним тиском води, при якому вона ще не здатна просочуватись крізь матеріал. Результати лабораторних випробовувань зразків-циліндрів ґрунтоцементу на водонепроникність наведені на рис. 3, де зведені значення марки за водонепроникністю зразків ґрунтоцементу залежно від терміну та середовища витримки.

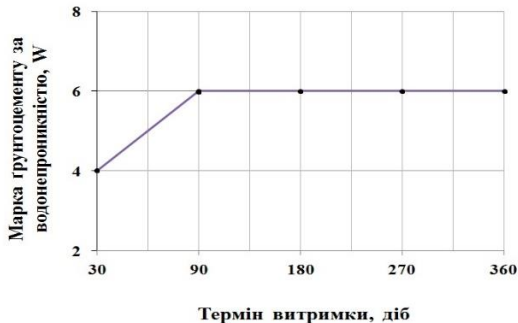


Рис. 3. Графік залежності марки ґрунтоцементу за водонепроникністю  $W$  від терміну витримки у хімічних розчинах

Як свідчить графік на рис. 3, через 30 діб тужавіння ґрунтоцементу у воді його марка за водонепроникністю склала  $W = 4$ . Наступні 60 діб зразки витримували партіями у ємностях з різними (дивись вище) хімічними розчинами. В усіх розчинах за цей період марка ґрунтоцементу за водонепроникністю збільшилася до  $W = 6$ . Подальше витримування зразків ґрунтоцементу у тих же розчинах не вплинуло на величину  $W$  на протязі року. Наведені результати експериментальних досліджень водонепроникності ґрунтоцементу, які були витримані на протязі року у хімічно

активному середовищі, свідчать про високу хімічну стійкість ґрунтоцементу і його високу водонепроникність. Стійкість ґрунтоцементу до впливу агресивного середовища прийнято оцінювати коефіцієнтом корозійної стійкості  $K_c$ , який дорівнює відношенню границі міцності при стиску зразків які були піддані впливу такого середовища  $R_a$ , до границі міцності при стиску контрольних зразків які зберігали

$$K_c = R_a / R_b \quad (1)$$

За значенням  $K_c$  визначається рівень корозійної стійкості ґрунтоцементу: високої стійкості ( $K_c > 0,8$ ), стійкий ( $K_c = 0,5 - 0,8$ ), відносно стійкий ( $K_c = 0,3 - 0,5$ ) і нестійкий ( $K_c < 0,3$ ). У таблиці 2 зведені показники коефіцієнту корозійної стійкості зразків-кубиків та зразків-циліндрів ґрунтоцементу відповідно, при різних термінах витримки у хімічних розчинах.

Таблиця 2

Визначення коефіцієнту корозійної стійкості зразків ґрунтоцементу при різних термінах витримки у хімічних розчинах

Середовище витримки	Міцність, МПа		Коефіцієнт стійкості, $K_c$	Стійкість
	$R_a$	$R_b$		
Термін витримки 30 діб				
2,8 % NaOH	5,29	5,53	0,96	Висока
4,0 % Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	5,13	5,53	0,93	Висока
15,0 % KCl	4,78	5,53	0,86	Висока
Термін витримки 90 діб				
2,8 % NaOH	6,07	6,39	0,95	Висока
4,0 % Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	5,84	6,39	0,91	Висока
15,0 % KCl	5,53	6,39	0,85	Висока
Термін витримки 180 діб				
2,8 % NaOH	6,53	6,84	0,96	Висока
4,0 % Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	6,06	6,84	0,89	Висока
15,0 % KCl	5,69	6,84	0,83	Висока
Термін витримки 270 діб				
2,8 % NaOH	7,12	7,66	0,93	Висока
4,0 % Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	6,73	7,66	0,88	Висока
15,0 % KCl	6,23	7,66	0,81	Висока
Термін витримки 360 діб				
2,8 % NaOH	7,33	7,87	0,93	Висока
4,0 % Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	6,89	7,87	0,88	Висока
15,0 % KCl	6,39	7,87	0,81	Висока

Експериментальними дослідженнями в лабораторних умовах встановлено, що відходи буріння свердловин можуть викликати корозію вилуговування у ґрунтоцементі, або кислотну корозію, які спричиняють розчинення та винесення з цементного каменю гідроксиду кальцію  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , що супроводжується порушенням його структури і зменшенням щільності та міцності. Уперше експериментально визначено коефіцієнт хімічної стійкості  $K_c$  зразків ґрунтоцементу, який вказує стійкість матеріалу до впливу хімічного середовища. Результати показали повільне поступове зниження показника  $K_c$  ґрунтоцементу в залежності від періоду витримки у агресивному середовищі. При цьому коефіцієнт хімічної стійкості  $K_c$  залишається у межах, що характеризує ґрунтоцемент, як хімічно високо стійкий ( $K_c > 0,8$ ).

Зараз розробляється проект гідроізоляції каналізаційного колектору довжиною 1400 м з перепадом глибин 5-9 м. Принципова схема ізоляції колектору наведена на рис.4. Порядок його влаштування складається, при відсутності природного водотриву (шару глини), з цементуванні підстильного шару (2) – влаштування штучного водотриву – товщиною 2,0 м. На наш погляд, для цього слід використовувати струменеву цементацію ґрунтів. Наступним етапом виконується водонепроникний екран (3) з вертикальних січних ґрунтоцементних елементів у два і більше рядів. Кількість рядів приймається в залежності від глибини закладання колектору. Коли екран завершено, виймається ґрунт між екранами до проектної відмітки, укладаються труби колектору і влаштовується залізобетонне укриття з оглядовими колодязями. Після чого виконується зворотна засипка. Укриття можна виконати стандартним способом, або у вигляді тунелю, як це показано на рис. 4. Тоді може відпасти необхідність у оглядових колодязях.

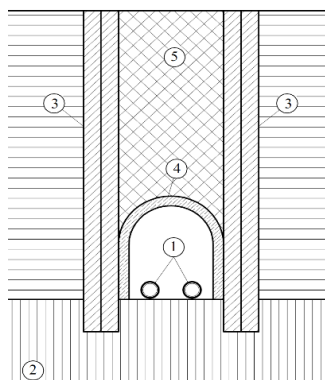


Рис. 4. Приклад влаштування ізоляції колектору: 1 – колектор, 2 – природний або штучний водотрив, 3 – ґрунтоцементний водонепроникний екран, 4 – залізобетонне укриття, 5 – зворотна засипка

Такий метод влаштування колекторів доцільний з точки зору екології, а також виключить утворення підземних порожнин внаслідок прориву напірних трубопроводів та їх наслідків.

### **Армування основ будівель і споруд ґрунтоцементними елементами з метою зниження сейсмічного впливу**

У якості прикладу розглянемо проект «Підсилення основи фундаменту резервуару РВСП-20000 №5 НПС «Августівка» складений доцентом Харченко М.О. В адміністративному відношенні майданчик будівництва знаходиться південніше с. Августівка Беляївського району Одеської області. Складність інженерно-геологічних умов даного майданчику характеризується наявністю на глибині 7,6 м від поверхні землі м'якопластичних і текучих суглинків і супісків (ІГЕ-4, ІГЕ-5, ІГЕ-6), які відносяться до слабких і сильно стисливих ґрунтів (модуль деформації коливається в межах  $E=3...5$  МПа). Загальна потужність цих ґрунтів складає приблизно 12...13 м. Підстеляються слабкі і сильно стисливі ґрунти твердою і напівтвердою глиною (ІГЕ-8 потужністю приблизно 5 м) на глибині 21,7...23,9 м. Нормативна сейсмічна інтенсивність ділянки будівництва для споруди класу відповідальності (наслідків) СС3 складає 8 балів (за картою ЗСР-2004-С). Із урахуванням третьої категорії ґрунтів за сейсмічними властивостями (для 10-ти метрового шару) розрахункова інтенсивність сейсмічних впливів буде складати 9 балів.

При будівництві у складних інженерно-геологічних умовах в якості фундаментів доводиться використовувати фундаменти глибокого закладення у вигляді паль, які прорізають слабкі і спиратися на міцні ґрунти. У разі врахування сейсмічних впливів кількість чи армування паль значно зростає, оскільки при землетрусах на них будуть передаватися значні горизонтальні зусилля. У таких випадках ефективним методом є розділення паль і фундаментної плити резервуару і влаштування між ними демпферної подушки з піску чи щебеню [8], що добре себе зарекомендував при землетрусах у Чилі в 60-х роках минулого століття. За такої конструкції ми будемо мати не пальовий фундамент, а ґрунтову основу, яка армована палями. Доречно зауважити, що таке рішення задовольняє вимогам міцності і стійкості у разі землетрусів, але малоефективне при статичних навантаженнях. Влаштування паль для армування ґрунтової основи не лише є доволі витратним, але й достатньо трудомістким. Тому ефективним рішенням є заміна паль на ґрунтоцементні елементи. Таким чином, зменшення впливу динамічного навантаження на надземну частину споруди можливо досягти завдяки розробленню комплексних заходів покращення геотехнічних властивостей слабких основ, що зменшує

прискорення її коливань при сейсмічних та інших (аварійних) впливах. Такий підхід дасть змогу створити оптимальну сейсмостійку систему «штучна основа – фундамент – резервуар», що суттєво зменшить загальну вартість об'єктів зберігання нафти і нафтопродуктів, мінімізувавши технічні та екологічні ризики при їх зведенні та експлуатації».

За рахунок цементації (влаштування вертикальних ґрунтоцементних елементів) є можливість водонасичені піски перетворити у ґрунти, що за своїми властивостями будуть подібні напівскельним, в яких **швидкість поширення сейсмічних хвиль** збільшиться до 800 м/с. При динамічних (сейсмічних) впливах ґрунт не буде розріджуватися, додатково ущільнюватися тощо. При цьому за рахунок того, що швидкість поширення сейсмічних хвиль (як поперечних, так і повздовжніх) буде значною в межах зцементованого ґрунту, то буде мала амплітуда коливань і тим самим зменшиться сейсмічна активність даної ділянки. Для підтвердження динамічних властивостей зцементованої основи необхідно буде виконати натурні вимірювання швидкості поширення сейсмічних хвиль в них і ґрунтах з природними властивостями [12, 13, 18]. За таких умов передбачено влаштувати штучну основу (рис. 5) армуванням вертикальними ґрунтоцементними елементами (ГЦЕ).

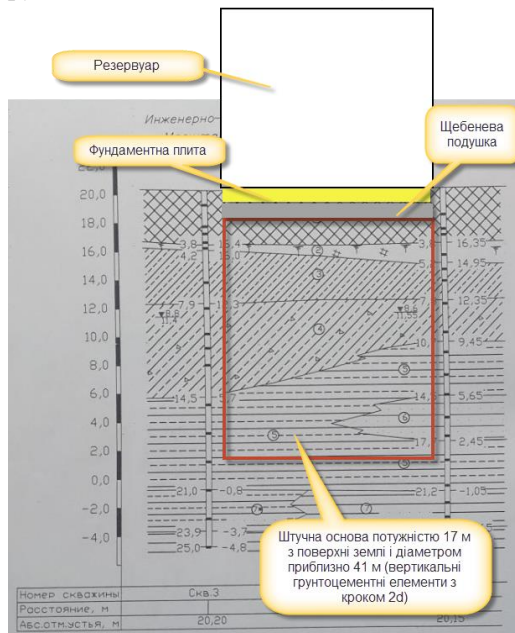


Рис. 5. Розрахункова схема системи «ґрунтовий масив – підсилена основа – щебенева демпферна подушка – фундаментна плита – резервуар»

Довжина, діаметр та крок ГЦЕ визначався ітераційним методом. Основним критерієм розрахунку було забезпечення менших за критично допустимі значення осідання центру та крайніх розрахункових точок фундаментної плити, крену резервуару, а також несучої здатності основи при розрахункових сейсмічних впливах. У результаті розрахунків (більш детально див. розділ 3) встановлено, що діаметр ГЦЕ – 500 мм, довжина – 17 м, крок – 1,0 м (2d). Дане рішення також знижує сейсмічну небезпеку за рахунок збільшення модуля пружності (деформації) і характеристик міцності основи та підвищення швидкості поширення сейсмічних хвиль (як поперечних, так і повздовжніх). Це забезпечить менші прискорення коливання основи на контакті з фундаментами. Для зменшення динамічних горизонтальних навантажень на основу від коливання резервуару передбачено розділити фундаментну плиту від штучної основи щебеневою подушкою. Ця подушка також додатково служить демпфером даної системи.

Для підтвердження правильності даного рішення передбачено виконати моделювання напружено-деформованого стану (НДС) системи «грунтовий масив – підсилена основа – щебенева демпферна подушка – фундаменти – резервуар» методом скінченних елементів (МСЕ) із урахуванням розрахункового сейсмічного впливу.

Між підшовою фундаменту резервуару та верхнім зрізом ГЦЕ влаштовується щебенева подушка потужністю 600...1300 мм (див. креслення) з щебеню фракції 20–40 мм, яка має ширину на 1,0 м більшу у кожен бік від бічних граней ГЦЕ крайніх рядів. Основна функція щебеневої подушки – рівномірно розподілити навантаження від фундаментної плити на ГЦЕ і на ґрунт, що затиснутий між ними, а також гасити коливання резервуару при землетрусах. Просторова розрахункова схема системи «підсилена основа – щебенева подушка – фундаменти» наведена на рис. 6.

За результатами розрахунків і моделювання варіант фундаментна плита на штучній ґрунтоцементній основі є сейсмічністюїким і коштує менше за пальовий варіант. При влаштуванні ґрунтоцементної основи зменшуються сейсмічні ризики експлуатації резервуару за рахунок зменшення прискорення коливань поверхні штучної основи при землетрусах, а також за рахунок підвищення характеристик її міцності і деформативності.

Згідно з аналітичними розрахунками за методикою норм середнє осідання центру фундаментної плити на підсиленій основі складає –  $S = 10,9$  см, що менше за гранично допустиме  $S_{\max,u} = 20$  см як для резервуарів об'ємом менше  $30000 \text{ м}^3$  за нормами. За результатами моделювання

середнє осідання центру фундаментної плити на підсиленій основі складає –  $S=15$  см, що також менше за  $S_{\max,u}=20$  см.

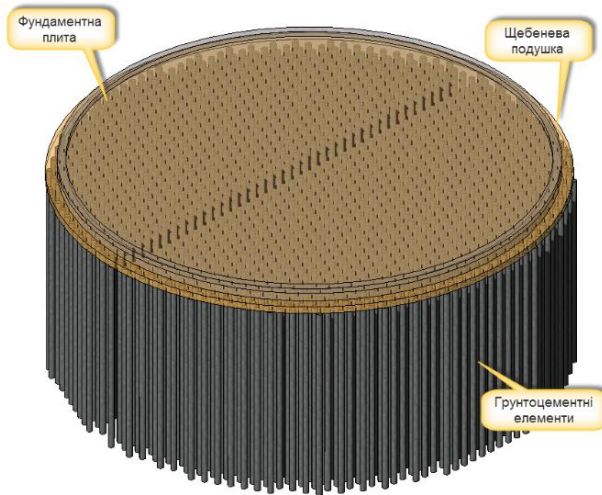


Рис. 6. Просторова розрахункова схема системи «підсилена основа – щебенева подушка – фундаменти»

Середні осідання підсиленої основи контурного кола фундаменту коливаються в межах  $S=3,2\dots4,5$  см. Різниця осідання центру основи і середнього осідання контурного кола складає 6,4 см і є не меншою за нуль і не більшою за  $(v_0-0,002)R$ . Крен резервуару  $i=0,0003$  не перевищує гранично допустимий  $i_{\max,u} = 0,003$  згідно з нормами для резервуарів об'ємом менше  $30000$  м<sup>3</sup> і з понтоном або плаваючою покрівлею. Для кожної розрахункової точки контурного кола виконується умова:

$$\Delta u_i = \left| u_i - 0,5(u_{i+1} + u_{i-1}) \right| \leq 0,016 \frac{l}{K}. \quad (2)$$

Тиск на позначці низу штучної основи  $p = 382,2$  кПа менший за розрахунковий опір  $R = 573,1$  кПа слабкої основи (ІГЕ-5 з модулем деформації  $E=3$  МПа).

У результаті чисельного моделювання при врахуванні сейсмічних впливів отримано, що максимальне горизонтальне переміщення верху резервуару складає 6 мм, низу – 10 мм. Різниця переміщень низу відносно верху при цьому складає 16 мм, що менше за 20 мм і тому є допустимим.

У результаті аналітичного розрахунку фундаменту на зрушення по підшві за методикою норм отримано, що опір зрушення значно більший

за сили зрушення і при цьому виконується вимога п. 7.10.6 [5]  
 $\Sigma F_{s,a} = 140012 \text{ кН} \leq (\gamma_c \Sigma F_{s,r}) / \gamma_n = 0,9 \cdot 186706 / 1,2 = 140030 \text{ кН}$  140030 кН.

У результаті аналітичного розрахунку фундаменту за несучою здатністю основи отримано, що вертикальна складова позacentрового навантаження в особливому сполученні, яке передається фундаментом, менша за вертикальну складову сили граничного опору основи при сейсмічних впливах

$$N_a = 184832 \text{ кН} \leq \gamma_{c.eg} \cdot N_{u.eg} / \gamma_n = 0,7 \cdot 6212173 / 1,2 = 3623767 \text{ кН}.$$

Фундаментна плита на щебеневій подушці товщиною 1300 мм і на штучній ґрунтоцементній основі (ГЦЕ діаметром Ø500 мм, довжиною 17,0 м, крок 1000x1000 мм) задовольняє вимоги нормативних документів при статичних навантаженнях і сейсмічних впливах.

## ВИСНОВКИ

На підставі викладеного матеріалу можливо зробити висновок про те, що в Україні відмічається зростання використання ґрунтоцементу у загальному обсягу будівництва основ, фундаментів і підземних споруд. Окрім армованих основ і ґрунтоцементних набивних паль ґрунтоцемент з успіхом використовується у якості розділювальних екранів для захисту існуючих будівель і споруд від впливу новобудов. При цьому маємо не тільки економічні переваги проти залізобетонних паль, шпунта і металевих труб, а також відзначається їх перевага саме у захисних якостях за рахунок варіювання площею спірання екрану на ґрунт.

Високі водонепроникність і хімічна стійкість ґрунтоцементу, а також досконала технологічність його виготовлення за бурозмішувальним методом ставлять ґрунтоцемент на перше місце як гідроізоляційний матеріал при спорудженні підземних сховищ токсичних і хімічно активних відходів побуду і виробництва. Запропоновані конструкції шламових амбарів для буріння і експлуатації нафтогазових свердловин. Розглянута можливість гідроізоляції підземних каналізаційних колекторів за допомогою тунелів, що виготовлені з ґрунтоцементу бурозмішувальним способом. Таким чином можливо захищати довкілля від звалищ, розтікання нафти, аміаку, води тощо при аваріях відповідних колекторів. Цей метод також захистить міста від розмиву ґрунтів і утворення підземних порожнин у містах України, які утворюються при проривах напірних колекторів.

Фундаментна плита на щебеневій подушці товщиною 1300 мм і на штучній ґрунтоцементній основі (ГЦЕ діаметром Ø500 мм, довжиною 17,0 м,



крок 1000x1000 мм) задовольняє вимоги нормативних документів при статичних навантаженнях і сейсмічних впливах.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Веденісов А.В. Захисні роз'єднувальні екрани з ґрунтоцементу в умовах стисненої міської забудови. / Веденісов А.В. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. - Випуск 24. - Рівне, 2012.
2. Винников Ю.Л. Модельные исследования эффективности ґрунтоцементных разделительных экранов для защиты зданий от влияния нового строительства / Ю.Л. Винников, А.В. Веденісов // Вестник: сб. научн. трудов. – Пермь, 2014.
3. Дослідження водонепроникності ґрунтоцементу / [М.Л. Зоценко, О.І. Наливайко, І.І. Ларцева, О.М. Панько] // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: ДНУЗТ, 2010. – Вип. 32. – С. 43–48.
4. Кранцфельд Я.Л. О конструктивных решениях экранов для инженерной сейсмозащиты территории объектов строительства / Я.Л. Кранцфельд // Основания, фундаменты и механика ґрунтов. - 2011. – №1. – С. 13–17.
5. Крысан В.И. Перспективное направление применения технологий бурения в строительстве / Крысан В.И. // Научный вестник Национального горного университета (Техника и технология разведки месторождений полезных ископаемых). – Днепропетровск: НГУ. - 2004. - № 5. - С. 93 – 95.
6. Ларцева І.І. До визначення фізико-механічних характеристик ґрунтоцементу / І.І. Ларцева, М.В. Петруняк // Зб. наук. пр. (галузеве машинобуд., буд-во). – Полтава: ПолтНТУ, 2010. – Вип. 2 (27). – С. 127–134.
7. Петраш О.В. Забезпечення ефективної роботи підземних конструкцій, які виготовлені з ґрунтоцементу / О.В. Петраш // Зб. наук. праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – Вип. 4(34). – С. 178 – 183.
8. Степанчук Н.В. Влияние армирования ґрунтов на изменение напряженно-деформированного состояния ґрунтового массива при сейсмических воздействиях / Н.В. Степанчук // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К.: НДІБК, 2011. – Вип. 75. – Кн. 2. – С. 622 – 630.
9. Тимофеева К.А. Застосування ґрунтоцементу як протифільтраційного екрану амбарів-шламонакопичувачів для відходів буріння та експлуатації нафтогазових свердловин / К.А. Тимофеева // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Вип. 4(34). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – С. 67 – 70.
10. Тимофеева К.А. Лабораторні дослідження впливу агресивних складових бурового шламу на фізико-механічні характеристики ґрунтоцементу / К.А. Тимофеева // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Вип. 1(40). – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – С. 259 – 267.

11. Токин А.Н. Фундаменты из цементогрунта / А.Н. Токин. - М.: Стройиздат. 1984. - 184 с.
12. Уздин А.М. Об эффективности применения экранов в грунте для сейсмозащиты зданий и сооружений / А.М. Уздин, М.В. Фрезе // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2011. – №1. – С. 17–19. (критика статті Кранцфельд Я.Л. і чисельний розрахунок).
13. Уздин А.М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений / А.М. Уздин, Т.А. Сандович, Аль-Насер-Мохомад Самихмин. – СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1993. – 176 с.
14. Characteristics of manmade stiff grounds improved by drill-mixing method / [M. Zotsenko, Yu. Vynnykov, I. Lartseva et al.] // Proc. of the 15th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Athens, 2011). – Amsterdam: IOS Press, 2011. – P. 1097 – 1102.
15. Denies N. Summary of the short courses of the IS-GI 2012 latest advances in deep mixing / N. Denies, G.V. Lysebetten // Proc. of the Intern. Symposium on Ground Improvement IS-GI. – Brussels. – 2012. – P. 73 – 123.
16. Innovative solutions in the field of geotechnical construction and coastal geotechnical engineering under difficult engineering-geological conditions of Ukraine / M. Zotsenko, Y. Vynnykov, M. Doubrovsky, V. Oganessian, V. Shokarev, V. Syedin, A. Shapoval, M. Poizner, V. Krysan, G. Meshcheryakov // Proc. of the 18<sup>th</sup> International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris. – 2013. – Vol. 3. – P. 2645 – 2648.
17. Koch E. Laboratory tests and numerical modeling for embankment foundation on soft chall silt using deep-mixing / E. Koch, R. Szepeshazi // Proc. of the 18<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris. – 2013. – Vol. 3. – P. 2521 – 2524.
18. Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering / S.L. Kramer. – New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996. – 672 p.
19. Strength properties of densely compacted cement-mixed gravelly soil / A. Ezaoui, F. Tatsuoka, S. Furusawa, K. Yirao, T. Kataoka // Proc. of the 18<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris. – 2013. – Vol. 1. – P. 329 – 332.
20. Zotsenko N. Soil-cement piles by boring-mixing technology / N. Zotsenko, Yu. Vynnykov, V. Zotsenko // Energy, energy saving and rational nature use. – Oradea University Press, 2015. – P. 192 – 253.

## REFERENCES

1. Vedenisov A.V. *Zakhysni rozyednuvalni ekrany z hruntotsementu v umovakh stysnenoyi miskoyi zabudovy* [Protective separating screenings of soil-cement in urban restrained environment]. *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivlita sporudy* [Resource efficient materials, constructions, buildings and structures]. Rivne, 2012, no. 24. (in Ukrainian).

2. Vynnykov Yu.L. and Vedenisov A.V. *Model'nye yssledovanyya efektyvnosti hrunto-tsementnykh razdelytel'nykh ekranov dlya zashchyty zdannyi ot vlyyanyya novoho stroytel'stva* [Modeling researches of efficiency of soil-cement separating screenings for buildings protection from new construction influence] *Zbirnyk naukovykh prats'. Vestnyk* [Collection of scientific works. Bulletin]. Perm, 2014. (in Russian).
3. Zotsenko M.L., Nalyvayko O.I., Lartseva I.I. and Pan'ko O.M. *Doslidzhennyya vodonepronyknosti gruntotsementu* [Research of soil-cement watertightness ]. *Visnyk Dnipropetr. nats. un-tu. zalozn. transp. im. akad. V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk national university of railway transport named in honor of academician V. Lazaryan]. DNUZT, 2010, Dnipropetrovsk, iss. 32, pp. 43–48. (in Ukrainian).
4. Krantsfel'd Ya.L. *O konstruktyvnykh reshenyakh ekranov dlya ynzhenernoy seysmozashchyty terrytoryi ob'ektov stroytel'stva* [About structural solutions of screenings for engineering seismic protection]. *Nauchno-tekhnicheskyy zhurnal «Osnovanyya, fundamenty y mekhanika hruntov»* [Scientific and technical journal «Bases, foundations and soil mechanics»]. Moscow, 2011, iss.1, pp. 13–17. (in Russian).
5. Krysan V.I. *Perspektyvnoe napravlenye pryomenenyya tekhnolohyy burenyya v stroytel'stve* [Perspective directions of application the technologies of boring in construction]. *Naukovyy visnyk Natsional'noho hirnychoho universytetu* [Scientific bulletin of National University of Mines]. NHU, 2004, Dnipropetrovsk, iss. 5, pp. 93–95. (in Russian).
6. Lartseva I.I. and Petrunyak M.V. *Do vyznachennyya fizyko-mekhanichnykh kharakterystyk gruntotsementu* [Determination of physical and mechanical characteristics of soil-cement]. *Zb. nauk. pr. (haluzeve mashynobud., bud-vo)* [Collection of scientific works (Industrial machine engineering, construction)]. PoltNTU, 2010, Poltava, Iss. 2 (27), pp. 127–134. (in Ukrainian).
7. Petrash O.V. *Zabezpechennyya efektyvnoyi roboty pidzemnykh konstruksiy, yaki vyhotovleni z gruntotsementu* [Efficient operation providing for underground structures of soil-cement]. *Zbirnyk naukovykh prats' (haluzeve mashynobudovannya, budivnytstvo)* [Collection of scientific works (Industrial machine engineering, construction)]. PoltNTU, 2012, Poltava, Iss. 4 (34), pp. 178–183. (in Ukrainian).
8. Stepanchuk N.V. *Vlyyanye armyrovanyya hruntov na yzmenenyye napryazhenno-deformirovannoho sostoyannyya hruntovoho massyva pry seysmycheskykh vozdeystviyakh* [Soil reinforcement influence on stress strain state change under seismic influences] *Budivel'ni konstruksiyi: Mizhvid. nauk.-tekhn. zb.* [Building constructions: scientific and technical digest]. NDIBK, KYIV, 2011, Iss. 75. (in Ukrainian).
9. Tymofeyeva K.A. *Zastosuvannya gruntotsementu yak protyfil'tratsiynoho ekranu ambariv-shlamonakopychuvachiv dlya vidkhodiv burinyya ta ekspluatatsiyi naftohazovykh sverdllovyh* [Application the soil-cement as insulating screening of sludge collectors for wastes of boring the oil and gas wells]. *Zbirnyk naukovykh*

- prats' (haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstva)* [Collection of scientific works (Industrial machine engineering, construction)]. PoltNTU, 2012, Poltava, Iss. 4 (34), pp. 67–70. (in Ukrainian).
10. Tymofeyeva K.A. *Laboratorni doslidzhennya vplyvu ahresyvykh skladovykh burovoho shlamu na fizyko-mekhanichni kharakterystyky gruntotsementu* [Laboratory investigations of influence of aggressive compounds of boring sludge on the physical and mechanical characteristics of soil-cement]. *Zbirnyk naukovykh prats' (haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstva)* [Collection of scientific works (Industrial machine engineering, construction)]. PoltNTU, 2014, Poltava, Iss. 1 (40), pp. 259–267. (in Ukrainian).
  11. Tokyn A.N. *Fundamenti yz tsementohrunta* [Foundations of soil-cement]. Moscow, Stroyizdat, 1984. p. 184.
  12. Uzdyn A.M. and Freze M.V. *Ob efektyvnosti pryimenenyya ekranov v hrunte dlya seysmozashchyty zdanny y sooruzheny* [About efficiency of application underground screenings for seismic protection of the buildings and structures]. *Nauchno-tekhnychesky zhurnal «Osnovannya, fundamenty y mekhanika hruntov»* [Scientific and technical journal «Bases, foundations and soil mechanics»]. Moscow, 2011, iss.1, pp. 17–19. (in Russian).
  13. Uzdyn A.M., Sandovych T.A. and Al'-Naser-Mokhomad Samykhmy *Osnovy teoryy seysmostoykosti y seysmostoykoho stroytel'stva zdanny y sooruzheny* [Fundamentals of theory of seismic stability and seismic proof construction]. Saint-Petersburg, VNYYH ym. B.E. Vedeneeva, 1993, p. 176.
  14. Characteristics of manmade stiff grounds improved by drill-mixing method / [M. Zotsenko, Yu. Vynnykov, I. Lartseva et al.] // Proc. of the 15th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Athens, 2011). – Amsterdam: IOS Press, 2011. – P. 1097 – 1102.
  15. Denies N. Summary of the short courses of the IS-GI 2012 latest advances in deep mixing / N. Denies, G.V. Lysebetten // Proc. of the Intern. Symposium on Ground Improvement IS-GI. – Brussels. – 2012. – P. 73 – 123.
  16. Innovative solutions in the field of geotechnical construction and coastal geotechnical engineering under difficult engineering-geological conditions of Ukraine / M. Zotsenko, Y. Vynnykov, M. Doubrovsky, V. Oganessian, V. Shokarev, V. Syedin, A. Shapoval, M. Poizner, V. Krysan, G. Meshcheryakov // Proc. of the 18<sup>th</sup> International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris. – 2013. – Vol. 3. – P. 2645 – 2648.
  17. Koch E. Laboratory tests and numerical modeling for embankment foundation on soft chall silt using deep-mixing / E. Koch, R. Szepeshazi // Proc. of the 18<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris. – 2013. – Vol. 3. – P. 2521 – 2524.
  18. Kramer S.L. *Geotechnical Earthquake Engineering* / S.L. Kramer. – New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996. – 672 p.
  19. Strength properties of densely compacted cement-mixed gravelly soil / A. Ezaoui, F. Tatsuoka, S. Furusawa, K. Yirao, T. Kataoka // Proc. of the 18<sup>th</sup>

Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris. – 2013.  
– Vol. 1. – P. 329 – 332.

20. Zotsenko N. Soil-cement piles by boring-mixing technology / N. Zotsenko, Yu. Vynnykov, V. Zotsenko // Energy, energy saving and rational nature use. – Oradea University Press, 2015. – P. 192 – 253.

Стаття надійшла до редакції 17.09.2016 р.