

ЗМІЦНЕННЯ ҐРУНТОВОЇ ОСНОВИ БУРОЗМІШУВАЛЬНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ СЕЙСМІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

Харченко М.О.

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

АНОТАЦІЯ: Обґрунтовано методику зниження сейсмічної небезпеки (підвищення сейсмічної стійкості ґрунтової основи) шляхом армування слабкої і сильностисливої основи вертикальними ґрунтоцементними елементами (ВГЦЕ) за бурозмішувальною технологією.

АННОТАЦИЯ: Обоснована методика снижения сейсмической опасности (повышение сейсмической устойчивости грунтового основания) путем армирования слабого и сильносжимаемого основания вертикальными ґрунтоцементными элементами (ВГЦЭ) по буросмесительной технологии.

ABSTRACT: The technique of seismic hazard reduction (increase seismic resistance of soil base) by reinforcing of soft base using vertical soil-cement elements (VSSE) by drilling mixing technology is substantiated.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: сейсмічний вплив, сейсмічна небезпека, зміцнення ґрунтів, ґрунтоцементні елементи, бурозмішувальна технологія.

ВСТУП

За результатами сучасних сейсмологічних досліджень [1 – 3] установлено, що на платформеній території України існує небезпека місцевих і сильних підкорових землетрусів з магнітудою понад 5 (більше 6 балів за шкалою MSK-64). Така тенденція призводить до того, що вартість будівництва значно зростає, що в свою чергу зменшує інвестиційну привабливість України. Тому з метою мінімізації витрат на зменшення сейсмічної небезпеки доцільно розробити ефективні рішення пристосування основ до

можливих сейсмічних впливів за рахунок покращення властивостей ґрунтів. Такий підхід зменшує вартість будівництва як за умов сейсмічних впливів, так і при статичному режимі експлуатації будівель і споруд.

Зараз у світі проблема підвищення сейсмічної стійкості будівель і споруд вирішується за рахунок використання високоміцних матеріалів і відповідних архітектурно-конструктивних рішень (симетричні конструктивні схеми для рівномірного розподілу жорсткості і мас, рівноміцність несучих елементів, можливість розвитку пластичних деформацій тощо), що забезпечують мінімальні значення сейсмічних навантажень, підвищення характеристик міцності ґрунтових основ [4 – 25]. Ефективними методами також є методи, що змінюють динамічну жорсткість і частоти (періоди) власних коливань при землетрусі. Це, як правило, спеціальні конструктивні пристрої: сейсмоізолюючі фундаменти (кінематичні фундаменти, пальові фундаменти з підвищеними дисипативними характеристиками тощо); динамічні гасителі сейсмічних коливань (резино-сталеві циліндричні опори, системи із підвищеними характеристиками затухання коливань тощо); систем з деградуючою жорсткістю (пояси ковзання, рамно-в'язеві системи зі складовими діафрагмами жорсткості тощо) [4 – 23]. Крім того відомі й методи влаштування захисних екранів, суть яких полягає у відбиванні сейсмічних хвиль [22]. Одним із ефективних напрямів зменшення сейсмічної небезпеки є влаштування штучних основ різними технологіями [7, 14, 16, 19, 20, 24].

Мета роботи – обґрунтування методики зниження сейсмічної небезпеки (підвищення сейсмічної стійкості ґрунтової основи) шляхом армування слабкої і сильностисливої основи ВІЦЕ за бурозмішувальною технологією.

На сьогодні нормативні документи [26] і більшість посібників для розрахунку сейсмостійкості будівель і споруд не враховують вплив типу фундаментів на поведінку надземної будівлі чи споруди при землетрусах, хоча є очевидним, що при використанні стрічкових, плитних чи пальових фундаментів надземна частина буде вести себе по-різному, особливо при несиметричних сейсмічних впливів.

Землетруси є досить рідкісним явищем, тому при виборі сейсмостійких конструктивних систем потрібно схилитися до тих, що будуть ефективними і в умовах відсутності сейсмічних впливів.

На сьогодні слабо досліджено сумісну роботу системи «основа – фундаменти – споруда» («ОФС») при сейсмічних впливах, в т.ч. при влаштуванні штучних основ. Таким чином, дослідження зміцнення слабкої і сильностисливої ґрунтової основи бурозмішувальною технологією для зниження сейсмічної небезпеки при зведенні об'єктів підвищеної відповідальності безперечно є актуальними у сучасній геотехніці.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для кращого розуміння задачі зниження сейсмічної небезпеки необхідно розглянути основні аспекти теорій розповсюдження сейсмічних хвиль у ґрунтових полях і сейсмостійкої геотехніки. Відомо, що передача енергії хвилі від точки до точки відбувається за рахунок пружних властивостей середовища, тому хвилі напружень є пружними. В процесі поширення хвилі частина її енергії втрачається, що призводить до зниження інтенсивності динамічного навантаження з віддаленням від її джерела і називається загасанням. Причини загасання різні і пов'язані головним чином з неідеальною пружністю, дискретністю і неоднорідністю будови будь-якого масиву ґрунтів як середовища поширення пружних хвиль [2 – 6, 14, 15]. За рахунок різних механізмів втрат енергії хвилі виділяють наступні види загасання: 1) розбіжність зумовлено зменшенням питомої енергії на одиницю площі фронту хвилі в зв'язку з її збільшенням в міру віддалення від джерела; 2) розсіювання в різних неоднорідних середовищах, що призводить до зменшення енергії хвилі в конкретному напрямку; розсіювання хвиль на будь-якій перешкоді залежить від її форми і розмірів, а також від щільності і стисливості речовини перешкоди; 3) поглинання зумовлено витратами енергії на пластичні і нелінійно-пружні деформації. Тобто можливо зробити узагальнення, що наявність різних перешкод і слабких неоднорідних ґрунтових мас на шляху сейсмічної хвилі призводить до відбивання і поглинання її енергії, що відповідно знижує сейсмічну інтенсивність.

Задача розрахунку коливання системи «ОФС» ускладнюється погано прогнозованими ефектами резонансного посилення сейсмічних коливань пухкими приповерхневими ґрунтами: в залежності від типу і потужності пластів коливання одних частотних інтервалів можуть вибірково посилюватися, а інших практично повністю поглинатися. Явище це пов'язано з порушенням власних коливань самого пласта поблизу вільної поверхні в хвилях даного типу. Тобто верхні шари ґрунтів змінюють параметри сейсмічних хвиль, що підходять з глибин, і, тим самим, можуть змінювати (як збільшувати, так і зменшувати) інтенсивність сейсмічних коливань залежно від своїх динамічних властивостей. Рівень ґрунтових вод (водонасиченість) може впливати на сейсмічну інтенсивність в тому випадку, коли вода змінює фізико-механічні властивості ґрунтів, що має проявитися в зміні їх пружних властивостей, зокрема швидкості поперечних хвиль. Тому для того, щоб спроектувати сейсмостійку будівлю, необхідні не лише відомості про силу і місце можливих землетрусів, але і надійні дані про вимушені коливання споруди на тих чи інших ґрунтових основах. Для цього визначаються деякі характеристики ґрунтів, такі, як його динамічні модулі стиснення і зсуву, коефіцієнт загасання, в т.ч. мати прогноз зміни властивостей ґрунтів

протягом експлуатації споруди, а в залежності від них для розрахунків приймається одна з можливих моделей поведінки ґрунтової основи.

Однією із найважливіших динамічних властивостей ґрунтів є їх сейсмічна жорсткість V_{sr} (де V_s – швидкість розповсюдження поперечних хвиль, ρ – щільність ґрунту). При цьому, чим більша V_{sr} активного шару ґрунту, тим менша амплітуда його коливань.

З точки зору динаміки, потужність активного шару визначається співвідношенням частотних характеристик ґрунтової товщі і споруди. При цьому найбільш несприятливий в сейсмічному відношенні випадок має місце при перетині смуги пропускання частотних характеристик ґрунтової товщі з власними частотами коливань споруди. Потужність H ґрунтів, які істотно впливають на коливання від землетрусів, визначається співвідношенням $H = V_s / 4f$ (де V_s – середня швидкість поперечних хвиль в ґрунтовій товщі; f – значення низькочастотної частини перетину смуг пропускання частотних характеристик ґрунтової товщі і власних коливань споруди). Якщо частотні характеристики ґрунтової товщі і власних коливань споруди не перетинаються, то буде слабкий зв'язок цих процесів.

При сейсмічних коливаннях виникають різні сейсмічні хвилі. Поздовжні хвилі призводять до стиснення-розтягування частинок ґрунту, поперечні – стають причиною перекосу або бічного зрушення. При бічному зустріті виникає небезпека порушення сил зчеплення між частинками ґрунту. Тому існує додаткова проблема – здатність ґрунтів змінювати свої механічні властивості при проходженні через них пружних хвиль. Суть такого ефекту полягає в тому, що ґрунти складаються з дрібних і найдрібніших мінеральних часток, в проміжках (порах) між якими знаходяться вода і гази. Весь опір такого ґрунту зовнішньому навантаженню здійснюється за рахунок величезного числа контактів між цими частками, багато з яких дуже слабкі. При проходженні пружної хвилі збуджуються коливання частинок ґрунту з різними швидкостями і частина контактів (тим більша, чим вище енергія хвилі) розривається. Крім того при переході хвилі від більш щільного до пухкого шару ґрунту та суттєвому (у два рази і більше) збільшенню амплітуди коливання, порушення зчеплення стає реальним. В результаті міцність ґрунту помітно (іноді в кілька разів) знижується. При цьому ґрунт стає «текучим», це явище називають «розрідженням» ґрунту (він опиняється у виваженому водою стані). Вода при цьому прагне віджатися, але процес цей вимагає деякого часу, оскільки обмежується водопроникністю ґрунту.

Найважливішим завданням при розрахунку коливання системи «ОФС» за всіма формами є прогноз її резонансних частот і пікових амплітуд зміщення, що розглядаються як граничні – найнесприятливіші умови роботи споруди. Справа в тому, що в спектрі сейсмічної хвилі присутні коливання з частотами, близькими до власної частоти ряду споруд (характерні періоди від 0,2 до 2 с). У разі виникнення резонансу різко зростають напруження по контакту фундаме-

нту з ґрунтом, а також в самій конструкції споруди і вірогідність руйнування даної системи підвищується.

Вплив ґрунтової основи на сейсмічні коливання споруди має кілька аспектів [8, 9, 18, 21, 22]. По-перше, через основу передається сейсмічний вплив на споруду. Споруда, в силу своєї масивності і жорсткості, робить зворотний вплив на рух ґрунту. По-друге, ґрунтова основа володіє власною масою і жорсткістю, які знижують частоти вільних коливань динамічної системи «споруда – основа» (при збільшенні маси і жорсткості ґрунту зменшується амплітуда і збільшується частота коливання основи). По-третє, під час землетрусу сейсмічні хвилі відбиваються від фундаменту і розсіюються в основі. Два останніх фактори впливають на величину динамічного відклику споруди, а тому і на сейсмічні інерційні навантаження, що діють на споруду.

Основною ідеєю роботи є пропозиції щодо використання штучних основ в умовах слабких ґрунтів для зменшення осідання і крену, вартості фундаментів та зменшення сейсмічної небезпеки при експлуатації будівель і споруд.

Аналіз світового та вітчизняного досвіду використання різних методів щодо зниження динамічного і вібраційного впливу на слабкі, водонасичені, структурно-нестійкі ґрунти [7, 8, 11, 14, 16, 17, 19 – 21, 24, 25] показав, що найбільш ефективним засобом для їх штучного перетворення є цементація за допомогою струменевої (grouting mixing) чи бурозмішувальної (boring-mixing) технологій. Головною особливістю цих технологій є те, що вони дозволяють зміцнювати практично весь діапазон ґрунтів від гравійних відкладень до дрібнодисперсних глин, мулів, торфів. При цьому відбувається руйнування і одночасне перемішування ґрунту з цементним розчином в режимі «mix-in-place» (перемішування на місці).

За класифікацією [14] бурозмішувальна технологія відноситься до reinforcement techniques using deep mixing. Суть бурозмішувальної технології полягає у тому, що у процесі буріння свердловини розпушується природний ґрунт без виймання його із свердловини. У зону руйнування крізь вертлюг, яким оснащено буровий станок, розчинонасосом нагнітають водоцементну суспензію, яка робочим органом ретельно перемішується із пухким ґрунтом. Розпушування ґрунту, подавання цементного розчину, і розмішування його з ґрунтом виконується за всією довжиною ГЦЕ. Після тужавіння суміші утворюється міцний ГЦЕ, який не розмокає у водному середовищі (рис. 1). Дана технологія за дослідженнями, що проведені у ПолтНТУ під керівництвом проф. Зоценка М.Л. [25], особливо ефективна для армування просадочних і слабких ґрунтів. Міцність ГЦЕ залежать від багатьох факторів: гранулометричного складу ґрунту, водоцементного відношення розчину, кількості цементного розчину на 1 п.м. елементу і можуть коливатися в межах від 0,3...3,0 МПа (торф); 1...12 МПа (мул, глина); 2...14 МПа (супісок, суглинок); до 5...30 МПа (пісок, гравій).

Ефект такого армування основ полягає у тому, що у певному об'ємі слабого ґрунту частина його замінюється жорстким матеріалом (ґрунтоцементом) з достатньо великим модулем деформації ($E=70\ldots 200$ МПа). Природний ґрунт, що затиснутий між ВГЦЕ, також підвищує свої механічні характеристики за рахунок неможливості бічного випирання. Модуль деформації утвореної штучної основи вважається середньовиваженим (за дослідженнями [25]). Даний параметр можливо регулювати за рахунок зміни відстані між сусідніми ГЦЕ. Загальний вигляд штучної основи наведено на рис. 2.



Рис. 1. Фото ГЦЕ



Рис. 2. Загальний вигляд штучної основи
(фото взяті з інтернет ресурсу <http://fb3.com.ua>)

Основні робочі гіпотези проекту полягають у тому, що завдяки розробленню комплексних заходів покращення геотехнічних властивостей слабких основ можливо створити штучну сейсмостійку основу. Основними елементами такої конструкції основи є ВГЦЕ, між якими затиснутий слабкий ґрунт, та поверх них щебенева чи піщана подушка. Функція подушки – рівномірний розподіл верти-кального навантаження від споруди між ВГЦЕ та природним ґрунтом, а також для зменшення горизонтальних навантажень на ВГЦЕ при землетрусах.

Запропонована конструкція у разі землетрусу дозволить зменшити вплив динамічного навантаження на надземну частину споруди, зменшити період (підвищити частоту) коливань основи, покращити демпферні її характеристики, призвести до дисипації енергії сейсмічної хвилі, ліквідувати тиксотропні властивості й властивості розрідження ґрунтів в межах штучної основи, а також стабілізувати властивості основи протягом експлуатації на ній будівель і споруд.

Зменшення впливу динамічного навантаження на надземну частину споруди при землетрусах можливо досягти за рахунок зменшення приско-

рення і амплітуди коливань основи її фундаментів. Для зменшення прискорення і амплітуди коливань ґрунтів основи, а також для зменшення періоду (підвищення частоти) цих коливань, необхідно збільшити її сейсмічну жорсткість. Підвищення сейсмічної жорсткості V_{sr} можливо досягнути за рахунок підвищення пружних деформаційних характеристик основи. За рахунок цементації можливо підвищити модуль пружності основи в межах 500...2000 МПа і відповідно швидкість поширення сейсмічних хвиль до 600...1000 м/с, але щільність при цьому майже не зміниться.

Покращення демпферних характеристик штучної основи відбувається за рахунок наявності щебеневої чи піщаної подушки, а також за рахунок наявності тертя і зчеплення затиснутого ґрунту по поверхні контактів ВГЦЕ. Тому верти-кальні складові сейсмічного імпульсу (вертикально направлені поштовхи) подушка демпфує і лише у послабленому вигляді передає на фундаментну плиту.

В зоні штучної основи ВГЦЕ частково поглинають і розсіюють енергію сейсмічної хвилі (дисипація) аналогічно пальному фундаменту за [20].

Ліквідація тискотропних властивостей і властивостей розрідження ґрунтів відбувається за рахунок локальної цементації в межах ВГЦЕ та підвищеною опору зрушення ґрунту, затиснутого між цими елементами. Також збільшується опір фільтраційної консолідації слабкої основи за рахунок її армування.

Бурозмішувальна технологія також дозволяє стабілізувати властивості основи на протязі експлуатації на ній будівель і споруд. Особливо це ефективно для ґрунтів, які здатні погіршувати свої властивості при водонасиченні. Найбільш це характерно для просадочних ґрунтів [23].

Отже, проведені дослідження доводять про ефективність влаштування штучних основ армуванням ґрунтів ВГЦЕ за бурозмішувальною технологією для зниження сейсмічної небезпеки і мінімізації технічних та екологічних ризиків при експлуатації будівель і споруд. Проблемним питанням залишається призначення розмірів штучної основи, яке згідно з [7] потребує різного підходу до його розв'язання залежно від того суттєвий (для важких споруд на слабких ґрунтах) чи ні (для легких споруд на щільних ґрунтах) зворотній вплив споруди на коливання системи. Тому розробити однозначні рекомендації щодо підбору параметрів сейсмостійких основ для різних будівель і споруд неможливо, доцільно виконувати прямий динамічний розрахунок системи «штучна основа – фундаменти – споруда». Крім того потребують подальшого дослідження динамічні властивості штучних основ як експериментальними, так і теоретичними методами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сейсмическое микрорайонирование строительных площадок для сейсмостойкого проектирования зданий и сооружений в сейсмических районах

- Украины / [А.В. Кендзера, К.В. Егупов, Н.Г. Марьенков и др.] // Наука та будівництво. – К.: ДП НДІБК, 2015. – №4. – С. 12–18.
2. Алешин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов / А.С. Алешин. – М.: ООО «Светоч Плюс», 2010. – 293 с.
 3. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территории городов, населенных пунктов и больших строительных площадок / В.Б. Заалишвили. – М.: Наука, 2009. – 350 с.
 4. Окамото Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений: пер. с англ. / Ш. Окамото. – М.: Стройиздат, 1980. – 342 с.
 5. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях: пер. с англ. / К. Ишихара. – Санкт-Петербург: НПО «Геореконструкция-Фундамент-проект», 2006. – 384 с.
 6. Ньюмарк Н. Основы сейсмостойкого строительства: сокр. пер. с англ. – ред. Я.М. Айзенберга / Ньюмарк Н., Розерблюэт Э. – М.: Стройиздат, 1980. – 344 с.
 7. Уздин А.М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений / А.М. Уздин, Т.А. Сандович, Аль-Насер-Мохомад Самихмин. – Санкт-Петербург: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1993. – 176 с.
 8. Ставницер Л.Р. Сейсмостойкость оснований и фундаментов: монография / Л.Р. Ставницер. – М.: АСВ, 2010. – 448 с.
 9. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А.Н. Бирбраер. – Санкт-Петербург: Наука, 1998. – 255 с.
 10. Немчинов Ю.И. Сейсмостойкость зданий и сооружений / Ю.И. Немчинов. – К., 2008. – 480 с.
 11. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов: монография / Е.А. Вознесенский. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 264 с.
 12. Priestley M.J.N. Displacement-Based Seismic Design of Structures / M.J.N. Priestley, G.M. Calvi, M.J. Kowalsky. – IUSS Press, 2007. – 721 p.
 13. Verruijt A. Soil Dynamics.. – Delft: Delft University of Technology, 2009. – 427 p.
 14. Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering. – New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996. – 672 p.
 15. Павленко О.В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет / О.В. Павленко. – М.: Научный мир, 2009. – 260 с.
 16. Ильичев В.А. Свайные фундаменты в сейсмических районах / В.А. Ильичев, Ю.В. Монголов, В.М. Шаевич. – М.: Стройиздат, 1983. – 144 с.
 17. Таранов В.Г. Влияние сейсмического воздействия и положения уровня подземных вод на свойства грунтов / В.Г. Таранов // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХДТБА/ХОТВ АБУ, 2001. – Вип.15. – С. 295–308.
 18. Петров В.А. Инженерные методы учета динамического взаимодействия сооружения с основанием / В.А. Петров, А.М. Уздин. – Санкт-Петербург: ЗАО «Ленинградский Промстройпроект», 2004. – С. 42–69.

19. Степанчук Н.В. Влияние армирования грунтов на изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива при сейсмических воздействиях / Н.В. Степанчук, Я. Червинский // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К.: ДП НДІБК, 2011. – Вип. 75. – Кн. 2. – С. 622–630.
20. Домбровский Я.И. Изменение напряженно-деформированного состояния грунта межсвайного пространства при сейсмических воздействиях / Я.И. Домбровский // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К.: ДП НДІБК, 2011. – Вип. 75. – Кн. 1. – С. 292 – 297.
21. Сахаров В.О. Модель деформування водонасичених ґрунтів основ при дії сейсмічних та довготривалих динамічних навантажень / В.О. Сахаров // Основи та фундаменти: зб. наук. праць. – К.: КНУБА, 2013. – Вип. 33. – С. 47 – 57.
22. 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.
23. Обозов В.И. Анализ напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты на просадочных грунтах при сейсмических воздействиях / В.И. Обозов, М.А. Толстых // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 2011. – №1. – С. 20–23.
24. Абрамова Т.Т. Современные методы управления свойствами грунтов на участках высоких динамических нагрузок / Т.Т. Абрамова, Е.А. Вознесенский. – М.: ГеоТехника, 2015. – №4, 1/2015. – С. 6–25.
25. Zotsenko, N., Vynnykov Yu., Zotsenko V. Soil-cement piles by boring-mixing technology. Energy, energy saving and rational nature use. – Oradea University Press, 2015. – P. 192 – 253.
26. Будівництво у сейсмічних районах України: ДБН В.1.1 – 14:2014 / науковий керівник Ю.І. Немчинов. - [Чинні від 2014-10-01]. – К.: Мінрегіон України, 2014. - VI, – 110 с. – (Будівельні норми України).

REFERENCES

1. Seismic micro zoning of construction sites for the seismic design of buildings and structures in seismic regions of Ukraine / A.V. Kendzera, K.V. Egupov, N.G. Maryenko and other // Scientific and technical, industrial and information-analytical journal "Science and Engineering". – К.: NDIBK, 2015. – #4. – P. 12–18.
2. Aleshin A.S. seismic micro zoning especially important objects / A.S. Aleshin. – М.: Ltd «SvetochPlus», 2010. – 293 p.
3. Zaalishvili V.B. Seismic micro zoning territory of cities, settlements and large construction sites / V.B. Zaalishvili. – М.: Nauka, 2009. – 350 p.
4. Okamoto Sh. Seismic resistance of engineering structures / Sh. Okamoto. – М.: Stroyizdat, 1980. – 342 p.
5. Ishihara K. The behavior of soils during earthquakes / K. Ishihara. – St. Petersburg: NPO «Georekonstruktsiya-Fundamentproekt», 2006. – 384 p.

6. Newmark N. Fundamentals of Earthquake Engineering / Newmark N., Rozerbluet E. – M.: Stroyizdat, 1980. – 344 p.
7. Uzdin A.M. Fundamentals of the theory of seismic stability and seismic resistant construction of buildings and structures / A.M. Uzdin, T.A. Sandovich, Al-Naser-Mohamed Samakhin. – St. Petersburg: VNIIG, 1993. – 176 p.
8. Stavniser L.R. Seismic resistance of bases and foundations / L.R. Stavniser // Monograph. – M.: ASV, 2010. – 448 p.
9. Birbraer A.N. Seismic Analysis of Structures / A.N. Birbraer. – St. Petersburg: Nauka, 1998. – 255 p.
10. Nemchinov Yu.I. Seismic resistance of buildings and structures / Yu.I. Nemchinov. – K., 2008. – 480 p.
11. Voznesenskii E.A. Dynamic instability of soils: monograph / E.A. Voznesenskii. – M.: Lenend, 2014. – 264 p.
12. Priestley M.J.N. Displacement-Based Seismic Design of Structures / M.J.N. Priestley, G.M. Calvi, M.J. Kowalsky. – IUSS Press, 2007. – 721 p.
13. Verruijt A. Soil Dynamics / A. Verruijt. – Delft: Delft University of Technology, 2009. – 427 p.
14. Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering / S.L. Kramer. – New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996. – 672 p.
15. Pavlenko O.V. Seismic waves in soil layers: a non-linear soil behavior during strong earthquakes of recent years / O.V. Pavlenko. – M.: Science World, 2009. – 260 p.
16. Il'ichev V.A. Pile foundations in seismic regions / V.A. Il'ichev, Y. Mongols, V.M. Shaevich. – M.: Stroyizdat, 1983. – 144 c.
17. Taranov V.G. Effect of seismic influence and position level of ground waters on soil properties / V.G. Taranov // Scientific Bulletin of construction. – Kharkiv: KhSTech UBA/KhOTV UAB, 2001. – #15. – P. 295-308
18. Petrov V.A. Engineering methods of accounting of dynamic interaction soil – construction / V.A. Petrov, A.M. Uzdin. – St. Petersburg: Leningrad Promstroiproekt, 2004. – P. 42–69.
19. Stepanchuk N.V. Influence of soil reinforcement on the change of the stress-strain state of the soil mass at the seismic influences / N.V. Stepanchuk // Building constructions Interdepartmental scientific and technical periodical book. – # 75., T. 2. – K.: SESRIofBC, 2011. – P. 622 – 630.
20. Dombrovskii Ya.I. Changing the stress-strain state of soil between piles space at the seismic influences / Ya.I. Dombrovskii // Building constructions Interdepartmental scientific and technical periodical book. – # 75., T. 1. – K.: SESRIofBC, 2011. – P. 292 – 297.
21. Saharov V.O. Deformation model of saturated soil under the action of seismic and long-term dynamic loads / V.O. Saharov // Bases and foundations: Interdepartmental scientific and technical periodical book. – # 33. – K.: KNUCA, 2013. – P. 47 – 57.
22. Uzdin A.M. On the effectiveness of the cut-off wall use in the ground for seismic protection of buildings and structures / A.M. Uzdin, M.V. Freze // Scientific and

technical journal "Foundations, foundations and soil mechanics", 2011. – #1. – P. 17–19.

23. Obozov V.I. Analysis of stress-strain state of the raft foundation on subsiding soils under seismic actions / V.I. Obozov, M.A. Tolstuh // Scientific and technical journal "Foundations, foundations and soil mechanics", 2011. – #1. – P. 20–23.
24. Abramova T.T. Modern properties of soil management practices in the areas of high dynamic loads / T.T. Abramova, E.A. Voznesenskii. – M.: Journal «Geotechnics», 2015. – #4, 1/2015. – P. 6–25.
25. 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.
26. DBN V.1.1-14:2014. Construction in seismic regions of Ukraine. – K.: Ukraine Ministry of Regional Development, 2014. – 110 p. (National Standard of Ukraine).

Стаття надійшла до редакції 28.07.2016 р.