

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАФТОВИХ РЕЗЕРВУАРІВ У СКЛАДНИХ ГЕОТЕХНІЧНИХ УМОВАХ ПРИ СЕЙСМІЧНИХ ВПЛИВАХ

**М.Л. Зоценко<sup>1</sup>, Ю.Л. Винников<sup>2</sup>, М.О. Харченко<sup>3</sup>, І.І. Ларцева<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кодратюка, Полтава,  
Україна, E-mail: zotcenco@mail.ru  
Доктор технічних наук, професор

<sup>2</sup> Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кодратюка, Полтава,  
Україна, E-mail: vynnykov@yandex.ru  
Доктор технічних наук, професор

<sup>3</sup> Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кодратюка, Полтава,  
Україна, E-mail: maka1984@i.ua  
Кандидат технічних наук, доцент

<sup>4</sup> Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кодратюка, Полтава,  
Україна, E-mail: larchik.84@mail.ru  
Кандидат технічних наук, доцент

Систематизовано проблемні питання будівництва та експлуатації нафтових вертикальних сталевих резервуарів у складних геотехнічних умовах (просадочні і заторфовані ґрунти, мули, насипні, наливні ґрунти, підтоплені території), у т. ч. на сейсмічно небезпечних територіях. Обґрунтовано методику зниження сейсмічної небезпеки (підвищення сейсмічної стійкості ґрунтової основи) з метою забезпечення безаварійної експлуатації резервуарів у разі землетрусів різної інтенсивності. Наведено практичний досвід проектних рішень вискоелективних систем «штучна основа – фундаменти – резервуар» у складних геотехнічних умовах для статичних і динамічних впливів (землетрусів, аварійних техногенних навантажень тощо).

*Ключові слова:* сейсмічні впливи, сейсмостійкість, нафтовий резервуар, складні інженерно-геологічні умови, штучна основа, ґрунтоцементні елементи

## RELIABILITY CONTROL OF EXPLOITATION OF OIL STORAGE TANKS BASES IN COMPLEX GEOTECHNICAL CONDITIONS AT SEISMIC EFFECTS

**M.L. Zotsenko<sup>1</sup>, Yu.L. Vynnykov<sup>2</sup>, M.O. Kharchenko<sup>3</sup>, I.I. Lartseva<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine,  
E-mail: zotcenco@mail.ru

*DSc, Professor*

<sup>2</sup> *Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine,  
E-mail: vynnykov@yandex.ru  
DSc, Professor*

<sup>3</sup> *Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine,  
E-mail: maka1984@i.ua  
PhD, Assistant Professor*

<sup>4</sup> *Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine,  
E-mail: larchik.84@mail.ru  
PhD, Assistant Professor*

Problematic issues of construction and operation of oil storage vertical steel tanks in complex geotechnical conditions (collapsible and peaty soils, silts, poured soils, hydraulic fills, flooded area), including the seismically unstable territories are systematized. The technique of seismic danger decreasing (increasing the seismic stability of the ground) for ensuring the accident-free operation of tanks during earthquakes of various intensities is proved. The practical experience of design solutions of the highly effective systems «man-made grounds – foundation – tank» in complex geotechnical conditions for static and dynamic effects (earthquakes, emergency technogenic loadings etc.) is given.

*Key words:* seismic effects, seismic resistance, oil storage tank, complex geotechnical conditions, man-made grounds, soil-cement elements

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЁЖНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В СЛОЖНЫХ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

**Н.Л. Зоценко<sup>1</sup>, Ю.Л. Винников<sup>2</sup>, М.А. Харченко<sup>3</sup>, И.И. Ларцева<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> *Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кодратюка, Полтава, Украина, E-mail: zotcenco@mail.ru  
Доктор технических наук, профессор*

<sup>2</sup> *Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кодратюка, Полтава, Украина, E-mail: vynnykov@yandex.ru  
Доктор технических наук, профессор*

<sup>3</sup> *Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кодратюка, Полтава, Украина, E-mail: maka1984@i.ua  
Кандидат технических наук, доцент*

<sup>4</sup> *Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кодратюка, Полтава, Украина, E-mail: larchik.84@mail.ru  
Кандидат технических наук, доцент*

Систематизированы проблемные вопросы строительства и эксплуатации нефтяных вертикальных стальных резервуаров в сложных геотехнических условиях (просадочные и заторфованные почвы, илы, насыпные, намывные грунты, подтопленные территории), в т. ч. на сейсмически опасных территориях. Обоснована методика снижения сейсмической опасности (повышение сейсмической устойчивости почвенного основания) с целью

обеспечения безаварийной эксплуатации резервуаров в случае землетрясений различной интенсивности. Приведен практический опыт проектных решений высокоэффективных систем «Искусственная основа - фундамент - резервуар» в сложных геотехнических условиях для статических и динамических воздействий (землетрясений, аварийных техногенных нагрузок и др.).

*Ключевые слова:* сейсмическое влияние, сейсмостойкость, нефтяной резервуар, сложные инженерно-геологические условия, искусственная основа, почвенноцементные элементы

## Вступ

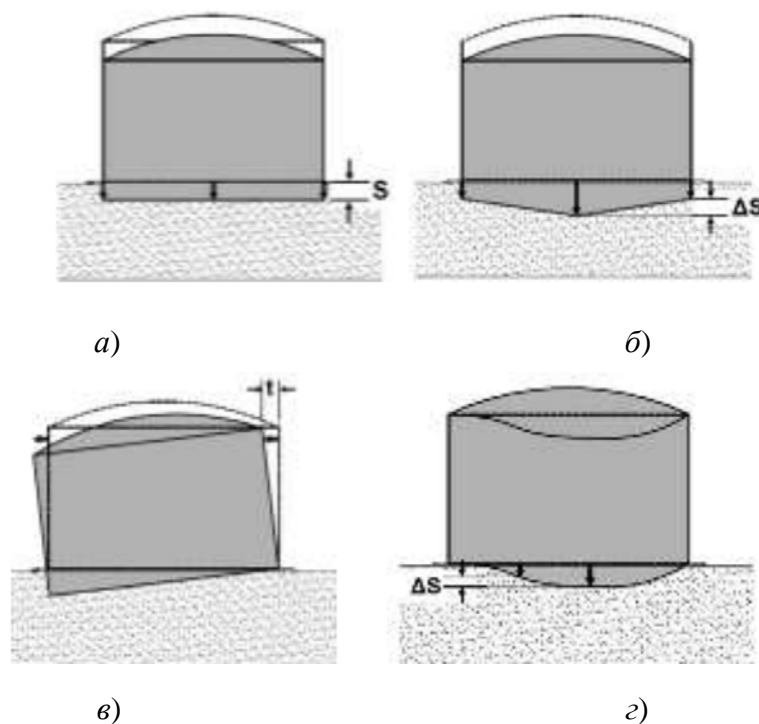
Розвиток нафтової і нафтохімічної промисловості пов'язано з необхідністю зведення значної кількості резервуарів для зберігання сировини і готової продукції. Вертикальні сталеві резервуари (РВС) – відповідальні споруди, які забезпечують не тільки зберігання нафти і нафтопродуктів на сировинних базах, нафтопереробних заводах тощо, але й безпеку та безперебійність постачання товарів по системах магістральних трубопроводів. При цьому резервуари являють собою споруди підвищеної небезпеки, аварії на яких супроводжуються розливом величезних мас рідини, що може призвести (і призводило) до катастрофічних наслідків з людськими жертвами, порушень штатних режимів експлуатації об'єктів транспортування і зберігання нафти і нафтопродуктів, а також до значного забруднення навколишнього середовища, тяжких економічних наслідків.

Часто резервуари зводять на територіях зі складними геотехнічними умовами (ДБН В.1.1-45:2017, 2017): 1) ґрунти з особливими властивостями (просадочні та заторфовані, мули, насипні й намівні масиви, ґрунти, які за певних умов збільшують свій об'єм тощо); 2) можливість розвитку небезпечних геологічних (гравітаційних) процесів (карсти, зсуви, ерозійні, суфозійні, абразивні процеси і т. ін.), а також прояви нерівномірних деформацій ґрунтових основ при замоканні, проведенні гірничих робіт й ін.

Крім того технологічні вимоги до резервуарних парків призводять до збільшення об'ємів РВС. При цьому тиск, що передається на ґрунтову основу, також значно збільшується порівняно з раніше накопиченим досвідом експлуатації цих споруд. Тому, вартість будівництва сучасних РВС у складних інженерно-геологічних умовах значно зростає.

Як правило, осідання резервуарів відбувається рівномірно (рис. 1, а), проте у складних геотехнічних умовах ускладнюється можливість забезпечення проектних технологічних вимог при їх експлуатації за рахунок нерівномірних деформацій основи фундаментів (рис. 1, б, в, г). Ця ситуація викликає необхідність розроблення якісно нових геотехнічних технологій, які б мінімізували ризики й забезпечили безаварійну експлуатацію сучасних РВС, особливо у складних геотехнічних умовах.

Ступінь пошкодження об'єкта під час землетрусу залежить не лише від рівня сейсмічних впливів, але і від якості сейсмостійкого проектування і будівництва (Кендзера, Семенова, 2017). За результатами нещодавніх сейсмологічних досліджень (Кендзера, Егупов, Мар'єнков и др., 2015) встановлено, що на території України, в т. ч. і на платформній її частині, існує небезпека місцевих і сильних підкорових землетрусів з магнітудою понад 5 (більше 6 балів за шкалою MSK-64).



**Рис. 1.** Схеми осідання резервуарів (Selvaraju, Wei He, Weng Leong, 2017): а – рівномірне; б – збільшення осідання під центром резервуару; в – крен; г – периферійне (колове) осідання

**Fig. 1.** Schemes of subsidence of reservoirs (Selvaraju, Wei He, Weng Leong, 2017): а – uniform; б – increase in subsidence under the center of the reservoir; в – roll; г – peripheral (circular) subsidence



**Рис. 2.** Приклади нерівномірних деформацій резервуарів (Anumod, Harinarayanan, Usha, 2014)

**Fig. 2.** Examples of uneven deformations of tanks (Anumod, Harinarayanan, Usha, 2014)

Це створює додаткову небезпеку експлуатації існуючих і нових нафтових резервуарів. Приклади нерівномірних деформацій резервуарів внаслідок сейсмічних явищ подано на рис. 2.

При проектуванні резервуарів для зберігання нафтопродуктів, які є об'єктами підвищеної відповідальності (клас наслідків СС3), згідно з діючими нормами (ДБН В.1.1-12:2014, 2014) необхідно враховувати 1%-ну імовірність перевищення розрахункової інтенсивності сейсмічних впливів протягом 50 років. Цей фактор також суттєво підвищує ризики безаварійної експлуатації та відповідно вартість і складність будівництва цих інженерних споруд, оскільки доводиться виконувати додаткові розрахунки та розробляти відповідні конструктивні рішення щодо мінімізації ризиків при їх аваріях у разі землетрусу.

### **Огляд останніх джерел досліджень і публікацій**

Лабораторними та польовими дослідженнями деформаційних характеристик ґрунтів, одержаних переважно фахівцями Японії та США, визначено, що в умовах значних сейсмічних навантажень деформаційні характеристики ґрунту стають нелінійними (Кендзера, Семенова, 2017; Ишихара, 2006; Справочник..., 2014; Ставницер, 2010).

Аналіз світового та вітчизняного досвіду використання різних методів щодо зниження динамічного і вібраційного впливу на слабкі, водонасичені, структурно-нестійкі ґрунти показав, що найбільш ефективним засобом для їх

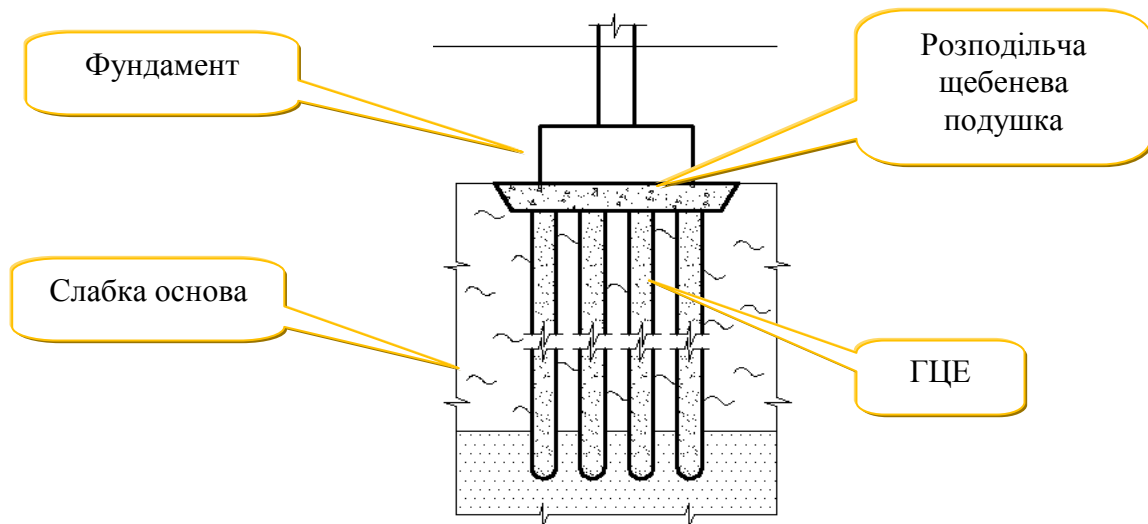
штучного перетворення є цементация за допомогою струминної чи бурозмішувальної технологій (Абрамова, 2015; Вознесенский, Кушнарєва, Фуникова, 2014; Zotsenko N., Vynnykov, Zotsenko V., 2015; Коновалов, Мангушев, Сотников и др., 2009; Зоценко М., Винников, Зоценко В., 2016; Kramer, 1996; Kryvosheiev, Farenjuk, Tytarenko, Boyko, Kornienko, Zotsenko, Vynnykov, Siedin, Shokarev, Krysan, 2017; Vynnykov, Voskobiinyk, Kharchenko, Marchenko, 2017; Ha, Park, Lee K., Lee H., Kim S., Kwon, Kim H., 2017; Ganne, Denies, Huuybrechts et al., 2011; Ezaoui, Tatsuoka, Furusawa, Yirao, Kataoka, 2013; Hor, Jee, Song, Kim, 2017).

Їх головною особливістю 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). Між твердими частинками виникають міцні, зумовлені в'язучими речовинами, зв'язки, які значною мірою збільшують міцність ґрунту та зменшують його стисливість.

Ефект закріплення (підсилення, армування) основ – у тому, що в певному об'ємі слабого ґрунту частина його замінюється жорстким матеріалом – ґрунтоцементом, з відносно великим модулем деформації ( $E = 70 - 200$  МПа). Природний ґрунт, затиснутий між створеними вертикальними ґрунтоцементними елементами (ГЦЕ), також підвищує свої механічні параметри за рахунок неможливості бічного випинання (рис. 3).

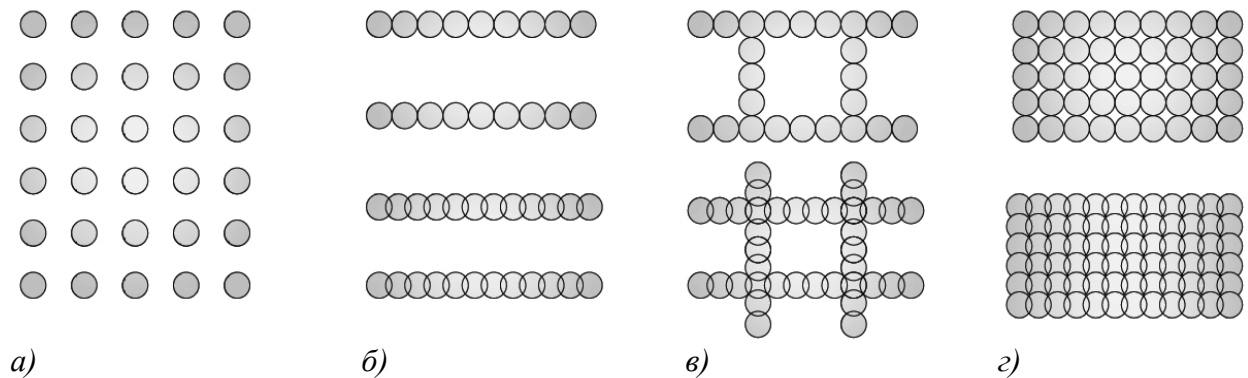
Модуль деформації створеної штучної основи вважають середньозваженим (Zotsenko N., Vynnykov, Zotsenko V., 2015; Зоценко М., Винников, Зоценко В., 2016; Ha, Park, Lee K., Lee H., Kim S., Kwon, Kim H., 2017; Ganne, Denies, Huuybrechts et al., 2011). Його значення можливо регулювати за рахунок зміни відстані між ГЦЕ.

Залежно від навантажень та інженерно-геологічних умов визначають необхідну кількість і довжину (до 40 м) ГЦЕ. При цьому виділяють наступні конструктивні схеми армування масиву вертикальними ГЦЕ (рис. 4).



**Рис. 3.** Закріплення слабких ґрунтів вертикальними ГЦЕ  
**Fig. 3.** Fixing of weak soils with vertical cementitious elements

Сітку ГЦЕ можна створити з різним кроком без взаємовпливу чи з їх «перетином».



**Рис. 4.** Конструктивні схеми армування масиву вертикальними ГЦЕ:  
а – одиночні ГЦЕ; б – панельний тип; в – решітчастий тип; г – блочний тип  
**Fig. 4.** Structural schemes of reinforcement of an array by vertical cementitious elements:  
а – single cementitious elements; б – panel type, в – lattice type, г – block type

### Виділення не розв’язаних раніше частин загальної проблеми

Сьогодні ще недостатньо накопичений досвід експлуатації РВС в складних інженерно-геологічних умовах на штучних основах, особливо при дії таких небезпечних геологічних явищ як землетрус.

Будівництво відповідальних споруд у складних інженерно-геологічних умовах із врахуванням сейсмічних впливів – одна з найскладніших задач

геотехніки. Тому за мету роботи поставлено проаналізувати геотехнічні рішення будівництва РВС на просадочних і слабких ґрунтах у сейсмічних районах і розробити ефективний вид штучної сейсмостійкої основи.

### **Основний матеріал і результати дослідження**

Для кращого розуміння задачі зниження сейсмічної небезпеки розглянемо основні аспекти теорій розповсюдження сейсмічних хвиль у ґрунтових полях і сейсмостійкої геотехніки. 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. За рахунок різних механізмів втрат енергії хвилі виділяють такі 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.

Отже, 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 «основа – фундаменти – споруда» 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. прогноз зміни властивостей ґрунтів протягом експлуатації споруди, а залежно від них для розрахунків приймається одна з можливих моделей поведінки ґрунтової основи.

Однією із найважливіших динамічних властивостей ґрунтів є їх сейсмічна жорсткість  $V_s\rho$  (де  $V_s$  – швидкість розповсюдження поперечних хвиль,  $\rho$  – щільність ґрунту). При цьому, чим більша  $V_s\rho$  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 – перетинання 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

параметри ґрунтової товщі і власних коливань споруди не перетинаються, то буде слабкий зв'язок цих процесів.

При сейсмічних коливаннях виникають сейсмічні хвилі. Поздовжні хвилі призводять до стиснення-розтягування частинок ґрунту, поперечні – стають причиною перекосу або бічного зрушення. При бічному зсуві 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 ефекту полягає в тому, що ґрунти складаються з дрібних і найдрібніших часток, в проміжках (порах), між якими є вода й газ. 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 зваженому водою стані). Вода при цьому прагне віджатися, але процес цей вимагає деякого часу, оскільки обмежується водопроникністю ґрунту.

Найважливішим завданням при розрахунку коливання системи «основа – фундаменти – споруда» 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 с до 2 с). У разі виникнення резонансу різко зростають напруження по контакту фундаменту з ґрунтом, а також в самій конструкції споруди і вірогідність руйнування даної системи підвищується.

Вплив ґрунтової основи на сейсмічні коливання споруди має ряд аспектів:

1) через неї передається сейсмічний вплив на споруду (споруда, в силу своєї масивності і жорсткості, робить зворотний вплив на рух ґрунту);

2) 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);

3) під час землетрусу сейсмічні хвилі відбиваються від фундаменту і розсіюються в основі.

Два останніх фактори впливають на величину динамічного відгуку споруди, а тому і на сейсмічні інерційні навантаження, що діють на споруду.

Конструкція циліндричного РВС являє собою вертикальний тонкостінний циліндр, що обмежений знизу днищем, а зверху покрівлею. У днищі резервуару, що лежить на основі, під тиском навантаження від рідини, що знаходиться в ньому, виникають відносно невеликі напруження. При цьому товщина листа днища складає 4-12 мм і зумовлена, головним чином, умовами технології монтажних-зварювальних робіт і антикорозійною стійкістю метала.

Особливістю РВС є той факт, що вони навіть в штатному режимі експлуатації знаходяться у складному напружено-деформованому стані (НДС). НДС елементів РВС виникає вже на стадії виготовлення й виконання будівельно-монтажних робіт. Подальше збільшення напружень в елементах конструкції резервуару є наслідком дії як експлуатаційних навантажень (гідростатичні навантаження, надмірний тиск, вакуум, снігові, вітрові та температурні навантаження), так і результатом нерівномірного осідання основи його фундаментів як по площі, так і по периметру. Тому для забезпечення технологічних експлуатаційних вимог при зведенні РВС на слабких і просадочних ґрунтах доводиться прорізати ці ґрунти пальовими фундаментами чи використовувати різні види штучних основ.

При проектуванні резервуарів у сейсмічних районах з інтенсивністю вище 6 балів, необхідно враховувати додаткові вимоги, що забезпечують сейсмостійкість будівельних металоконструкцій:

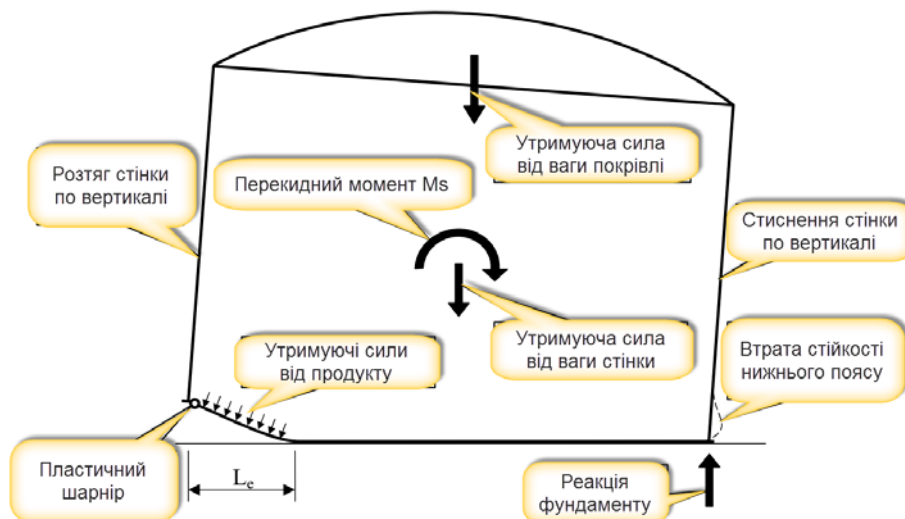
- застосування резервуарів з нижчою висотою;
- в резервуарах з плаваючою покрівлею або понтоном застосовувати затвори м'якого типу;
- при застосуванні резервуарів зі стаціонарною покрівлею треба проводити розрахунок максимальної висоти заповнення резервуару рідиною, щоб уникнути гідродинамічного удару у покрівлю хвилею, що розвивається у резервуарі від горизонтального поштовху;
- у вузлах вводу трубопроводів з запірною арматурою повинні бути передбачені спеціальні пристрої (компенсатори), що забезпечують міцність та надійність згаданих вузлів.

Для резервуарів з плаваючою покрівлею (з понтоном) слід враховувати горизонтальні інерційні сили від плаваючої покрівлі чи понтону.

В загальному випадку резервуари розраховують на стійкість проти перекидання і зрушення від вітрових навантажень, нерівномірних деформацій основи фундаментів чи сейсмічних впливів. На наступному етапі виконують розрахунок основних і допоміжних конструкцій резервуару. Основу фундаментів резервуарів розраховують за двома групами граничних станів:

- 1) за несучою здатністю для перевірки стійкості резервуарів і уникнення їх перекидання;
- 2) за деформаціями (абсолютне вертикальне осідання разом із просіданням центру фундаменту і контурного кола, нерівномірність осідання з урахуванням локального замокання просадочної товщі, крен).

Розрахунок несучої здатності ґрунтової основи, визначення осідання, просідання й крена резервуарів аналогічний іншим будівлям і спорудам і виконується відповідно до вимог норм (ДБН В.2.1-10-2009., 2012). Середнє осідання контурного кола для резервуарів об'ємом до 30000 м<sup>3</sup> має бути не більше 20 см, для резервуарів об'ємом 30000 м<sup>3</sup> і більше – не більше 30 см (ВБН В.2.2-58.2-94,1994). Розрахункова схема до визначення сейсмостійкості резервуару подана на рис. 5.



**Рис. 5.** Розрахункова схема до визначення сейсмостійкості резервуару  
**Fig. 5.** Design scheme for determining the seismic resistance of the reservoir

В умовах землетрусу крім зовнішніх коливань – складова сейсмічного навантаження від вертикальних коливань ґрунту, виникають додаткові навантаження зі сторони продукту на стінку і днище резервуара – це: 1) гідростатичне навантаження і навантаження від дії надлишкового тиску; 2) імпульсивна (інерційна) складова гідродинамічного тиску; 3) конвективна (кінематична) складова гідродинамічного тиску.

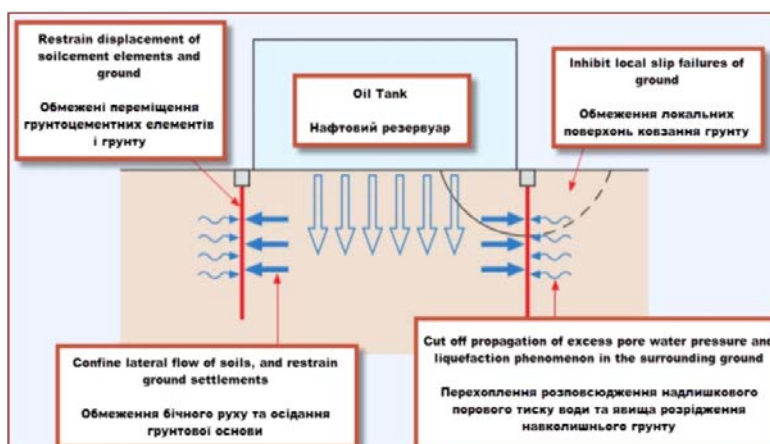
Імпульсивна складова тиску виникає від частини продукту, що рухається в умовах землетрусу разом зі стінкою резервуара. Коливання рідини всередині резервуара створюють конвективний тиск і призводить до появи хвиль на поверхні продукту. Вертикальні коливання основи резервуара також індукують додаткове навантаження на його стінку.

Сейсмостійкість резервуара слід вважати забезпеченою при одночасному виконанні наступних умов: а) резервуар не перекидаються під час землетрусу (критерієм перекидання є граничний стан, при якому на зовнішньому радіусі піднятої частині днища виникає повний пластичний шарнір); б) забезпечена стійкість нижнього поясу стінки від дії повздовжнього і поперечного навантаження; в) забезпечення умови міцності для всіх несучих елементів резервуара.

Можливо кілька концепцій зменшення сейсмічної небезпеки за рахунок покращення властивостей ґрунтових основ шляхом їх армування вертикальними ГЦЕ.

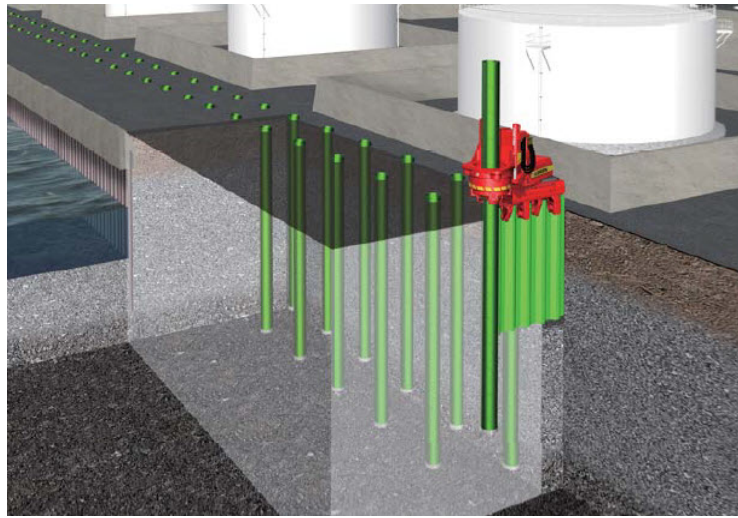
*Концепція №1. Обмеження пошкоджень від розрідження «обмежуючим ґрунтовим сейсмічним амортизатором»* (рис. 6) – це сейсмоізолююча технологія для пом'якшення ударів при поштовхах під час землетрусів, яка включає в роботу ґрунтовий масив із суцільної ґрунтоцементної стінки. Така споруда може ефективно обмежити осідання та бічні зміщення ґрунту, а також переміщення конструкцій.

*Концепція №2. Метод обмеження бічного зміщення ґрунту за рахунок його армування ГЦЕ.* Бічне зміщення ґрунтів, яке викликане їх розрідженням під час землетрусу, а горизонтальні переміщення та осідання резервуарів зменшено за рахунок армування ґрунту у шаховому порядку ГЦЕ з існуючої дамби обвалування (рис. 7), що захищає резервуари з нафтою та нафтопродуктами. Така технологія додатково попереджає витікання забрудненої рідини із пошкоджених трубопроводів.



**Рис. 6.** Концепція № 1 – обмеження пошкоджень від розрідження «обмежуючим ґрунтовим сейсмічним амортизатором»

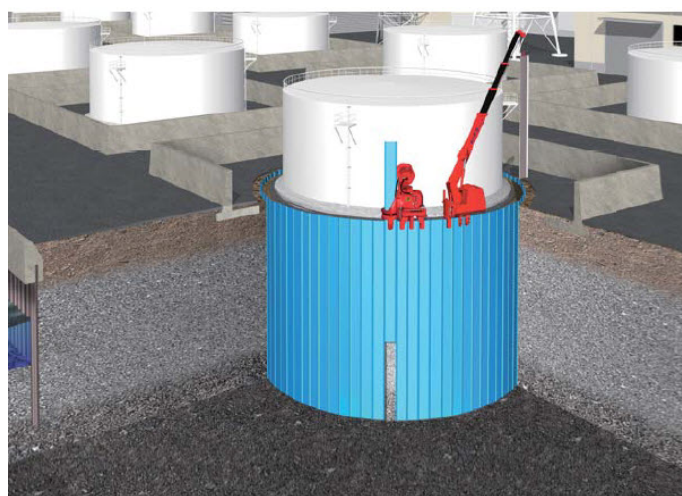
**Fig. 6.** Concept # 1 – limitation of damage from rarefaction "limiting ground seismic shock absorber"



**Рис. 7.** Концепція №2 – обмеження бічного зміщення ґрунту за рахунок його армування ГЦЕ

**Fig. 7.** Concept # 2 – limiting the lateral displacement of soil due to its reinforcement cementitious elements

*Концепція №3. Метод суцільної ґрунтоцементної оболонки.*  
 Розрідження ґрунту під час землетрусу обмежують застосуванням «обмежуючого ґрунтового сейсмічного амортизатора», внаслідок чого ґрунт виявляється замкненим суцільною ґрунтоцементною стінкою (рис. 8). Витікання забрудненої рідини через зміщення резервуару чи пошкодження трубопроводу попереджається за рахунок зменшення як величини осідань основи фундаментів, так і їх нерівномірності.



**Рис. 8.** Концепція №3 – метод суцільної ґрунтоцементної оболонки

**Fig. 8.** Concept # 3 – method of solid cement sheath

*Концепція № 4. Метод огороження ГЦЕ. Осідання та втрата стійкості нафтозахисної ґрунтової дамби, викликані землетрусами, а також витікання забрудненої рідини за межі дамби можуть бути обмежені чи попереджені улаштуванням ґрунтоцементної стінки по контуру дамби (рис. 9).*



**Рис. 9.** Концепція № 4 – метод огороження ГЦЕ

**Fig. 9.** Concept # 4 – method of fencing cementitious elements

Крім того, розрідження ґрунту під час землетрусу обмежують застосуванням «обмежувачого ґрунтового сейсмічного амортизатора», завдяки якому ґрунт виявляється замкненим суцільною ґрунтоцементною стінкою. При цьому може бути попереджене витікання забрудненої рідини через зміщення резервуару чи пошкодження трубопроводу.

*Концепція № 5. Метод суцільної штучної ґрунтоцементної основи.* Зменшення впливу динамічного навантаження на надземну частину споруди при землетрусах за рахунок підвищення пружних деформаційних параметрів основи.

Зменшення впливу динамічного навантаження на надземну частину споруди при землетрусах можливо досягти за рахунок зменшення прискорення і амплітуди коливань основи її фундаментів. Одним із варіантів зменшення сейсмічної інтенсивності є підвищення сейсмічної жорсткості  $V_{sp}$  активного шару ґрунту за рахунок збільшення швидкості розповсюдження в ньому сейсмічних хвиль. Такий ефект можливо досягнути за рахунок підвищення



пружних деформаційних характеристик основи, використовуючи бурозмішувальну технологію (Вознесенский, Кушнарєва, Фуникова, 2014; Kramer, 1996).

При такому підході можливо підвищити модуль пружності основи до 500 – 2000 МПа, швидкість поширення хвиль до 600 – 1000 м/с при сталій щільності.

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 ГЦЕ. Тому вертикальні складові сейсмічного імпульсу (вертикально направлені поштовхи) подушка демпфує і лише у послабленому вигляді передає на фундаментну плиту. В зоні штучної основи вертикальні ГЦЕ частково поглинають і розсіюють енергію сейсмічної хвилі (дисипація) аналогічно пальному фундаменту.

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

Основною ідеєю авторів є розроблення універсальної штучної основи, яка буде забезпечувати нормативні і технологічні вимоги як для статичних умов експлуатації РВС на просадочних і слабких ґрунтах, так і у разі дії сейсмічних впливів різної інтенсивності.

Як приклад наведено геотехнічні рішення для нафтового резервуару РВСП-20000 нафтоперекачувальної станції «Августівка» (с. Августівка Беляївського району Одеської області).

Технологічні параметри РВС-20000 представлені в табл. 1.

**Табл. 1.** Технологічні параметри нафтового резервуару РВСП-20000  
**Tabl. 1.** Technological parameters of the oil reservoir РВСП-20000

Параметри	Значення
Густина продукту (нафта), т/м <sup>3</sup>	0,89
Розрахунковий рівень наповнення продуктом, м	16,2
Рівень води при гідровипробуванні, м	16,75
Внутрішній надлишковий тиск	відсутній
Нормативний внутрішній вакуум	відсутній
Інтенсивність експлуатації (циклів на рік), min/max	20/100
Характеристичне снігове навантаження, кг/м <sup>2</sup>	102
Характеристичне вітрове навантаження, кг/м <sup>2</sup>	51
Розрахункова сейсмічна інтенсивність, балів	8
Температура найхолоднішої доби із забезпеченістю 0,98, °С	мінус 24
Максимальна температура зберігання нафти, °С	плюс 25
Розрахунковий термін експлуатації, років	40
Розрахункова висота хвилі нафти при дії сейсмічного навантаження, м	0,32
Величина припуску на корозію для листів стінки, мм	0
Мінімальна відмітка поверхні окрайки відносно поверхні коре, мм	плюс 0,5

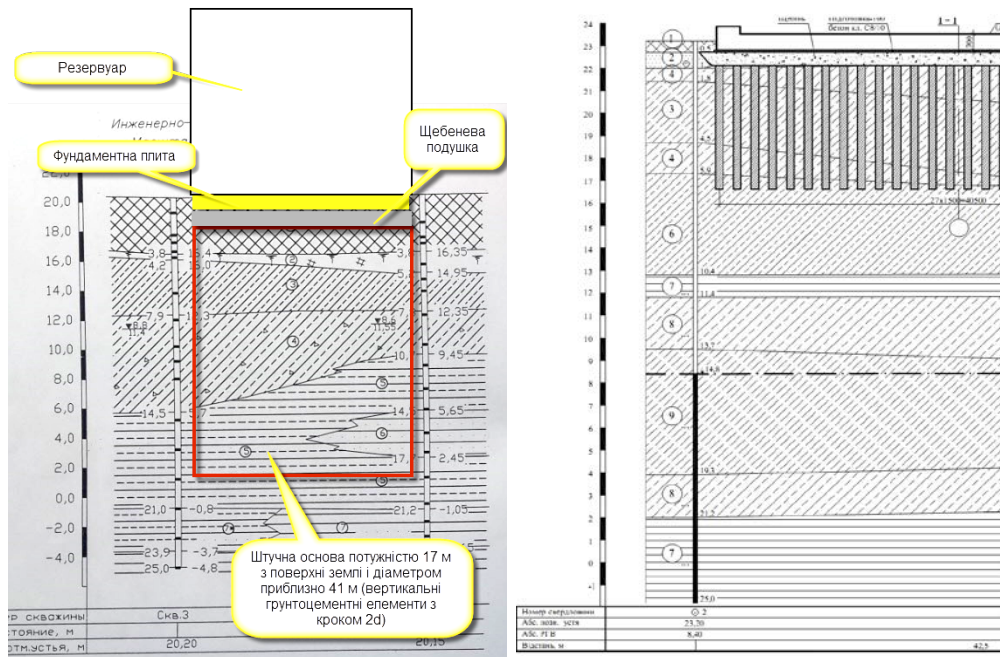
Геометричні параметри РВС-20000: 1) номінальний об'єм 20000 м<sup>3</sup>; 2) геометричний об'єм 20956 м<sup>3</sup>; 3) висота стінки 17,926 м; 4) внутрішній діаметр 39,9 м; 5) площа дзеркала продукту 1250,4 м<sup>2</sup>.

Діаметр фундаментної плити – приблизно 40,5 м. Тиск під подошвою фундаментної плити складає при гідровипробуваннях 168,14 кПа, при експлуатації – 180,86 кПа. Рівномірно розподілене навантаження по контуру фундаменту при гідровипробуваннях складає 31,65 кН/м.п., при експлуатації – 40,33 кН/м.п., при вітрових навантаженнях – ±6 кН/м.п., при сейсмічних впливах – +353,73/-268,67 кН/м.п. Величина рівнодіючої горизонтальних сейсмічних сил, що передається від конструкції резервуару на фундаментну плиту склала 65500 кН.

У геоморфологічному відношенні ділянка знаходиться на водорозділі між Куяльницьким і Хаджибейським лиманами. У геологічній будові беруть участь насипні ґрунти, четвертинні суглинки, які підстеляються піщано-глинистими відкладами куяльницького ярусу неогену, нижче по розрізу залягають меотичні глини. Рівень ґрунтових вод знаходиться на глибині 8,6 – 8,8 м від рівня поверхні землі. Горизонт безнапірний, розвантажується вниз по балці.

Розглядається два майданчики зі складними інженерно-геологічними

умовами. Складність першого майданчику характеризується наявністю на глибині 7,6 м від поверхні землі м'якопластичних і текучих суглинків і супісків, 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 на глибині 21,7 – 23,9 м (рис. 10).



**Рис. 10.** Інженерно-геологічний розріз майданчиків будівництва  
**Fig. 10.** Engineering and geological section of construction sites

Слабкий ґрунт у разі дії сейсмічних впливів може перейти у текучий стан (проявити тиксотропні властивості), отримати додаткове ущільнення, у результаті чого виникнуть наднормативні деформації резервуару. Складність другого майданчику характеризується наявністю просадочної товщі потужністю більше 5 м.

За сейсмічними властивостями категорія ґрунтів – III. Нормативна сейсмічна інтенсивність ділянок будівництва – 8 балів (за картою ЗСР-2004-С (ДБН В.1.1-12:2014.)), розрахункова – 9 балів.

Для цих умов розглядалося декілька геотехнічних рішень:

1) прорізання слабкої і просадочної товщі ґрунту залізобетонними палями перерізом 350 мм x 350 мм для їх спирання на міцні ґрунти, а також

ліквідація просадочних властивостей ґрунту міжпальового простору глибинним ущільненням (влаштування ґрунтових паль діаметром 300 мм), зведення поверх паль фундаментної плити товщиною 0,7 м, шарнірне з'єднання паль з плитою;

2) те саме, що і в першому варіанті, але поверх паль передбачається влаштування щебеневої подушки з метою демпфування коливань резервуару та уникнення передачі горизонтальних навантажень на палі;

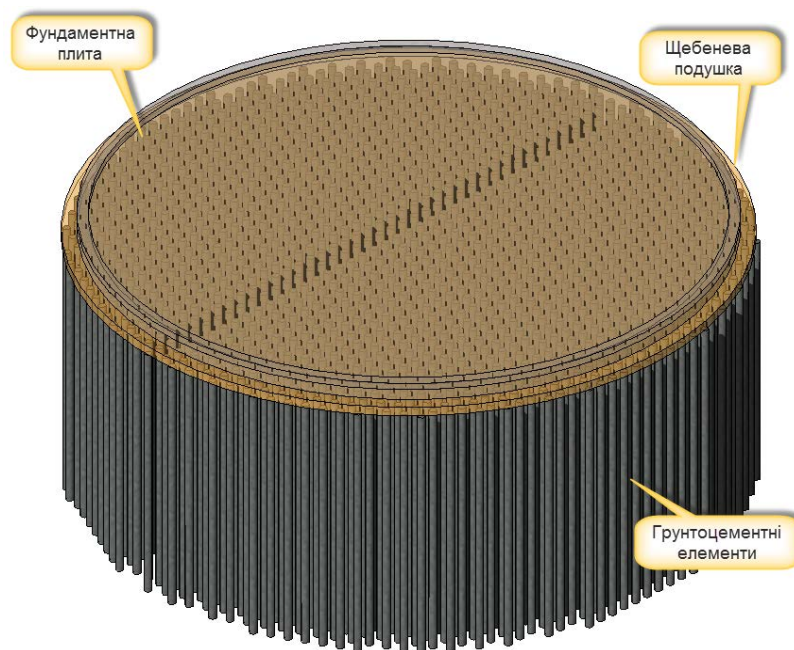
3) влаштування штучної основи шляхом армування слабкого і просадочного ґрунту вертикальними ГЦЕ діаметром 500-650 мм, далі те саме, що і в другому варіанті.

Сприйняття горизонтального сейсмічного навантаження за рахунок роботи паль по ґрунту забезпечується тільки при значній їх кількості (~1000 шт.), що є економічно недоцільним, оскільки при цьому вертикальне навантаження на палі становитиме не більше 35% від допустимої. Тому даний варіант у подальшому не порівнювався.

Варіант з вертикальними ГЦЕ виявився значно дешевшим і його можливо було реалізувати за менший період часу.

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, крена резервуару, а також несучої здатності основи при розрахункових сейсмічних впливах. У результаті розрахунків встановлено, що оптимальним діаметр ГЦЕ є 500 мм, крок – 1,0 м (2d). Інформаційна геотехнічна модель РВСП-20000 наведена на рис. 11.

Для підтвердження коректності рішення проведено моделювання НДС системи «ґрунтовий масив – підсилена основа – щебенева демпферна подушка – фундаменти – резервуар». Задачу вирішували у двомірній («вісесиметричній») постановці з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) із урахуванням розрахункового сейсмічного впливу.



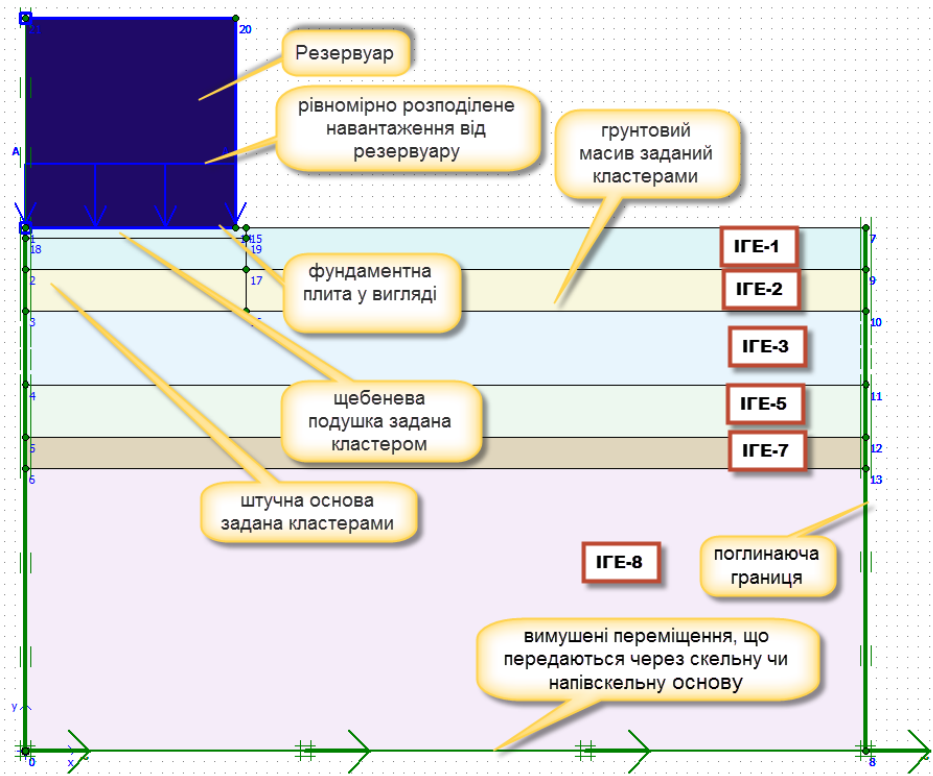
**Рис. 11.** Просторова розрахункова схема системи «підсилена основа – щебенева подушка – фундаменти»

**Fig. 11.** Spatial calculation scheme of the system "reinforced base – crushed stone pillow – foundations"

Ґрунтова основа, штучна основа і щебенева подушка задані у вигляді кластерів з відповідними характеристиками. Фундаментна плита задана балочним елементом з відповідною згинальною  $EI$  та нормальною  $EA$  жорсткістю, яка відповідає товщині плити 0,7 м. Для визначення параметрів коливання резервуару його змодельовано балочними елементами, а нафта моделювалася кластером з відповідними характеристиками. Розрахункова схема наведена на рис. 12.

Розміри розрахункової зони в сторони від споруди приймалися з умови недопущення їх впливу на деформування основи. За глибиною межа розрахункової області обиралася з умови відсутності додаткових напружень і прийнята 50 м (для умовного досягнення скельного чи напівскельного ґрунту); задані вимушені коливання до нижньої площини розрахункової моделі у вигляді акселерограм землетрусу (з параметрами, що відповідають інтенсивності сейсмічних впливів у 9 балів); на правій межі моделі задано поглинаючі границі, задачею яких є недопущення відбиття хвиль по бокових гранях сітки; ґрунт моделюється лінійною моделлю з відповідними

коефіцієнтами пружності. Вплив гідростатичного тиску води враховувався при задаванні відповідного рівня ґрунтових вод. Демпфування будівлі та основи змодельовано за допомогою коефіцієнтів Релея. Вимушені горизонтальні переміщення нижньої грані розрахункової області задано  $u_x=0,01$  м, вертикальні –  $u_y=0$ .



**Рис. 12.** Розрахункова вісесиметрична схема системи «ґрунтовий масив – підсилена основа – щебенева демпферна подушка – фундаменти – резервуар»  
**Fig. 12.** Estimated axially symmetric scheme of the system "the soil mass – the reinforced base – crushed stone damping pillow – foundations - reservoir"

Приклад загального вигляду штучної основи з вертикальних ГЦЕ наведено на рис. 13.

За аналізом результатів розрахунків, моделювання та порівняння варіантів можливо зробити такі **висновки**:

1. Варіант фундаментної плити на штучній ґрунтоцементній основі, яка перетворює слабку та просадочну товщу на композитний матеріал, є сейсмостійким, коштує менше за пальовий і при цьому є більш технологічним. Всі технологічні й нормативні вимоги, які висуваються до експлуатації

резервуарів, задовольняються.



**Рис. 13.** Загальний вигляд штучної основи з вертикальних ГЦЕ  
**Fig. 13.** General view of artificial base from of vertical cementitious elements

2. За рахунок армування частини ґрунтового масиву слабкої і просадочної основи зменшується амплітуда коливань резервуару, змінюється характер прискорень ґрунту і знижуються значення прискорень ґрунту в рівні дна котловану. Такий результат забезпечується збільшенням швидкості поширення сейсмічних хвиль у штучній ґрунтоцементній основі, а також за рахунок підвищення характеристик міцності і деформативності.

3. При сейсмічних впливах з розрахунковою інтенсивністю 9 балів максимальне розраховане горизонтальне переміщення верху резервуару не перевищило 6 мм, низу – 10 мм. Різниця переміщень низу відносно верху при цьому складає 16 мм, що менше за 20 мм і тому є допустимим. Резервуар не перекидається, дотримується умова зрушення фундаментної плити відносно щебеневої подушки.

#### Список літератури

1. ДБН В.1.1-45:2017 Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Загальні положення. К.: Мінрегіонбуд України, 2017. – 39 с.
2. Кендзера А.О. Моделювання впливу ґрунтової товщі на параметри сейсмічної небезпеки / А.О. Кендзера, А.Ю. Семенова // Світ геотехніки. – 2017. – №3 (55). – С. 4-14.
3. 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.: НДІБК, 2015. – № 4. – С. 12-18.
4. Selvaraju S. Vibro replacement stone columns for large steel storage tanks in Vietnam / S. Selvaraju, Z. Wei He, K. Weng Leong // Proc. of the 19<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Sep. 17 – 22, 2017 / COEX, Seoul, Korea) – ed. by W. Lee, J.-S. Lee, H.-K. Kim, D.-S. Kim. – Seoul. – 2017. – P. 2651 – 2654.
5. Anumod A.S. Finite Element Analysis of Steel Storage Tank Under Siesmic Load / A.S. Anumod, S. Harinarayanan, S. Usha // Intern. J. of Engineering Research and Applications (IJERA). – January 2014. – P. 47 – 54. – ISSN: 2248-9622 Trends and Recent Advances in Civil Engineering (TRACE- 24th-25 th January 2014).
6. ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво у сейсмічних районах України. – К.: Мінрегіонбуд України, 2014. – 110 с.
7. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях / С-Пб.: НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. – 381 с.
8. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / Под ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2014. – 728 с.
9. Ставницер Л.Р. Сейсмостойкость оснований и фундаментов / Л.Р. Ставницер // Монография. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 448 с.
10. Абрамова Т.Т. Современные методы управления свойствами грунтов на участках высоких динамических нагрузок. М.: ГеоТехника. – 2015. – №4.– С. 6 – 25.
11. Вознесенский Е.А. Природа и закономерности затухания волн напряжений в грунтах / Е.А. Вознесенский, Е.С. Кушнарева, В.В. Фуникова. – М.: ФЛИНТА, 2014. – 104 с.
12. 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.
13. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований / [П.А. Коновалов, Р.А. Мангушев, С.Н. Сотников и др.] // Научн. изд. – М.: АСВ, 2009. – 336 с.
14. Зоценко М.Л. Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом / М.Л. Зоценко, Ю.Л. Винников, В.М. Зоценко. – Х.: Друкарня Мадрид, 2016. – 94 с.
15. Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering / S.L. Kramer. – New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996. – 672 p.
16. Innovative projects in difficult soil conditions using artificial foundation and base, arranged without soil excavation / P. Kryvosheiev, G. Farenyuk, V. Tytarenko, I. Boyko, M. Kornienko, M. Zotsenko, Yu. Vynnykov, V. Siedin, V. Shokarev, V. Krysan // Proc. of the 19<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Sep. 17 – 22, 2017 / COEX, Seoul, Korea) – ed. by W. Lee, J.-S. Lee, H.-K. Kim, D.-S. Kim. – Seoul. – 2017. – P. 3007 – 3010.
17. Probabilistic analysis of deformed mode of engineering constructions soil-cement grounds / Yu. Vynnykov, O. Voskobiinyk, M. Kharchenko, V. Marchenko // Materials Science, Engineering and Chemistry. – MATEC Web of Conf. Proc. of the 6<sup>th</sup> Intern. Scientific Conf. “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings” (Transbud-2017) (Kharkiv, Ukraine, April 19-21, 2017). – Vol. 116 (2017). – 02038 (2017). – ISBN: 978-2-7598-9022-4. Published online: 10 July 2017. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201711602038>.
18. Seismic behavior of LNG storage tank considering soil-foundation-structure interaction with different foundation types / J. Gon Ha, H. Joon Park, M. Kyo Lee, H. Lee, D.-S. Kim, S. Kwon, H. Kim // Proc. of the 19<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical



- Engineering (Sep. 17 – 22, 2017 / COEX, Seoul, Korea) – ed. by W. Lee, J.-S. Lee, H.-K. Kim, D.-S. Kim. – Seoul. – 2017. – P. 931 – 934.
19. Soil mix: influence of soil inclusions on structural behaviour / P. Ganne, N. Denies, N. Huybrechts et al. // Proc. of the 15th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Athens, 2011). – Amsterdam: IOS Press, 2011. – P. 977 – 982.
  20. Strength properties of densely compacted cement-mixed gravelly soil / A. Ezaoui, F. Tatsuoka, S. Furusawa, K. Yirao, T. Kataoka // Proc. of the 18th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris. – 2013. – Vol. 1. – P. 329 – 332.
  21. Ground improvement using rigid inclusion for the foundation of LNG tanks / B. Hor, S. Hyun Jee, M. Jun Song, D. Young Kim // Proc. of the 19<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Sep. 17 – 22, 2017 / COEX, Seoul, Korea) – ed. by W. Lee, J.-S. Lee, H.-K. Kim, D.-S. Kim. – Seoul. – 2017. – P. 2907 – 2910.
  22. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти будівель і споруд. Основні положення проектування (зі змінами №1 і №2). – К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 161 с.
  23. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. – К.: Державний Комітет України по нафті і газу (Держкомнафтогаз), 1994. – 98 с.

### References

1. DBN W.1.1-45:2017. 2016. Buildings and structures in complex engineering and geological conditions. General Provisions K. Minregionbud Ukraine. 39 p. (In Ukrainian).
2. Kendzera A.O., Semenova A.Yu. 2017. Modeling of the influence of the soil layer on the parameters of seismic hazard. *Svit geotekhniki*. №3 (55). S. 4-14. (In Ukrainian).
3. Kendzera A.O., Egupov K.V., Maryenkov N.G. et. al. 2015. Seismic microdistribution of construction sites for seismic resistance design of buildings and structures in seismic areas of Ukraine. *Science and construction. K. NDIBK*. № 4. S. 12-18. (In Ukrainian).
4. Selvaraju S., Wei He Z., Weng Leong K. 2017. Vibro replacement stone columns for large steel storage tanks in Vietnam. Proc. of the 19th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Sep. 17-22, 2017 / COEX. Seoul. Korea). ed. by W. Lee, J.-S. Lee, H.-K. Kim, D.-S. Kim. Seoul. P. 2651-2654.
5. Anumod A.S. Harinarayanan S., Usha S. 2014. Finite Element Analysis of Steel Storage Tank Under Siesmic Load. *Intern. J. of Engineering Research and Applications (IJERA)*. January P. 47-54. ISSN: 2248-9622 Trends and Recent Advances in Civil Engineering (TRACE-24th-25th January 2014).
6. DBN W.1.1-12:2014. 2014. Construction in seismic regions. K. Minregionbud Ukraine. 110 p. (In Ukrainian).
7. Ischihara K. 2006. Ground Behavior in Earthquakes. S-PB. *NPO «Georekonstrukciya-Fundamentproekt»*. 381 p. (In Russian).
8. Reference book of geotechnics. Foundations, foundations and underground structures. 2014. Edited by Ilicheva V. A. and Mangusheva R.A. M. *ASV*. 728 p. (In Russian).
9. Stavnicer L.R. 2010. Seismic resistance of foundations and foundations. M. *ASV*. 448 p. (In Russian).
10. Abramova T.T., Voznesenskiy E.A. 2015. Modern methods of managing soil properties in areas of high dynamic loads. M. *GeoTechniks*. №4. S. 6-25. (In Russian).
11. Voznesenskiy E.A., Kuschnareva E.S., Funikova V.V. 2014. The nature and patterns of attenuation of stress waves in soils. M. *FLINTA*. 104 p. (In Russian).
12. Zotsenko N., Vynnykov., Zotsenko V. 2015. Soil-cement piles by boring-mixing technology. Energy, energy saving and rational nature use. Oradea University Press. P. 192-253.
13. Konovalov P.A., Mangushev R.A., Sotnikov S.N. et al. Foundations of steel tanks and deformation of their bases. M. *ASV*. 2009. 336 p. (In Russian).
14. Zotcsenko M.L., Vynnykov Yu.L., Zotsenko V.M. 2016. Crushing ground cement piles, which are made by the mixing method. H. *Drukarnya Madrid*. 94 p. (In Ukrainian).

15. Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering. New Jersey. Prentice Hall. Upper Saddle River. 1996. 672 p.
16. Kryvosheiev P., Farenjuk G., Tytarenko V., Boyko I., Kornienko M., Zotsenko M., Vynnykov Yu., Siedin V., Shokarev V., Krysan V. 2017. Innovative projects in difficult soil conditions using artificial foundation and base, arranged without soil excavation. Proc. of the 19th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Sep. 17-22, 2017. COEX, Seoul, Korea) – ed. by W. Lee, J.-S. Lee, H.-K. Kim, D.-S. Kim. Seoul. P. 3007-3010.
17. Vynnykov Yu., Voskobiinyk O., Kharchenko M., Marchenko V. 2017. Probabilistic analysis of deformed mode of engineering constructions soil-cement grounds. Materials Science, Engineering and Chemistry. MATEC Web of Conf. Proc. of the 6th Intern. Scientific Conf. “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings” (Transbud-2017) (Kharkiv, Ukraine, April 19-21, 2017). Vol. 116 (2017). 02038 (2017). ISBN: 978-2-7598-9022-4. Published online: 10 July  
DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602038>.
18. Ha J. Gon, Park H. Joon, Lee M. Kyo, Lee H., Kim D.-S., Kwon S., Kim H. 2017. Seismic behavior of LNG storage tank considering soil-foundation-structure interaction with different foundation types. Proc. of the 19th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Sep. 17-22, 2017 / COEX, Seoul, Korea) ed. by W. Lee, J.-S. Lee, H.-K. Kim, D.-S. Kim. Seoul. P. 931-934.
19. Ganne P., Denies N., Huybrechts N. et al. 2011. Soil mix: influence of soil inclusions on structural behavior. Proc. of the 15th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Athens, 2011). Amsterdam: IOS Press. P. 977- 982.
20. Ezaoui A., Tatsuoka F., Furusawa S., Yirao K., Kataoka T. 2013. Strength properties of densely compacted cement-mixed gravelly soil. Proc. of the 18th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris. Vol. 1. P. 329-332.
21. Hor B., Hyun Jee S., Song M. Jun, Kim D. Young. 2017. Ground improvement using rigid inclusion for the foundation of LNG tanks. Proc. of the 19th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Sep. 17-22, 2017 / COEX, Seoul, Korea) ed. by W. Lee, J.-S. Lee, H.-K. Kim, D.-S. Kim. Seoul. P. 2907-2910.
22. DBN W.2.1-10-2009. 2012. Basics and foundations of buildings and structures. Main design provisions (with amendments №1 and №2). K. Minregionbud Ukraine. 161 p. (In Ukrainian).
23. VBN W.2.2-58.2-94. 1994. Reservoirs vertical steel for storage of oil and petroleum products with a pressure of saturated vapor no higher than 93.3 kPa. K. State Committee of Ukraine for Oil and Gas. 98 p. (In Ukrainian).