

Зоценко М.Л., д.т.н., професор
Тимофєєва К.А., аспірант

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СИСТЕМИ «ГРУНТОЦЕМЕНТНИЙ ПРОТИФІЛЬТРАЦІЙНИЙ ЕКРАН ШЛАМОВОГО АМБАРА – ОСНОВА»

Розглянуто конструкцію шламового амбара з гідроізоляцією стінок котловану січними ґрунтоцементними елементами у два ряди, які виготовляються за бурозмішувальним методом без виймання ґрунту. З'ясовано, що саме вони формують протифільтраційну завісу за типом «стіна в ґрунті» до водотривкого шару без гідроізоляції дна. З метою перевірки надійності конструкції амбара було проведено обчислювальний експеримент з визначення напружено-деформованого стану системи «ґрунтоцементний протифільтраційний екран шламового амбара – ґрунтова основа». За результатами розв'язання пружно-пластичної задачі нелінійної механіки ґрунтів методом скінченних елементів встановлено, що запропонована конструкція протифільтраційного екрана шламового амбара надійна і забезпечує необхідні експлуатаційні якості.

Ключові слова: *шламовий амбар, гідроізоляція, ґрунтоцемент, протифільтраційний екран, напружено-деформований стан.*

Зоценко Н.Л., д.т.н., професор
Тимофеева Е.А., аспірант

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «ГРУНТОЦЕМЕНТНЫЙ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫЙ ЭКРАН ШЛАМОВОГО АМБАРА – ОСНОВАНИЕ»

Рассмотрена конструкция шламового амбара с гидроизоляцией стенок котлована ґрунтоцементными элементами, изготовленными буросмесительным методом без извлечения ґрунта в два ряда. Выяснено, что именно они формируют противофильтрационную завесу по типу «стена в ґрунте» до водоупорного слоя без гидроизоляции дна. С целью оценки надежности конструкции амбара был проведен вычислительный эксперимент по определению напряженно-деформированного состояния системы «ґрунтоцементный противофильтрационный экран шламового амбара – ґрунтовое основание». По результатам решения упругопластической задачи нелінійной механіки ґрунтов методом конечных элементов встановлено, что предложенная конструкция противофильтрационного экрана шламового амбара является надежной и обеспечивает необходимые эксплуатационные качества.

Ключевые слова: *шламовый амбар, гидроизоляция, ґрунтоцемент, противофильтрационный экран, напряженно-деформированное состояние.*

Zotcenko N., ScD, Professor
Tymofieieva K., post-graduate
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

THE STRAIN-STRESS DISTRIBUTION MODEL ENGINEERING OF THE SYSTEM «SOILCEMENT GROUND WATER CUTOFF OF SLUDGE PIT – GROUND BASE»

During the construction and operation of oil and gas wells accompanied by the formation of a large number of liquid waste. For environmental waste from drilling oil and gas wells to need insulate and neutralize. Waste collected in the sludge pits or in containers for further disposal. Sludge pits for its effectiveness must have reliable waterproofing.

The article deals with the design of the barn with waterproofing slurry trench walls soilcement elements in two rows, made by drill-mixing technology without removing the soil that form ground water cut off type «wall in soil» to the impermeable waterproofing layer without the bottom of the pit. Laboratory studies have shown soilcement its high water resistance, which is not less than W6. Experimental laboratory studies corrosive components cuttings on physical and mechanical properties soilcement shown that it is chemically highly resistant material and is reliable for ground water cutoff sludge pits.

Today's advances in science can simulate the real processes with the using computer technology. With this aim in solving geotechnic problems often use the finite element method. The specificity of numerical modeling of stress-strain state of the ground is the fact that soils deformed nonlinearly. That dependence is the stress of displacement is a curves. Using the method of finite elements enables the calculation system of «fence – soil» to use different models of soil. In the calculation often used of ideal elastic-plastic model with Mohr-Coulomb yield criterion. It is quite schematically describes the behavior of real soil, as it volumetric compression modules and faults is constant. Now to solve problems of the method of finite elements is uses software packages such as Lira, SCAD, Midas and Plaxis.

The construction sludge pit trench walls with waterproofing soilcement impervious to the elements without waterproofing layer the bottom of the pit.

In order to ensure reliability barn design computational experiment was conducted to determine the strain-stress distribution of system «soilcement ground water cutoff of sludge pit – soil foundation». The analysis of finite element modeling found that the proposed construction ground water cutoff of sludge pit is reliable and provides the necessary serviceability.

The analysis of finite element modeling found that the proposed scheme of arrangement fences barns for different geological conditions are reliable and provide necessary their serviceability. In particular, two row elements placing vertical soilcement when they reach impermeable layer stability factor at the excavation stage was $k_{st} = 2.5$, that less regulation 1.2. Regulatory stability factor is taken as protections for excavation. At the stage of filling the trench cuttings an additional pressure on the bottom and on the walls of the barn, which reduces the shear stress in the construction of his fence.

Keywords: *sludge pit, waterproof, soilcement, watertight screen, strain-stress distribution.*

Вступ. Аналіз численних досліджень відходів буріння та експлуатації нафтогазових свердловин показав, що вони містять у своєму складі широкий спектр хімічних речовин, зокрема і нафту. Ці речовини погіршують екологічний стан природи, уповільнюють ріст або навіть знищують рослинність, забруднюють ґрунтові води, які у свою чергу за рахунок постійного руху розповсюджують забруднення на сотні кілометрів від території бурової. Як результат, потрапляння бурових відходів у навколишнє природне середовище може спричинити екологічну катастрофу. Для запобігання цьому шламові амбари повинні мати надійну гідроізоляцію.

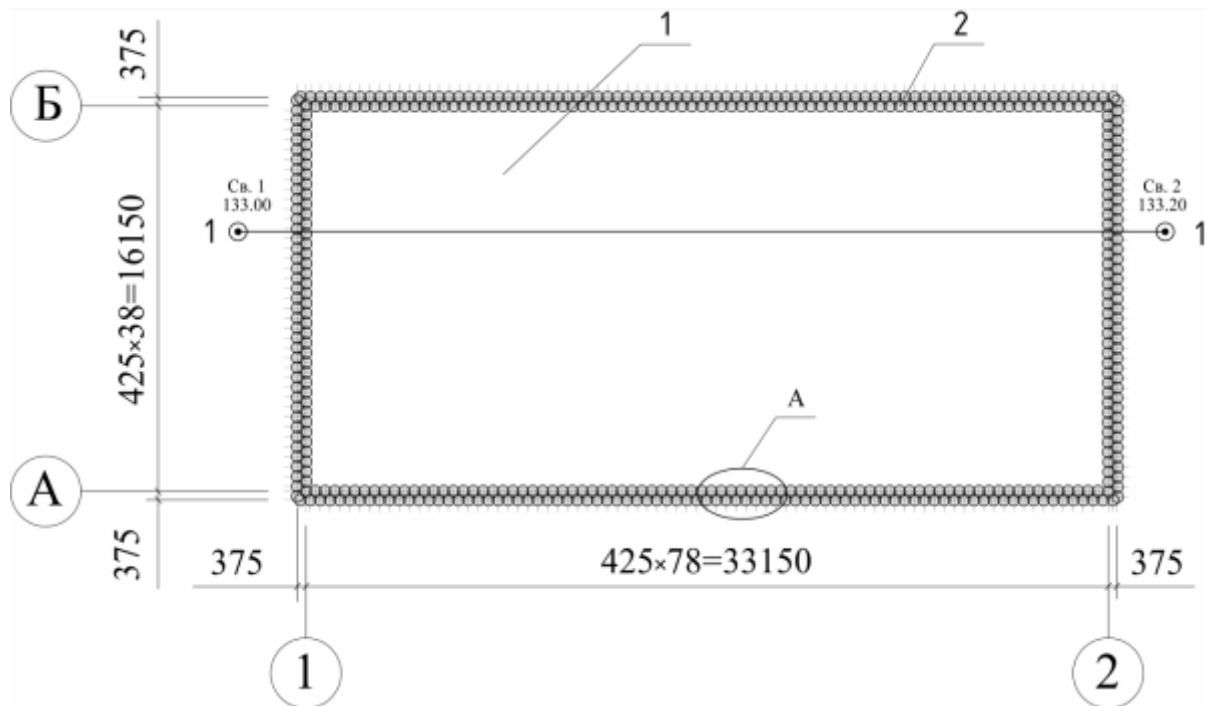
Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Лабораторні дослідження ґрунтоцементу показали його високу водонепроникність, яка складає не менше W6 [1 – 6]. Міцність ґрунтоцементу, як і бетону, зростає в часі, й такий процес може тривати роками. Найбільш швидко зростання міцності спостерігається у початковий період. Підвищення температури та вологості середовища значно прискорює процес тужавіння ґрунтоцементу. При зберіганні ґрунтоцементу у воді спостерігається більш інтенсивне зростання міцності. Це свідчить про те, що найбільш сприятливим для тужавіння ґрунтоцементу слід вважати його знаходження у водонасичених ґрунтах або у воді. Експериментальні лабораторні дослідження впливу агресивних складових бурового шламу на фізико-механічні характеристики ґрунтоцементу показали, що він є хімічно високостійким матеріалом і надійним для протифільтраційного екрана шламових амбарів.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Унаслідок значної кількості факторів, що впливають на роботу системи «ґрунтоцементний протифільтраційний екран шламового амбара – ґрунтова основа», існуючий аналітичний підхід не може з достатнім ступенем точності відобразити механізм змін її напружено-деформованого стану (НДС). Тому НДС цієї системи слід оцінювати за допомогою числових методів, удосконалюючи розрахункові моделі з максимальною ретельністю.

Постановка завдання. Завданням цього дослідження є встановлення взаємодії ґрунтової основи з ґрунтоцементним гідроізоляційним огородженням котловану шламового амбара при статичних та динамічних впливах в умовах, коли він порожній та заповнений відходами, а також їх аналіз. Це дослідження допоможе визначити надійність запропонованої конструкції шламового амбара.

Основний матеріал і результати. Розглянемо конструкцію шламового амбара з гідроізоляцією стінок котловану ґрунтоцементними елементами до водотривкого шару без гідроізоляції днища котловану. На рис. 1 показано план будівництва та схему розташування по периметру котловану із січних ґрунтоцементних елементів у два ряди, виготовлених за бурозмішувальною технологією без виймання ґрунту, які формують протифільтраційну завісу по типу «стіна у ґрунті».

У результаті проведення геологічних вишукувань встановлено таке нашарування ґрунтів (рис. 2): ПЕ-1 – ґрунтово-рослинний шар, потужність 0,2 – 0,7 м; ПЕ-1а – суглинок гумусований, потужність 0,3 – 0,8 м; ПЕ-2 – суглинок лесовий, карбонатний, важкий, пілуватий, твердий, потужність 0,7 – 0,9 м; ПЕ-3 – суглинок лесовий, напівтвердий, карбонатний, важкий пілуватий, потужність 1,9 – 2,5 м; ПЕ-4 – суглинок лесовий, карбонатний, важкий, тугопластичний, пілуватий, потужність 0,3 – 1,5 м; ПЕ-5 – супісок лесовий, м'якопластичний, з конкреціями карбонатів, пілуватий, потужність 4,2 – 5,5 м; ПЕ-6 – глина карбонатна, легка, пілувата, напівтверда, пройдена на глибину 14,9 м. Гідрогеологічні умови території характеризуються наявністю постійного безнапірного водоносного горизонту ґрунтового типу, водовміщуючими породами слугують четвертинні відклади. Водотривкий шар представлений ПЕ-6 – глина карбонатна, легка пілувата, пройдена на глибину 14,9 м. На момент вишукувань ґрунтова вода на плато знаходилася на глибині 5,8 м.



**Рисунок 1 – Схема розташування ґрунтоцементних елементів шламового амбара:
1 – котлован; 2 – ґрунтоцементні елементи**

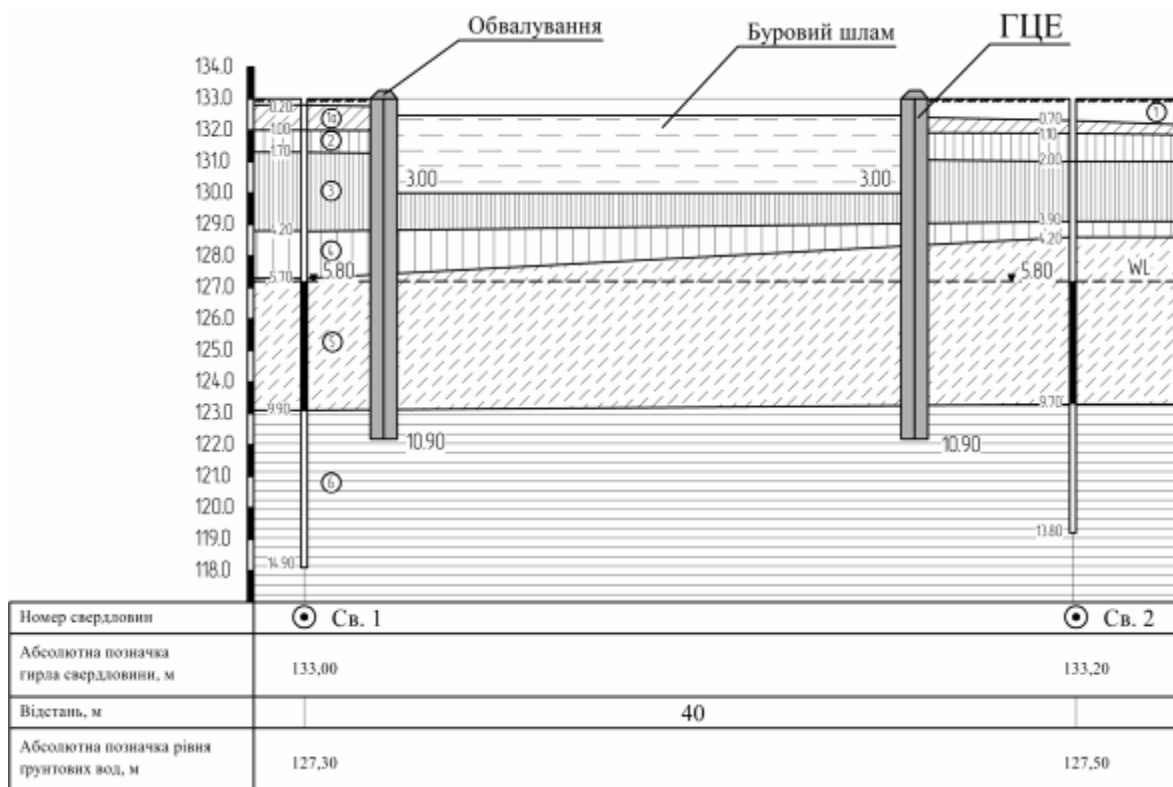


Рисунок 2 – Інженерно-геологічний розріз 1-1 майданчика будівництва шламового амбара

Сьогоднішні досягнення науки дозволяють моделювати реальні процеси за допомогою комп'ютерної техніки. Дискретизація розрахункової області при розв'язанні нелінійних задач НДС ґрунтових основ виконується за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ). Такий підхід дозволяє розглядати НДС при одночасному прикладанні всіх навантажень чи покроковому прикладанні. Може бути врахований вихідний напружений стан, досягнутий системою до прикладання навантаження. Компоненти напружень визначаються тільки в центрах континуальних скінченних елементів, що моделюють ґрунт, переміщення – у вузлах сітки. Особливістю методу, який розглядається, є виконання розрахунків за граничними станами обох груп на одній розрахунковій схемі при одній моделі ґрунту.

Інформація, що вводиться, складається з таких масивів вихідних даних: 1) координати вузлів; 2) зв'язки (вузли з нульовими переміщеннями та вузли з рівними переміщеннями); 3) опис навантажень (величина, напрямок і точки (вузли), до яких прикладаються); 4) опис скінченних елементів (номери вузлів, площі перерізів та моменти інерції стержнів; механічні характеристики ґрунтів: модуль деформації, коефіцієнт Пуассона, кут внутрішнього тертя, питоме зчеплення, швидкість дилатації; показники опору зрушенню й кут нахилу поверхні ковзання, природний та вихідний напружений стан); 5) максимальна кількість циклів ітерацій. На друк видаються такі результати розрахунку: 1) переміщення вузлів; 2) компоненти напружень у центрах континуальних скінченних елементів; 3) поздовжні, поперечні сили й моменти на кінцях стержневих елементів.

Для встановлення стійкості протифільтраційної завіси по типу «стіна у ґрунті», виготовленої за бурозмішувальною технологією без виймання ґрунту із ґрунтоцементних елементів, та виявлення потенційно-небезпечних явищ, які можуть вплинути на експлуатацію споруди, виконано розрахунки НДС ґрунтоцементного масиву стіни котловану за допомогою програмного комплексу Plaxis 8. Розрахункова схема стіни котловану приймалася довжиною 33 м та глибиною 3 м.

Розрахункова схема – ідеалізована модель об'єкта, яка розділяється на скінченні елементи (СЕ). Результатом такого поділу є встановлення положення вузлів СЕ сітки. Специфікою розрахункової схеми системи «ґрунтоцементний протифільтраційний екран шламового амбара – ґрунтова основа» є той факт, що порівняно з початковим напруженим станом на стадії влаштування амбара буде розвантаження ґрунтової основи. Тому стислої товщі як такої в цій задачі не буде. Отже, розміри розрахункової області встановлювалися таким чином:

1) бічні межі прямокутної розрахункової зони приймають відповідно на вертикальній осі симетрії Y й на достатній відстані від бічної поверхні огорожувальної конструкції для максимального зменшення її впливу з умови заборони горизонтальних переміщень, концентрації напружень й ущільнення ґрунту на контакті із зовнішньою межею розрахункової зони (для виконання цієї умови звичайно досить прийняти сторону розрахункової області, не меншою ніж ширина котловану, м);

2) верхню горизонтальну межу розрахункової зони розміщують на рівні поверхні ґрунтового масиву;

3) нижню горизонтальну межу розрахункової зони на першому етапі досліджень прийнята такою, що дорівнює ширині котловану.

Після призначення розмірів розрахункової зони і характеристик матеріалу моделі, а також автоматичного поділу її на СЕ встановлюють граничні умови, що відповідають натурним особливостям роботи огорожувальної конструкції та масиву ґрунту, а саме: всі вузли, що знаходяться на нижній межі розрахункової зони, закріплюють нерухомо; вузли бічних меж не можуть мати горизонтальних переміщень.

Комп'ютерне моделювання процесу влаштування котловану і його огороження містить такі стадії: 1) визначення НДС ґрунтового масиву до початку влаштування котловану; 2) влаштування огороження (протифільтраційного екрана); 3) екскавація ґрунту до проектної позначки; 4) відкачування ґрунтових вод (за необхідності).

Густота сітки збільшується переважно лише в місцях прогнозованого великого градієнта функцій НДС. У практиці застосування МСЕ густину сітки визначають експериментальним способом, згущення виконують до тих пір, поки результат розрахунку при наступному згущенні у півтора раза буде відрізнятися від попереднього не більше ніж на 3%. Ділити на СЕ, раціонально використовуючи принцип фрагментації. Сітка виконується густішою у місцях, де необхідно оцінити НДС із більшою точністю (локальна крупність). Геометрія СЕ також суттєво впливає на точність рішення, тому елементи повинні наближатися до рівносторонніх [7 – 11].

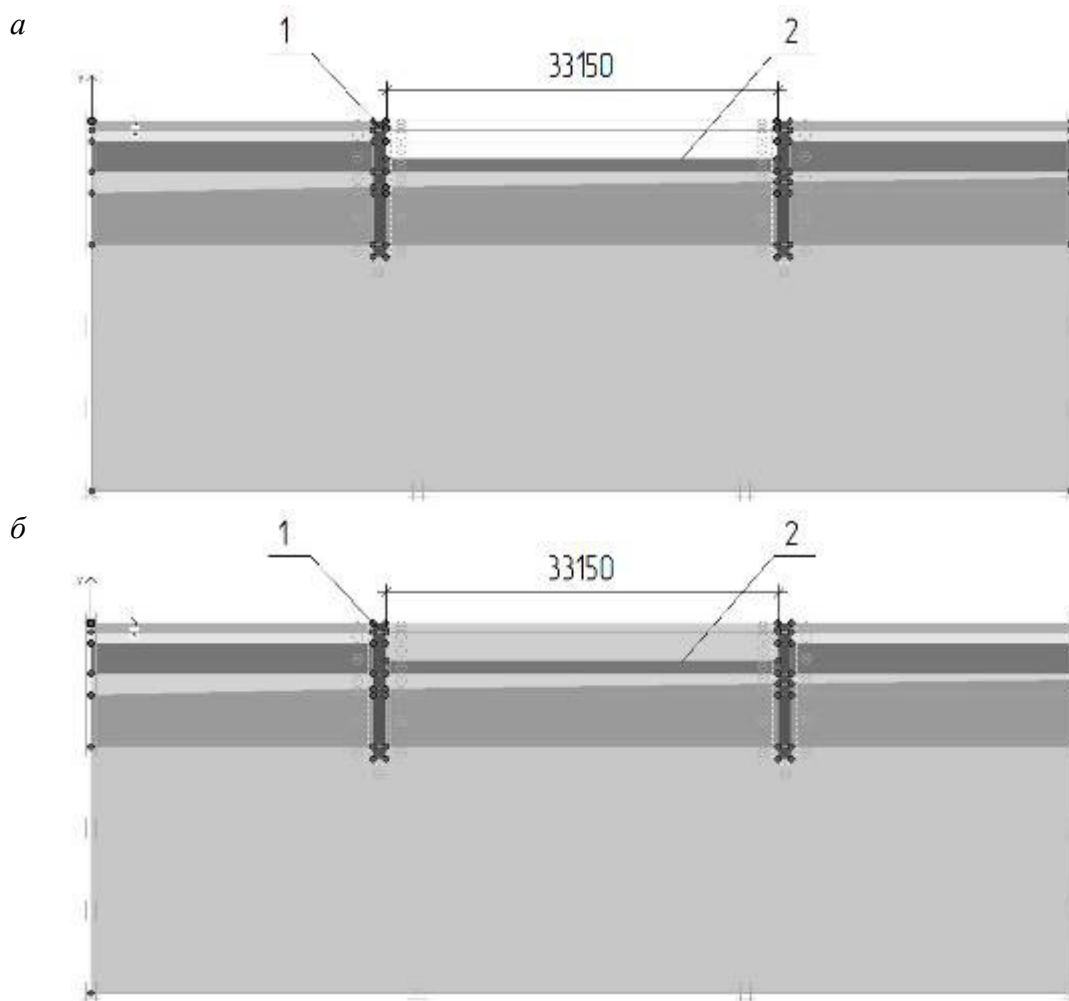


Рисунок 3 – Розрахункова схема та схема скінченних елементів амбара на стадіях: а – влаштування; б – експлуатації;

1 – ґрунтоцементні елементи; 2 – днище котловану на глибині 3 м

Параметри міцності (c , φ) моделі для ґрунтів (Strength) призначалися за даними випробовувань ґрунтів на зрушення. Параметри деформативності (Stiffness) ґрунтів (E) також призначалися за даними випробовувань у компресійному приладі. Коефіцієнт Пуассона ν брався відповідно до ДСТУ Б В.2.1-4-96 для суглинків 0,35 – 0,37. При цьому менші значення ν бралися при більшій щільності ґрунту. Вплив гідростатичного тиску води враховувався при задаванні відповідного рівня ґрунтових вод.

Для моделювання вертикальних ґрунтоцементних елементів використана лінійна модель (Linear Elastic). Ця модель відповідає закону Гука – ізотропній лінійності пружності. Модель містить два пружних параметри жорсткості, а саме: модуль E і коефіцієнт Пуассона ν . Ці значення встановлювалися відповідно до ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Для просторових кластерів цього типу використано опцію Non-porous (непористий). При цьому не будуть ураховуватися початковий і додатковий поровий тиск у кластерах відповідного типу.

Використання коефіцієнтів надійності по ґрунту лише для параметрів γ , ϕ , c , E при застосуванні середніх характеристик достатньо, щоб забезпечити необхідну довірчу вірогідність результатів розрахунку.

Пружно-пластична задача, що розглядається, поставлена так, щоб властивості ґрунтового середовища, які враховуються в розрахунку, могли бути описані реально визначеними характеристиками.

Розрахункова схема та схема скінченних елементів амбара наведені на рис. 3, результати розрахунків, відповідно, – на рис. 4.

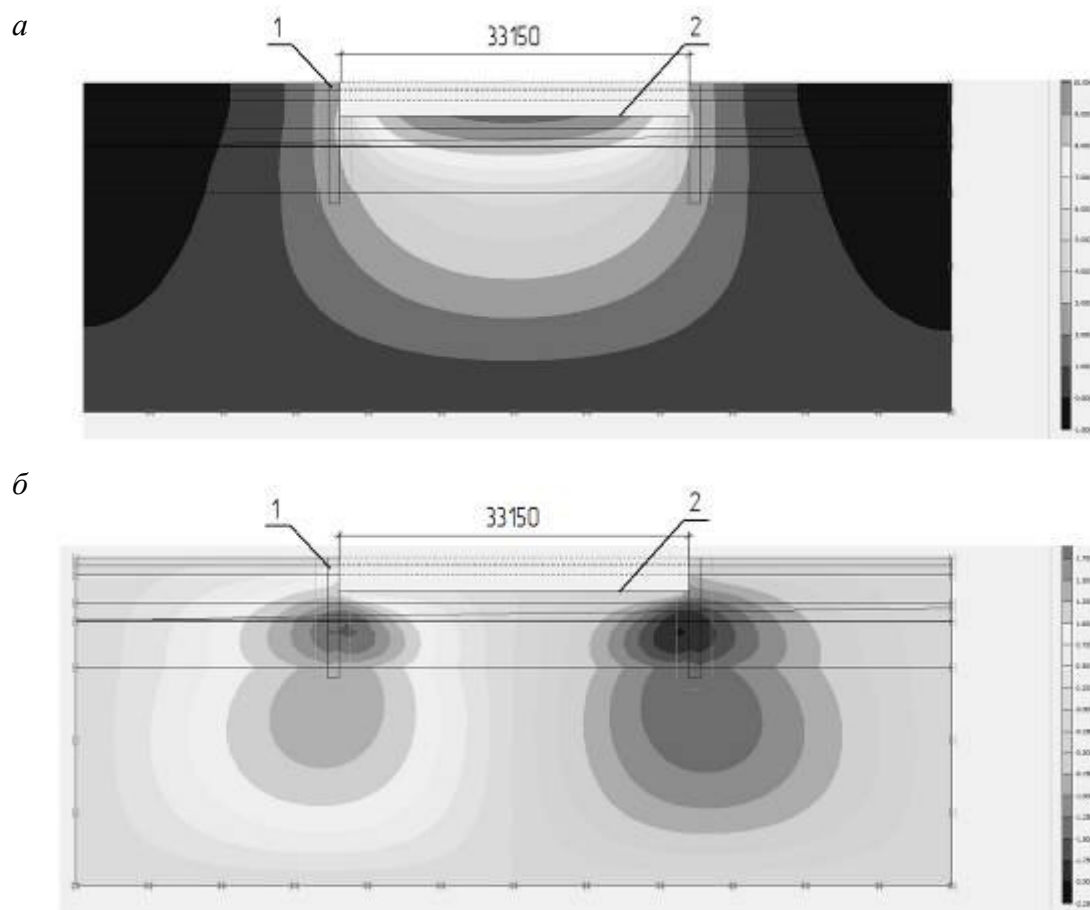


Рисунок 4 – Ізополя вертикальних (а) і горизонтальних (б) переміщень на стадії влаштування:

1 – ґрунтоцементні елементи; 2 – днище котловану на глибині 3 м

За результатами аналізу СЕ моделювання встановлено, що запропонована схема влаштування огороження амбарів для даної інженерно-геологічної умови є надійною і забезпечують необхідну їх експлуатаційну придатність. Зокрема, для дворядного розміщення вертикальних ґрунтоцементних елементів при досягненні ними водотривкого шару коефіцієнт стійкості на стадії відкопування склав $k_{st}=2,5$, що менше

нормативного 1,2. Нормативний коефіцієнт стійкості приймається таким, як для огорожень котловану. На стадії заповнення його буровим шламом з'являється додатковий тиск на дно і на стінки амбара, що зменшує дотичні напруження в конструкціях його огороження. Горизонтальні переміщення огорожувальної стінки з вертикальних ґрунтоцементних елементів коливаються в межах 2...5 мм залежно від інженерно-геологічних умов.

Висновки. За результатами аналізу моделювання скінчених елементів встановлено, що запропонована схема влаштування огороження амбара для конкретних інженерно-геологічних умов є надійним і забезпечує необхідну їх експлуатаційну придатність. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану системи «ґрунтоцементний протифільтраційний екран шламового амбара – ґрунтова основа» підтвердило надійність використання такого протифільтраційного екрана у будівництві шламових амбарів.

Література

1. Токин А. Н. *Фундаменты из цементогрунта* / А. Н. Токин. – М. : Стройиздат, 1984. – 184 с.
2. 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.
3. Ларцева І. І. До визначення фізико-механічних характеристик ґрунтоцементу / І. І. Ларцева, М. В. Петруняк // *Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво.* – Полтава: ПолтНТУ, 2010. – Вип. 2 (27). – С. 127 – 134.
4. До визначення водонепроникності ґрунтоцементу / І. І. Ларцева, М. В. Петруняк, К. А. Тимофєєва // *Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво. Том 2.* – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – Вип. 3 (38). – С. 193 – 199.
5. Hamidi B. *Lessons Learned from Millions of Square Metres of Ground Improvement* / B. Hamidi, S. Varaksin // *Proc. of the Intern. Symposium IS-GI, Brussels.* – 2012, vol. 1. – P. 29 – 40.
6. Лабораторні дослідження впливу агресивних складових бурового шламу на фізико-механічні характеристики ґрунтоцементу / К. А. Тимофєєва // *Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво.* – Вип. 1(40). – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – С. 259 – 267.
7. Водонепроникні заповни з ґрунтоцементу, який виготовлюється за бурозмішувальною технологією / М. Л. Зоценко, І. І. Ларцева, О. В. Петраш, В. Г. Іванченко, І. М. Сухоросов // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: наук.-техн. зб.* – К. : КНУБА, 2011. – Вип. 17. – С. 39 – 46.
8. Melentijevic S. *Application o cement deep mixing method for underpinning* / S. Melentijevic, J. L. Arcos, C. Oteo // *Proc. of 18th Intern. Conf. on soil Mechanics and Geotechnical Engineering.* – Paris, 2013. – Vol. 1. – P. 2549 – 2552.
9. Day R. W. *Foundation engineering handbook Design and Construction with the 2009 International Building Code* / R. W. Day by The McGraw-Hill Comp., Inc. – 2010 – 1024 p.
10. Bilfinger W. *Foundation and Retaining's Structurec* / W. Bilfinger // *Proc. of 18th Intern. Conf. on soil Mechanics and Geotechnical Engineering.* – Paris, 2013. – Vol. 3. – P. 1915 – 1922.
11. Zimmerman Th. *Numerics in geotechnics and structures 2010* / Th. Zimmerman, A. Truty, K. Podles. – *Elmpress International*, 2010. – 17 p.

© Зоценко М.Л., Тимофєєва К.А.
Надійшла до редакції 3.12.2015