

О.М. ГАЛІНСЬКИЙ, канд. техн. наук, с. н. с., науково-дослідний інститут будівельного виробництва (НДІБВ), Київ

В.П. МАКСИМЕНКО, канд. техн. наук, с. н. с., науково-дослідний інститут будівельного виробництва (НДІБВ), Київ

УДК 624.012.3

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПРОТИФІЛЬТРАЦІЙНОГО ЕКРАНУ ПІД СПОРУДОЮ

Ключові слова: горизонтальний протифільтраційний екран, напружено-деформований стан.

Розроблено методику визначення напружено-деформованого стану горизонтального протифільтраційного екрану під спорудою. Методика дозволяє визначити НДС елементів екрану для довільних ґрунтових умов і довільного виду фундаментів. Для заданих ґрунтових умов і вертикальних навантажень від будівлі визначені деформації і напруження, що виникають в елементах екрану.

Разработана методика определения напряженно-деформированного состояния горизонтального противофильтрационного экрана под сооружение. Методика позволяет определить НДС элементов экрана для произвольных грунтовых условий и произвольного вида фундаментов. Для заданных грунтовых условий и вертикальных нагрузок от здания определены возникающие в элементах экрана деформации и напряжения.

The technique of determining the stress - strain state of horizontal impervious screen under construction. The method allows determining the SSS element of the screen to for any ground conditions and any type of foundations. For given soil conditions and vertical loads from the building occur in the defined display elements of strain and stress.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями. Проблема захисту ґрунтів і водоносних горизонтів від забруднення стоками промислових підприємств та сховищ радіоактивних відходів з кожним днем зростає. Під впливом як внутрішніх, так і зовнішніх факторів, з часом, нерідко виникають фільтраційні потоки, що забруднюють навколишній ґрунт і підземні води. При відсутності водоупора на досяжній глибині проблему можна вирішити, застосовуючи нову технологію влаштування горизонтального протифільтраційного екрану (ГПЕ) під існуючими спорудами з урахуванням впливу навантажень від фундаментів та ґрунту, що розташовані вище.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В НДІ будівельного виробництва протягом декількох років проводяться дослідження влаштування ГПЕ під спорудами [1, 2]. З урахуванням вимог [3], ці дослідження спрямовані на вивчення впливу вертикального тиску від ґрунту та фундаментів, розташованих вище, на формування ГПЕ з матеріалу, що твердіє, та зусилля переміщення робочого органу при влаштуванні екра-

ну в ґрунті. Одними з питань, які на сьогоднішній день залишаються маловивченими, це вплив споруд та ґрунту, розташованих вище, на деформації екрану.

Мета роботи. Розробити методику для визначення напружено-деформованого стану (НДС) елементів ГПЕ і ґрунтової товщі в постановці методу скінченних елементів (МСЕ).

Виклад основного матеріалу. В НДІБВ вже багато років розробляється і впроваджується технологія влаштування вертикальних стін і протифільтраційних завіс способом «стіна в ґрунті» [4], в тому числі і влаштування вертикальних «стін у ґрунті» між попередньо пробуреними вертикальними свердловинами. Можливість створення горизонтальних свердловин методом горизонтально-направленого буріння (ГНБ) з використанням бурових комплексів, які широко застосовуються в Україні, дозволило обґрунтувати нову технологію [5, 6] щодо створення аналогічного протифільтраційного екрану під спорудою в горизонтальній площині або площині автентичної підшви або фундаментам споруди (рис.1, 2).

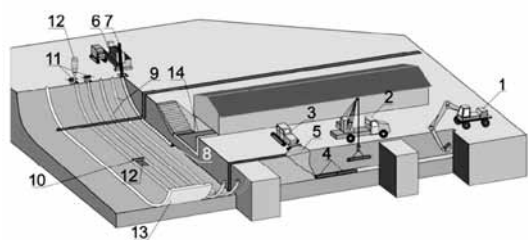


Рис 1. Технологія влаштування ГПЕ під спорудою: 1 – екскаватор, 2 – автокран, 3 – бульдозер, 4 – дренажна труба, 5 – щєбінь для дренажу, 6 – бурова установка ГНБ, 7 – бурова штанга, 8 – бурова головка, 9 – горизонтальна свердловина, 10 – робочий орган, 11 – лебідка, 12 – ПФМ, 13 – ГПЕ, 14 – споруда.

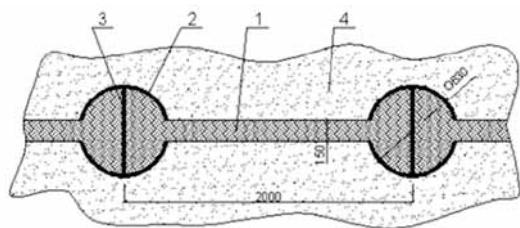


Рис 2. Фрагмент ГПЕ: 1 – ГПЕ; 2 – розподільчий елемент; 3 – перегородка розподільчого елемента (ребро жорсткості); 4 – ґрунт.

Технологія влаштування ГПЕ під спорудою, включає: буріння горизонтальних направляючих свердловин методом ГНБ, затягування в свердловини розподільчих елементів (РЕ) з полімерних труб, розробку ґрунту між свердловинами з розподільчими елементами робочим органом та заповнення горизонтальної порожнини, що утворилася протифільтраційним матеріалом (ПФМ) – глино-цементно-піщаною пастою [1].

Якщо дослідженнями на моделях, що були проведені раніше [1, 2], встановлено вплив вертикального тиску на зусилля переміщення робочого органу в пісках та на утворення порожнини при формуванні горизонтального екрану з матеріалу, що твердіє, то питання деформації екрану під впливом споруд та ґрунту, що

розташовані вище, залишається маловивченим.

Напружено-деформований стан при створенні ГПЕ і відповідні розрахункові співвідношення можуть бути визначені з використанням змішаного варіаційного формулювання. Завдання статички формулюється на основі принципу можливих переміщень:

$$\int \delta \{ \epsilon \}^T [D] \{ \epsilon \} dS - \int \delta \{ u \}^* \{ P \} dS - \int \delta \{ u \}^T \{ N \} = 0, \quad (1)$$

де: $\{ u \}$ - вектор узагальнених переміщень; $\{ P \}$ - вектор поверхневого навантаження; $\{ \epsilon \}$ - вектор узагальнених деформацій; S - площа поверхні тіла, на якій задані зовнішні сили P ; δ - вузлові зміщення; L - довжина контуру, на якому задані кінематичні граничні умови; $\{ N \}$ - вектор зовнішніх навантажень; $[D]$ - матриця узагальнених характеристик жорсткості.

Формула (1) передбачає, що узагальнені деформації $\{ \epsilon \}$ визначаються узагальненими переміщеннями $\{ u \}$ у постановці методу скінченних елементів (МСЕ), виходячи з принципу можливих переміщень при сумі можливих робіт внутрішніх та зовнішніх сил, що дорівнює нулю.

В даній роботі моделювання НДС при влаштуванні ГПЕ вирішувалося у фізично нелінійній постановці плоскої задачі кроковим методом прирощування, тобто в результаті моделювання монотонного навантаження на i -тому кроці одержимо сумарні деформації $\{ \epsilon \}$ і зусилля $\{ \sigma \}$ у вигляді:

$$\begin{aligned} \{ \epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy} \}_i &= \{ \epsilon \}_{i-1} + \{ \Delta \epsilon \}_i, \\ \{ \sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy} \}_i &= \{ \sigma \}_{i-1} + \{ \Delta \sigma \}_i, \\ \{ \Delta \sigma \}_i &= [D]_i [B] \{ \delta \}_i, \end{aligned} \quad (2)$$

де: $[B]$ – матриця диференціювання; матриця пружності $[D]_i$ будується на кожному i -тому кроці навантаження. Збіжність даного методу показано в [7].

У прикладі моделювання НДС горизонтального екрану у постановці МСЕ умовно обраний ґрунтовий багатошаровий масив довжиною 60 м, глибиною товщі, що просідає, 18 м з двома шарами ґрунту при зміні кута нахилу нижнього шару ґрунту від 5 до 15 градусів. Горизонтальний екран з глино-цементно-піщаної пасти щільністю $\rho_2=1,3-1,5 \text{ т/м}^3$, влаштовується на позначці -5.0 м від рівня землі (нуля) під будівлею довжиною 25 м.

Для влаштування ГПЕ в ґрунті моделювався процес прокладання з кроком 2 м розподільчих елементів діаметром 630 мм з додатковими вертикальними перегородками, які можуть бути представлені як ребра жорсткості.

Для детального вивчення НДС елементів екрану в розрахунковій схемі використовувалося згущення сітки МСЕ від 0,1 до 1 м із загальною розмірністю задачі 39 185 невідомих, кількість елементів – 27445, кількість вузлів – 19 242. Граничні умови по контуру моделювалися «нуль-елементами».

При комп'ютерному моделюванні розглядалася будівля з двома варіантами (типами) фундаментів (рис. 4): перший – суцільна фундаментна плита, другий – окремо стоячі фундаменти. Навантаження від ваги верхніх конструкцій прикладалися на рівні верху фундаментів. Розглядалася тільки вертикальна складова навантажень.

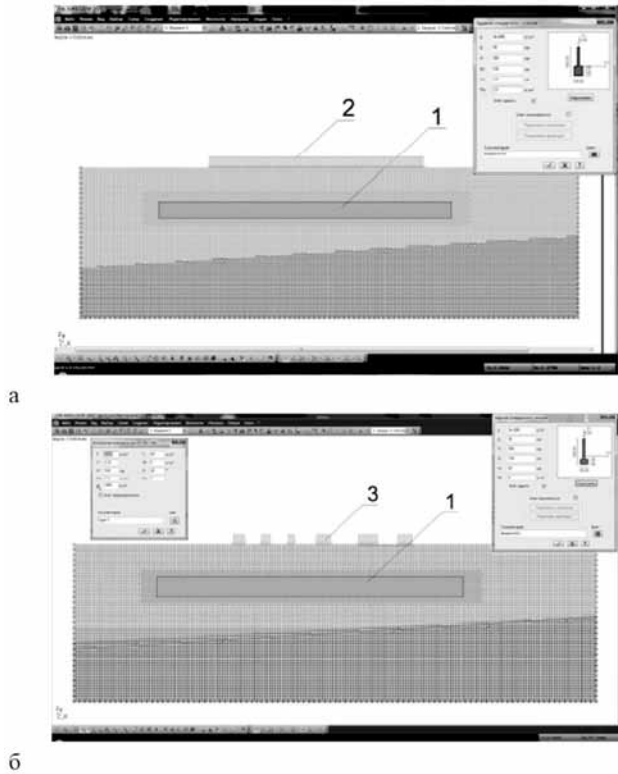


Рис 3. Розрахункова схема МКЕ ґрунтового масиву ГПЕ: а) - варіант 1; б) - варіант 2; 1 - ГПЕ; 2 - суцільна фундаментна плита (варіант 1); 3 - окремо стоячі фундаменти (варіант 2).

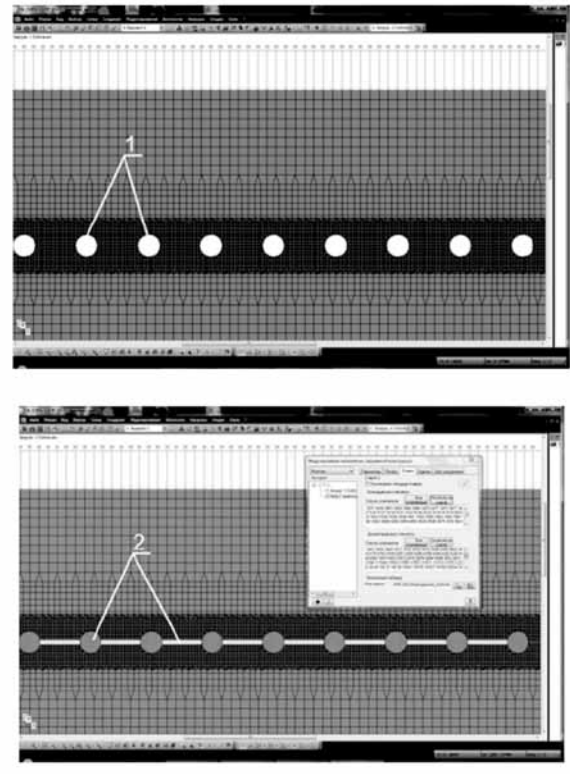


Рис 4. Друга стадія розрахунку: а) влаштування свердловин з РЕ; б) влаштування порожнини з ПФМ; 1 - свердловини з РЕ; 2 - порожнина в РЕ, що заповнені ПФМ.

Навантаження від власної ваги ґрунту враховуються автоматично виходячи з об'ємної ваги шарів ґрунту $\gamma_1 = 18,0 \text{ кН/м}^3$; $\gamma_2 = 19,0 \text{ кН/м}^3$. Активне навантаження від будівлі на фундаменти задавалася кроком величиною до 30 тс/м^2 .

Для вивчення НДС елементів ГПЕ у вигляді порожнини товщиною 150 мм, яка утворюється після проходу робочого органу та заповнення глино-цементно-піщаною пастою щільністю $\rho = 1,3-1,5 \text{ т/м}^3$ і полімерних розподільчих елементів діаметром 630 мм, що заповнені тим же матеріалом, використовується двох стадійний нелінійний розрахунок:

стадія 1 – розрахунок з урахуванням тільки власної ваги ґрунту і навантаження на фундаменти;

стадія 2 – розрахунок з урахуванням влаштування горизонтальних свердловин з РЕ і горизонтальної порожнини, що заповнена ПФМ (рис. 4).

В результаті нелінійного поетапного розрахунку та дослідження НДС елементів екрану встановлені деформації (X, Z) ґрунтового масиву, полімерних розподільчих елементів і горизонтального екрану, а також зусилля в елементах екрану, що розтягують – стискають (N) і перерізають (Qz).

Приклади результатів розрахунків для будівель з різними типами фундаментів: суцільна фундаментна плита (варіант 1) і окремо стоячі фундаменти (варіант 2) представлено на рисунках 5–7.

Результати комп'ютерного моделювання НДС екрану і проведені розрахунки показали, що при вертикальному тиску на ґрунт, що не перевищує 30 тс/м^2 в ГПЕ, що виконаний з глино-цементно-піщаної пасту при навантаженні від будівлі з суцільною фундаментною плитою (варіант 1) виникають зусилля, що розтягують, в межах $0,1-0,8 \text{ кгс/см}$

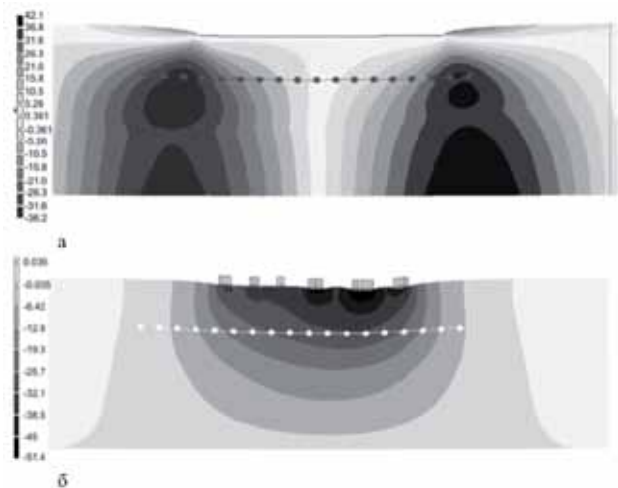


Рис 5. Поля деформації ґрунтового масиву і екрану: а) варіант 1 – по горизонталі (X); б) варіант 2 – по вертикалі (Z).

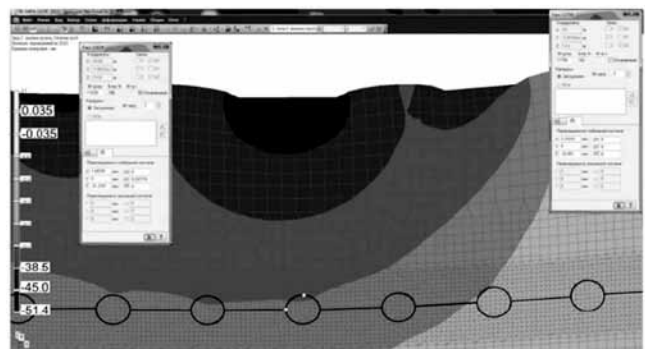


Рис 6. Деформації РЕ по горизонталі (X) і по вертикалі (Z) (варіант 2).

та максимальні напруження не перевищують $2,5 \text{ кгс/см}^2$ при цьому стиск розподільчого елемента не перевищує 30 мм, а для будівлі з окремо стоячими фундаментами (варіант 2) ці значення менше: зусилля, що розтягують знаходяться в межах $0,1-0,4 \text{ кгс/см}$, а стиснення розподільчого елемента не перевищує 10 мм.

Порівняння результатів моделювання ПДВ екрану з результатами лабораторних досліджень на стенді, моделювання технології влаштування ГПЕ, наведених в [8], в яких, були підібрані склади глино-цементно-піщаної пасти, що твердіє та визначено її технічні характеристики, показали, що напруження в екрані, отримані при моделюванні НДС не перевищують характеристик міцності екрану, які при стисканні коливаються від 19 до 28 кгс/см^2 , а при розтягу зі згинанням знаходяться в межах $3,75 - 5,77 \text{ кгс/см}^2$.

Незважаючи на те, що розрахункові напруження в екрані значно менше його характеристик міцності, отриманих в лабораторних умовах, не виключені варіанти влаштування ГПЕ, при яких для певних геологічних і гідрогеологічних умов і навантажень від вище розташованої будівлі, напруження в екрані можуть перевищувати його характеристики на міцність.

У цьому випадку, для підвищення протифільтраційної надійності ГПЕ, що влаштовується під спорудами зі шкідливими хімічними або радіоактивними речовинами, є технологічна можливість в горизонтальну порожнину, утворену в ґрунті, додатково до глиняно-цементно-піщаної пасти укладати і полімерну плівку [6, 8].

ВИСНОВКИ:

1. Розроблено методику визначення напружено-деформованого стану (НДС) елементів горизонтального протифільтраційного екрану і ґрунтової товщі в постановці МСЕ. Розроблена методика дозволяє змодельовати і визначити НДС елементів екрану для довільних ґрунтових умов і довільного виду фундаментів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. A. Galinskiy, Research of technology of construction of horizontal impervious screen under the existing structures. Conference proceedings XV Danube - European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE 2014) 9-11September 2014, Vienna, Austria, volume 2 Paper No.1213-1219
2. А.М. Галинский. Определение эмпирических зависимостей для уточнения математической модели процесса устройства горизонтального экрана под сооружением.// Молодой ученый. – № 8 (23).– Частина 1. Серпень. – 2015.–С.17-23.
3. ДБН В.2.1-10-2009 «Основи та фундаменти. Основні положення проектування» Зміни № 1,2, Мінрегіонбуд України, К., 2011 р.;
4. ДСТУ-Н Б В.2.1-29:2014 «Настанова щодо проектування і влаштування заглиблених споруд способом «стіна в ґрунті» // Мінрегіон України.– 2014.–56С.
5. Спосіб влаштування екрану під споруду / Деклараційний патент на винахід № 35065 А від 15.03.2001, бюл. № 2.
6. Спосіб влаштування екрану під споруду / Патент на винахід № 95383 від 25.07.2011, бюл. № 14.
7. Городецкий А.С. Компьютерные модели конструкций / А.С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – К. : Факт, 2007. – 394 с.
8. Проведение лабораторных испытаний на стенде моделирования технологии устройства ГПЕ. Отчет о НИР, науч. рук. А.М. Галинский, НИИСП, Киев, 2011. – 69с.

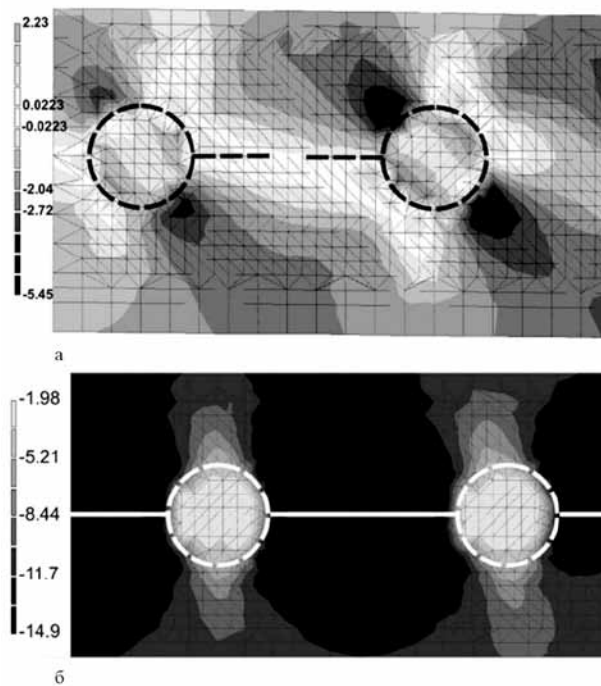


Рис 7. Максимальні напруження в ґрунтовому масиві і екрані: а) варіант 1 – напруження, що розтягують; б) варіант 2 – напруження, що стискають.

2. Порівняння результатів моделювання НДС екрану з результатами лабораторних досліджень на стенді моделювання технології влаштування ГПЕ, показали, що напруження в екрані, отримані при моделюванні НДС не перевищують характеристик міцності екрану, які отримані в лабораторних умовах, і які при стисканні коливаються від 19 до 28 кгс/см^2 , а при розтягу зі згинанням знаходяться в межах $3,75-5,77 \text{ кгс/см}^2$.
3. Для певних умов, за яких напруження в екрані можуть перевищувати його характеристики з міцності для підвищення протифільтраційної надійності екрану запропоновано влаштовувати горизонтальний екран з глиняно-цементно-піщаної пасти, що твердіє і полімерної плівки.