

## Особливості числового моделювання гідрогеологічних умов ґрунтового масиву при влаштуванні котловану в програмному комплексі Plaxis

Максим Хоронжевський<sup>1</sup>, Максим Мятко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,  
<sup>1</sup>khoronzhevskiy.ubp@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5797-7304

<sup>2</sup>Проектна компанія АІММ  
буд. 6, офіс 264, вул. Кадетський гай, Київ, Україна, 03037,  
<sup>2</sup> info@dhc.global

DOI: 10.32347/0475-1132.46.2023.161-172

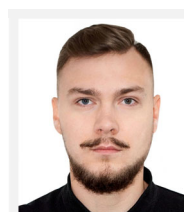
**Анотація.** Будівництво багатоповерхових цивільних споруд, особливо в центральних частинах міст нерідко супроводжується розвинутою підземною частиною, що вимагає виконання глибоких котлованів. Влаштування таких котлованів, досить часто, призводить до зміни гідрогеологічного режиму на ділянці будівництва та поруч з нею.

В даній роботі представлено порівняння напружено-деформованого стану системи «основа - огороження котловану», в залежності від способу моделювання гідрогеологічних умов.

Дослідження розділено на два етапи: визначення основних особливостей інструментарію програмного комплексу Plaxis для моделювання та визначення тисків порової води; створення числових моделей та виконання розрахунків. В першій частині розглянуто базовий принцип визначення напружень у водонасичених ґрунтах, типи розрахунку порового тиску, гідравлічні граничні умови та типи дренавання ґрунтів.

В рамках другої частини дослідження розроблено числові моделі в Plaxis 2D, на основі реального об'єкту та гідрогеологічної обстановки на ділянці зведення споруди. Описано два найбільш популярні підходи, щодо моделювання гідрогеологічних умов при сухій розробці ґрунту в котловані. Виконано покроковий розрахунок з врахуванням поетапності виїмки ґрунту в котловані і водозниження та влаштуванням утримуючих конструкцій за схемою передбаченою проектними рішеннями.

За результатами розрахунків продемонстровано відмінність в отриманих значеннях зусиль та горизонтальних переміщень підпірної стіни



**Максим Хоронжевський**  
аспірант кафедри  
геотехніки



**Максим Мятко**  
CEO АІММ

для моделей, що були створені при використанні різних методів задання водно-геологічного стану основи.

З метою підвищення точності розрахунків та визначенню впливу водопроникності ґрунтів, виключено вплив стратиграфії основи, шляхом вирішення теоретичних задач з однорідним ґрунтовим масивом, складеним глинистими або піщаним ґрунтом з показниками фільтрації ґрунтових вод в широкому діапазоні ( $k_x=k_y=0,001\dots 6$ м/добу). Спираючись на отримані результати, встановлено, що обидва підходи корелюють між собою у випадку наявності в основі слабо фільтруючих ґрунтів з коефіцієнтом фільтрації  $k=0,001\dots 0,05$  м/добу, розрахунки показали збіжність у переміщеннях та зусиллях підпірної стіни в таких схемах до 97,9-99,9%. Натомість при заляганні ґрунтів з високою проникною здатністю води ( $k=0,4\dots 6$  м/добу), різниця в результатах становить до 56,5%.

**Ключові слова.** числове моделювання, гідрогеологічні умови, поровий тиск, граничні умови, утримуючі конструкції котловану.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В переважній більшості випадків пов'язаних з будівництвом заглиблених споруд, відзначається наявність ґрунтових вод під поверхнею землі, які знаходяться в порах ґрунту та розломах скельних порід. Одним з найважливіших питань, що виникає при проектуванні глибоких котлованів є зміна гідрогеологічних режиму основи, що спричинений розробкою ґрунту та влаштуванням огорожувальних конструкцій котловану.

Фільтрація ґрунтових вод впливає на фізичні та механічні параметри ґрунту, і визначає його здатність витримувати навантаження від будівельних конструкцій. Таким чином, правильне визначення тиску ґрунтових вод та фільтраційних сил, які виникають внаслідок зміни рівня води в котловані, вимагає особливої уваги при розрахунках.

Сьогодні, прогресуючий розвиток комп'ютерного моделювання і зацікавленість інженерів-проектувальників у його можливостях, все більше заохочує нових користувачів до використання програмних комплексів. В теперішніх умовах важко уявити розрахунок основ, тим паче таких складних систем як «основа-огороження котловану» без використання методу скінченних елементів реалізованого в багатьох програмних комплексах. Та втім, нерідко, наявність в руках інструменту який не підвладний недосвідченому користувачу призводить до фатальних результатів.

Розповсюдженою помилкою є ігнорування ефекту фільтрації ґрунтової води або некоректного моделювання, що в свою чергу може призвести до втрати стійкості огороження котловану або інших небезпечних наслідків.

## АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Питанню розрахунків ґрунтів у водонасичених умовах присвячено багато робіт, в тому числі й фундаментальних, представлених найвидатнішими науковцями минулого й сьогодення в області геотехніки [1, 2]. Насамперед, велика увага приділяється

взаємодії скелету ґрунту з водою, дослідженням порових тисків та аналітичним розрахункам фільтраційних потоків підземних вод. Зокрема, результати цих досліджень було імплементовано в сучасні розрахункові програмні комплекси.

Одним з найбільш поширених серед інженерів-проектувальників є ПК Plaxis який відзначається інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом та логічною послідовністю створення числової моделі. Також він надає широкий спектр моделей ґрунтів та інструментів для вирішення будь-яких геотехнічних задач. Для спрощення його використання інженерами було розроблено велика кількість мануалів [3] та рекомендацій розробниками програмного комплексу. Також, у статтях [5, 6] приділяється велика увага типовим помилкам, що припускають при використанні Plaxis 2D в розрахунках, однак незважаючи на ці роботи цей напрямок є ще недостатньо розкритий, і потребує подальших досліджень.

## МЕТА РОБОТИ

Оцінити чисельні особливості розрахунку порових тисків, визначення гідравлічних граничних умов, типів дренажу ґрунтів, що доступні в програмному комплексі Plaxis. Визначити вплив різних способів моделювання гідрогеологічних умов на напружено-деформований стан основи та утримуючих конструкцій котловану на прикладі реального об'єкту.

## ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ділянка будівництва, на основі якої виконано дослідження знаходиться у нижній частині лівобережного схилу долини річки Либідь, міста Київ. Об'єкт будівництва являє собою багатоповерховий секційний житловий комплекс з підземним паркінгом, для виконання якого передбачено влаштування котловану глибиною до 10м. За проектом передбачено виконання огороження котловану шляхом комбінації укосів бортів котловану під кутом 35° та підпірної стіни з

бурових залізобетонних паль діаметром 820 мм з кроком 1,22м та довжиною 17,5м.

Гідроізоляція котловану забезпечена влаштуванням jet-паль в проміжку між палями до відмітки розташування слабо фільтруючих ґрунтів (ІГЕ-13).

За даними інженерно-геологічних вишукувань геологічна будова ділянки будівництва до глибини 42 метрів складається з нашарувань пісків, супісків, глин різної консистенції. Найменування ґрунтів та їх фізико-механічні властивості в умовах природнього залягання, що визначені методом статичного зондування та лабораторними методами наведено в табл.1, а нашарування ґрунтів показано на відповідних розрахункових перерізах. Також в таблиці представлено параметри, потрібні для числової моделі, визначені на підставі літератури та власного досвіду дослідника.

Так як основна увага в роботі зосереджена на числовому моделюванні гідрогеологічного режиму ділянки будівництва то в першій частині дослідження буде

розглянуто можливості та особливості інструментів програмного комплексу для визначення гідрогеологічних умов. В другій частині проведено порівняльний аналіз результатів при використанні різних типів розрахунку порових тисків та гідравлічних граничних умов.

*Принцип ефективних напружень.*

Однією з фундаментальних концепцій геомеханіки, що описує механічну поведінку пористого середовища такого як ґрунт є принцип ефективних напружень Терцагі. Він базується на ідеї, що ґрунт як пористе середовище, може бути розглянуто як двокомпонентну систему, що складаються з твердої фази (ґрунтових частинок) і рідинної фази (води або повітря). Цей принцип стверджує, що механічні властивості ґрунту визначаються ефективними напруженнями, які відображають різницю між повними напруженнями та тиском порової води у ґрунті.

Табл. 1. Фізико-механічні властивості ґрунтів  
Table 1. Physical and mechanical soil parameters

Номер ІГЕ	Назва ґрунту (номенклатурна)	Щільність	Природна вологість	Число пластичності	Вологість на межі розкошування	Показник текучості	Коефіцієнт пористості	Ступінь водонасичення	Коефіцієнт фільтрації	Питома зчеплення	Кут внутрішнього тертя	Модуль деформації		Power
		$\rho$	W	$I_p$	$W_p$	$I_L$	$e$	$S_r$	$K_f$	c	$\phi$	$E_{50}$	$E_{ur}$	m
		г/см <sup>3</sup>	(д.о.)	(д.о.)	(д.о.)	(д.о.)	(д.о.)	(д.о.)	м/добу	кПа	град	МПа	МПа	(д.о.)
Н	Насипний ґрунт - пісок, супісок з включенням будівельного сміття	1,65	-	-	-	-	0,69	0,19	6	-	-	12	36	-
2	Пісок середньої крупності середньої щільності, маловологий до насиченого водою	1,65	0,05	-	-	-	0,69	0,19	6	1	30	25	75	0,5
2щ	Пісок середньої крупності щільний, маловологий до насиченого водою	1,81	0,05	-	-	-	0,54	0,24	5	2	17	38	114	0,5
7	Супісок пластичний, з прошарками піску	1,92	0,23	0,05	0,18	1	0,72	0,86	0,4	11	19	10	40	0,6
8	Супісок пластичний до текучого, з прошарками піску, з включенням жорстви кристалічних порід	1,97	0,2	0,04	0,16	1	0,63	0,86	0,5	9	20	12	60	0,6
12a	Глина спонділова (мергель), з прошарками суглинку, напівтверда до тугопластичної	1,94	0,31	0,19	0,25	0,3	0,84	1	0,01	70	15	17	68	1
13	Глина спонділова (мергель) тверда	1,91	0,31	0,21	0,3	0,05	0,89	0,98	0,001	94	13	23	115	1
14	Суглинок піщанистий, напівтвердий	2,01	0,23	0,12	0,21	0,1	0,66	0,95	0,05	40	16	15	60	0,8

Даний принцип реалізований в ПК Plaxis і зокрема застосовується для аналізу того, як зміна тиску води призводить до зміни напружень в ґрунтах та відповідних деформацій ґрунту.

За Терцагі, повні напруження  $\sigma$  складаються з ефективних напружень  $\sigma'$  та тиску порової води  $u$ : [1]

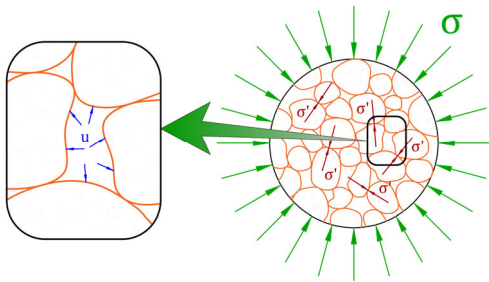


Рис.1. Принцип ефективних напружень за Терцагі  
Fig.1. Tertsagi's principle of effective stresses.

$$\sigma = \sigma' + u_w \quad \text{- повні напруження} \quad (1)$$

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad \text{- ефективні напруження} \quad (2)$$

Пізніше, Бішоп, ввів до порового тиску води матричне всмоктування, таким чином, формула набула вигляду [2]:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi \cdot (u_a - u_w) \quad (3)$$

У ПК Plaxis [3] в рівнянні (1, 2)  $u_w$  позначається як активний поровий тиск  $p_{active}$ :

$$\sigma = \sigma' + p_{active} \quad (4)$$

При цьому використовується два припущення, що тиск повітря в порах  $u_a$  дорівнює нулю, а коефіцієнт матричного всмоктування в рівнянні (3), визначається як  $\chi = S_{eff}$ . В результаті чого, активний поровий тиск ( $p_{active}$ ) визначається як ефективне водонасичення помножене на поровий тиск води ( $p_{water}$ ).

$$p_{active} = S_{eff} \cdot p_{water}, \quad (5)$$

де ефективний ступінь водонасичення  $S_{eff}$  є нормованим коефіцієнтом, що містить фактичний ступінь водонасичення  $S$  в

ґрунті, залишковий ступінь водонасичення  $S_{res}$  і повністю водонасичений ступінь  $S_{sat}$ .

$$S_{eff} = \frac{S - S_{res}}{S_{sat} - S_{res}} \quad (6)$$

У випадку, коли  $S = 1.0$ ;  $S_{sat} = 1.0$  і  $S_{res} = 0$ , тобто повне водонасичення ґрунту, ефективний ступінь водонасичення  $S_{eff}$  дорівнює 1.0, таким чином, активний поровий тиск ( $p_{active}$ ) співпадає з поровим тиском води ( $p_{water}$ ), натомість, коли ступінь водонасичення менше одиниці, а це зазвичай буває вище рівня ґрунтових вод то поровий тиск води ( $p_{water}$ ) відмінний від активного порового тиску ( $p_{active}$ ) [2].

Поровий тиск води ( $p_{water}$ ) в свою чергу поділяється на поровий тиск в стаціонарному стані ( $p_{steady}$ ) та надлишковий поровий тиск ( $p_{excess}$ ):

$$p_{water} = p_{steady} + p_{excess} \quad (7)$$

Стаціонарний поровий тиск ( $p_{steady}$ ) вважається вихідною компонентою та відомий до початку деформаційного аналізу, в той час як надлишковий поровий тиск ( $p_{excess}$ ) виникає в результаті зміни напружень в недренованих матеріалах та є результатом деформаційного або консолідованого аналізу. Зміна напружень в ґрунтах може бути наслідком додаткового навантаження на основу, розвантаження або зміни гідрогеологічних умов.

*Типи розрахунку порового тиску*

Оскільки, в попередньому розділі було визначено, що стаціонарний поровий тиск ( $p_{steady}$ ) є вихідними даними для деформаційного аналізу, розглянемо за допомогою яких способів він може бути згенерований. Для цього, в Plaxis може бути вибрано відповідний тип розрахунку порового тиску (*pore pressure calculation type [PPCT]*):

1. *Фреатичний (Phreatic [PHR])*. При використанні цього способу в схемі задають *глобальний рівень води (Global water level)* та призначають *водні умови (water conditions)* кластерам розрахункової моделі. Розрахунок стаціонарного порового тиску ( $p_{steady}$ ) в

активних кластерах відбувається на основі заданого рівня ґрунтових вод та відповідних водних умов. В неактивних кластерах в залежності від їх водних умов може бути згенерований "зовнішній" тиск води на модель, на межі між активним та неактивним кластером. Якщо необхідно виключити поровий тиск в певних кластерах, для них використовують опцію «Сухий» (*Dry*). Використання опції «Інтерполювати» (*Interpolate*) дозволяє виконати лінійну інтерполяцію порового тиску зверху до низу в межах заданого полігону ґрунту, враховуючи тиски порової води в сусідніх кластерах.

2. *Стаціонарний потік ґрунтових вод (Steady state groundwater flow [SSGWF])*. Розрахунок стаціонарного порового тиску ( $p_{steady}$ ) методом SSGWF розраховується за допомогою потоку підземних вод із заданими параметрами потоку та гідравлічними граничними умовами. В аналізі SSGWF граничні умови потоку визначають, де порова вода може вливатися в ґрунт або витікати з нього, таким чином, впливаючи на загальний поровий тиск в цьому випадку. При чому, використання даного способу вимагає призначення ненульової проникності в наборі даних матеріалів для ґрунту. Потік води у водонасичених ґрунтах зазвичай описується за допомогою закону Дарсі, а рівняння рівноваги для потоку ґрунтових вод має вигляд [3]:

$$\nabla p_w + p_w \underline{g} + \underline{\varphi} = 0 \quad (8)$$

Інші типи розрахунку порового тиску, такі як: *Використання тиску з попередньої фази (Use pressure from previous phase [UPPP])* та *Перехідний потік підземних вод (Transient groundwater flow [TGWF])*, для вирішення такого роду задач не є прийнятними, оскільки в першому варіанті поровий тиск приймається з попередньої фази, а не розраховується, що не коректно для етапу з деактивованими кластерами, а другий доступний лише, якщо для початкової фази обрано тип розрахунку *Тільки потік (Flow only)*.

#### *Граничні умови потоку ґрунтових вод.*

Для вибору поведінки граничних умов потоку ґрунтових вод в Plaxis доступний широкий спектр опцій, які можна обрати в залежності від специфіки задачі:

*Просочування (Seepage)* – це межа через яку вода може просочуватись, зазвичай використовується для поверхні землі вище рівня ґрунтових вод

*Закритий (Closed)* – означає, що через цей контур потік ґрунтових вод не відбувається. Цей тип граничних умов задає нульовий потік Дарсі на границі:

$$\underline{q} \cdot \underline{n} = q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = 0 \quad (9)$$

*Напір (Head)* – може бути заданий на додаток до автоматичного встановлення гідравлічних умов на основі рівня ґрунтових вод. Якщо напір ґрунтових вод задано на зовнішньому контурі моделі то для цього контуру буде згенеровано зовнішній тиск води, яке при аналізі деформацій буде розглянуто як навантаження.

*Притік (Inflow)* та *Відтік (Outflow)* – приплив та відплив води до моделі через межу, за встановленими параметрами.

*Інфільтрація (Infiltration)* – може бути задано вручну геометричним контурам моделі вище рівня води для генерації граничних умов інфільтрації від опадів [4].

#### *Тип дренавання ґрунтів.*

Plaxis надає можливість обирати серед декількох типів дренавання ґрунту, що описують взаємодію скелету ґрунту і води у водонасиченому стані. Перший з них називається «Дренований» (*Drained*), і при його використанні в ґрунті не відбувається розвитку надлишкових порових тисків, другий – «Непористий» (*Non-porous*), що теж немає порового тиску води та три типи недренованих, які мають назву *Undrained A*, *Undrained B* та *Undrained C*.

Останні три типи дозволяють провести аналіз недренованих ґрунтів при пластичному розрахунку, при чому для *Undrained A* та *Undrained B* розрахунок виконується



При розрахунку враховано поетапність розробки ґрунту в котловані та влаштування конструкцій за схемою передбаченою проектними рішеннями. Для генерації природних напружень в початковому масиві ґрунту використано процедуру гравітаційного навантаження *Gravity loading procedure*, що є коректним у випадку наявності схилу чи похилих шарів ґрунту або рівня ґрунтових вод. На наступних етапах використано тип розрахунку *Пластичний (Plastic)* для проведення пружно-пластичного деформаційного аналізу, при якому не враховується зміна порового тиску з часом.

Взявши до уваги інженерно-геологічні умови та конструктивні особливості огороження котловану можна вважати, що підпірна стіна являє собою ідеальну протифільтраційну завісу (ПФЗ), оскільки її нижня відмітка розташована у водонепроникному шарі ґрунту. Це означає, що на огороження котловану з різних сторін діють різні за величиною тиски ґрунтових вод.

Проаналізувавши літературні джерела [5] та відеоматеріали від розробників програмного комплексу, серед інших, виділено два найбільш коректних підходи до моделювання гідрогеологічних умов, що зустрічаються в проектній практиці при розв'язанні такого роду задач, які й було використано при створенні числової моделі:

▪ В першому підході для задання рівня ґрунтових вод використовують так званий *z-метод*. Для цього, проводять ламану лінію, що складається з горизонтальної ділянки на глобальному рівні ґрунтових вод (*global water level*) в межах частини моделі, де не передбачається розробка ґрунту, похилої лінії на точку, що розташована на огороженні котловану до позначки планованого рівня ґрунтових вод з боку котловану та горизонтальної ділянки в межах котловану на цій же позначці. Криву депресії за межами котловану Plaxis розраховує автоматично, на основі даних водопроникності геологічних елементів. На контакті конструкцій огороження та ґрунту в режимі умов потоку (*flow conditions*) задають інтерфейси, для моделювання водонепроникних структурних елементів. На контурі дна та центральній лінії симетричної моделі назначають гідравлічні граничні умови «Закрито» (*Closed*).

Розрахунок порового тиску (*pore pressure calculation*) виконано на основі стаціонарного потоку підземних вод (*steady state groundwater flow*) по моделі Ван Генухтена класифікації ґрунтів HYPRES з урахуванням коефіцієнтів фільтрації визначених при інженерно-геологічних вишукуваннях.

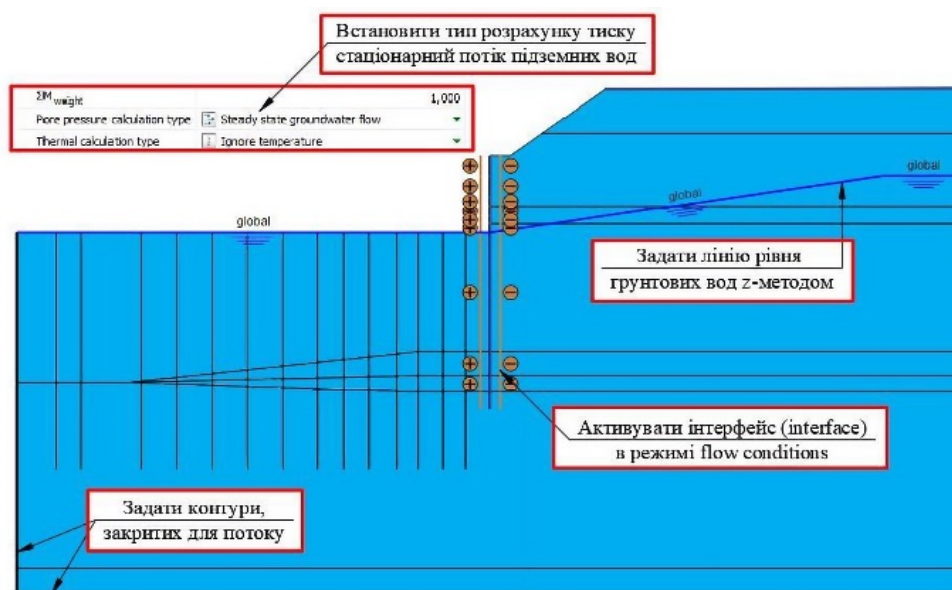


Рис.3. Алгоритм дій для задання гідрогеологічних умов, що використовується при першому підході.  
Fig.3. Algorithm of actions for setting hydrogeological conditions which used in the first method.

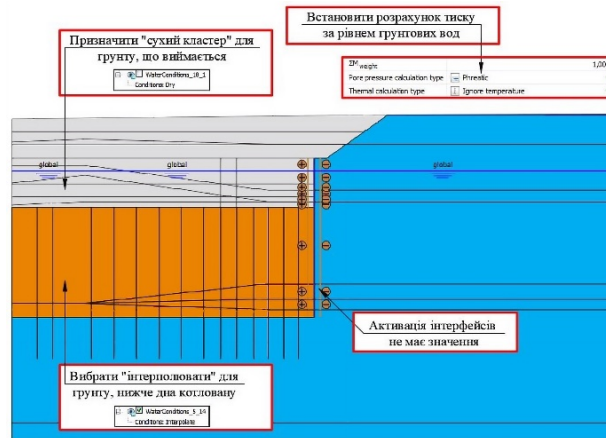


Рис.4. Алгоритм дій для задання гідрогеологічних умов, що використовується у другому підході.  
 Fig.4. Algorithm of actions for setting hydrogeological conditions which used in the second method.

У другому підході, для випадку ідеальної ПФЗ припускають, що потік ґрунтових вод не відбувається і наявність інтерфейсів на контакті огороження в режимі умов потоку не має значення. Моделювання зневоднення котловану виконують шляхом призначення кластерам ґрунту, що виймається, водних умов – «Сухий» (Dry), а для того, щоб уникнути різкого стрибка в розподілі порового тиску в межах нижньої частини огороження, кластерам нижче дна котловану призначають – «Інтерполювати» (Interpolate). Розрахунок порового тиску виконують на основі рівня ґрунтових вод (Phreatic level).

Після визначення необхідних специфікацій щодо гідрогеологічних умов та призначенням їх числовим моделям, виконано покроковий розрахунок виїмки котловану та порівняльний аналіз отриманих результатів для двох розглянутих моделей.

В табл. 2 показано результати порівняння напружено-деформованого стану огороження котловану, представленого

розрахунковими максимальними зусиллями та горизонтальними переміщеннями визначеними в осьовому перерізі підпірної стіни та дані геодезичного моніторингу.

На рисунку 5 представлено розподіл стаціонарних порових тисків ( $p_{steady}$ ) в масиві ґрунту та тиск на підпірну стіну для двох способів їх генерації. Попри схожу кількісну оцінку, можна спостерігати певну розбіжність щодо якісної оцінки результатів.

Також, варто зазначити, що у другій числовій моделі, максимальний стаціонарний поровий тиск на нижню частину підпірної стіни після останнього етапу розкопки, зі сторони котловану, становить 160,0 кН/м<sup>2</sup> (Рис. 5), що відповідає початковому стану ґрунтових вод, насамперед це пов'язано з тим, що для моделювання водозниження, кластерам моделі нижче дна котловану, було призначено опцію «Interpolate», для якої і було виконано лінійну інтерполяцію порового тиску прийнявши значення з суміжного нижнього кластеру.

Табл. 2. Результати розрахунків  
 Table 2. Calculation results

Спосіб моделювання ГУ	Тип розрахунку порового тиску [PPCT]	Максимальні горизонтальні переміщення ПС, $U_x$	Максимальний згинальний момент в ПС, $M_y$	Максимальна поперечна сила в ПС, $Q$
№	[-]	[мм]	[кНм/м]	[кН/м]
1	Steady state groundwater flow [SSGWF]	249,4	578,7	294,7
2	Phreatic [PHR]	326,8	545,7	334,8
Розбіжність результатів числових моделей		23,7%	-6,0%	12,0%
Геодезичний моніторинг		314,7		



На рисунку 6 представлені епюри згинальних моментів, поперечної сили та горизонтальних деформацій по всій довжині палі. Можемо чітко спостерігати схожість загального характеру епюри, однак є певна відмінність в кількісних результатах.

Максимальний згинальний момент у першій числовій моделі дорівнює 578,7 кНм/м, а у випадку другої моделі 545,7кНм/м. Максимальні поперечні сили для двох випадків мають розбіжність в результатах до 12%, але найбільша різниця в результатах спостерігається для горизонтальних переміщень і становить 23,7%.

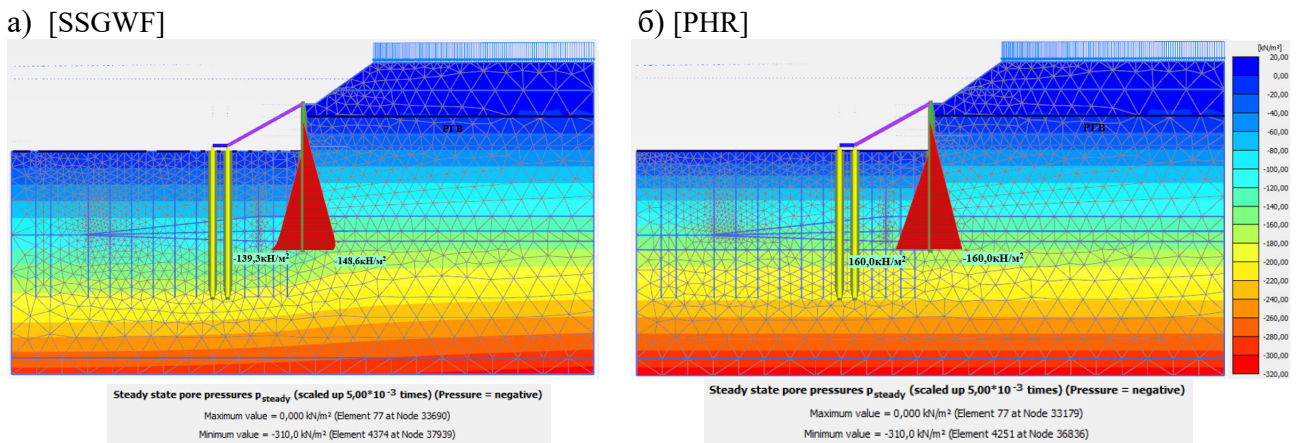


Рис.5. Стаціонарний поровий тиск ( $p_{steady}$ ), кН/м<sup>2</sup> для: а) 1 [SSGWF]; б) 2 [PHR]  
 Fig.5. Steady state pore pressure ( $p_{steady}$ ), кН/м<sup>2</sup> for: а) 1 [SSGWF]; б) 2 [PHR]

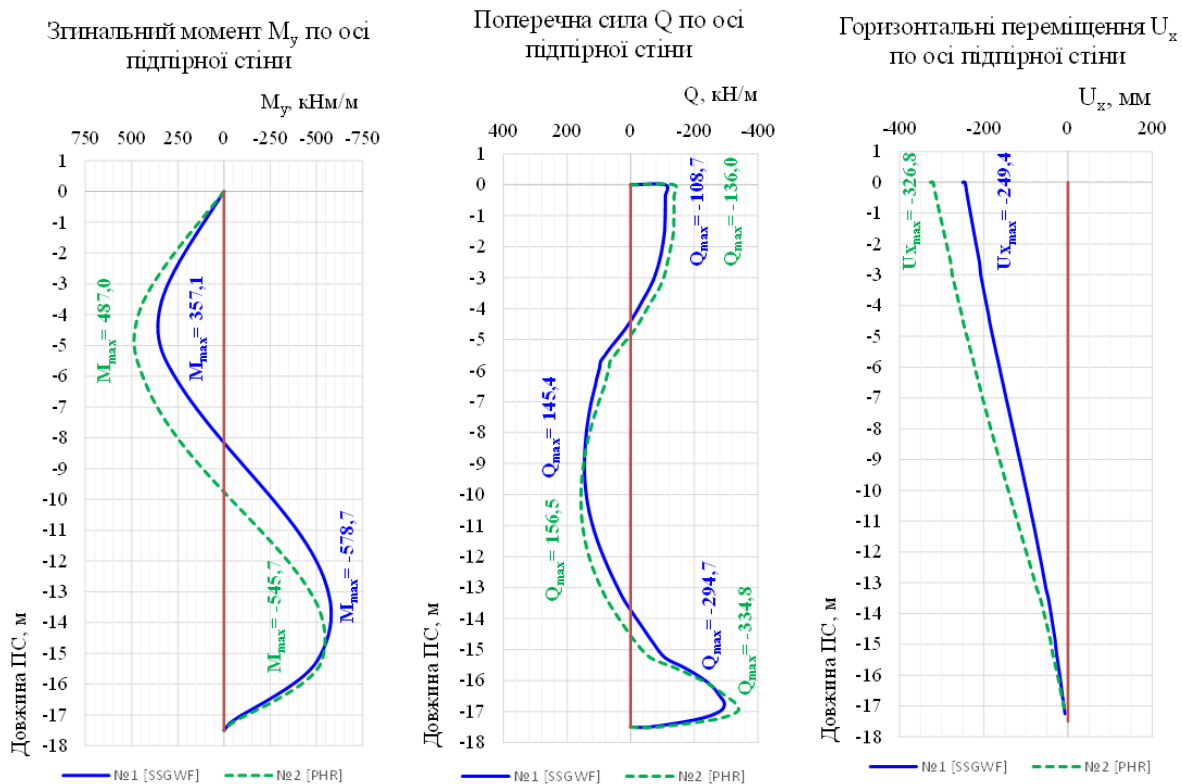


Рис.6. Епюри згинальних моментів  $M_y$ , поперечних сил  $Q$  та горизонтальних переміщень  $U_x$  в ПС.  
 Fig.6. Plots of bending moments  $M_y$ , shear forces  $Q$  and horizontal displacements  $U_x$  in the RW.

Для мінімізації впливу нашарувань ґрунтів на результати розрахунків та визначення впливу фільтраційних властивостей глинистих ґрунтів, було проведено додаткові розрахунки теоретичних задач з однорідним ґрунтовим масивом. Було розглянуто 8 числових моделей з аналогічними конструктивними параметрами котловану, для чотирьох типів ґрунтів, що було представлено в попередніх розрахунках, таких як: ПГЕ-13 (Глина тверда), ПГЕ-14 (Суглинок напівтвердий), ПГЕ-8 (Супісок пластичний) та ПГЕ-2 (Пісок середньої крупності). Характеристики ґрунтів ідентичні попереднім моделям. Для кожного ґрунту виконано моделювання гідрогеологічних умов за двома підходами. Для розрахунку кривої депресії та стаціонарного рівня ґрунтових вод у моделях складених ґрунтами з високим коефіцієнтом фільтрації було прийняте рішення збільшити ширину для всіх моделей праворуч на 70м. Таким

чином загальний розмір моделі склав 140x37,5м

Порівняльний оцінка результатів розрахунку для різних ґрунтів базувалася на пікових значеннях зусиль та деформацій підпірної стіни. Вихідні умови та результати розрахунків представлені в табл.3.

Аналізуючи отримані величини переміщень та зусиль, можна помітити, що для глинистих ґрунтів з коефіцієнтами фільтрації  $k_x=k_y=0,001\dots 0,05$  м/добу розбіжність становить 0,1-2,1%, тобто знаходиться в межах похибки, проте для піщаного ґрунту та супіску результати різняться до 56,5%. Таким чином можна зробити висновок, що обидва підходи до моделювання гідрогеологічних умов, можуть бути коректними, для основи складеної слабо фільтруючими ґрунтами, при наявності фільтраційного потоку ґрунтових вод, моделі не корелюють між собою.

Табл. 3. Результати розрахунків для моделей з однорідним ґрунтом  
Table 3. Calculation results for models with homogeneous soil

Спосіб моделювання ГУ	Однорідний ґрунт	Тип дренавання ґрунту	Коефіцієнт фільтрації, $k_x=k_y$	Тип розрахунку [СТ]	Тип розрахунку порового тиску [PPCT]	Максимальні горизонтальні переміщення ПС, $U_x$	Максимальний згинальний момент в ПС, $M_y$	Максимальна поперечна сила в ПС, Q
№	[ПГЕ]	[-]	[м/добу]	[-]	[-]	[мм]	[кНм/м]	[кН/м]
1	ПГЕ-13 Глина тверда	Undrained A	0,001	Plastic [PL]	Steady state groundwater flow [SSGWF]	19,5	194,5	106,5
2	ПГЕ-13 Глина тверда	Undrained A	0,001	Plastic [PL]	Phreatic [PHR]	19,24	198,7	106,3
Розбіжність результатів числових моделей						1,3%	2,1%	0,2%
1	ПГЕ-14 Суглинок напівтвердий	Undrained A	0,05	Plastic [PL]	Steady state groundwater flow [SSGWF]	69,2	311,7	133,8
2	ПГЕ-14 Суглинок напівтвердий	Undrained A	0,05	Plastic [PL]	Phreatic [PHR]	69,02	311,3	133,7
Розбіжність результатів числових моделей						0,3%	0,1%	0,1%
1	ПГЕ-8 Супісок пластичний	Undrained A	0,4	Plastic [PL]	Steady state groundwater flow [SSGWF]	236,1	530	172,2
2	ПГЕ-8 Супісок пластичний	Undrained A	0,4	Plastic [PL]	Phreatic [PHR]	529	746,8	192,3
Розбіжність результатів числових моделей						55,4%	29,0%	10,5%
1	ПГЕ-2 Пісок	Drained	6	Plastic [PL]	Steady state groundwater flow [SSGWF]	57,43	358,4	115,7
2	ПГЕ-2 Пісок	Drained	6	Plastic [PL]	Phreatic [PHR]	132,1	575,3	167,3
Розбіжність результатів числових моделей						56,5%	37,7%	30,8%

## ВИСНОВКИ

Визначено основні специфікації для задання гідрогеологічного режиму основи, що доступні в програмному комплексі Plaxis. Розглянуто властивості гідравлічних граничних умов, типів розрахунку порового тиску та особливості створення числової моделі при використанні двох підходів, щодо моделювання гідрогеологічних умов.

Представлено результати розрахунків при використанні даних реального об'єкту будівництва для двох числових моделей. Показано, що розподіл стаціонарних порових тисків ( $p_{steady}$ ) в основі попри схожу кількісну оцінку, має певну відмінність щодо якісної оцінки, при різних способах їх генерації. Також встановлено розбіжність у розрахункових зусиллях підпірної стіни, так значення максимального згинального моменту для першої числової моделі становить 578,7 кНм/м, а у випадку другої моделі 545,7кНм/м. Найбільшу різницю в результатах розрахунку можна спостерігати для горизонтальних переміщень ПС, яка становить до 23,7%.

При виконанні теоретичних задач з однорідною основою, встановлено, що попри різні способи моделювання гідрогеологічних умов та типу розрахунку порового тиску, результати збігаються, коли в основі залягають слабо фільтруючі ґрунти. Так, для масиву складеного глинистими ґрунтами з коефіцієнтами фільтрації  $k_x=k_y=0,001\dots0,05$  м/добу розбіжність у визначених зусиллях та переміщеннях підпірної стіни становить до 2,1%.

Однак при наявності фільтраційного потоку ґрунтових вод, який можливий у ґрунтах з високим показником фільтрації, моделі не корелюють між собою, а відмінність у результатах розрахунку становить до 56,5% для горизонтальних переміщень та до 37,7% для зусиль підпірної стіни.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics, *New York, John Wiley & Sons, Inc.* – 1943 – 248p.
2. Bishop, A.W. & Blight, A.K.G. Some aspects of effective stress in saturated and partially saturated soils. *Géotechnique*, - 1963 - 13: 177-197.
3. Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., Swolfs, W.M. Plaxis 2D Reference Manual 2018, Tutorial Manual, Reference Manual, *Delft University of Technology, The Netherlands.* – 2018 – 55-64.
4. Galavi V. Groundwater flow, fully coupled flow deformation and undrained analyses in Plaxis 2D and 3D; *Internal Report, Delft, Plaxis.* – 2010.
5. Gouw Dr, Tjie-Liong. Common Mistakes on the Application of Plaxis 2D in Analyzing Excavation Problems. 9. – 2014. - 8291-8311.
6. Gouw, Tjie-Liong. Deep Excavation Failures, Can They Be Prvented. *Proc. International Symposium on Sustainable Geosynthetics and Green Technology for Climate.* – 2012. – 342-357.

## REFERENCES

1. Terzaghi K., (1943) Theoretical Soil Mechanics, *New York, John Wiley & Sons, Inc.* 248.
2. Bishop, A.W. & Blight, A.K.G. (1963). "Some aspects of effective stress in saturated and partially saturated soils". *Géotechnique*, 13: 177-197.
3. Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., Swolfs, W.M. (2018). Plaxis 2D Reference Manual 2018, Tutorial Manual, Reference Manual, *Delft University of Technology, The Netherlands.* 55-64.
4. Galavi V. (2010). Groundwater flow, fully coupled flow deformation and undrained analyses in Plaxis 2D and 3D; *Internal Report, Delft, Plaxis.*
5. Gouw Dr, Tjie-Liong. (2014). Common Mistakes on the Application of Plaxis 2D in Analyzing Excavation Problems. 9. 8291-8311.
6. Gouw, Tjie-Liong. (2012). Deep Excavation Failures, Can They Be Prvented. *Proc. International Symposium on Sustainable Geosynthetics and Green Technology for Climate.* – 342-357.

**Features of the numerical modeling of the hydrogeological conditions of the soil massive during the excavation of the pit in the Plaxis software complex**

*Maksym Khoronzhevskiy  
Maksym Miatko*

**Summary.** The construction of multi-storey civilian buildings, especially in the central districts of cities, is often accompanied by a developed underground part, which requires deep pits. The construction of such pits often leads to a change in the hydrogeological condition at and near the construction site.

This paper presents a comparison of the stress-strain state of the "base - pit enclosure" system, depending on the method of modeling hydrogeological conditions.

The study is divided into two stages: determination of the main features of the Plaxis software complex toolkit for modeling and determining pore water pressures; creating of numerical models and performing calculations. . The first part of the study describes the basic principle of determining stresses in saturated soils, pore pressure calculation types, hydraulic boundary conditions, and types of soil drainage.

In the second part of the study, the numerical models were developed in Plaxis 2D, based on the real object and hydrogeological conditions at the construction site. The two most popular methods for modeling hydrogeological conditions during dry excavation in the pit are described. A step-by-step calculation is performed taking into account the stages of excavation in the pit and dewatering and the construction of retaining structures according to the scheme provided by the design solutions.

The results of the calculations demonstrate the difference in the obtained values of forces and horizontal displacements of the retaining wall for models created using different methods of setting the hydrogeological conditions of the base.

In order to improve the accuracy of calculations and determine the impact of soil permeability, the impact of the stratigraphy of the base was excluded by solving theoretical problems with a homogeneous soil massif composed of clay or sandy soil with groundwater filtration rates in a wide range ( $k_x=k_y=0.001...6\text{m/day}$ ). Based on the results obtained, it was found that both methods correlate with each other in the case of the presence

of poorly filtering soils with a filtration coefficient of  $k=0.001...0.05\text{ m/day}$ , the calculations demonstrated similarity in the displacements and forces of the retaining wall in such schemes up to 97.9-99.9%. Instead, in the case of soils with high water permeability ( $k=0.4...6\text{ m/day}$ ), the difference in results is up to 56.5%.

**Key words.** numerical modeling, hydrogeological conditions, pore pressure, boundary conditions, foundation pit enclosure structures