

УДК 624.131.7

## ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД

**І.І. Солодей,**

доктор технічних наук, професор кафедри будівельної механіки

**Е.Ю. Петренко,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки

**Г.А. Затилюк,**

аспірант кафедри будівельної механіки

*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ*

DOI: 10.32347/2410-2547.2019.102.139-149

В статті розглянуто найбільш поширені питання, що виникають на етапі створення дискретних моделей для розрахунку напружено-деформованого стану системи «підземна споруда – ґрунтовий масив» за допомогою МСЕ.

**Ключові слова:** підземна споруда, метод скінченних елементів, навантаження від ґрунтового масиву, ґрунтова модель, межі розрахункової області.

**Вступ.** Сьогодні неможливо уявити собі розрахункового обґрунтування проєктів будівництва, експлуатації та реконструкції без використання сучасних програмних комплексів, які використовують МСЕ в якості своєї теоретичної бази.

Необхідність застосування чисельних методів при розрахунку підземних споруд продиктована трудомісткістю або, навіть, неможливістю виконати аналітичний розрахунок внаслідок складності конфігурації та конструктивної схеми споруди, неоднорідності властивостей матеріалів конструкцій, необхідності враховувати нерівномірне залягання ґрунтів, поетапне будівництво і т.д.

Можливості обчислювальної техніки та використання МСЕ значно полегшили та пришвидчили процес розрахунку. Це дозволило деталізувати розрахункові схеми, які ускладнилися у порівнянні з тими, що використовувалися раніше. Сучасні розрахункові моделі дозволяють відобразити дійсні умови роботи будівель і споруд на різних стадіях їх життєвого циклу, моделювати їх суттєву нелінійність.

З іншого боку сам процес створення коректної розрахункової моделі досить складний і супроводжується цілою низкою питань. Аналіз найбільш поширених складнощів, які виникають на цьому етапі, при моделюванні системи «підземна споруда – ґрунтовий масив» є основною метою написання даної статті.

Можна виділити наступні питання, які виникають при створенні таких розрахункових моделей:

- визначення величини і характеру розподілу постійних навантажень від ґрунтового масиву;
- вибір ґрунтової моделі;

- вибір меж розрахункової області;
- інші питання, наприклад: питання дискретизації сіткової області, обрання граничних умов, задання величини інтерфейсів тощо.

1. **Проблема визначення величини і характеру розподілу постійних навантажень від ґрунтового масиву.** Про проблему збору навантажень від масиву ґрунтів, які залягатимуть над майбутніми конструкціями, відомо досить давно. Висока вартість проведення натурних випробувань призвела до необхідності створення великої кількості теорій, заснованих на досить різноманітних передумовах і які дають задовільні результати у вузьких межах, відповідно до коректності цих передумов.

Перші методи аналітичного обчислення ґрунтового тиску спираються на гіпотезу, згідно з якою навантаження викликані вагою всього обсягу порід, що залягає над конструкцією і тому зростає прямо пропорційно глибині відносно поверхні землі. Однією з найбільш поширених була гіпотеза Турнера [1].



Рис. 1. Гіпотеза пропорційності глибини

тиску на довільній глибині  $H$ , слід визначати відповідно до формул:

$$\sigma_x = -g \sum_{(H)} \rho_i h_i, \quad (1)$$

$$\sigma_y = \sigma_l = -\lambda g \sum_{(H)} \rho_i h_i, \quad (2)$$

де  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  і  $\sigma_l$  - відповідно вертикальна та горизонтальна (поперечна і повздовжня) складові;  $g$  - прискорення вільного падіння;

$\rho_i$  та  $h_i$  - відповідно щільність та потужність довільного  $i$ -го пласту ґрунту;  $\nu$  - коефіцієнт поперечної деформації пласту ґрунту, що

вміщує виробку (коефіцієнт Пуассона).

Коефіцієнт бокового тиску в пружному масиві:

$$\lambda = \nu / (1 - \nu). \quad (3)$$

Для нескельних і напівскельних глинистих ґрунтів з явно вираженими реологічними властивостями коефіцієнт бокового тиску слід приймати за формулою:

$$\lambda = \frac{0.6 + 0.8\nu}{1.4 - 0.8\nu}. \quad (4)$$

Однак результати розрахунків за цим підходом не відповідають дійсному стану речей на великих глибинах, тому рівень навантажень безпідставно збільшується в десятки разів [2]. Як показує досвід будівництва, а також отримані експериментальні дані, тиск порід над підземну конструкцію (гірський тиск) не залежить, як правило, від глибини закладання споруди.

Цією обставиною була продиктована необхідність створення спеціальних гіпотез, які можна умовно поділити на наступні групи [3]:

1) гіпотези зводу тиску (обвалення), запропоновані В. Ріттером, М.М. Протод'яконовим і П.М. Цимбаревичем;

2) гіпотези про утворення призми сповзання в боках виробки, розвинені в працях М.П. Бродського і К. Терцагі;

3) гіпотези Н.М. Покровського і В.В. Орлова, засновані на спостереженнях практики;

4) гіпотези В.Д. Слесарева, А.П. Германа і А.І. Сегаля, підкріплені розрахунковими положеннями на основі апарату теорії пружності і будівельної механіки.

Найбільше значення для практики набули теорії, що базуються на припущенні про виникнення над виробкою склепіння природної рівноваги (арочного ефекту). Згідно цих теорій, гірський тиск залежить виключно від ваги вивалу породи в межах утвореного склепіння.

В практиці проектування споруд глибокого закладання поширення набула теорія розроблена професором Рижського університету В. Ріттером та дороблена професором М.М. Протод'яконовим, яка була запропонована для широкого діапазону порід – від слабких до міцних скельних та лягла в основу розділу збору постійних навантажень СНиП П-44-78 «Тоннели железнодорожные и автодорожные», який діяв в СРСР, а нині використовується в російських СП «Метрополитены» та СП «Тоннели железнодорожные и автодорожные». Згідно цієї теорії, гірський тиск залежить виключно від ваги вивалу породи в межах утвореного склепіння (арки) природної рівноваги.

Для обчислення навантаження від породи, що знаходиться під аркою природної рівноваги, необхідно оцінити її проліт  $B$  та висоту  $h_1$  (рис. 2) за формулами:

$$B = b + 2h \cdot \operatorname{tg}(45^\circ - \varphi^k / 2), \quad (5)$$

$$h_1 = \frac{B}{2f} = 0, \quad (6)$$

де  $f$  - коефіцієнт міцності,  $\varphi^k$  - уявний кут внутрішнього тертя.

В раніше опублікованій статті [4] на основі МСЕ дана оцінка зміни постійного навантаження від товщі ґрунтової основи на підземну споруду в залежності від глибини її залягання.

За результатами досліджень було зроблено висновок, що прямий розрахунок в межах методу скінченних елементів можливий лише для підземних споруд неглибокого закладання, для яких зберігається дія гіпотези прямої пропорційності глибині.

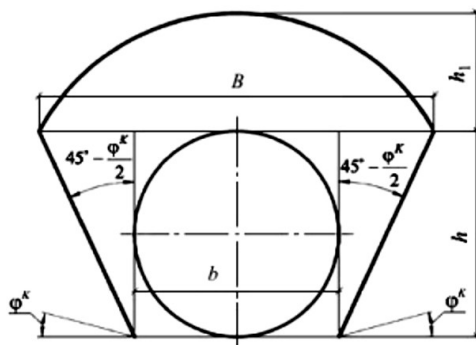


Рис. 2. Схема для розрахунку прольоту  $B$  та висоти  $h_1$  арки природної рівноваги за теорією проф. Протод'яконова

Опубліковані результати було ще раз перевірено, виконавши розрахунок аналогічної тестової задачі в програмному комплексі Plaxis, який широко використовується у всьому світі в інженерній геотехніці.

Особливістю ПК Plaxis, що якісно вирізняє його серед інших «універсальних» скінченноелементних комплексів, є можливість використовувати для розрахунку різноманітні ґрунтові моделі, про питання вибору яких йтиметься далі.

Тому, в цей раз, дослід був проведений в два етапи: на першому етапі виконувалися розрахунки з використанням моделі Кулона-Мора, на другому етапі вирішувалися задачі з використанням моделі зі зміцненням ґрунту (Hardening Soil Model).

Результати розрахунків показали, що тиск знову лінійно зростає зі



Рис. 1. Залежність максимальних згинаючих моментів та повздовжніх сил в обрці від глибини її залягання, за результатами розв'язаної задачі в роботі [5]

збільшенням глибини залягання конструкції, незалежно від використовуваної моделі: чи то поширена модель Кулона-Мора, чи більш складна модель зі зміцненням ґрунту. Такий же характер зміни напружень наведено і у статті іншого автора [5], яким також використовував модель зі зміцненням ґрунту, і хоча ним досліджувана залежність апроксимована поліномом другого ступеня, доцільніше говорити про лінійний зв'язок між навантаженнями та глибиною залягання з огляду на малість коефіцієнтів при старшій змінній. Крім того, лінійна функція забезпечує майже аналогічну достовірність апроксимації (рис. 3).

**2. Проблема вибору ґрунтової моделі.** Достовірність досліджень поведінки системи «підземних споруда – ґрунтовий масив» безпосередньо залежить від обраної для розрахунку ґрунтової моделі.

У сучасній практиці геотехнічних розрахунків використовуються математичні моделі ґрунту різного ступеня складності. Перевага простих моделей полягає в меншій кількості вхідних параметрів, а також в простоті і коректності рівнянь. Однак результати моделювання в цьому випадку можуть бути досить наближеними і не узгоджуються з реальними даними. Складні, вдосконалені моделі дозволяють описати поведінку ґрунту більш точно, але вони вимагають більш широкого набору характеристик ґрунту, які потрібно визначити експериментальними методами з застосуванням

спеціального обладнання, а також достатньої обізнаності та досвідченості інженера при виборі моделі, її параметрів і аналізі отриманих результатів розрахунків.

Для проведення геотехнічних розрахунків дуже часто використовується найпростіша пружно-пластична ґрунтова модель Кулона-Мора, яка заснована на законі Гука та умові міцності Кулона. Ця модель вимагає визначення всього чотирьох розрахункових параметрів ґрунту: модуля загальної деформації  $E$ , коефіцієнта Пуассона  $\nu$ , зчеплення  $c$  та кута внутрішнього тертя  $\phi$ .

Основний принцип моделі полягає в поділі деформацій і їх швидкостей на пружні і пластичні складові [6, 7, 8]:

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p, \tag{7}$$

де  $\epsilon^e$  - пружні деформації,  $\epsilon^p$  - пластичні деформації.

В даній моделі деформаційні характеристики ґрунту (модуль деформації ґрунту і коефіцієнт Пуассона) приймаються постійними величинами.

Іншою нелінійною моделлю ґрунтового масиву є вдосконалена пружнопластична модель зі зміцненням ґрунту (Hardening Soil Model). На відміну від моделі Кулона-Мора, дана модель враховує в тому числі зміцнення ґрунту при незворотних пластичних деформаціях, тобто описується залежність модуля жорсткості від напружень, і використовує гіперболічну залежність деформацій від напружень.

Для використання моделі зі зміцненням ґрунту необхідно задати додаткові параметри жорсткості, а саме: модулі деформації по сичній  $E_{50}$ , при розвантаженні та повторному навантаженні  $E_{ur}$ , дотичний модуль деформації при

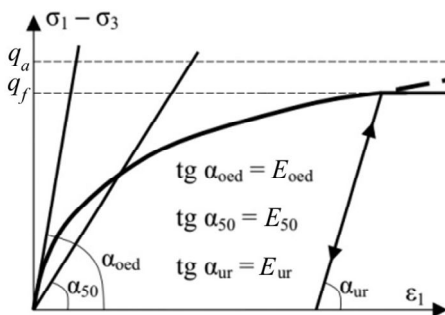


Рис. 4. Гіперболічна залежність між деформаціями та напруженнями в моделі зі зміцненням ґрунту

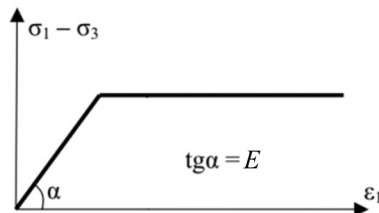


Рис. 5. Білінійна діаграма залежності деформацій та напружень в моделі Кулона-Мора

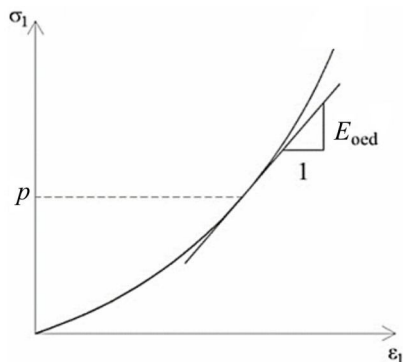


Рис. 6. Визначення модуля деформації  $E_{oed}$  в залежності від рівня напружень за результатами одометричних випробувань

первинному навантаженні в одометрі (одометричний модуль)  $E_{\text{од}}$ , а також показник ступеня залежності жорсткості ґрунту від рівня напружень  $m$  [6, 7, 8]. В цьому і полягає складність використання даної моделі.

Враховуючи результати порівняння результатів розв'язку різних задач з використанням згаданих моделей [4, 9, 10], можна говорити про переваги моделі зі зміцненням ґрунту над моделлю Кулона-Мора та про необхідність її використання, якщо є така можливість і цього потребує поставлена задача. Якщо немає можливості якісного отримання всіх необхідних даних по переважаючим типам ґрунту для використання більш вдосконалених моделей, то слід зупинитися на використанні моделі Кулона-Мора.

**3. Вибір меж розрахункової області.** Ще одна проблема, яка потребує вирішення, це вибір меж ґрунтової моделі. Багато авторів при обґрунтуванні прийнятих вихідних даних розв'язаних задач взагалі не торкаються питання прийнятих розмірів розрахункової моделі. Деякими використовується методика встановлення таких розмірів моделі, щоб вплив граничних умов на розподіл зусиль був мінімальним [11, 12]. Тобто, щоб при збільшенні розмірів моделі спостерігалась збіжність результатів до допустимої похибки. Це загальне правило і цього підходу достатньо для розрахунку конструкцій на міцність.

Вбачається, що попередній розмір розрахункової моделі можна задати із розрахунку розмірів зони впливу виробок, яка визначається за формулою [13]:

$$R_{\Delta} = r_0 \cdot \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 - 6 \cdot (1 - \lambda) \cdot \Delta \cdot \cos 2\theta}}{2 \cdot \Delta}}, \quad (8)$$

де  $\Delta$  - допустима похибка,  $r_0$  - радіус виробки,  $\lambda$  - коефіцієнт Пуассона,  $\theta$  - кут нахилу ( $0^{\circ}$  - для меж по вертикалі і  $90^{\circ}$  - по горизонталі).

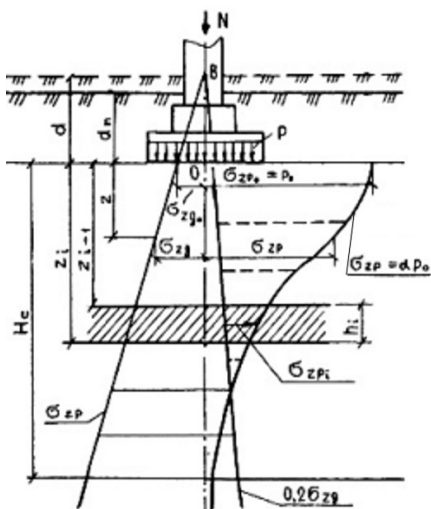


Рис. 7. Схема для розрахунку глибини стисливої зони

В той же час, описаний підхід є неприйнятним, якщо об'єктом дослідження поряд із НДС підземної споруди є величини її осідань. Відомо, що величини цього виду деформацій будуть зростати разом із збільшенням глибини моделі (розмірів по вертикалі). В цьому випадку деякі вказують на можливість використати іншу методику [14] - обмежити розрахункову схему глибиною стисливої зони, яка розраховується методом пошарового підсумування, границя якої знаходиться на глибині, де виконується умова:

$$\sigma_{zp} \leq 0,2\sigma_{zg}, \quad (9)$$

де  $\sigma_{zg}$  - напруження від власної

ваги ґрунту,  $\sigma_{zp}$  - тиск від споруди, з урахуванням коефіцієнту затухань по глибині.

Особливе місце займають методики визначення меж при динамічному розрахунку. Їх необхідно моделювати таким чином, щоб запобігти відображенню хвиль, тобто забезпечувати їх проходження чи гасіння [15].

Крім того, вбачається, що використання HSM може позбавити вад першу методику за рахунок описаної залежності жорсткості ґрунту від рівня напружень.

На наш погляд, проблема вибору меж розрахункової області є актуальною і потребує більш глибокого вивчення та розв'язання тестових задач.

**4. Деякі інші питання, що виникають при моделюванні системи «підземна споруда – ґрунтовий масив».** Одним з таких питань є обрання розмірів елементів скінченноелементної сітки. Використання МСЕ супроводжується похибками в результатах розрахунку, що складаються головним чином з похибки дискретизації, обумовленої заміною тіла, що має нескінченне число ступенів свободи, моделлю зі скінченим числом ступенів свободи, і похибки округлення чисел при виконанні обчислювальних операцій.

Тут необхідно скористатися загальними рекомендаціями та досліджувати збіжність моделі, провівши аналіз послідовності результатів на сітках, що згущуються, для оцінки точності розв'язку та обрати необхідний розмір сітки. Також доцільніше виконувати згущення сітки в околі досліджуваного об'єкта, залишаючи більш крупні елементи на периферії.

Думки щодо обрання граничних умов моделі серед різних авторів збігаються [16, 17]. Рекомендується верхню межу моделі залишити вільною для переміщень, обмежити горизонтальні переміщення бокових граней та горизонтальні і вертикальні для нижньої межі.

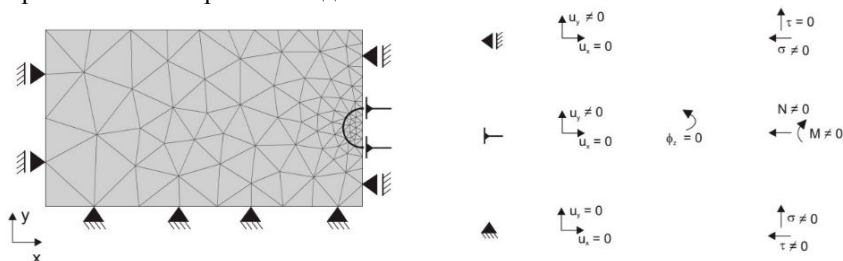


Рис. 2. Рекомендовані граничні умови для розрахункових схем

Часто досліджувана підземна споруда є симетричною, що дозволяє розглядати половину об'єкта. Для задоволення умов симетрії необхідно заборонити вертикальні та кутові переміщення.

Істотне значення має і правильне завдання величини інтерфейсів. Інтерфейс - це поверхня між ґрунтом і спорудою, яка моделює зміну сил тертя і зчеплення. Величини інтерфейсів будуть відрізнятися в залежності від технології виконання робіт. У загальному випадку міцність контакту між обробкою і ґрунтом повинна визначатися в лабораторії або натурними

дослідами. Якщо таких даних немає, можна скористатися значеннями інтерфейсів з довідкової літератури [18].

Також різні технології виконання робіт (екскавації ґрунту і зведення оправ) потребують використання різних методів їх моделювання, наприклад:  $\beta$ -метод, який широко поширений при розрахунку тунелів, що побудовані за новим австрійським методом проходок (NATM).

**Висновок.** В статті була розглянута низка питань, які виникають при моделюванні системи «підземна споруда – ґрунтові масиви». Їх врахування є обов'язковим для адекватного прогнозу НДС досліджуваних об'єктів.

Так, нехтування пролемною визначення величини і характеру розподілу постійних навантажень від ґрунтового масиву призведе до безпідставного збільшення навантажень на великих глибинах в десятки разів, у випадку використання прямого розрахунку в межах методу скінченних елементів.

Також перед нами стоїть проблема зваженого вибору ґрунтової моделі. З одного боку є проста модель Кулона-Мора, яка дає менш точні результати, однак, яких достатньо для ряду задач, а також при попередніх розрахунках. З іншого боку, існує більш складна модель зі зміцненням ґрунту, яка більш точно описує реальну поведінку основ, однак потребує більшої кількості вихідних даних, які отримуються за допомогою складних дослідів, якість яких має відповідати нормативним документам.

Межі розрахункової області мають обиратися з врахуванням описаних вище особливостей, з мінімізацією впливу граничних умов на НДС об'єкту досліджень.

Підсумовуючи можна сказати, що отримання відповідей на ці та інші питання потребує глибокого розуміння математичних методів і фізичного сенсу явищ, що моделюються, врахування різноманіття природних і виробничих факторів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Борщ-Компониц В.И.* Практическая механика горных пород –Москва: Горная книга, 2013. – 322с.
2. *Егоров П. В.* Геомеханика / П.В. Егоров, Г.Г. Штумпф, А.А. Ренев та ін. – Кемерово: Кемеровский институт, 2001. – 276 с.
3. *Петренко В.Д.* Обзор аналитических и экспериментальных методов исследования взаимодействия массива и крепи / В.Д. Петренко, А.Л. Тюткин, В.И. Петренко. // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – №1. – С. 75–81.
4. *Солодей І.І.* Визначення навантажень від масиву ґрунтових сипучих порід при проектуванні підземних споруд / І.І. Солодей, Г.А. Затилок. // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2016. – №97. – С. 145–154.
5. *Данг Ван Чьонг.* Изменение напряженно-деформированного состояния системы «грунтовой массив – тоннель» в зависимости от глубины заложения тоннеля / Данг Ван Чьонг // Вестник МАДИ.– 2015. – вып. 4 (43). – С.89-94
6. *Кудашева М.И.* Сравнение модели Мора-Кулона и модели упрочняющегося грунта в программном комплексе Plaxis [Электронный ресурс] / М.И. Кудашева, С.В. Калошина // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=9>.
7. *Юдина И.М.* К вопросу о выборе расчетной модели для прогнозирования напряженно-деформированного состояния грунтов при устройстве котлованов / И.М. Юдина, А.Н. Климов. // Вестник МГСУ. – 2008. – №2. – С. 145–149.
8. *Строкова Л.А.* Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов / Л.А. Строкова. // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – №1. – С. 69–74.



9. *Безгодов М. А.* Выбор модели грунта при численном моделировании влияния разработки глубоких котлованов на существующую застройку / М.А. Безгодов, С.В. Калошина. // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. - 2012. - № 2(6). - С. 17-27.
10. *Голубев А.И.* Выбор модели грунта и её параметров в расчётах геотехнических объектов / А.И. Голубев, А.В. Селецкий//Труды международной конференции по геотехнике "Геотехнические проблемы мегаполисов (GEOMOS 2010).– 2010. – том 4. – С. 1727-1732.
11. *Бережной Д.В.* Моделирование деформирования обделки тоннеля метрополитена, расположенной в грунте сложной физической природы / Д.В. Бережной, М.К. Сагдатуллин, Л.У. Султанов. // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №9. – С. 250–255.
12. *Петров Д.Н.* Численное моделирование напряженного состояния в обделке колонных станций без боковых платформ/ Д.Н. Петров, П.А.Деменков, Д.А. Потемкин. // Записки Горного института. – 2010. – т.185. – С. 166-170.
13. *Бульчев Н.С.* Механика подземных сооружений в примерах и задачах. / Н.С. Бульчев – М.:Недра,1989. – 270 с.
14. *Городецкий А.С.* Компьютерные модели конструкций / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. – Киев: Факт, 2005. – 344 с.
15. *Бирбраер А.Н.* Расчет конструкции на сейсмостойкость/ А.Н. Бирбраер. – С.-Пб.: Наука, 1998. – 255 с.
16. *Деменков П.А.* Численное моделирование напряженно-деформированного состояния обделок перегонных тоннелей в зоне их взаимного влияния/ П.А. Деменков. // Записки Горного института. – 2010. – т.172. – С. 24-28.
17. *Möller S.* Tunnel in duced settlement sandstructural forces in linings: dissertation/Sven Möller – (Institut für Geotechnik) Universität Stuttgart, 2006. – 174 с.
18. *Рябов С.В.* Опыт применения программного комплекса Plaxis 3D отделом проектирования тоннельных строительных конструкций /С.В. Рябов, Н.А. Соловьев. // Метро и тоннели. – 2016. – №9. – С. 53–55.

## REFERENCES

1. *Borshch-Komponiets V.I.* Prakticheskaia mekhanika hornykh porod (Practical mechanics of rocks) – Moskva: Hornaia kniha, 2013. – 322 p.
2. *Ehorov P.V.* Neomekhanika (Geomechanics) / P. V.Ehorov, H. H. Shtumpf, A. A. Renevtain. – Kemerovo: Kemuizdat, 2001. – 276 p.
3. *Petrenko V.D.* Obzor analiticheskikh i eksperimentalnykh metodov issledovaniia vzaimodeistviia massiva i krepri (An overview of analytical and experimental methods for studying the interaction of the array and the support) / V.D. Petrenko, A.L. Tiutkin, V.I. Petrenko. // Mosti ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktika. – 2012. – №1. – P. 75–81.
4. *Solodei I.I.* Vznachennia navantazhen vid masivu hruntovikh sipuchikh porid pri proektuvanni pidzemnikh sporud (Determination of loads from array of runningsoil when designing underground structures)/ I.I. Solodei, H.A. Zatiliuk. // Opir materialiv i teoriia sporud. – 2016. – №97. – P. 145–154.
5. *Danh Van Chyongh.* Zmienenie napriazhenno-deformirovannoho sostoiannia sistemy «hruntovyi massiv – tunnel» v zavisimosti ot hlubiny zalozheniia tonnelia (Change in the stress-strain state of the system "soilmassif - tunnel" depending on the depth of the tunnel)/ Danh Van Chyongh // Vestnik MADI. – 2015. – vyp. 4 (43). – P. 89-94
6. *Kudasheva M.I.* Sravnenie modeli Mora-Kulona i modeli uprochniaiushchegosia hrunta v prohrannmno komplekse Plaxis [Elektronniuresurs] (Comparison of the Mora-Coulomb model and the hardening soil model in the Plaxis software package)/ M.I. Kudasheva, S.V. Kaloshina // Stroitelstvo i arkhitektura. Opyt i sovremennye tekhnologii. – 2017. – <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=9>.
7. *Yudina I.M.* K voprosu o vybere raschetnoi modeli dlia prohnzirovaniia napriazhenno-deformirovannoho sostoiannia hruntov pri ustroistve kotlovanov (On the issue of choosing a computational model for predicting the stress-strain state of soils during the construction of trenches) / I.M. Yudina, A.N. Klimov. //Vestnik MHSU. – 2008. – №2. – P. 145–149.
8. *Strokova L.A.* Opredelenie parametrov dlia chislennoho modelirovaniia povedeniia hruntov (Determination of parameters for numerical simulation of soil behavior) / L.A. Strokova // Izvestiia Tomskoho politekhnicheskogo universiteta. – 2008. – №1. – P. 69–74.
9. *Bezghodov M.A.* Vyorbor modeli hrunta pri chislenno modelirovaniii vliianiia razrabotki hlubokikh kotlovanov na sushchestvuiushchuiu zaostroiku (Choosing a soil model for numerical simulation of the influence of deep excavation on the existing building) / M.A. Bezghodov, S.V. Kaloshina. // Vestnik PNIPIU. Urbanistika. - 2012. - № 2(6). - P. 17-27.

10. *Holubev A.I.* Vyibor modeli grunta i ego parametrov v raschyotah geotekhnicheskikh ob'ektov (The choice of soil model and its parameters in the calculation of geotechnical objects) / A.I. Holubev A.V. Seletskii // Trudy mezhdunarodnoi konferentsii po heotekhnike "Heotekhnicheskie problemy mehapolisov (GEOMOS 2010). – 2010. – tom 4. – P. 1727-1732.
11. *Bereznoi D.V.* Modelirovanie deformirovaniia obdelki tonnelia metropolitena, raspolzhennoi v hrunte slozhnoi fizicheskoi prirody (Modeling the deformation of the lining of the tunnel of the subway, located in the ground of a complex physical nature) / D.V. Bereznoi, M.K. Sahdatullin, L.U. Sultanov. // Vestnik Kazanskogo tekhnolohicheskogo universiteta. – 2013. – №9. – P. 250–255.
12. *Petrov D.N.* Chislennoe modelirovanie napriazhennoho sostoiianiia v obdelke kolonnykh stantsii bez bokovykh platform (Numerical modeling of the stress state in the lining of columnar stations without sideplatforms) / D.N. Petrov, P.A. Demenkov, D.A. Potemkin. // Zapiski Hornoho instituta. – 2010. – t.185. – P. 166-170.
13. *Bulychev N.S.* Mekhanika podzemnykh sooruzhenii v primerakh i zadachakh. / N.S. Bulychev – M.: Nedra, 1989. – 270 p.
14. *Horodetskii A.S.* Kompiuternye modeli konstruksii (Computer models of constructions) / A.S. Horodetskii, I.D. Evzerov. – Kiev: Fakt, 2005. – 344 p.
15. *Birbraer A.N.* Raschet konstruksii na seismostoikost (Design calculation for earthquake resistance) / A.N. Birbraer. – SPb.: Nauka, 1998. – 255 p.
16. *Demenkov P.A.* Chislennoe modelirovanie napriazhenno-deformirovannogo sostoiianiia obdelok perehonnnykh tonneli v zone ikh vzaimnogo vliianiia (Numerical modeling of the stress-strain state of lining of distillation tunnels in the zone of the irmutual influence) / P.A. Demenkov. // Zapiski Hornoho instituta. – 2008. – t.172. – P. 24-28.
17. *Möller S.* Tunnel in duced settlement sandstructural forces in linings: dissertation/Sven Möller – (Institut für Geotechnik) UniversitätStuttgart, 2006. – 174 p.
18. *Riabkov S.V.* Opyt primeneniia prohrammnogo kompleksa Plaxis 3D otделom proektirovaniia tonnelnykh stroitelnykh konstruksii (Experience in the application of the software complex Plaxis 3D by the department of designing tunnel building structures) / C.V. Riabkov, H.A. Solovev. // Metro i tonneli. – 2016. – №9. – p. 53–55.

*Стаття надійшла до редакції 18.02.2019 р.*

*Solodei I.I., Petrenko E.Yu., Zatyliuk Gh.A.*

## **FEATURES OF THE NUMERICAL SIMULATION IN RESEARCH ON THE STRESS STRAIN BEHAVIOR OF UNDERGROUND STRUCTURES**

In our time, widely use numerical calculations methods, the leading place among which is the finite element method (FEM).

The necessity of using numerical methods in calculating underground structures is caused by complexity and the inability to perform analytical calculation because of such factors: composite build configuration, structural diagram of constructions, anisotropy of materials, differential subsidence, multistage construction, etc.

The article considers the most common questions, which arise at the stage of discrete modelling for calculation of the stress strain behavior of system "underground development - a soil mass" by use of FEM, such as:

Measuring and pattern of distribution dead loads from soil mass. At great depth underground pressure generally does not depend on depth of construction, that give a problem.

Choosing a material model. The credibility of research results depends on selected mathematical model of the soil. Simple models give blunder and complex models require more conditions that need to be determined qualitatively using special purpose equipment.

Choosing FE-mesh dimensions. Differing approaches to problem solving impact differently on the distribution of stress strain behavior in constructions and the soil mass.

Also, the article deals questions of dimensioning mesh coarseness, selecting boundary conditions, the setting of interfaces, etc.

Problem solution requires a thorough understanding of the mathematical methods and the physical phenomena that are modelled, taking into account the diversity of natural and production factors.

**Keywords:** underground structures, finite element method, loads from soil mass, material model of soil, fe-mesh dimensions.

*Солодей І.І., Петренко Э.Ю., Затылюк Г.А.*

**ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

В статье рассмотрены наиболее распространенные вопросы, возникающие на этапе создания дискретных моделей для расчета напряженно-деформированного состояния системы «подземное сооружение - грунтовой массив» с помощью МКЭ.

**Ключевые слова:** подземное сооружение, метод конечных элементов, нагрузки от грунтового массива, грунтовая модель, границы расчетной области.

УДК 624.131.7

*Солодей І.І., Петренко Е.Ю., Затылюк Г.А. Особливості створення розрахункових моделей при дослідженні напружено-деформованого стану підземних споруд // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2019. – Вип. 102. – С. 139 – 149.*

*В статті розглянуто найбільш поширені питання, що виникають на етапів створення дискретних моделей для розрахунку напружено-деформованого стану системи «підземна споруда – грунтовий масив» за допомогою МСЕ.*

*Л. 7. Бібліогр. 18 назв.*

*Solodei I.I., Petrenko E.Yu., Zatyliuk Gh.A. Features of the numerical simulation in research on the stress strain behavior of underground structures // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv:KNUBA, 2019. – Issue 102.– P. 139 – 149.*

*The article considers the most common questions, which arise at the stage of discrete modelling for calculation of the stress strain behavior of system "underground development - a soil mass" by use of FEM.*

*Fig. 7. Ref. 18.*

*Солодей І.І., Петренко Э.Ю., Затылюк Г.А. Особенности создания расчетной модели при исследовании напряженно-деформированного состояния подземных сооружений // Сопrotивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборн. – К.: КНУСА, 2019. - Вип. 102. – С. 139 – 149.*

*В статье рассмотрены наиболее распространенные вопросы, возникающие на этапе создания дискретных моделей для расчета напряженно-деформированного состояния системы «подземное сооружение - грунтовой массив» с помощью МКЭ.*

*Лл. 7. Библиогр. 18 назв.*

**Автор:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри будівельної механіки СОЛОДЕЙ Іван Іванович

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

**Робочий тел.:** +38(044) 241-55-55

**Мобільний тел.:** +38(050)357-44-90

**E-mail:** isolodey@gmail.com

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0001-7638-3085>

**Автор:** кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геотехніки ПЕТРЕНКО Едуард Юрійович

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0002-9792-4757>

**Автор:** аспірант кафедри будівельної механіки ЗАТИЛЮК Герман Анатолійович

**Мобільний тел.:** +38(099) 11-00-564;

**E-mail:** gherman.zt@gmail.com

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0003-0392-2214>