

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.159.2:624.131

В. С. АНДРЕЄВ^{1*}, В. О. П'ЄЛИК²

^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 480 11 33, ел. пошта v.s.andriev@ust.edu.ua, ORCID 0009-0006-3155-7452

²Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 492 03 22, ел. пошта VladislavNAVI@gmail.com, ORCID 0009-0002-7375-2388

Принципи та моделі розрахунку осідань фундаментів для розрахунку деформацій ґрунтових основ

Мета. У практиці інженерної діяльності часто виникає проблема розрахунку осідань фундаментів на шаруватій основі. При цьому не враховується той факт, що в основах із шаруватою текстурою розподіл напружень може суттєво відрізнятися від їхнього розподілу в однорідній основі. Зазначене негативно впливає на використання в даний час методики розрахунку осідань. Автори ставлять за мету проведення порівняльного аналізу принципів та моделей розрахунку осідань фундаментів під час визначення деформацій ґрунтових основ. **Методика.** Наявні в науково-технічній літературі дані свідчать про те, що використовувані в даний час методи розрахунку в ряді випадків не дозволяють досягти необхідної точності, оскільки вплив реологічних властивостей ґрунтової шаруватості основи та часові показники при визначенні нахилу фундаментів не враховуються. Також відомо, що однією з причин невідповідності розрахунків експлуатаційним параметрам є недостатньо повне врахування текстурних особливостей ґрунтової товщі, а саме шаруватості. Існуючі в даний час методи розрахунку осідань фундаментів або споруд на ґрунтовій основі, як правило, базуються на використанні рішень, отриманих у рамках моделі лінійно-пружного ізотропного середовища. У статті порівняно декілька моделей розрахунку осідань фундаментів під час розрахунку деформацій ґрунтових основ та проаналізовано їх принципи. **Результати.** Для вирішення даної задачі необхідно обґрунтувати аналітичні методи розрахунку осідань фундаментів. Існуючі методи дозволяють оцінити лише їх деякі показники, зважаючи на умовність використовуваних розрахункових моделей. Отримання достовірних результатів можливе лише із впровадженням комплексного підходу до оцінки спостережень за деформаціями основ. **Наукова новизна.** Полягає у виборі та обґрунтуванні рішень стосовно розрахунку осідань фундаментів під час розрахунку деформацій ґрунтових основ. **Практична значимість.** Полягає в розробці практичних рекомендацій щодо розрахунку осідань жорстких фундаментів з урахуванням шаруватості основи та тимчасових показників.

Ключові слова осідання; фундамент; деформації; модель; ґрунт

Вступ

В практиці інженерної діяльності часто виникає проблема розрахунку осідань фундаментів на шаруватій основі.

Наявні в науково-технічній літературі дані свідчать про те, що використовувані в даний час методи розрахунку в ряді випадків не дозволяють досягти необхідної точності, оскільки вплив реологічних властивостей ґрунтової шаруватості

основи та часові показники при визначенні нахилу фундаментів не враховуються.

Також відомо, що однією з причин невідповідності розрахунків експлуатаційним параметрам є недостатньо повне врахування текстурних особливостей ґрунтової товщі, а саме шаруватості.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Осідання фундаментів є основним критерієм, що визначає експлуатаційну придатність будівель та споруд.

Різноманітність наявних робіт обумовлена низкою причин, серед яких:

- різноманітність ґрунтових умов на підставі будівель та споруд;
- різноманітність конструктивних рішень щодо дослідження фундаментів, а також вирішення питань реконструкції будівель та споруд;
- умови експлуатації та функціональні особливості будівель та споруд.

В даний час методикою ДСТУ [1] передбачаються такі вимоги:

1. Тиск під підшвою фундаменту має перевищувати деякої граничної величини розрахункового опору ґрунту R .

2. При великих ексцентриситетах прикладання до фундаменту зовнішнього навантаження та специфічних ґрунтових умов має бути забезпечена несуча здатність основи по ґрунту.

Існуючі в даний час методи розрахунку осідань фундаментів або споруд на ґрунтовій основі, як правило, базуються на використанні рішень, отриманих у рамках моделі лінійно-пружного ізотропного середовища. При цьому не враховується той факт, що в основах із шаруватою текстурою розподіл напружень може суттєво відрізнятися від їхнього розподілу в однорідній основі.

Зазначене негативно впливає на використання в даний час методики розрахунку осідань.

Мета

Метою наукової статті є проведення порівняльного аналізу принципів та моделей розрахунку осідань фундаментів під час визначення деформацій ґрунтових основ.

Методика

Норми проектування основ фундаментів містять умовний прийом, заснований на обмеженні зони в основі, що деформується, по заданому співвідношенню вертикальних осьових нормальних напружень від зовнішнього навантаження і вертикальних напружень від власної ваги ґрунту [3].

Недолік експериментів визначення товщини деформованої зони, особливо в натурних умовах, пов'язаний з відсутністю способів визначення вихідного природного напруженого стану від дії власної ваги та порушення цілісності масиву при зануренні у нього вимірювальних приладів. Тому в технічній літературі містяться пропозиції низки дослідників щодо визначення товщини деформованої зони.

Деякі автори рекомендують для глинистих ґрунтів визначати потужність товщі, що деформується, виходячи з умови, що на її межі напруження дорівнюють структурній міцності ґрунту. За відсутності даних структурної міцності глибини стисливої товщі рекомендується приймати подвоєну товщину еквівалентного шару [3].

Відповідно до деяких рекомендацій основа приймається нестисливою на глибині, що дорівнює подвоєній потужності еквівалентного шару, котра визначена методом спроб для схеми стисливого шару кінцевої товщини згідно ДСТУ.

Для великорозмірних фундаментних плит, що зводяться на сильно стисливій основі, слід приймати товщину зони, що деформується, в межах 10...15 м.

За даними спостережень за пошаровими деформаціями основ, складених сильно стисливими ґрунтами, виміряна товщина більш ніж 2 рази перевищувала ширину фундаменту. Узагальнюючи результати експериментальних спостережень, низка дослідників розвитку пошарових деформацій на основі великорозмірних фундаментів (ширина $b > 10$ м), зазначається, що розміри деформованої зони залежать, в основному, від ґрунтових умов, причому в щільних ґрунтах товщина деформованої зони становить глибину дії, а для сильно стисливих ґрунтів розраховується за ДСТУ, причому в ряді випадків виміряна величина не перевищує розрахункову. Зазначене вище узгоджується з висновками, згідно з якими глибина товщі, що деформується, в основі гідротехнічних споруд коливається від 0,5 до 0,75 ширини підшви фундаменту [3].

Для умов близького залягання нестисливого ґрунту було запропоновано метод розрахунку осідань для пружного шару кінцевої товщини. Цей метод включений в ДБН поряд з розрахунком осідання за методом пружного півпростору. Умовність даного способу полягає у встанов-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ленні вихідного значення товщини зони, що деформується. Однак, ця розрахункова схема застосовується як для випадку залягання ґрунту практично стисливої основи ($E > 100$ МПа), так і у разі основи, завантаженої по великій площі ($b > 10$ м, $E > 10$ МПа).

У деяких роботах зі штампами площею $0,5 \dots 1,0$ м², встановлених на глинистих, піщаних та великоуламкових основах з вимірюванням пошарових деформацій у центральній частині круглих жорстких штампів. показано, що в глинистій основі:

1. Осідання штампів більш ніж на 90 % викликаються стисненням шару ґрунту товщиною $1,5b$ у центрі та $1,25b$ поблизу його краю. При цьому частка деформацій верхнього шару ґрунту завтовшки $0,5b$ у загальному осіданні штампів становить понад 70 % для центральної його частини та 85 % для крайової [3];

2. Товщина деформованої зони в часі (2,5 місяця) зберігає практично постійне значення, а деяке збільшення осідання, що спостерігається, відбувається за рахунок деформацій, котрі протікають у верхніх шарах глибиною $1,0b$.

У великоуламкових (з глинистим заповнювачем) і піщаних ґрунтах глибина зони, що деформується, не перевищувала $1,2$ і $1,5b$, при цьому 90 % деформацій протікала у верхньому шарі товщиною b .

Відзначено, що глибина зони, що деформується, приймається пропорційно збільшенню тиску, і виміряна товща в $1,5 \dots 2$ рази менше, ніж обчислена за нормами лінійно-деформованого півпростору [3].

Дослідженнями пошарових деформацій на основі впливу штампів і дослідних фундаментів встановлено, що виміряна зона, що деформується, в $1,5 \dots 2$ рази менша, ніж обчислена за ДСТУ [1, 4, 5, 8]. Фактична глибина зони, що деформується, у тому числі під фундаментами існуючих будівель, становить 50...60 % розрахункових значень [3].

Встановлено, що виміряна глибина товщі, що деформується, зменшується з підвищенням модуля деформації, тоді як її розрахункове значення не залежить від величини модуля деформації. Тому, чи вище це значення, то більше розбіжність між фактичними і розрахунковими

значеннями глибини стисливої товщі; зі збільшенням розмірів підшви фундаментів зростає зона деформації основи.

Вимірювання пошарових деформацій у піщаній основі під жорстким круглим штампом показали, що 70 % деформацій відбувалося у шарі товщиною $1,5d$, а 80 % – у шарі, що дорівнює $2,0d$ (d – малий діаметр штампів). Зазначені дослідні проводились у ґрунтовому лотку зі штампом малого діаметра ($d = 28$ см, $F = 615$ см²) [3].

Спосіб визначення товщі, що деформується, по суті, базується на використанні за пропозицією Терцаги, результатів компресійних випробувань зразків непорушеного ґрунту, відібраних із різної глибини під підшвою фундаменту (рис. 1).

Наявність води в порах ґрунтових основ, повзучість ґрунтового скелета та незворотність деякої частки деформацій під час циклу «завантаження – розвантаження» є основними ознаками, що відрізняють від інших суцільних середовищ. Оскільки деформації ґрунтових основ характеризуються великою тривалістю, а в деяких випадках переміщення, що реалізуються після закінчення деякого часу, становлять значну частку від загального, проблемі прогнозу поточних деформацій присвячено велику кількість робіт [3].

Ґрунти, з яких складаються основи, як правило, мають природне походження зі складною історією виникнення. Отже, фізико-механічні властивості різних видів ґрунтів можуть відрізнятися.

При описі поведінки ґрунтів під навантаженням використовуються моделі дискретного і суцільного середовища.

Вперше завдання фільтраційної консолідації в рамках лінійної пружної консолідуєчої середовища була сформульована і вирішена для компресійного завдання К. Терцаги [2]. Як рівняння стану середовища було прийнято закон Гука. Оскільки завдання вирішувалося при постійному навантаженні, проблему вдалося звести до отримання значень порового тиску з подальшим визначенням напруження в ґрунтовому скелеті і його переміщень.

Отримані К. Терцаги [2] рішення при тих чи інших припущеннях використовуються в інженерній практиці і зараз. Однак прийняті ним співвідношення не дозволяють врахувати ряд особливостей ущільнення реальних ґрунтових

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

основ, а саме загасання епюри вертикальних напружень по глибині та просторовий характер роботи ґрунтових основ фундаментів. У зв'язку з цим з'явилася низка інженерних методів, сутність яких полягає у пошуку компромісу між фактичним напружено-деформованим станом ґрунту та отриманими в рамках компресійного завдання рішеннями.

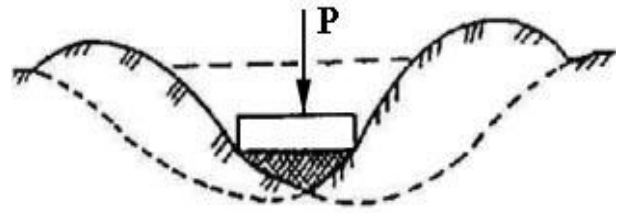
Найбільш досконалими серед вказаних методів є метод еквівалентного шару, суть якого зводиться до побудови рішення ґрунту, що знаходиться в умовах компресійного стиснення під впливом розподіленої певним чином по глибині об'ємного навантаження. При цьому закон зміни об'ємного навантаження відповідає епюрі розподілу вертикальної нормального напруження, розрахованої для випадку просторового завдання. Необхідно відзначити, що такий підхід, однак, не дозволяє повністю відобразити фактичний характер ущільнення ґрунтових основ, що знаходяться під впливом місцевого навантаження, оскільки при компресії немає можливості відтоку порової рідини в горизонтальному напрямку. Також було досліджено проблему консолідації при компресії середовищ зі шматково-лінійною зміною властивостей основ [3, 9].

Подальший розвиток теорія фільтраційної консолідації набула у роботах В. А. Флоріна та М. Біо [7, 8], які як рівняння стану прийняли узагальнений закон Гука. Це дозволило їм поширити результати Терцагі [2] у разі просторового напружено-деформованого стану.

Для випадку просторового напружено-деформованого стану та плоскої деформації розрахунків осідань фундаментів різної форми в рамках моделі пружного консолідованого середовища був виконаний раніше, і як розрахункову схему було прийнято модель водонасиченого півпростору (рис. 3).

У межах моделі пружного консолідуемого середовища для розрахункових схем півпростору отримав теоретичні залежності «середнє осідання – час». Результати надалі були узагальнені на випадок спадково-пружної консолідуемого основи. Однак, таке завдання було вирішено лише для штампу круглої форми при постійному навантаженні в часі, а для її вирішення був використаний наближений алгоритм.

a – a



б – б

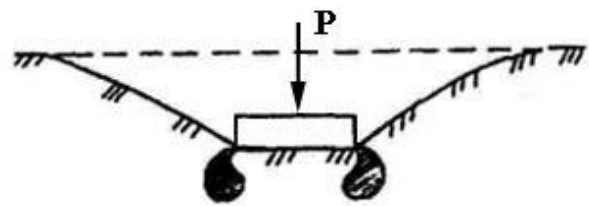


Рис. 1. Схема для розрахунку для шару кінцевої товщини:

a – основа працює в умовах граничної рівноваги;
б – пружного шару, працюючого в умовах змішаної задачі теорії пружності та теорії пластичності

Fig. 1. Scheme for calculation for a layer of finite thickness:

a – the base operates under conditions of limit equilibrium;
b – an elastic layer operating under conditions of a mixed problem of the theory of elasticity and the theory of plasticity

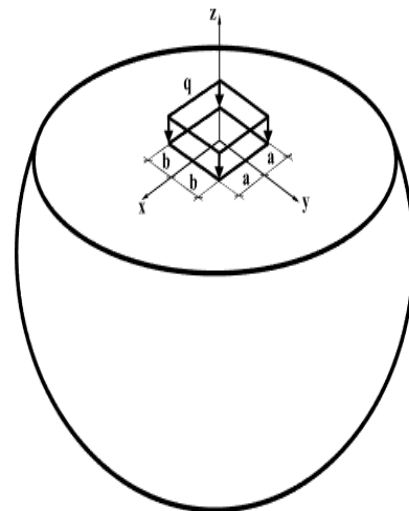


Рис. 2. Модель пружного півпростору

Fig. 2. Elastic half-space model

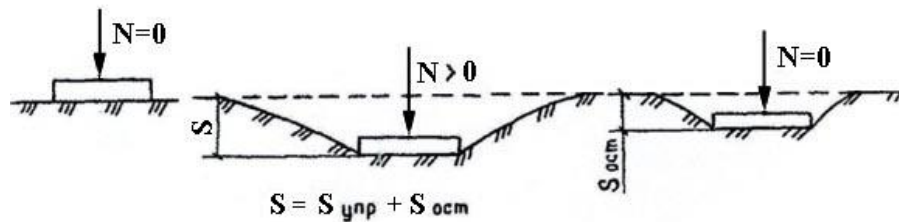


Рис. 3. Схема розрахункової моделі пружного лінійно-деформованого півпростору

Fig. 3. Scheme of the computational model of an elastic linearly deformed half-space

У цілому нині теоретичні залежності «осідання – час», встановлені під час врахування просторового напружено-деформованого стану, мають наближений характер і не дозволяють повною мірою враховувати вплив на характер ущільнення водонасичених основ змінної в часі зовнішнього навантаження. Незважаючи на зазначені недоліки, прийнята в нормативних документах методика розрахунку осідань в даний час є цілком прийнятною.

Допустимість застосування рішень теорії пружності визначення напруженого стану ґрунтового середовища залежить, переважно, від розмірів областей, у яких є граничний напружений стан. Якщо такі області відсутні або настільки малі порівняно з розмірами споруди (або площі завантаження), що ними можна знехтувати, то застосування рішень теорії пружності можливе і не викликає суттєвих заперечень [3].

Для визначення напруженого стану ґрунтів в умовах одноразового застосування навантаження становлять інтерес не пружні властивості земляного середовища, а застосовність закону Гука. Використання розрахункової моделі лінійно-деформованого середовища широко застосовується під час проєктування для визначення напруженого стану ґрунтового середовища особливо з метою встановлення очікуваних величин осідань, нахилів та інших зсувів споруд, що зводяться при виконанні практичних розрахунків [3].

Також щодо осідань фундаментів виходячи з уявлень його деформування як пружного півпростору (рис. 2), застосовується метод скінченних елементів. Цей метод є потужним засобом для вирішення кола завдань, що описуються диференціальними рівняннями.

При вирішенні завдань механіки ґрунтів методом скінченних елементів розрахункова область,

яка може бути ґрунтовим масивом різної складності, розбивається на кілька підобластей, званих скінченними елементами. В елементах виділяються точки, які називають вузловими точками або вузлами.

Результати

Таким чином, проблема розрахунку залежностей «осідання – час» для фундаментів при змінному в часі навантаженні вимагає свого вирішення.

Під час будівництва споруди, навіть якщо міцність ґрунту забезпечена, виникають деформації основи. Як правило, вони мають нерівномірний характер та викликають перерозподіл зусиль у конструкціях споруди. За певних умов це може ускладнити нормальну експлуатацію споруди, а в деяких випадках навіть призвести до її аварії.

Зазначимо, що залежність між осіданнями поверхні ґрунтової основи та діючими навантаженнями $s = f(p)$ має нелінійний характер.

Однак встановлено, що в деякому інтервалі навантажень, що відповідає фазі ущільнення ґрунту, ця залежність близька до лінійної та розвиток осідань у часі завжди має загасаючий характер.

Час розвитку осідань водонасичених ґрунтів пов'язаний зі швидкістю фільтрації води в ґрунті. Відомо, що процеси фільтрації в глинистих ґрунтах протікають суттєво повільніше, ніж у піщаних. Характер кривих $s = f(t)$ цих фундаментів буде кардинально різним.

Абсолютне осідання окремого фундаменту визначається як середнє вертикальне переміщення подошви фундаменту. Знаючи величини осад для різних фундаментів, можна оцінювати нерівномірність деформацій основи та конструкції споруди.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна полягає у розробці та обґрунтуванні аналітичних рішень та практичних рекомендацій для визначення кренів фундаментів на водонасиченій шаруватій основі, зокрема розробці алгоритму рішення визначення напружено-деформованого стану водонасичених основ позацентрово-навантажених фундаментів, що мають властивості повзучості.

Практична значимість полягає в розробці практичних рекомендацій щодо розрахунку осідань жорстких фундаментів з урахуванням шаруватості основи та тимчасових показників, зокрема в методиці розрахунку осідань фундаментів, що дозволяє більш повно враховувати реальний напружено-деформований стан, у тому

числі з урахуванням реологічних властивостей (фільтраційної консолідації та повзучості ґрунтового скелета).

Висновки

Викладені у статті результати аналітичних досліджень дозволяють зробити такі висновки:

1. Існує актуальна проблема розрахунку осідань фундаментів на властивістю повзучості водонасиченій ґрунтовій основі.

2. Нормативні документи, що нині діють, не дозволяють прогнозувати осідання фундаментів на властивості повзучості водонасиченої основи в часі.

3. У нормативних документах відсутні рекомендації щодо розрахунку осідань фундаментів на шаруватій ґрунтовій основі сучасними методами, зокрема, методом скінченних елементів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- ДБН В.2.1-10:2018. *Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення*. [Чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2019. 40 с.
- Зоценко М. Л., Коваленко В. І., Хілобок В. Г., Яковлев А. В. *Інженерна геологія: Механіка ґрунтів, основи та фундаменти*. Київ : Вища школа, 2004.
- Харченко В. В., Петренко В. Д. Обґрунтування вибору моделі основи та фундаменту будівлі під час її підсилення мікропалями. *Мости та тунелі: Теорія, дослідження, практика*. 2023. № 23. С. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281162>
- Шаповал А. В., Шаповал В. Г., Моркляник Б. В., Андреев В. С. *Варіаційні методи граничних елементів та сплайнів у контактних задачах* : монографія. Львів : Друк-Захід, 2016. 96 с.
- Шаповал А. В., Нестерова Е. В., Кабрель В. И., Шокарев Е. А., Причина Е. С., Легенченко В. А., Титякова Е. С., Шаповал В. Г., Андреев В. С. К вопросу математического моделирования осадок фундаментов с прямоугольной формой подошвы на грунтовом слое конечной толщины. *Проблеми використання інформаційних технологій у сфері освіти, науки та промисловості* : тези доп. X міжнар. конф. (Дніпропетровськ, 30-31 січ. 2013). Дніпропетровськ : НГУ, 2013. С. 69–70. URL: <https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/58eb6a4e-0142-4d42-b0ac-76ea797fe02f>
- Швец В. Б., Шаповал В. Г., Петренко В. Д., Андреев В. С., Селихова Т. А., Тютюкин А. Л. *Фундаменты промышленных, гражданских и транспортных сооружений на слоистых грунтовых основаниях* : монография. Днепропетровск : Новая идеология, 2008. 274 с.
- Biot M. A. Effect of Certain Discontinuities on Pressure Distributions in a Loaded Soil. *Physics*. 1935. Vol. 6, Iss. 12. P. 367–375. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1745279>
- Biot M. A. General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Physics*. 1941. Vol 12, Iss. 2. P. 155–164. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1712886>
- Shapoval V., Shashenko O., Hapiev S., Khalymendyk O., Andrieiev V. Stability assessment of the slopes and side-hills with account of the excess pressure in the pore liquid. *Mining of Mineral Deposits*. 2020. Vol. 14, Iss. 1, P. 91–99. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining14.01.091>

V. S. ANDRIEIEV^{1*}, V. O. PIELYK²

^{1*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 480 11 33, e-mail v.s.andrieiev@ust.edu.ua, ORCID 0009-0006-3155-7452

²Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 492 03 22, e-mail VladislavNAVI@gmail.com, ORCID 0009-0002-7375-2388

Principles and Models for Calculating Foundation Settlements for Calculating Soil Base Deformations

Purpose. In engineering practice, the problem of calculating the settlement of foundations on a layered base often arises. The authors set the goal of conducting a comparative analysis of the issues of principles and models for calculating foundation settlements when calculating deformations of soil foundations. **Methodology.** Data available in scientific and technical literature indicate that the calculation methods currently in use do not allow the necessary accuracy to be achieved in a number of cases, since the influence of the rheological properties of the layered soil base and time indicators are not taken into account when determining the inclination of foundations. It is also known that one of the reasons for the discrepancy between calculations and operational parameters is the insufficiently complete account of the textural features of the soil layer, namely its layering. Current methods for calculating the settlement of foundations or structures on soil bases are usually based on solutions obtained within the framework of a linear-elastic isotropic medium model. However, this does not take into account the fact that in foundations with a layered texture, the distribution of stresses can differ significantly from their distribution in a homogeneous foundation. This has a negative impact on the methods currently used to calculate settlement. The article compares several models for calculating foundation settlements when calculating deformations of soil foundations and analyzes their principles. **Finding.** To solve this problem, it is necessary to substantiate analytical methods for calculating foundation settlements. Existing methods allow us to evaluate only some of their indicators, taking into account the conventionality of the calculation models used. Obtaining reliable results is possible only with a comprehensive approach to evaluating observations of foundation deformations. **Originality.** Lies in the selection and justification of solutions for calculating foundation settlements when calculating deformations of soil foundations. **Practical value.** Develop practical recommendations for calculating the settlement of rigid foundations, taking into account the layering of the base and temporary indicators.

Keywords: settlement; foundation; deformations; model; soil

REFERENCES

1. *Osnovy i fundamenti budivel ta sporud. Osnovni polozhennia*, 40 DBN V.2.1-10:2018. (2019). (in Ukrainian)
2. Zotsenko, M. L., Kovalenko, V. I., Khilobok, V. H., & Yakovliev, A. V. (2004). *Inzhenerna heolohiia: Mekhanika gruntiv, osnovy ta fundamenti*. Kyiv: Vyshcha shkola. (in Ukrainian)
3. Kharchenko, V. V., & Petrenko, V. D. (2023). Justification of the choice of the model of the building's base and foundation of the building during its reinforcement with micropiles. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 23, 88-94. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281162> (in Ukrainian)
4. Shapoval, A. V., Shapoval, V. H., Morklianyk, B. V., & Andriev, V. S. (2016). *Variatsiini metody hranychnykh elementiv ta splainiv u kontaktnykh zadachakh*: monohrafiia. Lviv: Druk-Zakhid.
5. Shapoval, A. V., Nesterova, E. V., Kabrel, V. Y., Shokarev, E. A., Prychyna, E. S., Lehenchenko, V. A., Tytiakova, E. S., Shapoval, V. H., & Andriev, V. S. (2013, January). K voprosu matematicheskogo modelirovaniya osadok fundamentov s pryamougolnoy formoy podoshvyi na gruntovom sloe konechnoy tolschinyi. *Problemy vykorystannia informatsiynykh tekhnolohii u sferi osvity, nauky ta promyslovosti: tezy dop. Kh mizhnar. konf.* (pp. 69-70). Dnipropetrovsk, Ukraine. URL: <https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/58eb6a4e-0142-4d42-b0ac-76ea797fe02f> (in Ukrainian)
6. Shvets, V. B., Shapoval, V. H., Petrenko, V. D., Andreev, V. S., Selykhova, T. A., & Tiutkyn, A. L. (2008). *Fundamenti promyshlennykh, grazhdanskykh i transportnykh sooruzheniy na sloistykh gruntovykh osnovaniyakh*: monografiya. Dnepropetrovsk : Novaya ideologiya. (in Ukrainian)
7. Biot, M. A. (1935). Effect of Certain Discontinuities on Pressure Distributions in a Loaded Soil. *Physics*, 6(12), 367-375. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1745279> (in English)
8. Biot, M. A. (1941). General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Physics*, 12(2), 155-164. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1712886> (in English)
9. Shapoval, V., Shashenko, O., Hapiev, S., Khalymendyk, O., & Andriev, V. (2020). Stability assessment of the slopes and side-hills with account of the excess pressure in the pore liquid. *Mining of Mineral Deposits*, 14(1), 91-99. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining14.01.091> (in English)

Надійшла до редколегії: 28.05.2025

Прийнята до друку: 30.09.2025