

## Автоматизація і інформаційні технології

УДК 539.3:624.071:624.04

Д.Е. Прусов, к.т.н., с.н.с., доцент;  
В.М. Бадах, к.т.н., с.н.с., доцент (НАУ, Київ)

### ЗАСТОСУВАННЯ УТОЧНЕНИХ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ҐРУНТОВОГО МАСИВУ ПРИ РЕКОНСТРУКЦІЇ ОБ'ЄКТІВ У СКЛАДНИХ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ

*АНОТАЦІЯ.* Розглядається методологія застосування уточнених чисельних методів визначення стійкості ґрунтового масиву при дослідженні взаємодії огорожувальних та захисних конструкцій з ґрунтовым півпростором у надграницьному стані з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності при реконструкції об'єктів у складних інженерно-геологічних умовах.

*Ключові слова:* напружено-деформований стан, ґрунтові масиви, заглиблені об'єкти.

*АННОТАЦИЯ.* Рассматривается методология применения уточненных численных методов определения устойчивости ґрунтового массива при исследовании взаимодействия ограждающих и защитных конструкций с ґрунтовым полупространством в запредельном состоянии с учетом геометрической и физической нелинейности при реконструкции объектов в сложных инженерно-геологических условиях.

*Ключевые слова:* напряженно-деформированное состояние, ґрунтовые массивы, заглибленные объекты.

*SUMMARY.* The methodology of numerical methods applying for the soil mass stability determining is considered in the investigation of interaction between filler and protective structures with soil half-space in the transcendent state, taking into consideration the geometric and physical nonlinearity for the objects reconstruction in difficult engineering-geological conditions.

*Key words:* stress-strain state, the soil mass, depth objects.

**Постановка проблеми.** Забезпечення надійності будівель і споруд, зниження фінансових та матеріальних затрат є нагальним питанням сьогодення. Ці вимоги відносяться до основ і фундаментів як до самої відповідальної частини інженерних споруд. Кошторисні витрати робіт по реконструкції (підсиленню) фундаментів, або виправленню помилок, що допущені при проектуванні, в багато разів перевищують початкову вартість улаштування фундаментів, а деколи і всієї споруди. Завдяки цьому уточненим розрахункам основ та фундаментів у сучасних умовах приділяється значна увага. Одним з раціональних видів фундаментів є палі, що забезпечують високу несучу здатність та мінімальну величину осадок фундаментів. Об'єктивними причинами впровадження пальових фундаментів в Україні є наявність просадочних ґрунтів (більше 75% території), гостра необхідність будівництва багаторівневих промислових

та цивільних будівель та споруд з метою раціонального збереження земель під сільськогосподарські угіддя.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Незважаючи на давнє і широке застосування пальових фундаментів у житловому, промисловому та цивільному будівництві особливості їх взаємодії з основами вивчені недостатньо і зараз існує дуже багато проблемних задач, достовірно розв'язання яких не реалізоване у повній мірі.

Створення достовірної розрахункової моделі ґрунтової основи, яка б забезпечувала достатню відповідність між результатами розрахунку і дійсністю – все ще є однією з найважливіших проблем будівництва. Сучасні методи розрахунку основ у механіці ґрунтів дозволяють оцінити лише їх порядок. Використання як розрахункового тиску граничної величини, що відповідає кінцю (зламу) лінійної ділянки графіка “навантаження-осідання” призводить, як пра-

вило, до прийняття не завжди економічних розв'язків. За межами класичної (лінійної) механіки ґрунтів залишається неврахованою велика область досліджень пластичних деформацій. Виникає необхідність розробки більш досконалих методів розрахунку, що враховують дійсну схему роботи фундаментів та реальні нелінійні властивості ґрунтових основ [2, 3]. Актуальною залишається задача розроблення математичної моделі розрахунку опору паль з метою підвищення достовірності та надійності проектних розв'язків шляхом урахування геометричної і фізичної нелінійності роботи основ, дилатансійних явищ у них та уточнення критеріїв граничного стану ґрунтів за розширеним критерієм Мізеса-Губера-Боткіна.

### **Мета роботи та постановка завдання.**

У даній науковій роботі розроблюється методологія дослідження взаємодії огорожуючих та захисних конструкцій з ґрунтовим півпростором у позаграничному стані з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності, у постановці задачі при реалізації еволюції складного завантаження з урахуванням активного і пасивного навантаження та ефекту розвантаження ґрунтового півпростору. Методологія розроблена на основі теорії нелінійної механіки ґрунтів, нелінійної теорії пружності та пластичності, методів нелінійного програмування і методу скінченних елементів. Запропоновані нові модифіковані моделі урахування неоднорідності та впливу анізотропних властивостей багат шарового півпростору при відсутності тертя між окремими шарами.

**Теоретичні основи** запропонованої методології дослідження взаємодії огорожуючих та захисних конструкцій з ґрунтовим півпростором у надграничному стані з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності у постановці задачі, при реалізації еволюції складного завантаження з урахуванням активного і пасивного навантаження та ефекту розвантаження ґрунтового півпростору, розроблені із застосуванням теорії нелінійної механіки ґрунтів, нелінійної теорії пружності та пластичності, методів нелінійного програмування і

методу скінченних елементів, а також нових модифікованих моделях урахування неоднорідності та впливу анізотропних властивостей багат шарового півпростору при відсутності тертя між окремими шарами, та використані при вирішенні плоских задач дослідження напружено-деформованого стану (НДС) півпростору при взаємодії покриття з ґрунтовою основою [4].

Розроблення уточнених методів розрахунку аеродромних покриттів на основі наступних критеріїв: граничного стану плит покриття за міцністю, допустимих пружних прогинів, граничного опору ґрунту зсуву і допустимих розтягуючих напружень при згині для монолітних шарів покриття обумовлює необхідність розглянути комбінований багат шаровий масив із власне покриття, штучної та ґрунтової основи при зведенні розв'язання задачі у просторовій постановці до задачі у плоскій постановці. Для вирішення поставленої задачі на основі числового методу виконано моделювання багатокісного впливу від шасі сучасних важких повітряних суден з адекватним зведенням до еквівалентного полосового навантаження, що має місце при вирішенні плоскої задачі. З метою визначення граничних деформацій всього багат шарового розрахункового фрагменту півпростору з урахуванням граничного опору ґрунту зсуву і допустимих розтягуючих напружень у шарах штучної основи враховується розвиток локальних пластичних деформацій. На основі чисельних експериментів, виконаних за допомогою моментної схеми скінченних елементів, дано рекомендації щодо уточнення коефіцієнтів умов роботи, які дають можливість використовувати існуючі інженерні аналітичні методи розрахунку [5].

Гранична рівновага ґрунту в елементарному околі, що розглядається (скінченному елементі), адекватна такому напруженому стану, за якого навіть невеликий додатковий вплив може порушити цю рівновагу. Такий напружений стан характеризується ще й тим, що опір зсуву в елементарній області (скінченному елементі) повинен бути рівним граничному для даного типу ґрунту. Вказаний стан відноситься до другої фази

граничного стану ґрунтів при обширному розвитку зсувних деформацій у масиві ґрунту. Числовий розв'язок задачі стійкості ґрунтових масивів у цьому випадку здійснюється на основі запропонованої в методиці з деякими уточненнями критерію текучості для ґрунтового півпростору.

Варіаційне рівняння відповідно до енергетичних методів описує рівновагу елементарного об'єму будь-якого суцільного середовища незалежно від його фізико-механічних характеристик. У запропонованій методиці реалізується прикладний підхід варіаційних принципів і теорії граничного напруженого стану деформованого тіла, коли отримані рішення пов'язані з розподілом спочатку пружних областей на пружні і непружні з зонами, що розвиваються, пружно-пластичних (зсувних для ґрунтів) деформацій. Вихідна розрахункова скінченноелементна модель у процесі деформування трансформується відповідно до критерію текучості (руйнування) ґрунтового масиву і поділяється на дві області визначення напружено-деформівного стану: пружну і пружно-пластичну.

У даній роботі критерій стійкості, або текучості ґрунтового півпростору для окремої локальної однорідної ізотропної області представлений в універсальній формі на основі розширеного критерію текучості Мізеса (за рахунок включення до нього залежностей від шарового тензора напружень - гідростатичних напружень) з використанням поверхні навантаження за критерієм Кулона-Мора і з урахуванням не тільки другого, а й третього інваріанта тензора-девіатора функції напружень через інваріант Лоде-Надаї.

**Числові дослідження** як приклад практичного застосування методології розглядається задача дослідження напружено-деформованого стану однорідного півпростору та визначення зон граничної рівноваги з урахуванням ущільненого ядра під жорстким полосоподібним фундаментом на прикладі дослідження стійкості фундаментів на піщаній основі, яке проведено з урахуванням ущільненого ядра і повної взаємодії пружної та пластичної областей в ґрунті під фундаментом на основі рішень у скінчен-

них різницях. Експериментальні дослідження показують, що несуча здатність піщаних основ значно перевищує величини, отримані за іншими наближеними методами з урахуванням ущільненого ядра. Розрахункова схема взаємодії жорсткого полосоподібного (стрічкового) фундаменту з ґрунтово-піщаним масивом містить включення самого фундаменту і одиничний по товщині однорідний ізотропний півпростір. Схема навантаження включає власну вагу ґрунту  $\gamma = 0,0018$  кгс/см<sup>3</sup> і рівномірно розподілене навантаження на обріз фундаменту  $q_0 = 2,0 \dots 9,7$  кгс/см<sup>2</sup>. Зовнішнє навантаження на обріз фундаменту  $q_0 = 2$  кгс/см<sup>2</sup> відповідає початковій критичній силі (безпечний тиск на ґрунт), а  $q_0 = 9,7$  кгс/см<sup>2</sup> відповідає граничному навантаженню з розвитком пластичних деформацій і формуванню ущільненого ядра під подошвою фундаменту.

У розглянутому прикладі півпростір має розміри  $690 \times 800$  ( $h$ ) см (товщина 1 см) з площиною симетрії  $OZ^1Z^3$ , що проходить через середину стрічкового фундаменту. Сіткова область розрахункової схеми описана в сіткових координатах  $S_1 S_2 S_3$  - початок у лівому нижньому вузлі ( $S_1 = 1, S_2 = 1, S_3 = 1$ ), кінцеві сіткові розміри -  $S_1 = M1 = 2, S_2 = M2 = 23, S_3 = M3 = 29$ .

Граничні умови розрахункового фрагменту півпростору наступні: 1) по площині симетрії в глобальній системі координат накладаються в'язі на вузлові переміщення та кути повороту за напрямом  $Z^2$ ; 2) нижня грань фрагменту моделюється границею сіткової області по лінії з сітковими координатами початкових і кінцевих вузлів  $S_2^H = 1, S_3^H = 1, S_2^k = 23, S_3^k = 1$ , уздовж якої накладаються в'язі на переміщення за напрямками  $Z^2, Z^3$  (нерухомий шарнір); 3) вертикальна площина межі розрахункового фрагменту моделює шарнірно-рухливий край з накладенням в'язів на вузлові переміщення за напрямом  $Z^2$  (ця кромка достатньо віддалена від площини симетрії - у межах можливого розвитку пластичних деформацій).

У вихідних даних розглянутого прикладу прийняті наступні фізико-механічні характеристики однорідного ізотропного півпростору:  $E_0 = 240 \text{ кгс/см}^2$ ;

$$\nu_0 = 0,29; \gamma = 0,0018 \text{ кгс/см}^3; \varphi_1 = 30^\circ;$$

$c_1 = 0,02 \text{ кгс/см}^2$  (розглянута методика за числової реалізації передбачає необхідну умову для значення питомого зчеплення ґрунту  $c \neq 0$ , для піску достатньо прийняти  $c_1 = c_{II} = 0,02$ ); глибина закладання підшви стрічкового фундаменту становить  $h = 200 \text{ см}$ , ширина підшви фундаменту  $b = 150 \text{ см}$ ,  $h/b = 200/150 = 1,33$ .

Для фундаментів середньої глибини закладання  $0,5 < h/b < 2$  ( $0,5 < h/b = 1,33 < 2$ ), прийнято рішення на основі наближеного методу з використанням апроксимації ліній ковзання у вигляді відрізків прямих, а в зоні радіальних зсувів - логарифмічними спіралями, завдяки чому отриманий аналітичний вираз граничного тиску з урахуванням ущільненого ядра в умовах плоскої задачі для сипучих ґрунтів:

$$\text{гран. } P_n = A_{nh} \gamma b,$$

де  $A_{nh}$  - коефіцієнт несучої здатності сипучих ґрунтів для випадку плоскої задачі,  $A_{nh} = 36$ ;  $b$  - ширина підшви фундаменту.

Для розглянутого прикладу маємо  
 гр.  $P_n = 36 \cdot 1,8 \cdot 1,5 = 97,2 \text{ тс/м}^2 \approx 9,7 \text{ кгс/см}^2$ .

Отримане значення гран.  $P_{nh} = 9,7 \text{ кгс/см}^2$  взято в якості вихідного граничного параметра  $q_{кр} = 9,7 \text{ кгс/см}^2$ , що визначає інтенсивність зовнішнього навантаження на обріз фундаменту.

Результати чисельного дослідження напружено-деформованого стану однорідного півпростору при жорсткому впливі на ґрунт стрічкового фундаменту показали, що при завантаженні  $q = 9,7 \text{ кгс/см}^2$  розподіл пружних і пружно-пластичних зон відповідає критичному заграничному стану, що представлено на рис. 1. Області (дискретні з набору скінченних елементів), де має місце розвиток пластичних деформацій при  $f(\sigma, \dot{s}) > 0$ , помічені знаком х. Характер розвитку зон пластичних деформацій наступний (рис.1):

1) поширення по глибині нижче підшви фундаменту становить  $1,5 h$ , або  $4b_1$ , (в аналогічних прикладах ця величина складає  $(3,2 \dots 3,5)b_1$ ;

2) ширина розповсюдження зони пластичних деформацій на рівні підшви фундаменту становить  $(3,2 \dots 3,5)b_1$ ;

3) форма області ущільненого ядра - прямокутний трикутник, гіпотенуза якого є підшва фундаменту (абсолютно точно збігається з іншими розв'язками).

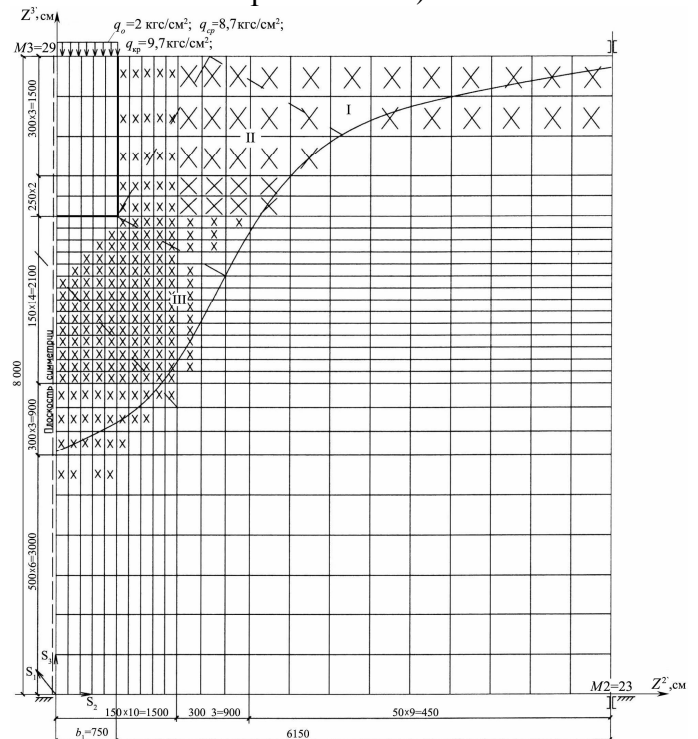


Рис.1. Розрахункова схема дослідження стійкості сипучих ґрунтів при дії полосового навантаження від стрічкового фундаменту (плоска задача) та границі зон ущільненого ядра і пластичних деформацій

Межі зон пластичних деформацій і пружних зон, показаних обвідною кривою на рис. 1, визначають обрис поверхонь ковзання зі змінним кутом відхилення дотичних, тому зіставити їх з апроксимаціями логарифмічних спіралей для спрощених рішень без урахування дії об'ємних сил, досить важко, проте, встановивши перпендикуляри до дотичних в екстремальних точках та точках перегину, можна виділити характерні зони зсувних деформацій: I - зону випору ґрунту; II - зону розвитку значних зсувних деформацій та III - фазу ущіль-

льнення та розвитку локальних зсувів. Отримана картина взаємодії жорсткого полосоподібного фундаменту (штампу) з однорідним півпростором, у плоскій постановці, відображає зрівноважений деформований стан, тобто з задовільненням статичних і кінематичних умов, тому обрис по лініях ковзання у вигляді логарифмічних спіралей розмито і нижче трикутного ущільненого ядра не спостерігається вторинний сектор ущільнення ґрунту (ущільненого ядра).

За обмежуючим поверхонь, поверхонь ядра ущільнення, граням жорсткого фундаменту і обрисами поверхонь ковзання, тобто у вузлових точках, моделюючих ці поверхні, проведені вектори переміщення (рис.2).

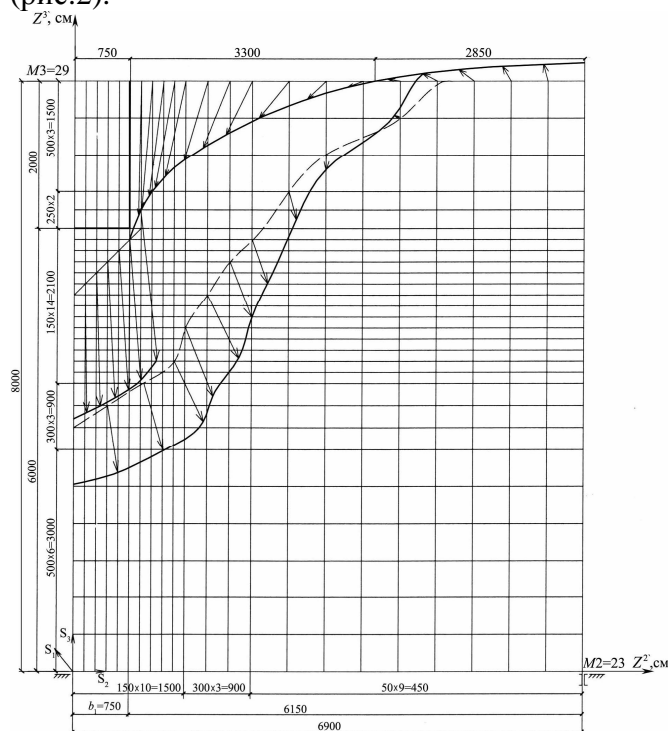


Рис.2. Криві ковзання, випора ґрунту та радіальних зрушень

Напрямки векторних відрізків зміщень елементарних (скінченно-вимірних) часток ґрунту визначають напрями деформацій зсуву і розширення зон пластичної течії - від ущільненого ядра та зони III - вниз і вправо і для зони I - вгору і вліво (випор ґрунту) (рис. 2).

Під подошвою жорсткого фундаменту отримані максимальні тиски стиснення для різних навантажень на обріз фундаменту – 2,1 кгс/см<sup>2</sup>; 5,0 кгс/см<sup>2</sup>; 8,7 кгс/см<sup>2</sup>;

9,7 кгс/см<sup>2</sup>; 12,0 кгс/см<sup>2</sup> та розраховані значення напружень  $\sigma_N^{33}$  і переміщень  $u_N^2$ ,  $u_N^3$ . Величини напружень практично не залежать від величини навантаження. Значення  $\sigma_N^{33}$  у центрі подошви мінімальні і становлять від 0,40 q до 0,425 q, а по краях максимальні і становлять від 3,25 q до 3,3 q.

Порівняння результатів числових досліджень у характерних перерізах при розрахунку з урахуванням розвитку пластичних деформацій і без урахування останніх показало невелику різницю за максимальними переміщеннями — близько 11%, а за максимальними напруженнями — близько 8%, при цьому с урахуванням пластичних деформацій спостерігається деяка концентрація в СЕ, що примикають до поверхні навантаження.

Характер розподілу напружень свідчить про неоднорідність багат шарового ґрунту, але загальний характер ізоліній, отриманих у розглянутій задачі, відповідає відомим класичним прикладам [6].

Для використання формул інженерного розрахунку за деформаціями, прийнятими в нормативних документах, запропоновано уточнити формули визначення абсолютних прогинів, ввівши уточнений коефіцієнт умов роботи нежорсткого покриття з урахуванням деяких деформацій зсуву в граничному стані, таким чином, щоб нежорстке покриття у граничному стані за показниками відносного прогину задовольняло нормативним вимогам.

**Висновки.** Аналіз отриманих результатів досліджень рівноважного граничного стану багат шарового ґрунтового півпростору при його взаємодії з огорожувальними і захисними спорудами при будівництві запроектованих будівель у прилеглих міських або промислових зонах близько розміщених існуючих будівель та споруд дозволяє зробити наступні висновки:

– розроблені нові співвідношення моделі рівнянь стану ґрунтів при врахуванні впливу поперечної анізотропії і неоднорідності гнучких багат шарових систем на основі нелінійної теорії пружності і пластичності з урахуванням критерію текучості на основі

розширеного критерію текучості Мізеса дозволяють отримати достатньо достовірний характер взаємодії ґрунтів з огорожувальними конструкціями глибоких котлованів і уточнити величину внутрішніх зусиль в елементах огорожувальних та захисних конструкцій при наявності стабілізуючих елементів, допоміжних екранів та інших жорстких включень у ґрунтовий простір;

– розроблені спеціальні алгоритми, що побудовані на методах нелінійного програмування, нелінійної теорії пружності і пластичності, співвідношеннях нелінійної механіки ґрунтів, дозволяють побудувати розрахункові моделі достатньо адекватні реальним фізичним процесам взаємодії ґрунтових насипів, ухилів, масивів з огорожувальними комбінованими конструкціями, що допускають кінематичну рухомість – великі переміщення і великі кути повороту;

– чисельна реалізація співвідношень і алгоритмів нелінійного деформування дозволяє розв'язувати задачі оптимального проектування огорожувальних конструкцій за узагальненими параметрами проектування: товщині, глибині занурення у півпростір, жорсткості стабілізуючих елементів та іншим;

– розроблена методологія забезпечує уточнений розрахунок елементів огорожувальних конструкцій глибоких котлованів, підпірних стінок в умовах активного і пасивного тиску ґрунтів, реалізації еволюційних технологій зовнішнього впливу на ґрунтовий півпростір, насипних дамб та транспортних земляних полотен з урахуванням їхнього багаточарового армування, а також споруд каналів для визначення стійкості днища в умовах розвитку граничних пластичних деформацій.

Отримані результати розрахунку на міцність конкретних прикладів конструкцій жорсткого покриття з використанням різних дискретних моделей і типів ґрунтових

основ свідчать про універсальність запропонованої методики дослідження НДС конструкцій на пружній неоднорідній основі, що у перспективі дозволить враховувати адекватність впливу на розподіл внутрішніх зусиль, концентрацію нормальних і зсувних напружень у конструкціях.

### Література

1. Шимановский А.В., Цыхановский В.К. Теория и расчет сильно нелинейных конструкций / А.В. Шимановский, В.К. Цыхановский – К.: Сталь, 2005. – 432 с.
2. Цыхановський В.К., Прусов Д.Е. Метод скінченних елементів у задачах дослідження неоднорідного півпростору з урахуванням геометричної і фізичної нелінійності // Сб., „Опір матеріалів і теорія споруд”. – К.: КНУБА, 2004. – С.87-98.
3. Цыхановський В.К., Прусов Д.Е. Метод скінченних елементів в задачах рівноваги півпростору при взаємодії ґрунтового масиву з огорожуючими конструкціями / В.К. Цыхановський, Д.Е. Прусов // Промислове будівництво та інженерні споруди. Київ, УкрНДІПСК, № 4, 2009. – С.38-44.
4. Прусов Д.Е., Хріптулова О.В. Проблеми уточнених методів розрахунку конструкцій укріплень ґрунтових масивів, огорожі котлованів та їх впливів на оточуючу забудову при наявності слабких прошарків ґрунтів / Д.Е. Прусов, О.В. Хріптулова // Будівництво України. – 2008. – №1. – С.34-36.
5. Прусов Д.Е. Аналіз рівнянь рівноваги дискретної розрахункової моделі ґрунтового півпростору / Д.Е. Прусов // Вісник НАУ, №3, 2009. - С.125-130.
6. Цытович Н.А., Тер-Мартirosян З.Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве / Н.А. Цытович, З.Г. Тер-Мартirosян – М.: Высш. шк., 1981. – 317с.

Рецензент: Г.Й. Зайончковський, д.т.н., проф.  
(НАУ, Київ)

Отримано: 01.10.2010р.