АЕРОПОРТИ ТА ЇХ ІНФРАСТРУКТУРА

УДК 539.3:624.071:624.01

Д.Е. Прусов, к.т.н., доц.

ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ З ГРУНТОВИМИ ОСНОВАМИ ЗІ СЛАБКИМИ ПРОШАРКАМИ

Запропоновано методологію та чисельну реалізацію визначення напружено-деформованого стану конструкцій аеродромних покриттів з урахуванням їх взаємодії з неоднорідним багатошаровим ґрунтовим півпростором зі слабкими прошарками.

The methodology and numerical realization are proposed for of stress-strain state determination of aerodrome pavement construction concerning to interaction with inhomogeneous multi-layer soil semi-space with weak soil strata presence.

аеродромне покриття, неоднорідний багатошаровий ґрунтовий півпростір, взаємодія конструкцій з ґрунтовими основами, математичне моделювання пружності та пластичності, напружено-деформований стан, слабкі прошарки

Вступ

Дослідження взаємодії конструкцій аеродромних покриттів з ґрунтовими основами зі слабкими прошарками пов’язані з урахуванням зниження структурної міцності в напруженому стані, що призводить до зростання тиску ґрунту з часом та до додаткових осідань.

Для розв'язання цієї проблеми та вдосконалення розрахунку особливо нежорстких або полегшених жорстких аеродромних покриттів за наявності у ґрунтовій активній товщі зазначених включень і взагалі при неоднорідності ґрунтової основи запропоновано моделювання ґрунтової основи дискретним неоднорідним півпростором. При цьому для дискретно-локальних зон враховується рівняння стану анізотропного матеріалу, еквівалентного реальному лесовому ґрунту.

Аналіз досліджень існуючих модифікацій механічних моделей для зазначених підходів дослідження ґрунтового півпростору підтверджує відоме протиріччя між вимогою до простоти моделі і прагненням повніше описати деформаційні властивості ґрунтів. Розгляд існуючих нормативних документів з урахуванням сучасного стану відповідних наукових доробок показує, що розглядається контактне завдання взаємодії твердих деформівних тіл з неоднорідним ґрунтовим півпростором з використанням функцій змінного коефіцієнта постелі [1; 2]. Такий підхід узгоджується з розв’язанням задачі дослідження жорстких аеродромних покриттів, які працюють переважно на згин і розподіляють навантаження на достатньо велику площину ґрунтового півпростору. Ці покриття доцільно розглядати як тонкі плити (пластинки) з використанням розрахункових дискретних моделей за методом скінченних елементів.

Постановка проблеми

Дослідження міцності та стійкості конструкцій у взаємодії з ґрунтовими основами є частковими задачами загальної теорії граничної рівноваги ґрунтів. Гранична рівновага ґрунту в такому елементарному околі відповідає такому напруженому стану, коли деякий додатковий вплив може порушити рівновагу. Напружений стан характеризується тим, що супротив зсуву в елементарному околі (скінченному елементі) дорівнює граничному для цього ґрунту значенню. Це, зазвичай, спостерігається у другій фазі напруженого стану за суцільного розвитку зон граничної рівноваги, коли потрібно застосовувати теорію нелінійно деформованого твердого тіла з урахуванням геометричної нелінійності – використання тензора скінченних деформацій Коші-Гріна і фізичної нелінійності – співвідношення теорії пластичності з використанням тензора пружностей для пружно-пластичного деформування.

Числовий розв’язок задач стійкості ґрунтових масивів виконується на основі методики з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). У постановці задачі передбачається дискретне моделювання суттєво неоднорідних шарів ґрунту, а також наявність твердих вкраплень, які моделюють елементи огороджувальних конструкцій глибоких котлованів та основ і фундаментів сусідніх прилеглих будівель. У примежових з твердими вкрапленнями шарах ґрунту потрібно утворювати примежові дискретні шари елементів моделі (згущення сіткової ділянки), де спостерігаються концентрації напружень і, як наслідок, виникає необхідність дослідження моделі півпростору в першому граничному стані за критерієм руйнування (розвитку зсувних деформацій) з використанням співвідношень нелінійної механіки ґрунтів [1–4].

Розглянуто задачу дослідження неоднорідного ґрунтового півпростору з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності у постановці завдання, тому як вихідні співвідношення МСЕ використано теорію нелінійної пружності і пластичності із застосуванням співвідношень у приростах переміщень, деформацій і напружень [5; 6]. Запропонована методика характеризується урахуванням комбінації геометричної і фізичної нелінійності з формулюванням розв'язувальних рівнянь рівноваги у приростах переміщень, деформацій і напружень, що дає можливість описати дискретні локальні ділянки пластичної течії ґрунту із застосуванням теорії в'язкої рідини.

Математична модель задачі

Теоретичною основою є теорія нелінійної механіки ґрунтів на базі механіки суцільного середовища із застосуванням співвідношень у приростах переміщень, деформацій і напружень.

Критерій стійкості або текучості ґрунтового півпростору для окремої локальної однорідної ізотропної ділянки, запропоновано у найбільш універсальній формі на основі розширеного критерію Мізеса (за рахунок включення в нього залежності від гідростатичних напружень) з використанням поверхні навантаження за моделлю Мора-Кулона і з урахуванням третього інваріанта тензор-девіатора функції напружень через інваріант Лоде-Надаї [6; 7].

Для реалізації скінченноелементних співвідношень у теорії, яка моделює пружно-пластичне деформування матеріалу для опису й обчислення критерію текучості, визначення співвідношень між напруженнями і деформаціями за межами пружності й використовуючи процедури МСЕ, запишемо функцію напружень з розвиненням в ряд Маклорена у двовимірному СЕ x^2, x^3 півпросторі:

$$\hat{\sigma}(x) = \hat{\sigma}_{(v)}(x) + \hat{S}(x);$$

$$\hat{\sigma}_{v}(x) = \frac{1}{3}\sigma^{\alpha\cdot}_{\cdot\alpha}(x)\hat{E} = \sigma^{\alpha\beta}_{(v)}(x)\vec{e}_{\alpha}\vec{e}_{\beta};$$

$$\sigma^{\alpha\beta}_{(v)}(x) = \frac{1}{3}\left(N^{\lambda\mu}G_{\lambda\mu} + M^{\lambda\mu}_{x}x^{x}\omega^{(\alpha)}_{(x)}G_{\lambda\mu}\right)G^{\alpha\beta};$$

$$S^{\alpha\beta}(x) = \sigma^{\alpha\beta}(x) - \sigma^{\alpha\beta}_{(v)}(x).$$

З введенням позначень

$$N^{\alpha\beta}_{(v)} = \frac{1}{3}N^{\lambda\mu}G_{\lambda\mu}G^{\alpha\beta};$$

$$M^{\alpha\beta}_{(v)\rho} = \frac{1}{3}M^{\lambda\mu}_{\rho}G_{\lambda\mu}G^{\alpha\beta};$$

$$N^{\alpha\beta}_{(s)} = N^{\alpha\beta} - \frac{1}{3}N^{\lambda}_{\lambda}G^{\alpha\beta};$$

$$M^{\alpha\beta}_{(s)} = M_{p}^{\ \alpha\beta} - \frac{1}{3}M^{\lambda\mu}_{p}G_{\lambda\mu}G^{\alpha\beta}$$

маємо функції складових напружень – шарових і девіаторних:

$$\sigma^{\alpha\beta}_{(v)} = N^{\alpha\beta}_{(v)} + M^{\alpha\beta}_{(v)\lambda}x^{\lambda}\omega^{(\alpha\beta)}_{(\lambda\lambda)}; \qquad (1)$$

$$S^{\alpha\beta} = N^{\alpha\beta}_{(S)} + M^{\alpha\beta}_{(S)x}x^{x}\omega^{(xx)}_{(\alpha\beta)}. \qquad (2)$$

Співвісною з $\sigma^{\alpha\beta}(x)$ тензор-функцією деформацій у конфігурації C^t є функція приростів деформацій Коші-Грина $\hat{\gamma}_{(x)}$, яка за аналогією з виразами (1), (2) буде мати вигляд:

$$\gamma^{(v)}_{\alpha\beta} = \overset{**(v)}{\xi}_{\alpha\beta} + \overset{**(v)}{\varphi}_{\alpha\beta\lambda}x^{\lambda}\omega^{(\lambda\lambda)}_{(\alpha\beta)};$$

$$\gamma^{(D)}_{\alpha\beta} = \overset{**(D)}{\xi}_{\alpha\beta} + \overset{**(D)}{\varphi}_{\alpha\beta\lambda}x^{\lambda}\omega^{(\lambda\lambda)}_{(\alpha\beta)}.$$

У надмежовому стані, коли одночасно з пружними деформаціями обчислюють пластичні, у варіаційному рівнянні

$$\int_{v}\left(\sigma'^{\alpha\beta} + B^{\alpha\beta\lambda\mu}_{(e,p)}\gamma_{\lambda\mu}\right)\delta\gamma_{\alpha\beta}dv -$$

$$-\int_{v}p^{\alpha'}\delta u_{\alpha'}dv - \int_{S}q^{\alpha'}\delta u_{\alpha'}dS = 0,$$

$$\alpha, \beta, \lambda, \mu = 2,3,$$

формується тензор пружностей четвертого рангу $\underset{4}{\hat{C}}^{(e,p)}$ замість $\underset{4}{\hat{C}}^{(e)}$ (або $\underset{4}{\hat{B}}_{(e,p)}$ замість $\underset{4}{\hat{B}}_{(e)}$).

Отже, у плоскому просторі напружень можна обчислювати і аналізувати функцію:

$$f = \frac{3}{2}\hat{S}\,\hat{S}^{T} - \sigma^{2}_{(s)} = 0,$$

тому у дискретній області пружно-пластичного деформування заслуговують на увагу дві величини:

–зовнішній добуток тензор-девіатора $\hat{S}$, який утворює пластичну добавку до тензора пружностей $\underset{4}{\hat{B}}^{(e)}$;

– перший інваріант квадрата тензора $\hat{S}^2$.

При обчисленні $\hat{S}\hat{S}_{(x)}$ і $I_1\left(\hat{S}^2(x)\right)$ як функціоналів тензор-функції $\hat{S}(x)$ (2) слід обчислювати інтеграли у просторі локальної області СЕ:

$$S'^{\alpha\beta\chi\varepsilon}_{(e)} = \int\limits_{v_{(e)}} \left(N'^{\alpha\beta}_{(s)} + M'^{\alpha\beta}_{(s)\lambda} x^{\lambda} \omega^{(\lambda\lambda)}_{(\alpha\beta)} \right) \times$$

$$\times \left(N'^{\chi\varepsilon}_{(s)} + M'^{\chi\varepsilon}_{(s)\mu} x^{\mu} \varpi^{(\mu\mu)}_{(\chi\varepsilon)} \right) dv_{(e)};$$

$$I_1\left(\hat{S}^2(x)\right) = \int\limits_{Ve} G_{\beta\chi} G_{\alpha\varepsilon} \times$$

$$\times \left(N'^{\alpha\beta}_{(s)} + M'^{\alpha\beta}_{(s)\lambda} x^{\lambda} \omega^{(\lambda\lambda)}_{(\alpha\beta)} \right) \times$$

$$\times \left(N'^{\chi\varepsilon}_{(s)} + M'^{\chi\varepsilon}_{(s)\mu} x^{\mu} \omega^{(\mu\mu)}_{(\chi\varepsilon)} \right) dv_{(e)}.$$

Після інтегрування отримаємо:

$$S^{\alpha\beta\chi\varepsilon} = N^{\alpha\beta}_{(s)} N^{\chi\varepsilon}_{(s)} +$$

$$+ \frac{1}{12} M^{\lambda\beta}_{(s)\lambda} M^{\chi\varepsilon}_{(s)\lambda} \omega^{(\lambda\lambda\lambda\lambda)}_{(\alpha\beta\chi\varepsilon)};$$

$$I_1\left(\hat{S}^2(x)\right) = G_{\beta\chi} G_{\alpha\varepsilon} S^{\alpha\beta\chi\varepsilon}.$$

Розширений критерій Мізеса в межах СЕ плоско-деформованого півпростору буде визначатися формулою

$$f_{(e)} = \frac{2}{3} G_{\beta\chi} G_{\alpha\varepsilon} S^{\alpha\beta\chi\varepsilon} - \left[\frac{1}{3} I_1(\hat{\sigma}) \mathrm{tg}\varphi + c \right]^2.$$

Наведені основні співвідношення двох модифікацій схем МСЕ, що розроблені для трикутного і чотирикутного СЕ, дозволяють проводити розрахунки огороджувальних конструкцій за взаємодії з ґрунтовим півпростором з урахуванням геометричної і фізичної нелінійностей у постановці задачі.

Наведена методика дослідження ґрунтового півпростору з використанням нелінійної теорії пружності забезпечує достовірні результати розв'язків для плоскої задачі механіки ґрунтів з урахуванням неоднорідності півпростору, наявності шарів з різними фізико-механічними характеристиками, граничними умовами, довільними зовнішніми впливами, а також дає змогу розраховувати ґрунтовий півпростір з включеннями конструктивних елементів фундаментів, підпірних стін та інших захисних споруд.

Визначення напружено-деформованого стану ґрунтової основи зі слабкими прошарками у взаємодії з аеродромним покриттям

Як приклад розглянуто задачу деформування багатошарового неоднорідного півпростору від впливу смугового навантаження. Для виконання міцнісного розрахунку використано найбільш ефективну схему МСЕ – моментну схему СЕ.

Для побудови розрахункової схеми фрагмента покриття у разі дії колісного навантаження від найбільш сучасного літака А380-800 попередньо було отримано еквівалентні геометричні параметри і фізико-механічні характеристики тришарової конструкції аеродромного покриття перону, виходячи з граничних поздовжньої і згинальної жорсткостей аеродромного покриття.

Реальні поздовжні і згинальні жорсткості (циліндричні для 1 м плити) можна визначити за формулами для суцільного перерізу, що складається з простих однорідних шарів.

Для встановлення вірогідності запропонованої моментної схеми СЕ з використанням оболонкового просторового МСЕ у роботах [4; 5; 7; 8] було розв'язано багато тестових задач у різних постановках, результати розв'язання яких з достатньою точністю збіглися з відповідними еталонними розв'язками.

Розглянуто плоску задачу деформування багатошарового неоднорідного півпростору від впливу смугового навантаження, що моделює вплив вертикального еквівалентного навантаження від основної опори повітряного судна.

Прийняту дискретну модель розрахункової частини досліджуваного півпростору показано на рисунку. Розрахунковий фрагмент півпростору вибрано з урахуванням площини симетрії, що проходить за віссю фюзеляжу повітряного судна (відстань між основними опорами L = 1100 см). Смугове навантаження відповідно до розрахункової схеми показано у вигляді вузлових значень.

Розрахункова скінченноелементна модель півпростору має такі граничні умови (див. рисунок):

– площа симетрії з сітковими вузловими координатами S_2, S_3, початку і кінця відповідно 1,1 і М3,1 по якій накладені в'язі на переміщення по другому напрямку глобальної системи координат;

– нижня грань – межа активної зони півпростору з сітковими координатами S_2, S_3, початку і кінця відповідно 1,1; М2,1 – жорсткі в'язі за третім напрямком глобальної системи координат.

Фізико-механічні характеристики шарів півпростору такі:

1 – нежорстке асфальтобетонне покриття товщиною 12 см:
$E = 9 \cdot 10^2$ МПа, $\nu = 0{,}3$, $\gamma = 0{,}0021$ кг/см^3;

2 – щебінь гранітний, просочений бітумом ($R_щ$ = 80 МПа):
$E = 7 \cdot 10^2$ МПа, $\nu = 0{,}3$, $\gamma = 0{,}0020$ кг/см^3;

3 – щебінь гранітний ($R_щ$ = 80 МПа):

Е = 3,5·10² МПа, ν = 0,22, γ = 0,0015 кг/см³;
4 – пісок (останній шар штучної основи нежорсткого аеродромного покриття):
Е = 120 МПа, ν = 0,3, γ = 0,00175 кг/см³;
5 – супісок (початок ґрунтової основи):
Е = 35 МПа, ν = 0,3, γ = 0,00164 кг/см³;
6 – супісок глинистий пластичний (варіант наявності слабкого прошарку в ґрунтовій основі):
Е = 5 МПа, ν = 0,34, γ = 0,00171 кг/см³.

З урахуванням величини стисливої товщі півпростору для нежорстких аеродромних покриттів згідно з працею [9] дискретна модель має розміри 985,30×622 см(h), сіткова область розміром М2×М3 – 19×21. Деяке згущення сіткової області виконане в межах області прикладення колісного навантаження.

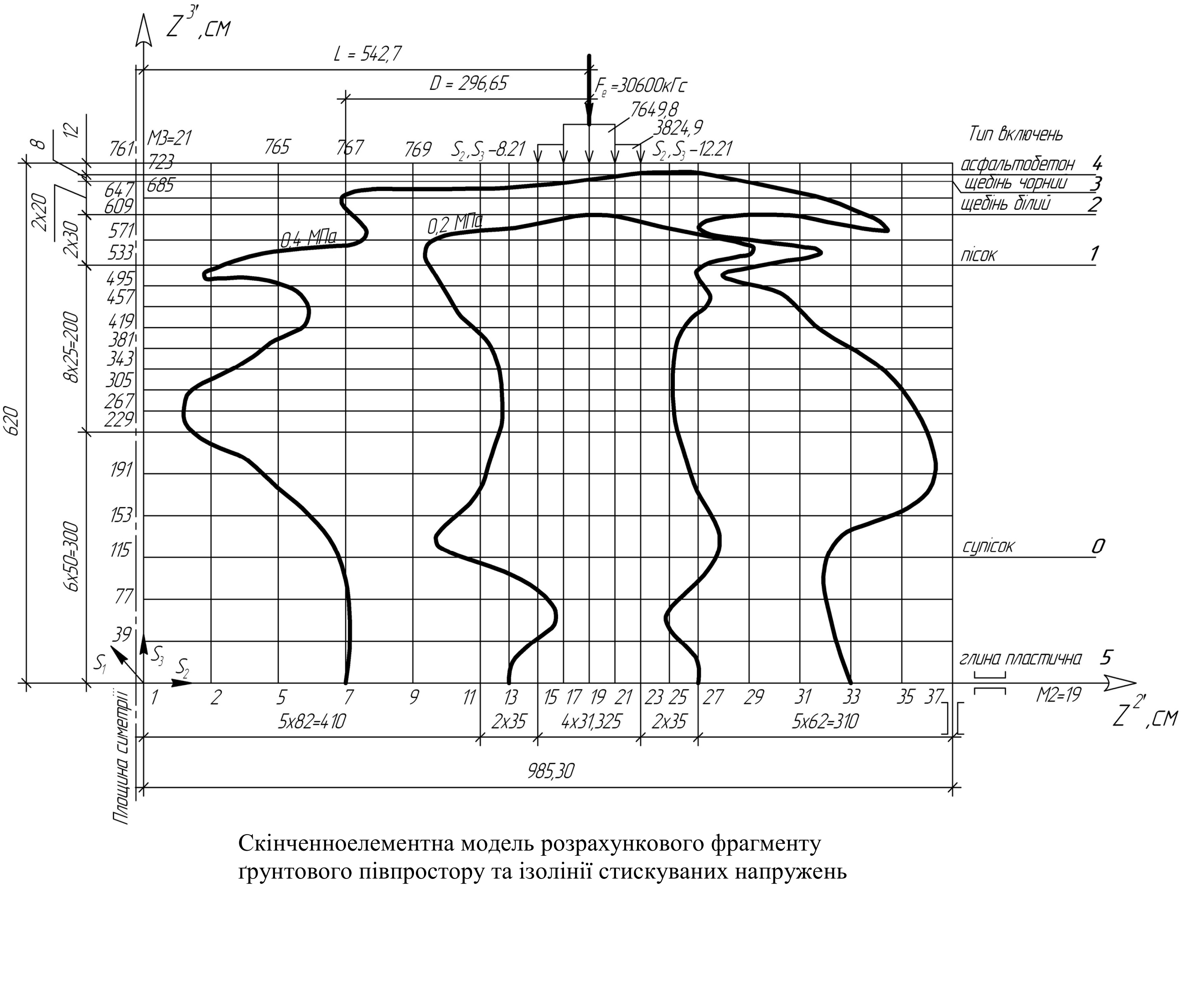
Моделювання еквівалентного смугового навантаження зводиться до перерозподілу рівномірної інтенсивності тиску, що дорівнює q = 4,416 кг/см, при смузі навантаження розміром 125,3×55,3 см це відповідає рівнодіючій F_e = 306 кН.

Бокова права грань півпростору з сітковими координатами S_2, S_3, початку і кінця відповідно М2,1; М2, М3 – накладені жорсткі в'язі за другим напрямком глобальної системи координат. Розміри сіткової області відповідають системі нелінійних рівнянь рівноваги (k = 2×19×21,3 = 2384) без врахування в'язей, накладених відповідно до зазначених граничних умов.

Результати розрахунку за переміщеннями показано у вигляді симетричної епюри на скінченноелементній моделі розрахункової схеми (див. рисунок) без урахування слабкого прошарку ($u^{3'}_{\max} = 1{,}128$ см, прогин верхньої площини півпростору в центрі смугового навантаження) і з врахуванням слабкого прошарку ($u^{3'}_{\max} = 1{,}82$ см). Діаметр чаші прогину становить 593,3 см.

На рисунку показано ізолінії напружень стиску.

Максимальні напруження у ґрунтовому півпросторі досягають 0,2 МПа. Характер ізоліній напружень свідчить про наявність значної неоднорідності півпростору.



Скінченноелементна модель розрахункового фрагменту ґрунтового півпростору та ізолінії стискуваних напружень

Висновки

Результати числового дослідження взаємодії аеродромного покриття показують:

– наявність слабкого прошарку в ґрунтовій основі покриття суттєво впливає на прогин покриття і справді зумовлює застосування нелінійного підходу під час розв'язання задачі;

– характер ізоліній напружень стиску в ґрунтовій товщі відповідає відомим у літературі викривленням ізоліній зазначених напружень з урахуванням анізотропних властивостей неоднорідного ґрунтового півпростору;

– уточнені результати числового розрахунку за деформаціями ґрунтового півпростору дозволяють досить точно визначити розміри реальної чаші прогину покриття від колісного навантаження основної опори літака.

Запропонована методологія дослідження ґрунтового півпростору на основі співвідношень нелінійної теорії пружності є розвитком теорії граничного напруженого стану ґрунтового півпростору із запровадженням розширеного критерію текучості Мізеса для плоскої задачі нелінійної теорії пружності пластичності. Вона передбачає визначення величини другого критичного навантаження, за якого у ґрунтовому півпросторі виникають суцільні ділянки граничного напруженого стану, і за наявності прошарків слабких ґрунтів у багатошаровому ґрунтовому півпросторі дає достовірні результати.

Література

1. *Кузнецов В.И.* Упругое основание. Расчёт балок, плит и рам / В.И. Кузнецов. – М.: ГИЛСА, 1952. – 296 с.

2. *Горбунов-Посадов М.* Расчёт конструкций на упругом основании / М. Горбунов-Посадов. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.

3. *Цытович Н. А.* Механика грунтов / Н. А. Цытович. – М.: ГИЛСЛи СМ, 1963. – 635 с.

4. *Баженов В.А.* Моментная схема метода конечных элементов в задачах нелинейной механики сплошной среды / В.А. Баженов, А.С. Сахаров, В.К. Цыхановский // Прикладная механика. – К.: Ин-т механики, НАН Украины, 2002. – Т. 38 (48), №6. – С. 24-63.

5. *Баженов В.А.* Метод скінченних елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м'яких оболонок / В.А. Баженов, В.К. Цихановський, В.М. Кислоокий. – К.: КНУБА, 2000. – 386 с.

6. *Цихановський В.К.* Метод скінченних елементів у задачах дослідження неоднорідного півпростору з урахуванням геометричної і фізичної нелінійності / В.К. Цихановський, Д.Е. Прусов // Опір матеріалів та теорія споруд: наук.-техн. зб. – К.: КНУБА, 2004. – Вип. 75. – С. 87–98.

7. *Цихановський В.К.* Методика моделювання елементів покриттів у взаємодії з неоднорідним ґрунтовим півпростором / В.К. Цихановський, Д.Е. Прусов // Опір матеріалів та теорія споруд: наук.-техн. зб. – – К.: КНУБА, 2005. − Вип. 76.– С. 87–98.

8. *Цихановський В.К.* Уточнений чисельний розрахунок жорстких аеродромних покриттів на слабких ґрунтових основах з урахуванням неоднорідності матеріалу і особливостей стикових елементів плит / В.К. Цихановський, Д.Е. Прусов // Опір матеріалів та теорія споруд: наук.-техн. зб. – К.: КНУБА, 2007. – Вип.78.– С. 87–98.

9. *СНиП 2.05.08.-85* „Аэродромы"/ Госстрой СССР. – М.:ЦНТП Госстроя СССР, 1985.– 59 с.

10. *Гольдштейн М. Н.* Механические свойства грунтов / М. Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1973. – 375 с.

11. *Харр М.Е.* Основы теоретической механики грунтов / М.Е. Харч. – М.: Изд-во лит. по стр-ву, 1971.-320 с.

12. *Шимановский А.В.* Теория и расчёт сильно нелинейных конструкций / А.В. Шимановский, В.К. Цыхановский. – К.: Сталь, 2005. – 423 с.

Стаття надійшла до редакції 15.04.09.