

УТОЧНЕНА МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВПЛИВУ СКЛАДНИХ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВ НА НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН КОНСТРУКЦІЙ АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ

Розглядається уточнена методика визначення стійкості ґрунтового масиву при дослідженні впливу на напружено-деформований стан конструкцій аеродромних покриттів у надграничному стані з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності при реконструкції об'єктів у складних інженерно-геологічних умовах.

Ключові слова: напружено-деформований стан, ґрунтові масиви, аеродромні покриття.

Постановка проблеми. У процесі влаштування аеродромних покриттів виникають певні труднощі, пов'язані зі збереженням незмінності існуючого напружено-деформованого стану (НДС) основи під ними, особливо в зонах складних геологічних умов. Розроблення методики оцінки впливу складних інженерно-геологічних умов на напружено-деформований стан конструкцій аеродромних покриттів при урахуванні граничного стану рівноваги півпростору виконано 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. Це обумовлює необхідність розглянути комбіноване багатошарове 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 багатоколісного 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 багатошарового 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 (МССЕ), дано рекомендації щодо уточнення коефіцієнтів умов роботи, які дають можливість використовувати існуючі інженерні аналітичні методи розрахунку [1, 3].

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 [4-6] методики з деякими уточненнями критерію текучості для ґрунтового півпростору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні аналіз зазначених систем можна проводити лише засобами числового моделювання, що вимагає використання сучасної комп'ютерної бази та відповідного математичного апарату. Складність розв'язання відповідних проблемних задач полягає не лише у створенні або використанні відповідного програмного комплексу, а насамперед у прийнятті обґрунтованої фізичної моделі, що найбільш коректно описує нелінійні процеси деформування матеріалу середовища, у тому числі моделі матеріалу ґрунту, а також у виборі розрахункових схем та реалізації спеціальних алгоритмів розрахунку, які забезпечують достовірність результатів (даних) розрахунку. Ситуація ускладнюється ще й тому, що на сьогодні відсутній універсальний метод чи модель, які можна застосовувати до будь-якого геоматеріалу, або середовища.

Існуючі норми та емпіричні залежності при оцінці впливу нового будівництва на існуючі конструкції призводять до необґрунтованого запасу, або навпаки до руйнування існуючих конструкцій, а забезпечення надійності будівель і споруд, зниження фінансових та матеріальних затрат є нагальним питанням сьогодення.

Мета роботи та постановка завдання. Кожна постановка задачі повинна включати власний аналіз на достовірність та особливий підхід, що вимагає від сучасного проектувальника не лише вміння правильно розробити документацію, але й мати відповідні значні навички та знання у питаннях числового моделювання та механіки ґрунтів.

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 правило, 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. 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.

Теоретичні основи. 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-деформованого стану: пружну і пружно-пластичну.

У даній роботі критерій стійкості, або текучості ґрунтового півпростору для окремої локальної однорідної ізотропної області представляється 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. Інваріанти тензора напружень визначаються через компоненти шарової і девіаторної частин функції напружень, а припущення про однорідність та ізотропність локального околу півпростору обумовлюють їх незалежність від напрямку нормалей октаедричних площин, розширений модифікований критерій текучості Мізеса можна подати у такій формі:

$$f\left(\hat{\sigma}, \hat{S}, \hat{\gamma}^{(p)}, \alpha, \varphi, c\right) = \frac{3}{2} I_1\left(\hat{S}^2\right) \left(\cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \cdot \sin \varphi\right)^2 - \left[\frac{1}{\sqrt{3}} I_1(\sigma) \sin \varphi - \sqrt{3} c \cos \varphi\right]^2 = 0, \quad (1)$$

де, $\hat{\sigma}, \hat{S}, \hat{\gamma}$ - тензори загальних (повних) напружень, напружень девіаторної частини і пластичних деформацій відповідно; α, φ, c - третій інваріант девіаторних напружень - через кут Лоде-Надаї, кут внутрішнього тертя ґрунту та питоме зчеплення ґрунту відповідно.

Використовуючи теорію пластичної текучості у рамках розширеного критерію текучості Мізеса, на основі асоційованого закону текучості можна записати:

$$d\gamma^{(p)} = d\lambda \hat{f}_{,\hat{S}}, \quad (2)$$

де $d\lambda$ - коефіцієнт пропорційності (пластичний множник); \hat{f} - похідна скалярної функції поверхні навантаження (пластичної текучості) по тензорному аргументу \hat{S} (тензор-девіатор напружень).

З використанням (2) отримуємо співвідношення для рівняння стану при розвитку пружнопластичних деформацій у природи загальних кінцевих деформацій $\hat{\gamma}$:

$$\hat{\sigma} = \hat{C}_4^{(e,p)} \cdot \hat{\gamma}, \quad (3)$$

де $\hat{C}_4^{(e,p)}$ – тензор пружності четвертого рангу для матеріалу в пружнопластичному стані:

Для отримання співвідношень необхідно виконати операцію диференціювання скалярної функції по тензорному аргументу \hat{S} , враховуючи, що параметр α , є функцією від \hat{S} . Обчислюємо похідну як від складної функції (додатку):

$$f_{,\hat{S}} \equiv \frac{\partial f}{\partial \hat{S}} = \frac{\partial \left(\frac{3}{2} I_1(\hat{S}^2) \right) \left(\cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \cdot \sin \varphi \right)^2}{\partial \hat{S}}. \quad (4)$$

При обчисленні похідної по \hat{S} переконуємося, що другий доданок не залежить від \hat{S} і похідна від нього дорівнює нулю, тому цей вираз можна записати як похідну від двох співмножників:

$$\frac{\partial f}{\partial \hat{S}} = \frac{3}{2} \frac{\partial \left(I_1(\hat{S}^2) \right)}{\partial \hat{S}} \left(\cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \cdot \sin \varphi \right)^2 + \frac{3}{2} \frac{\partial \left(\cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \cdot \sin \varphi \right)^2}{\partial \hat{S}} I_1(\hat{S}^2). \quad (5)$$

Для отримання остаточного виразу достатньо обчислити похідні від тригонометричних функцій параметра Лоде-Надаї.

Уточнення методики пов'язано із можливістю виникнення у знаменнику невизначеності типу 0/0 (розрив функції), тому слід виконати граничний перехід за правилом Лопіталя. Виконаємо деякі перетворення:

$$\frac{I_1^{3/2}(\hat{S}^2)}{\sqrt{I_1^3(\hat{S}^2) - 6 \cdot I_1^2(\hat{S}^3)}} = \frac{I_1^{3/2}(\hat{S}^2)}{\left(I_1^{3/2}(\hat{S}^2) + \sqrt{6} \cdot I_1(\hat{S}^3) \right) \cdot \sqrt{\frac{I_1^{3/2}(\hat{S}^2) + \sqrt{6} \cdot I_1(\hat{S}^3)}{I_1^{3/2}(\hat{S}^2) + I_1(\hat{S}^3)}}} \quad (6)$$

і скористаємося правилом Лопітала для функції підкореневого виразу в знаменнику, тобто межа невизначеності 0/0 при подвійному диференціюванні чисельника і знаменника під коренем наближається до 1, остаточно маємо:

$$\frac{\partial x}{\partial \hat{S}} = \frac{3\sqrt{6} \left[I_1(\hat{S}^2) \hat{S}^2 - I_1(\hat{S}^3) \hat{S} \right]}{I_1^{5/2}(\hat{S}^2)}. \quad (7)$$

Після підстановок значень похідних остаточно маємо:

$$\begin{aligned} & 3 \left(\cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \cdot \sin \varphi \right)^2 \hat{S} + \frac{3}{2} I_1(\hat{S}^2) \left[2 \left(\cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \cdot \sin \varphi \right) \times \right. \\ & \quad \left. \frac{\sqrt{6} \sin \alpha \left[I_1(\hat{S}^2) \hat{S}^2 - I_1(\hat{S}^3) \hat{S} \right]}{I_1(\hat{S}^2) \left[I_1^{3/2}(\hat{S}^2) + \sqrt{6} \cdot I_1(\hat{S}^3) \right]} - \right. \\ & \left. - \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \cdot \sin \varphi \right) \sin \varphi \times \left(- \frac{\sqrt{6} \cos \alpha \left[I_1(\hat{S}^2) \hat{S}^2 - I_1(\hat{S}^3) \hat{S} \right]}{I_1(\hat{S}^2) \left[I_1^{3/2}(\hat{S}^2) + \sqrt{6} \cdot I_1(\hat{S}^3) \right]} \right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Аналізуючи, переконуємося, що це є тензорний ряд виду

$$\hat{f}_{,\hat{S}} = \xi \hat{S} + \psi \hat{S}^2. \quad (9)$$

Розглянемо окремий випадок значення тензорної функції $\hat{f}_{,\hat{S}}$ для зв'язних ґрунтів при $c \neq 0$, $\varphi = 0$, тобто при $\sin \varphi = 0$:

$$\hat{f}_{,\hat{S}} = \xi' \hat{S} + \psi' \hat{S}^2, \quad (10)$$

Остаточно можна зробити висновок, що для розв'язання задач стійкості ґрунтового півпростору на основі методу скінченних елементів у якості вихідних співвідношень в запропонованій методиці використовуються варіаційні рівняння рівноваги і рівняння поверхні навантаження в шестивимірному просторі повних напружень, які в скалярній формі мають вигляд :

$$f\left(\sigma^{*ij}, S^{*ij}\right) = \frac{2}{3} S_{ij}^* S^{*ij} \left(\cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \sin \varphi \right) - \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \sigma^{*ij} G_{ij} \sin \varphi - \sqrt{3} c \cos \varphi \right]^2 = 0, \quad (11)$$

де σ^{*ij}, S^{*ij} - компоненти повних загального та девіаторного тензора напружень;

α - Параметр Лоде - Надаї - є функцією інваріантів $I_1(\hat{S}), I_3(\hat{S})$; φ, c - константи фізико-механічних характеристик ґрунту;

На основі теорії пластичного течії з використанням рівняння поверхні навантаження отримані рівняння стану в лінеаризованій формі узагальненого закону Гука, поширеного на область кінцевих деформацій для встановлення зв'язку приростів напруги і збільшень кінцевих деформацій (у стадії активного навантаження):

$$\sigma^{ij} = C_{(e,p)}^{ijkl} \gamma_{ij}; \quad C_{(e,p)}^{ijkl} = C_{(e)}^{ijkl} - \beta n^{ij} n^{kl}, \quad (12)$$

де $C_{(e)}^{ijkl}, C_{(e,p)}^{ijkl}$ - компоненти тензорів пружності в пружною і пружно-пластичної стадії розвитку пружно-пластичних деформацій відповідно; n^{ij} - компоненти тензора другого рангу, які обумовлені розвитком пластичних деформацій, коли функція.

$$f\left(\sigma^{*ij}, S^{*ij}\right) > 0. \quad (13)$$

Таким чином, співвідношення (13) зводяться до наступних:

$$C_{(e,p)}^{ijkl} = C_{(e)}^{ijkl} - \frac{2\mu}{S_k^i S_i^k} S^{ij} S^{kl}, \quad (14)$$

що відповідає співвідношенням, отриманим з використанням розширеного критерію Мізеса в [4-6]. Опис приростів тензора напружень у відповідності з теорією пластичної текучості і з використанням отриманих співвідношень забезпечує більш точний облік пластичних деформацій у тривимірному просторі деформованого стану області суцільного середовища. Достовірність отриманих рішень напружено-деформованого стану суцільного середовища з урахуванням співвідношень нелінійної теорії пружності і пластичності доведена на основі рішень цілого ряду задач, одна з яких наведена далі.

Чисельні дослідження напруженого стану аеродромних покриттів. Визначення напружено-деформованого стану аеродромних покриттів з урахуванням інженерно-геологічних, фізико-механічних і гідрологічних особливостей побудови товщі ґрунтів розглянемо на прикладі розрахунку нежорсткого аеродромного покриття та порівняльний аналіз його НДС при використанні інженерного та чисельного розрахунків. Використовуємо розрахунок нежорсткого аеродромного покриття полегшеного типу для

аеропорту IV класу. Виходячи з техніко-економічних обґрунтувань відповідного проекту аеродрому враховані специфіка економічних, кліматичних, гідрологічних та інших умов будівництва. Достовірність надійності проекту конструкції полегшеного покриття злітно-посадкової смуги аеродрому підтверджується інженерним розрахунком на міцність і додатковим науково-дослідним розрахунком з використанням числового методу - моментної схеми скінченних елементів [1].

У конструкції полегшеного нежорсткого покриття передбачається:

- штучна основа товщиною 40 см: ущільнена суміш ґрунтів ІГЕ-1 і ІГЕ-3 у співвідношенні 1:1 при дотриманні оптимальної вологості при ретельному ущільненні і при забезпеченні фізико-механічних характеристик $E_o = 164$ МПа, $\nu_o = 0,32$;

- власне покриття з ґрунтоцементу з використанням спеціальної добавки для приготування суміші - пластифікатора "Дорзин" товщиною 20 см марка ґрунтоцементу В10 (міцність на стиск $R_{bn} = 7,5$ МПа, розрахунковий опір розтягненню при згинанні $R_{btm} = 1,0$ МПа, $E_b = 768$ МПа);

- захисний шар товщиною 30 мм з гранітного відсіву з фракцією менше 5 мм, обробленого бітумом з високим ступенем стійкості до розм'якшення при дії високих температур марки БНД 40/60.

В активній зоні ґрунтової основи товщиною 6,1 м спостерігаються наступні горизонтальні нашарування:

- глина пилувато сіра, напівтверда щільна з прошарками водонасиченого піску - 2,3 м (ІГЕ-1 - $E_o = 21$ МПа, $\nu_o = 0,28$, $\varphi = 19^\circ$, $c = 0,054$ МПа, $\rho = 1950$ кг/м³);

- глина жорстка жирна, консистенція від напівтвердої до твердої - 1,2 м (ІГЕ-2 - $E_o = 15$ МПа, $\nu_o = 0,30$, $\varphi = 16^\circ$, $c = 0,041$ МПа, $\rho = 1900$ кг/м³);

- пісок середньозернистий, сіро-жовтий, середньої щільності, сухий, місцями маловологий - 1,8 м (ІГЕ-3 - $E_o = 40$ МПа, $\nu_o = 0,32$, $\varphi = 38^\circ$, $c = 0$ МПа, $\rho = 1920$ кг/м³);

- глина піщана сіро-бура, щільна, консистенція від напівтвердої до твердої - 0,8 м (ІГЕ-4 - $E_o = 42$ МПа, $\nu_o = 0,31$, $\varphi = 24^\circ$, $c = 0,042$ МПа, $P_a = 0,85$, $\rho = 1900$ кг/м³).

Відповідно до [2] визначаємо розрахункове значення колісного навантаження F_e для розрахункового повітряного судна ТУ-134, яке має найбільшу нормативне навантаження на основну опору: $F_n = 208,37$ кН і тиск у пневматиці $P_a = 0,85$ МПа - з набору повітряних суден, передбачених для експлуатації в проекті: Ту-134, Ан-32, Ан-24.

Відповідно до вихідних даних приводимо нижченаведений інженерний розрахунок на міцність нежорсткого аеродромного покриття.

Визначаємо розрахункове навантаження на колесо основної опори [2]:

$$F_d = \frac{F_n}{n_k} k_d \gamma_f = \frac{208,37}{4} \cdot 1,1 \cdot 1 = 57,3 \text{ кН.}$$

$$c = \frac{\lg 4}{\lg \frac{4 \cdot 1,05}{0,31}} \cdot \lg \frac{2 \cdot 0,6}{0,31} + \lg 57,3 = 2,08, \quad F_e = 10^{2,08} = 120,23 \text{ кН.}$$

Діаметр кола, рівновеликого відбитку одноколісного еквівалентного навантаження від основної опори розрахункового типу літака - Ту-134:

$$D_e = 2 \sqrt{\frac{F_e}{\pi \rho_a}} = 2 \sqrt{\frac{120,23 \cdot 10^3}{\pi \cdot 0,85 \cdot 10^6}} = 0,424 \text{ м.}$$

З метою визначення розрахункового відносного прогину покриття для одноколісного еквівалентного навантаження за [21] маємо:

$$\lambda_d = \frac{\omega_{\max}}{D_e},$$

де ω_{\max} - максимальний абсолютний прогин при дії рівномірно розподіленого навантаження по круговому відбитку (одноколісного навантаження) на однорідний ізотропний півпростір:

$$\omega_{\max} = \frac{(1 - \nu_0^2) p_a D_e}{E_{ed}}, \quad \lambda_d = \frac{(1 - \nu_0^2) p_a}{E_{ed}},$$

спрощуємо формулу з урахуванням $(1 - \nu_0^2) \approx 0,9$. Тоді маємо:

$$\lambda_d = 0,9 \frac{p_a}{E_{ed}},$$

де $E_{ed} = E_{mt} \Psi_k$.

$$E_{mt} = \frac{E_2 t_1 + E_3 t_2}{t_{tot}} = \frac{7,68 \cdot 10^2 \cdot 0,2 + 1,64 \cdot 10^2 \cdot 0,4}{0,6} = 3,65 \cdot 10^2 \text{ МПа.}$$

Остаточо маємо:

$$E_{ed} = 3,65 \cdot 10^2 \cdot 0,1 = 36,5 \text{ МПа;}$$

$$\lambda_d = 0,9 \cdot 0,85 / 36,5 = 0,021;$$

$$\omega_{\max} = \lambda_d D_e = 0,021 \cdot 0,424 = 0,0089 \text{ м} = 8,9 \text{ мм.}$$

Допустимий (граничний) прогин покриття по відносній деформації при колісній дії літака Ту-134 не задовольняє нормативним умовам. Проаналізуємо напружено-деформований стан розглянутої конструкції полегшеного нежорсткого покриття при дії полосового навантаження (з урахуванням коефіцієнта приведення до еквівалентного кругового відбитку) і зробимо остаточні висновки.

Для реалізації плоскої постановки задачі, коли враховується полосове

навантаження, необхідно інтенсивність цього полосового навантаження призвести до навантаження прямокутного (в окремому випадку - квадратного) рівномірно розподіленого, яка діє на обмежуючий поверхні однорідного ізотропного півпростору з параметрами $l \times b$. Цю модель апроксимації будемо на основі основної задачі механіки ґрунтів для однорідного ізотропного простору з навантаженням, яке розподілене по прямокутнику або при $l/b = \infty$, яке зводиться до полосового навантаження, коли напруження стискання по відносній глибині півпростору z/b визначається за табульованою формулою:

$$\sigma_z = k_0 p,$$

де p - інтенсивність навантаження, k_0 - коефіцієнт пропорційності в центрі прямокутника поверхневого навантаження півпростору.

Враховуючи параметри еквівалентного перерізу покриття, штучної основи і ґрунтового багат шарового півпростору, побудовано розрахункову схему для розглянутої задачі з урахуванням площині симетрії, що проходить через центральну вісь еквівалентного колісного відбитка розмірністю $a \times a$. Розрахунковий фрагмент півпростору має розміри: ширина - 300 см, глибина - 674 см, товщина - 1 см.

Сіткова область розрахункової схеми має розміри: $S_1 = M1 = 2$, $S_2 = M2 = 19$, $S_3 = M3 = 23$, тобто $2 \times 19 \times 23$, що відповідає 396 скінченним елементам (СЕ), кількості вузлів СЕ - 874 і кількості розв'язуючих рівнянь $k = 2622$, із відповідними граничними умовами розрахункового фрагмента. Зовнішнє навантаження у вигляді полосового навантаження: на верхній граничній поверхні півпростору накладається рівномірно розподілене навантаження інтенсивністю $q = 5,1 \text{ кгс/см}^2$ на інтервалі по верхній кромці розрахункової схеми з сітковими координатами вузлів $S_3 = 23$; $S_2 = 1 \dots 4$.

Результати дослідження напружено-деформованого стану розглянутого півпростору конструкції покриття нежорсткого типу у взаємодії з штучною і ґрунтовою основою на глибину 6,74 м можуть бути представлені у вигляді: 1) зон розповсюдження пластичних (зсувних) деформацій; 2) таблиць значень переміщень і внутрішніх зусиль у характерних перерізах (за площиною симетрії і обмежуючій верхній поверхні півпростору) від додаткового зовнішнього навантаження; 3) графіків-епюр переміщень, ізоліній стискаючих напружень (ізобар) і ізоліній зсувних напружень (розпір).

Області (набір скінченних елементів), в яких мають місце тільки пружні і пружно-пластичне деформації. Зсувні деформації незначної величини (близько $2,6 \cdot 10^{-4} \dots 6,3 \cdot 10^{-4}$), спостерігаються у піщаному шарі практично при нульовому питомому зчепленні $c = 0,02 \text{ кгс/м}^2$. У нижнім шарі (піщана глина)

при $c = 0,42 \text{ кгс/см}^2$ пластичні деформації не спостерігаються. Пластичні деформації в шарах полегшеного покриття і штучної основи носять характер початкового критичного стану, про що свідчать і їх значення: $1,8 \cdot 10^{-3} \dots 1,5 \cdot 10^{-6}$, зменшення відбувається за напрямом Z^2 - розширення зсувної області від площини симетрії до бічної границі півпростору.

Аналіз результатів числових досліджень у характерних перерізах, отриманих при розрахунку з урахуванням розвитку пластичних деформацій і без урахування останніх, свідчить, що при цьому різниця за максимальними переміщенням становить:

$$\Delta u_{837}^{3'} = u_{837}^{3'} - \bar{u}_{837}^{3'} = -10,2 - (-9,07) = -1,13 \text{ мм}; \quad \frac{\Delta u_{837}^{3'}}{u_{837}^{3'}} \cdot 100 \cong 11,08\%,$$

а за максимальними напруженнями:

$$\Delta \sigma_{799}^{33} = \sigma_{799}^{33} - \bar{\sigma}_{799}^{33} = -5,09 - (-4,66) = -0,43 \text{ кгс/см}^2; \quad \frac{\Delta \sigma_{799}^{33}}{\sigma_{799}^{33}} \cdot 100 \cong 8,48\%,$$

при цьому з урахуванням пластичних деформацій спостерігається деяка концентрація в СЕ, що примикають до поверхні навантаження.

Використовуючи результати визначення прогинів і переміщень верхньої обмежуючої поверхні півпростору числового розрахунку, побудуємо епюри прогинів поверхні нежорсткого покриття та адекватної йому числової дискретної моделі півпростору (рис. 1).

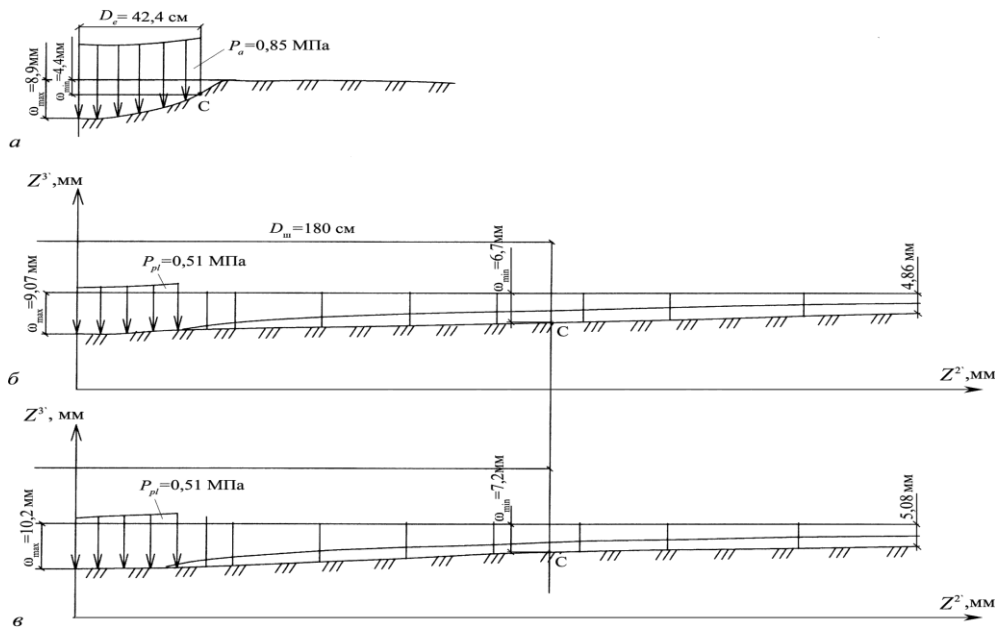


Рис. 1. - Епюри прогинів верхньої обмежуючої поверхні багатошарового півпростору: *а* – характер епюри прогинів за інженерним розрахунком нежорсткого аеродромного покриття; *б* – епюра прогинів півпростору, що досліджується без урахування розвитку пластичних деформацій; *в* – епюра прогинів півпростору з урахуванням розвитку пластичних деформацій

За характером деформування поверхні покриття, показаному на рис.1,а (аналітичний розрахунок за формулою Буссинеска) і на рис.1,б, можна зробити висновок, що чаша прогину при колісній дії по результатам числового розрахунку в декілька раз перевищує діаметр $D_e = 42,4$ см. За найменшими критеріями деформування, виходячи з наближених до точки перегину функцій $u_N^3 = f(z^2)$, діаметр чаші складає $D_q = 180$ см; звідси відносний прогин нежорсткого покриття

$$\bar{\lambda}d = \frac{u_{\max}^3}{D_q} = \frac{10,2}{1800} \cong 0,0057 .$$

Таким чином, нежорстке покриття, що розглядається, у граничному стані за показниками відносного прогину задовольняє нормативним вимогам.

Висновки. Розроблена уточнена методика оцінки впливу складних умов на напружено-деформований стан конструкцій аеродромних покриттів забезпечила уточнений розрахунок елементів конструкцій аеродромних покриттів в умовах реалізації еволюційних технологій зовнішнього впливу на ґрунтовий півпростір, насипних дамб та транспортних земляних полотен з урахуванням їх багат шарового армування, а також в умовах розвитку граничних пластичних деформацій. Методика чисельного розрахунку стійкості об'єктів аеропортів при урахуванні граничного стану рівноваги півпростору і впливу поля перонної анізотропії багат шаровості простору уточнена на основі розвитку математичної моделі стійкості аеродромних покриттів при урахуванні граничного стану рівноваги півпростору, створення алгоритмів розв'язання систем нелінійних рівнянь з використанням комбінації методів подовження за параметром збурення та за розвитком пластичних деформацій.

В результаті чисельних досліджень отримані розв'язки задачі оптимального проектування конструкцій аеродромних покриттів за узагальненими параметрами проектування. Проведений аналіз чисельних досліджень напруженого стану аеродромних покриттів з урахуванням складних інженерно-геологічних, фізико-механічних і гідрологічних особливостей побудови товщі ґрунтів на прикладі задачі розрахунку на міцність конкретних прикладів конструкцій жорсткого покриття з використанням різних дискретних моделей і типів ґрунтових основ свідчить про універсальність запропонованої методики дослідження НДС тонких плит на пружній неоднорідній основі.

Список використаних джерел

- 1.Цытович Н.А., Тер-Мартirosян З.Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве / Н.А. Цытович, З.Г. Тер-Мартirosян. – М.: Высш. шк.,

1981. – 317с.
- 2.СНиП 2.05.08-85 Аэродромы. – М.: Госкомитет СССР по делам строительства, 1985. – 58 с.
 - 3.Шимановский А.В., Цыхановский В.К. Теория и расчет сильно нелинейных конструкций / А.В. Шимановский, В.К. Цыхановский – К.: Сталь, 2005. – 432 с.
 - 4.Цыхановський В.К. Метод скінченних елементів у задачах дослідження неоднорідного півпростору з урахуванням геометричної і фізичної нелінійності / В.К. Цыхановський, Д.Е. Прусов // Сб., „Опір матеріалів і теорія споруд”. – К.:КНУБА, 2004. – Вип.75. – С.87-98.
 - 5.Цыхановський В.К. Уточнений чисельний розрахунок жорстких аеродромних покриттів на слабких ґрунтових основах з урахуванням неоднорідності матеріалу і особливостей стикових елементів плит / В.К. Цыхановський, Д.Е. Прусов // Опір матеріалів та теорія споруд: Науково-технічний збірник.– Київ, КНУБА, 2007. – Вип.78. – С. 87–98.
 - 6.Цыхановський В.К. 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, 2009. – № 4. – С.38-44.
 - 7.Прусов Д.Е. Аналіз рівнянь рівноваги дискретної розрахункової моделі ґрунтового півпростору / Д.Е. Прусов // Вісник НАУ. – 2009. – №3. – С.125-130.
 - 8.D.Prusov. The Depending of Embedded Structures State of Airports Objects in Terms of the Boundary Equilibrium State of Soil Semispace / D.Prusov, A.Beljatynskij // Science – Future of Lithuania. Civil and Transport Engineering. – 2011. – V.3, N.2. – P.118-125.
 - 9.Prusov D.E. Effect of Deep Excavations with Filler Constructions on the Groundwater Filtration Processes / D.E. Prusov, V.N. Badakh // Motorization and Power Industry in Agriculture MOTROL. – Lublin, POLAND, 2011. – Tom 13 C. – Ps. 43-50.

Аннотация

Рассматривается уточненная методика определения стойкости ґрунтового массива при исследовании влияния на напряженно-деформированное состояние конструкций аэродромных покрытий в сверхпредельном состоянии с учетом геометрической и физической нелинейности при реконструкции объектов в сложных инженерно-геологических условиях.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, ґрунтовые массивы, аэродромные покрытия.

Annotation

The refined estimating method of the soil mass stability has been considered for the investigation of the stress-strain state influence of the airfield pavements in the transcendent state considering the geometric and physical nonlinearity for the objects reconstruction in difficult engineering-geological conditions. Keywords: stress-strain state, the soil mass, the airfield pavements.