

*М.П. Нестеренко, к.т.н., доцент, О.В. Бандуріна, к.т.н., доцент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНДАМЕНТІВ ДЛЯ ВІБРАЦІЙНИХ ПЛОЩАДОК ІЗ ПРОСТОРОВИМИ КОЛИВАННЯМИ РОБОЧОГО ОРГАНА

Наведено результати аналітичних досліджень динамічних характеристик фундаментів для вібраційних площадок із просторовими коливаннями робочого органа методом скінченних елементів за розрахунковою схемою на основі програмного комплексу Plaxis 7.2.

Ключові слова: вібраційна площадка, метод скінченних елементів, коливання, фундамент.

*Н.П. Нестеренко, к.т.н., доцент, Е.В. Бандурина, к.т.н., доцент
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

ЧИСЛОВОЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНДАМЕНТОВ ДЛЯ ВИБРАЦИОННЫХ ПЛОЩАДОК С ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ РАБОЧЕГО ОРГАНА

Приведены результаты аналитических исследований динамических характеристик фундаментов для вибрационных площадок с пространственными колебаниями рабочего органа методом конечных элементов по расчетной схеме на основе программного комплекса Plaxis 7.2.

Ключевые слова: вибрационная площадка, метод конечных элементов, колебания, фундамент.

*M.P. Nesterenko, Ph. D., O.V. Bandurina, Ph. D.
Poltava National Technical Uriy Kondratyuk University*

NUMERICAL ANALYSIS OF DYNAMIC DESCRIPTIONS OF FOUNDATIONS FOR VIBRATION PLATFORMS WITH SPATIAL VIBRATIONS OF WORKING ORGAN

The results of analytical researches dynamic descriptions foundations are resulted for vibration platforms with the spatial vibrations working organ by the method eventual elements on by calculation chart on the basis of programmatic complex Plaxis 7.2.

Keywords: vibration platform, method of finite elements, oscillation, foundation.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями. У сучасних умовах будівництва залізобетонні вироби користуються стійким попитом. Промисловістю України та країн СНД віброформувальне обладнання серійно не випускається, а тому підприємства змушені самостійно його поповнювати за умов дефіциту металу та комплектуючих виробів. Досить розповсюджене у використанні розроблене в ПолтНТУ вібраційне обладнання з просторовими коливаннями робочого органа, яке постійно вдосконалюється [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання цієї проблеми. Влаштування фундаментів під машини, що виключає наявність негативних наслідків на оточуюче середовище можливе лише під час проведення аналізу на основі науково обґрунтованих методів проектування таких фундаментів. Дослідженням проблеми

проектування фундаментів машин займались А.І. Цейтлин [2], Н.С. Швець, В.Г. Таранов [3], Б.Г. Алексєєв [4], М.І. Забилін [5], М.Л. Холмянський [6] та ін.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Вібрації впливають на зростання деформацій і осідань як самих фундаментів машин, так і споруд, розташованих поблизу. Вібрації і шум утруднюють технологічні процеси і чинять шкідливий фізіологічний вплив на людей, підвищуючи втомлюваність працюючих. Головним заходом боротьби з вібраціями є коректне влаштування фундаментів під машини, що можливе за наявності необхідних методів проектування таких фундаментів.

Метою роботи є вдосконалення методики розрахунку фундаментів для вібраційних площадок із просторовими коливаннями методом скінченних елементів (МСЕ) за вибраною розрахунковою схемою на базі програмного комплексу Plaxis.

Виклад основного матеріалу дослідження. Визначення амплітуд вимушених і вільних коливань фундаменту чи окремих його елементів проводиться роздільно за напрямками та відповідними частотами [7, 8]. Фундаменти під формувальні машини підлягають навантаженням, (амплітуди вертикальних коливань не перевищують амплітуди горизонтальних коливань). Для нормальних умов експлуатації машин та фундаментів амплітуди коливань мають задовольняти умову [7]

$$A \leq A_{дон} \quad (1)$$

де A – найбільша амплітуда коливань фундаменту, що визначається розрахунком чи вимірюванням;

$A_{дон}$ – гранично допустима амплітуда коливань фундаменту [7].

При дії динамічних навантажень основу приймають лінійно-деформованою, ідеально пружно-в'язкою та позбавленою маси (неврахування інерції). В'язкість основи зумовлена демпфіруючими властивостями ґрунту.

Фундаменти під такі формувальні машини для виробництва збірного залізобетону слід проектувати масивними у вигляді блоків. У таких машинах застосовують гумометалеві пружні опори.

Вихідними даними для розрахунку є вертикальне статичне навантаження $P_{вст.}$, вертикальне динамічне навантаження $P_{од.}$, горизонтальне динамічне навантаження $P_{гд.}$, обертальний момент від роботи вібратора M , частота коливань тощо.

Розрахунок фундаменту проводимо методом скінченних елементів за допомогою програмного пакету Plaxis 7.2 [9, 10], який призначений для визначення деформацій та стійкості геотехнічних споруд. Проектування геотехнічних споруд вимагає складання дискретних моделей для моделювання нелінійної реологічної поведінки ґрунту.

Оскільки ґрунт є багатошаровим матеріалом, який складається з декількох фаз, необхідні спеціальні розрахунки для моделювання гідростатичного та негідростатичного порового тиску в ґрунті. Plaxis 7.2 володіє спеціальними можливостями для роботи з багатьма аспектами складних геотехнічних споруд, його застосовують для розв'язання більшості задач у сфері традиційної механіки ґрунтів.

Він охоплює питання закладення та спорудження фундаментів, земляних робіт (влаштування котлованів, траншей тощо), будівництва підпірних стін, розрахунку стійкості відкосів, розрахунків дорожнього насипу. Програмний комплекс має всі можливості введення-виведення інформації на екран у зручному для користувача інтерфейсі (у табличній чи графічній формі за допомогою графіків і рисунків).

У постановці пружно-пластичної задачі прийняті такі передумови:

– враховані прояви нелінійності містять пластичну деформацію формозміни при складному напруженому стані, безперешкодне деформування при розтязі, зсув по заданій поверхні;

– при складному напруженому стані (стиску зі зсувом) загальні деформації

включають в себе лінійну (пружну) та пластичну частини, причому пластична складова деформацій виникає після досягнення напруженим станом граничної міцності і відповідності за умовою Мора – Кулона для плоскої задачі.

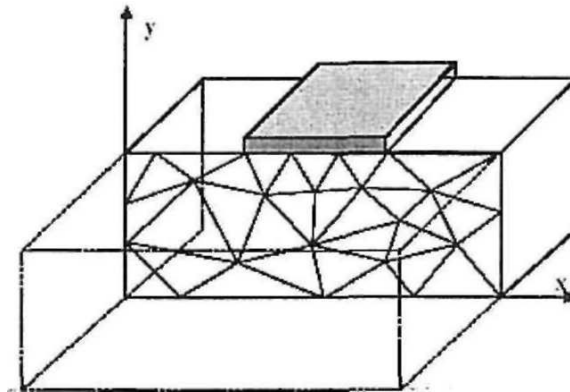


Рисунок 1 – Приклад розрахункової схеми при обчисленні за програмним комплексом PLAXIS

Для моделювання шарів ґрунту й інших груп (кластерів) при розрахунку вибираємо трикутні елементи з 6 або 15 вузлами (рис. 1). За замовчуванням використовуються 15-вузлові трикутники. Це забезпечує для переміщень інтерполяцію четвертого порядку та використовує чисельну хінтеграцію по дванадцяти гауссівських точках напружень. У разі 6-вузлових трикутників має місце інтерполяція другого порядку, а інтеграція проводиться по трьох точках напружень. Тип елементів для структурних елементів і контактних поверхонь автоматично вибирається за умови сумісності з типом елемента ґрунту.

Як показує досвід, 15-вузловий трикутник є дуже точним елементом, який забезпечує високий ступінь надійності розрахунків напружень у складних випадках. Проте використання 15-вузлових трикутників потребує значних витрат пам'яті, уповільнює роботу системи й знижує її ефективність. Тому на практиці, за умови використання достатньої кількості елементів, застосовують трикутні 6-вузлові елементи, що дає задовільні результати для стандартних деформаційних задач.

Один 15-вузловий елемент може бути представлений з'єднанням чотирьох 6-вузлових елементів (оскільки загальне число вузлів і точок напружень рівне). Проте, один 15-вузловий елемент ефективніший, ніж чотири 6-вузлові елементи [8].

Для зв'язку напружень і пружних деформацій у розрахунках використано закон Гука.

Нелінійна пружно-пластична модель за умовою Мора – Кулона дає змогу з більшою точністю описати поведінку ґрунту при статичних і динамічних навантаженнях, але через складності математичного апарату застосовується лише у розрахунках на ПЕОМ. Досліджуючи динамічні характеристики та осідання фундаментів із використанням такого програмного комплексу, першим кроком після побудови розрахункової схеми було проведення обчислень від дії статичного навантаження, наступним кроком – динамічний розрахунок. При розрахунку розглядається плоска задача [11].

Загальний ітераційний процес може бути описаний як

$$K^i \delta u^i = f_{ex}^i - f_{in}^{i-1}, \quad (2)$$

де K – матриця жорсткості;

δu – вектор приросту переміщення;

f_{ex} – вектор зовнішньої сили;

f_{in} – вектор внутрішньої реакції.

На початку ітераційного процесу формується вектор вузлових сил. Елементами цього вектора є значення вузлових сил.

Основне рівняння руху від впливу динамічного навантаження, що залежить від часу дії навантаження,

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F, \quad (3)$$

де M – матриця мас;

u – переміщення;

C – матриця затухання;

K – матриця жорсткості;

F – сума діючих сил.

З неявним інтегруванням рівняння (3), яке містить час $t + \Delta t$ отримуємо

$$M\dot{u}^{t+\Delta t} + C\dot{u}^{t+\Delta t} + Ku^{t+\Delta t} = F^{t+\Delta t}. \quad (4)$$

У такій формі рівняння застосовано для розрахунку амплітуд коливань й осідань фундаментів машин. Різниця між статичним розрахунком у додаткових величинах для маси і затухання. Вирази у правій частині рівняння містять додаткові значення першої та другої похідної від вібропереміщення на початку часового кроку (час Δt) [10].

Під час проведення геотехнічних розрахунків необхідна наявність основних ґрунтових моделей для імітації нелінійної та нестационарної поведінки ґрунтів. При цьому слід обов'язково враховувати і сам субстрат ґрунту як такий, гідростатичний і негідростатичний поровий тиск у ній. Таким чином, основний акцент роблять саме на взаємодії ґрунту і тих споруд, які може бути зведено на цій ділянці [11]. Загальні деформації включають лінійну (пружну) і пластичну частини, причому пластична складова деформацій виникає після досягнення напруженим станом межі пропорційності (текучості, міцності).

Уведення геометрії шарів ґрунту, конструкції, навантажень і граничних умов базується на САД-процедурах креслення, які забезпечують докладне і точне моделювання реальної ситуації. Для введення геометрії в PLAXIS представлено такі елементи, як балка, шарнір, анкери, граничні умови, навантаження, які використані при побудові розрахункової схеми фундаменту вібромашини [8].

Зі створеної геометричної моделі програма в автоматичному режимі генерує неструктуровану скінченно-елементну сітку з можливістю глобальної і локальної зміни її густини. Використання в моделі елементів високого порядку корисно для рівномірного розподілу напружень у ґрунті і точного прогнозу неприпустимих навантажень.

Для кожного шару ґрунту можна виділити різні рівні ґрунтових вод. Більш того, поровий тиск у шарі інтерпольований від порового тиску в суміжних шарах ґрунту.

Під час виконання розрахунків PLAXIS запущено в режимі автоматичного вибору кроку величини і кроку часу. Це дозволяє уникнути вибору відповідного приросту навантаження для розрахунків пластичності, що гарантує ефективність і точність процесу обчислень.

Пружно-пластична модель, основана на умові Мора – Кулона, базується на таких параметрах, як модуль пружності та коефіцієнт Пуассона ν , кут φ і питоме зчеплення [12, 13].

Загальні деформації включають лінійну (пружну) і пластичну частини, причому пластична складова деформацій виникає після досягнення напруженим станом межі пропорційності (текучості, міцності).

Основний принцип при використанні цієї моделі основи базуються на тому, що деформації і напруження мають пружну і пластичну частину

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}^e + \bar{\varepsilon}^p, \quad (5)$$

де ε – загальна деформація; ε^e , ε^p – пружна і пластична частина деформації.

Обраховано значення максимальної амплітуди коливань фундаменту в точках А, В, С. Для визначення амплітуд вібропереміщень використано 150 – 200 додаткових кроків розрахунку. Проведено дослідження амплітуди коливань фундаменту вібромашини від кількості елементів у площі, обмеженій розрахунковою схемою (рис. 2).

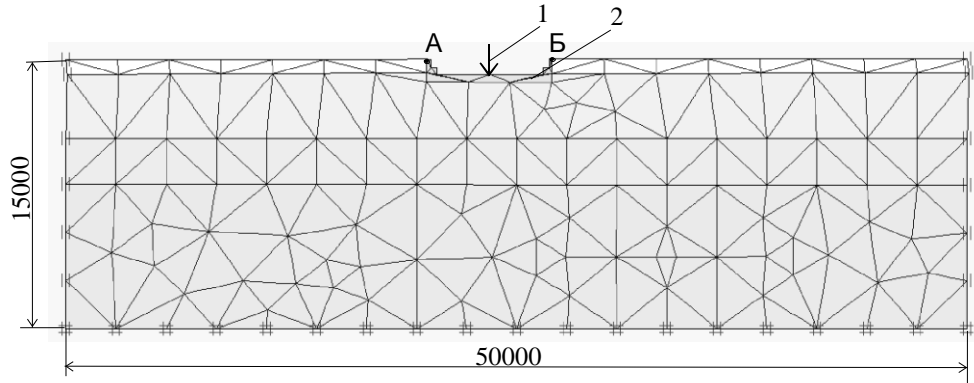


Рисунок 2 – Розрахункова схема для обчислення амплітуд коливань фундаменту вібромашини: 1 – вертикальне динамічне навантаження; 2 – фундамент вібромашини

Досліджено можливість врахування тріщин за допомогою чисельного методу. Плоска розрахункова схема розміром 15×50 м являла собою сітку елементів. За методом скінченних елементів побудовано ізополя амплітуд коливань фундаменту вібромашини (рис. 3). Максимальне значення амплітуди коливань фундаменту становить близько $0,26 \cdot 10^{-3}$ м. Що при порівнянні значень, визначених за допомогою методу скінченних елементів, показало задовільну збіжність результатів розрахунку.

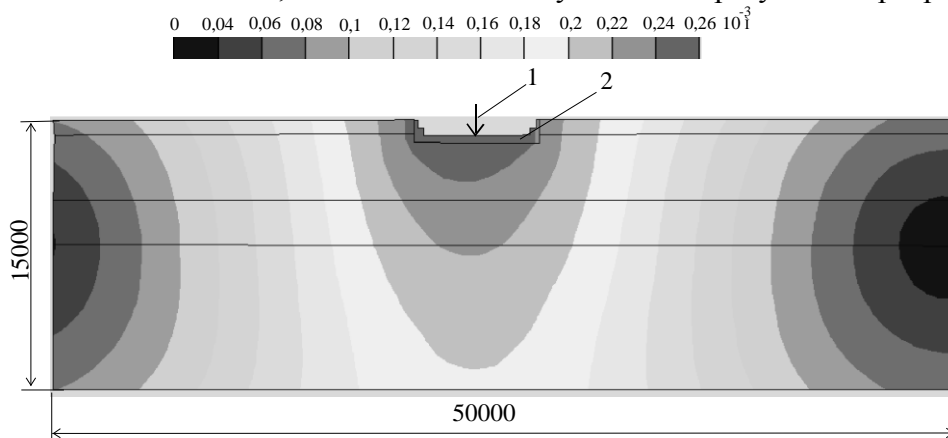


Рисунок 3 – Ізополя амплітуд коливань фундаменту вібромашини: 1 – вертикальне динамічне навантаження; 2 – фундамент вібромашини

Висновок. Запропонована методика розрахунку фундаментів для вібраційних площадок із просторовими коливаннями МСЕ за вибраною розрахунковою схемою на основі програмного комплексу Plaxis 7.2 дозволить удосконалити проектування фундаментів для конкретних ґрунтів.

Література

1. Нестеренко, М.П. Вібраційні площадки з просторовими коливаннями для виготовлення залізобетонних виробів широкої номенклатури / М.П. Нестеренко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2005. – Вип. 16. – С.177-181.

2. Цейтлин, А.И. Статистические методы расчета сооружений на групповые динамические воздействия / А.И. Цейтлин, Н.И. Гусева. – М.: Стройиздат, 1979. – 175 с.

3. Таранов, В.Г. *Расчетно-экспериментальные методы определения уровня колебаний и оценка виброустойчивости оснований фундаментов машин: дис....доктора техн. наук: 05.23.02 / Таранов Валентин Георгиевич. – Д.: ПГАСА, 1999. – 301 с.*
4. Алексеев, Б.Г. *Исследование влияния боковой засыпки на колебания фундаментов под машины с динамическими нагрузками: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.02 “Основи і фундаменти” / Б. Г. Алексеев – Дніпропетровськ, 1980. – 22 с.*
5. Забылин, М.И. *Расчет фундаментов под машины: Учебное пособие. / М.И. Забылин. – Новосибирск: Изд.-во НИСИ им. В.В. Куйбышева, 1983. – 83 с.*
6. Холмянский, М.Л. *К расчету перемещений основания при периодической нагрузке / М. Л. Холмянский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – №5. – С. 2 – 6.*
7. *Фундаменты машин с динамическими нагрузками: СНиП 2.02.05–87. – [Действующий с 1985–01–01]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 32 с.*
8. *Руководство по проектированию фундаментов машин с динамическими нагрузками. – М.: Стройиздат, 1982. – 207 с.*
9. Патронова, О.С. *PLAXIS – инструмент инженера-геотехника. Примеры расчетов / О.С. Патронова // CADmaster №13/3.2002 (июль-сентябрь) – С. 62 – 65.*
10. *Першина, С.В. PLAXIS – Программный пакет для расчета деформаций и устойчивости геотехнических сооружений методом конечных элементов / С.В. Першина, А.В. Слободяник // Зб. наук. праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2003. – Вип. 12. – С. 158 – 163.*
11. *Brinkgreve, R. B. J. PLAXIS. Version 7 / R.B.J. Brinkgreve, P.A. Vermeer – Rotterdam: A. A. Balkema, 1998. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.plaxis.nl>. – Заглав. с титул. экрана.*
12. *Бандуріна, О.В. Урахування динамічних впливів формувальних машин при реконструкції основ і фундаментів: дис....кандидата техн. наук: 05.23.02 / Бандуріна Олена Володимирівна. – П.: ПолтНТУ, 2008. – 213 с.*
13. *Ивахов, И. PLAXIS – геотехнические расчеты / И. Ивахов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cadmater.ru/article/11_plaxis.cfm. – Заглав. с титул. экрана.*

*Надійшла до редакції 03.10.2012
© М.П. Нестеренко, О.В. Бандуріна*