

EXPERIENCE OF CONSTRUCTION OF SPEED MODELS AND CALCULATIONS OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE SOIL THICKNESS OF INDUSTRIAL SITES OF LARGE INDUSTRIAL OBJECTS

Kocharian M.A.
Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
kocharian02marina@gmail.com

Abstract. Dynamic calculation of building structures on the basis of the accelerogram is entered into the obligatory standard at designing of especially responsible objects. Calculated accelerograms must satisfactorily reflect all parameters of soil oscillations. In particular, the assessment of the influence of resonant effects of the geological section of the industrial site on the spectral properties of accelerograms is performed by calculating and taking into account the amplitude-frequency characteristics of the soil layer.

The paper presents the results of numerical evaluation of the ability of the soil layer of the industrial site to change the frequency composition of seismic waves due to its filtering properties.

The used method of estimating the filtering properties of the soil layer is based on determining its amplitude-frequency characteristic, which in turn is a function of frequency.

The most important physical characteristic for calculating the frequency characteristics of the soil layer is the speed model of the geological environment of the industrial site.

Keywords. Seismic, speed model, amplitude-frequency characteristics of the geological environment.

ДОСВІД ПОБУДОВИ ШВИДКІСНИХ МОДЕЛЕЙ ТА РОЗРАХУНКІВ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ҐРУНТОВОЇ ТОВЩІ ПРОММАЙДАНЧИКІВ ВЕЛИКИХ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Кочарян М.А.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна
kocharian02marina@gmail.com

Анотація. Динамічний розрахунок будівельних конструкцій на основі акселерограми введений в обов'язковий норматив при проектуванні особливо відповідальних об'єктів. Розрахункові акселерограми повинні в задовільному ступені відображати всі параметри коливань ґрунту. Зокрема, оцінка впливу резонансних ефектів геологічного розрізу проммайданчику на спектральні властивості акселерограм виконується шляхом розрахунку і врахування амплітудно-частотних характеристик ґрунтової товщі.

У роботі представлено результати чисельної оцінки здатності ґрунтової товщі проммайданчика змінювати частотний склад сейсмічних хвиль завдяки своїм фільтруючим властивостям.

Використаний метод оцінки фільтруючих властивостей ґрунтової товщі заснований на визначенні її амплітудно-частотної характеристики, яка в свою чергу є функцією частоти.

Найважливішою фізичною характеристикою для розрахунку частотних характеристик ґрунтової товщі є швидкісна модель геологічного середовища проммайданчику.

Ключові слова. Сейсмозв'язка, швидкісна модель, амплітудно-частотна характеристика геологічного середовища.

1. Вступ

Україна є великою індустріальною державою, на території якої розташована велика кількість великих промислових об'єктів, а саме: атомні і теплові електростанції, великі греблі, хвостосховища крупних гірничо-збагачувальних комбінатів, хімічні і металургійні виробництва, тощо. Всі вони відносяться до споруд класу наслідків (відповідальності) ССЗ, руйнування яких може спричинити важкі екологічні та соціально-економічні наслідки. Одним з факторів, що

впливають на безпеку функціонування подібних об'єктів, є сильні сейсмічні впливи, викликані землетрусами тектонічної та техногенно-індукованої природи. Антропогенні зміни геологічного середовища, що пов'язані з будівництвом і експлуатацією цих об'єктів значно впливають і на локальні зміни сейсмічності. Вивчення мінливості параметрів руху ґрунтів при землетрусах з сейсмонебезпечних зон в залежності від будови і властивостей порід приповерхневої частини розрізу, а також врахування зміни властивостей середовища, що пов'язані з будівництвом та експлуатацією великих промислових об'єктів є обов'язковим елементом при проектуванні їх будівництва, реконструкції та продовження терміну їх експлуатації.

Ці питання вирішуються інженерною сейсмологією. Кінцевим результатом робіт по оцінці сейсмічності є синтетична акселерограма прогнозного землетрусу, максимально близька до очікуваної. Синтетичні акселерограми повинні в задовільній мірі відображати всі встановлені параметри коливань ґрунту.

Динамічний розрахунок будівельних конструкцій на основі акселерограми введений в обов'язковий норматив при проектуванні особливо відповідальних об'єктів [1]. Передбачається, що розрахункові акселерограми повинні володіти найбільш загальними рисами як минулих, так і майбутніх сейсмічних подій. В обов'язковому порядку в них повинні бути відображені особливості впливів, найбільш небезпечних для досліджуваних об'єктів.

Для оцінки сейсмостійкості будівель і споруд важливо знати спектральний склад коливань ґрунтів майданчика при сильних землетрусах.

У практиці інженерної сейсмології важливим питанням є оцінка впливу резонансних ефектів геологічного розрізу промайданчиків на спектральні властивості сейсмічних коливань при землетрусах. Дана оцінка виконується шляхом розрахунку і врахування амплітудно-частотних характеристик ґрунтової товщі.

Метою даної роботи є чисельна оцінка здатності ґрунтової товщі змінювати частотний склад сейсмічних хвиль завдяки своїм фільтруючим властивостям.

Використаний метод оцінки фільтруючих властивостей ґрунтової товщі заснований на визначенні її амплітудно-частотної характеристики, яка в свою чергу є функцією частоти.

Найважливішою фізичною характеристикою для розрахунку частотних характеристик ґрунтової товщі є швидкісна модель геологічного середовища промайданчика.

Нижче наведено методика і результати побудови швидкісної моделі і розрахунку амплітудно-частотної моделі середовища.

2. Побудови швидкісної моделі середовища

Для отримання швидкісної моделі геологічного середовища проводяться свердловинні і/або польові сейморозвідувальні роботи. Залежно від геологічної будови і умов проведення робіт, при вивченні швидкісних моделей ґрунтового масиву слід застосовувати одну або комплекс таких модифікацій сейморозвідки:

- польові сейморозвідувальні вимірювання методом заломлених хвиль (МЗХ);
- польові сейморозвідувальні вимірювання методом багатоканальних спектральних характеристик поверхневих хвиль;
- вертикальне сейсмічне профілювання (ВСП);
- міжсвердловинне прозвучування.

Головною особливістю сейморозвідувальних робіт при цих дослідженнях, яку слід враховувати при виборі апаратури, методики збудження коливань, їх реєстрації та обробці, є обов'язкове визначення швидкостей поперечних хвиль.

Поряд зі швидкісними моделями, при розрахунку амплітудно-частотних характеристик середовища, важливе значення мають і особливості геологічної будови майданчика досліджень, а також результати оцінки сейсмічної небезпеки.

Нижче наведено деякі приклади вивчення швидкостей геологічного середовища за допомогою свердловинної (ВСП) і польової (МЗХ) сейморозвідки.

При виконанні свердловинних спостережень застосовувалася гірляндна сейсмокоса, що складається з трьох трьохкомпонентних модулів, розташованих з кроком 1 м. Спостереження виконувалися від низу до верху із зсувом коси на 2 м при кожному наступному фіз. спостереженні.

Таким чином, 1-й модуль попереднього фіз. спостереження поєднувався з 3-м модулем подальшого фіз. спостереження для контролю позначки моменту порушення коливань.

Збудження пружних коливань на кожній свердловині відбувалося шляхом ударів кувалди по сталевій плиті з одного пункту збудження, розташованого від гирла свердловини на відстані від 0,5 м до 1 м. Виноси пункту збудження обмежувалися умовами місцевості.

Реєстрація спостережень ВСП проводилася за допомогою цифрової накопичувальної 24-канальної сейсмостанції «Лакколіт-24М» на жорсткий диск персонального комп'ютера.

На першому етапі обробки польових матеріалів, для кожного ПЗ формувалися зведені сейсмограми ВСП.

Процедури обробки зведених сейсмограм ВСП включали в себе м'ютинг початкової частини трас, нормування трас, зменшення некогерентного і когерентного шуму, смугову фільтрацію 20-45-245-300 Гц.

За зведеними сейсмограмами ВСП будувалися годографи перших вступів і фазові годографи поздовжньої хвилі, що проходить, яка розповсюджується вниз по розрізу. У фазові годографи вводяться поправки за фазу коливань, потім фазові годографи порівнюються з годографом перших вступів і будуються узагальнені зведені годографи перших вступів.

Приклад зведеної сейсмограми ВСП після обробки показано на рисунку 1.

За зведеними годографами t_0 розраховуються середні і пластові швидкості поздовжніх хвиль по розрізах свердловин (рис. 2).

Для вивчення швидкісних властивостей верхньої частини розрізу виконувалися польові сейсморозвідувальні роботи методом МЗХ.

Для реєстрації коливань також використовувалася цифрова 24-канальна сейсмостанція "Лакколіт-24М" з комплектом сеймоприймачів, сейсмічних кіс, лінії синхронізації. Польові роботи виконувалися за схемою Z-Z (вертикальна орієнтація сеймоприймачів і вертикальний напрямок удару) і Y-Y (горизонтальна орієнтація сеймоприймачів і горизонтальний напрямок удару). У першому випадку здійснювалася реєстрація поздовжніх хвиль, у другому – поперечних хвиль.

Кожна сейсмічна розстановка відпрацьовувалась по 5-точковій системі спостереження (пункти удару на кінцях коси, в середині і 2 виноси, рівні половині бази прийому). Відстань між пунктами збудження становить 55-60 м, база прийому 115 м, крок між пунктами прийому коливань – 5 м.

Збудження коливань виконувалося ударним способом з накопиченням сигналу від 15 до 60 ударів в залежності від рівня перешкод. Для збудження пружних коливань використовувалося джерело ударного типу (12-кілограмова кувалда). Удари наносилися по металевій підкладці типу «борона». У вертикальному напрямку удари наносилися при збудженні поздовжніх Р-хвиль і в напрямку, перпендикулярному лінії профілю при збудженні поперечних SH-хвиль. Для впізнання хвиль типу SH, записи отримували з протилежно спрямованими ударами. В цьому випадку поперечна хвиля змінює фазу на протилежну, а поздовжня хвиля – ні, за рахунок чого, при подальшому відніманні зареєстрованих сигналів, відбувається знешкодження хвиль-перешкод.

Як і в разі робіт ВСП, крок дискретизації сейсмічних записів 0,5 мс, тривалість запису 1024 дискрети, затримка – 0 мс, смуга фільтрації – відкритий канал. Рівень попереднього посилення по кожному каналу вибирався виходячи з рівня корисного сигналу і інтенсивності хвиль-перешкод і, в середньому, знаходився в межах 72-84 дБ.

Незважаючи на високий рівень техногенних перешкод в умовах промислових об'єктів, і польові і свердловинні сейсмограми характеризуються гарною якістю, що досягається за рахунок збільшення числа накопичень.

Обробка матеріалів МЗХ проводилася на ПЕОМ за допомогою спеціалізованого програмного комплексу в наступній послідовності.

1. Редакція сейсмограм.

2. Регулювання посилення:

- нормування сейсмічних трас;
- автоматичне і програмне регулювання посилення трас;
- центрування трас.

Обробка сейсмограм. З метою знешкодження регулярних та нерегулярних перешкод і оптимізації простеження вісей синфазності застосовувалися такі процедури обробки:

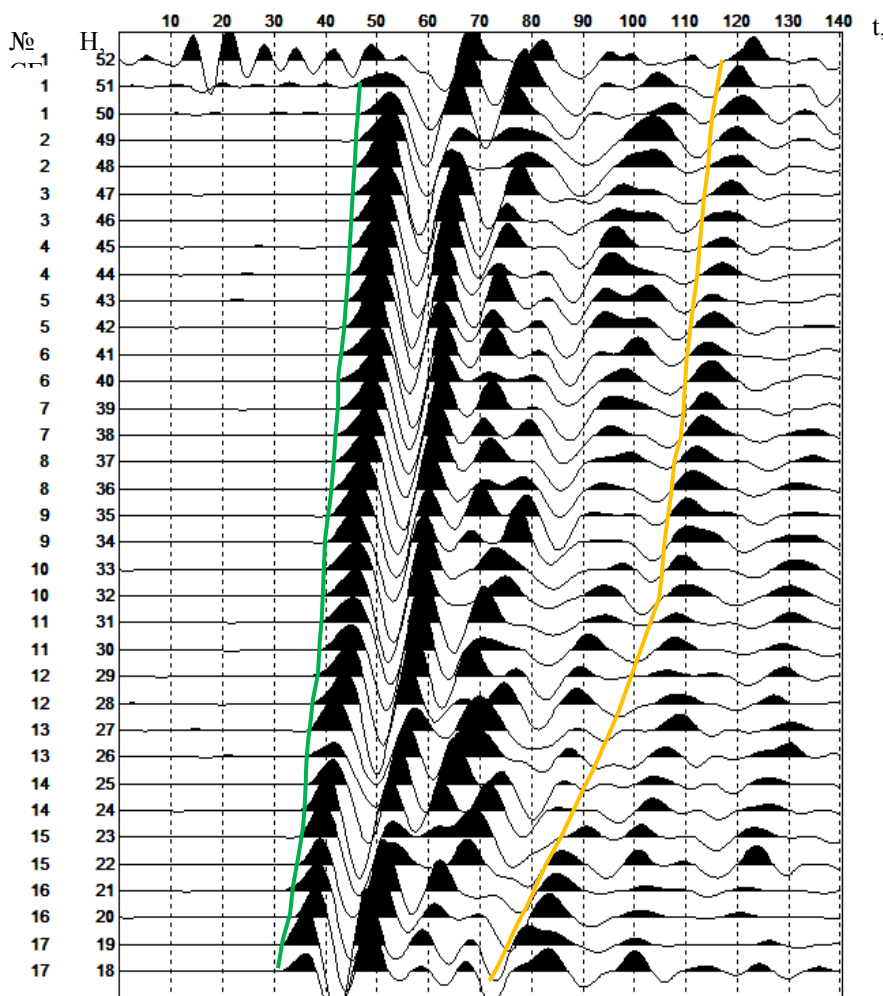
- смугова фільтрація з різними смугами пропускання – від 20-90 Гц до 75-120 Гц, залежно від частотного спектра та інтенсивності перешкод;
- мінімально-фазова деконволюція з інтервалом передбачення від 9 до 17 дискретів.

В ході інтерпретації здійснювалася:

- кореляція годографів заломлених хвиль;
- обробка і редакція спостережених годографів, складання систем зведених зустрічних і наганяючих годографів, обчислення швидкісних законів;
- обчислення граничних швидкостей і побудова заломлюючих границь по системам зустрічних і наганяючих годографів способом пластових швидкостей;
- обробка і редакція заломлюючих границь, складання остаточних глибинних розрізів;
- запис результатів у вигляді текстових файлів;
- побудова глибинних сейсмічних розрізів в потрібному масштабі.

За результатами обробки та інтерпретації даних сейсмічних зондувань МЗХ побудовані швидкісні моделі, що характеризують розподіл в масиві швидкостей сейсмічних хвиль (рис. 3).

Граничні швидкості ототожнюються з пластовими швидкостями поздовжніх та поперечних хвиль.



- - годограф поздовжньої Р-хвилі;
- - годограф обмінної SP-хвилі.

Рисунок 1 – Зведена сейсмограма ВСП. Обробка: мьютінг початкової частини трас + нормування трас + зменшення некогерентного і когерентного шуму + смугова фільтрація 20-45-245-300 Гц.

Свердловина 41-N-PR
Графіки середніх ($V_{ср}$) та пластових ($V_{пл}$) швидкостей V_p и V_s

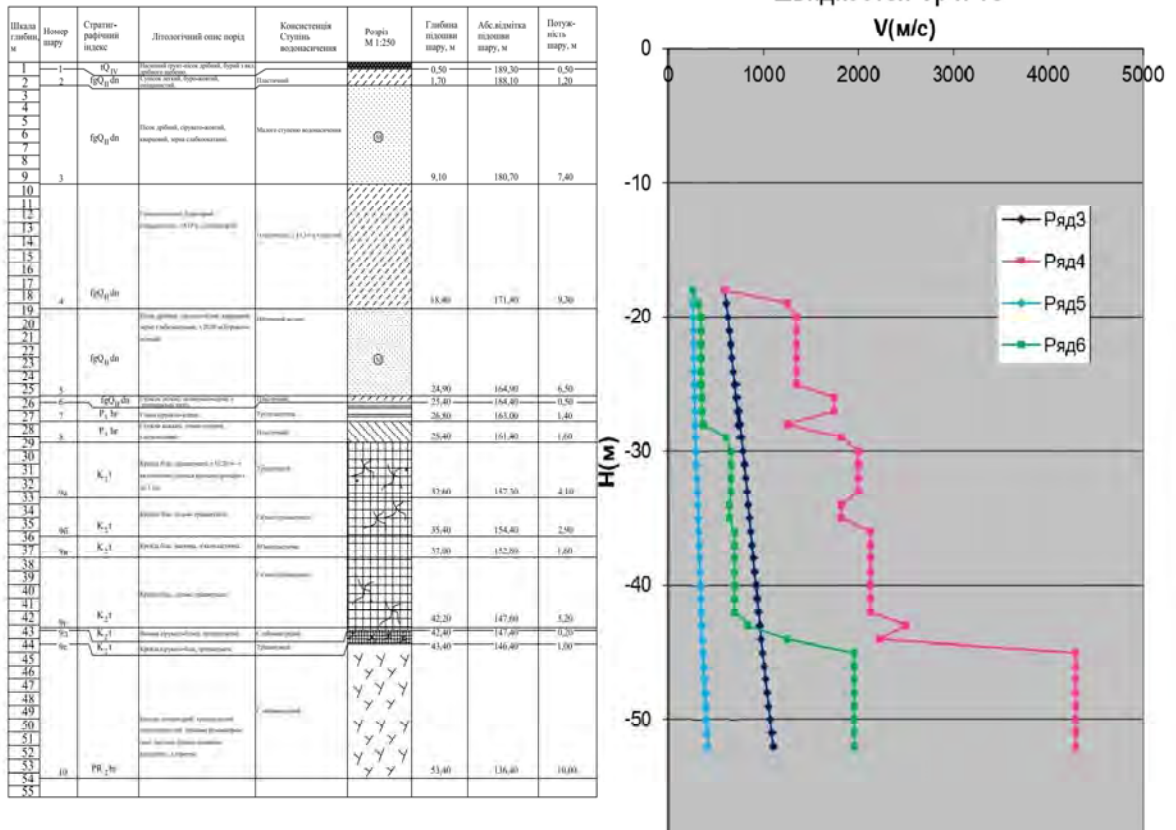


Рисунок 2 – Приклад швидкісної моделі за даними ВСП

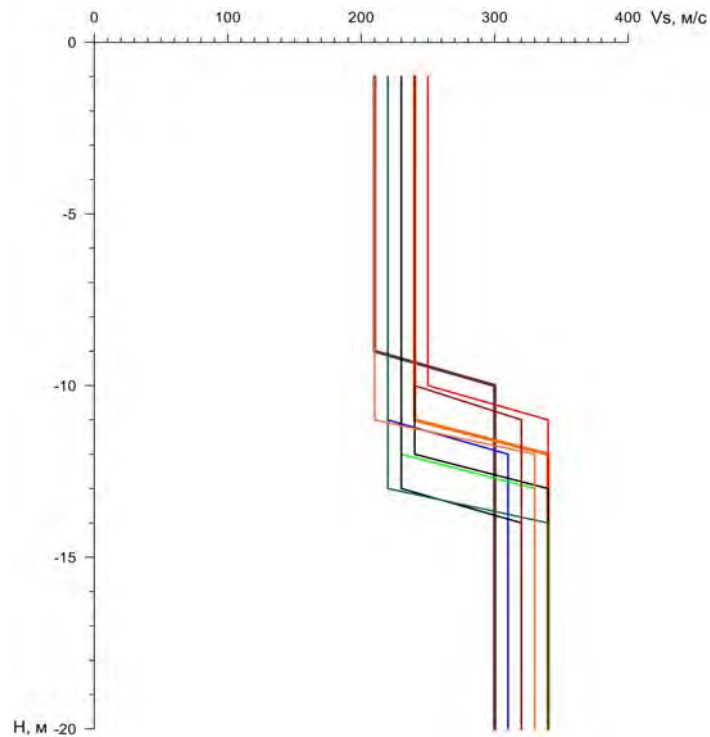


Рисунок 3 – Швидкісні моделі за поперечними хвилями за даними МЗХ

3. Розрахунок амплітудно-частотної моделі середовища

Ґрунт як природна багатокомпонентна система є специфічним нелінійним середовищем для поширення сейсмічних хвиль. Він змінює не тільки динамічні характеристики цих хвиль (аж до повного поглинання або перетворення типу хвилі), а й свої властивості, причому ці процеси невіддільні одне від одного. Ґрунти здатні також змінювати частотний склад сейсмічних хвиль завдяки своїм фільтруючим властивостям. Ці ефекти обумовлені резонансними явищами, поглинанням через неідеальну пружність середовища, розсіювання хвиль на різних неоднорідностях, відображення і перевивчення хвиль на межах шарів.

Шарувате геологічне середовище діє на спектральний склад сейсмічних хвиль аналогічно частотним фільтрам різних типів в залежності від будови і фізичних властивостей самого середовища [2].

На поверхні ґрунтової товщі, що містить кілька шарів, спектри хвиль можуть значно відрізнятися від спектра хвилі падаючої на нижню основу товщі.

Найбільш точний метод оцінки фільтруючих властивостей ґрунтової товщі заснований на визначенні її амплітудно-частотної характеристики, яка в свою чергу є функцією частоти. Амплітудно-частотна характеристика ґрунтів визначає зміни спектральних потужностей коливань ґрунту з урахуванням їх загасання.

При моделюванні сейсмічної реакції ґрунту в якості енергопоглинаючого параметра часто використовують коефіцієнт поглинання (демпфірування). Результати численних лабораторних експериментів на ґрунтах дозволяють стверджувати, що поглинаючі властивості практично не залежать від частоти в діапазоні звичайних сейсмічних навантажень.

Сучасні методи моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи дозволяють розраховувати спектральні характеристики середовища при падінні на її підшву сейсмічної хвилі. Можна використовувати лінійний або нелінійний підхід.

Прийнято вважати, що при малих деформаціях система підкоряється закону Гука. При інтенсивних сейсмічних впливах в ґрунтах виникають явища, які не можуть бути описані лінійною теорією пружності. Нелінійність залежності між напруженнями і деформаціями в ґрунтах при досить високому напруженні призводить до того, що при збільшенні інтенсивності землетрусу порушується пропорційність між напруженням і деформаціями і настає явище насичення, коли напруження зростають повільніше, ніж при менших значеннях деформацій. Значення напружень, при яких зникає пропорційність залежності між напруженнями і деформаціями, є порогом пружності. Поріг пружності для різних ґрунтів може мати відчутні відмінності. Він визначається в першу чергу поглинаючими властивостями ґрунтів.

Для реальних ґрунтових масивів явищу поширення коливань властива нелінійність. В цьому випадку при моделюванні реакції на сейсмічні дії необхідно враховувати нелінійну залежність між напруженнями і деформаціями.

При моделюванні реакції ґрунту на сейсмічні впливи останнім часом значна увага приділяється нелінійним підходам.

Один із способів, що дозволяють враховувати нелінійні властивості ґрунтів – еквівалентне лінійне моделювання. Даний підхід широко застосовується при сейсмічному мікрорайонуванні в багатьох країнах. Метод постійно вдосконалюється [3].

При еквівалентному лінійному моделюванні ґрунт розглядається як лінійний в'язкопружний матеріал, а його нелінійні властивості враховуються шляхом введення залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації зсуву. Такі залежності підбираються залежно від літології геологічних шарів. Важливо розробити правильний підхід до вибору цих залежностей для кожного шару ґрунтової товщі.

На сьогоднішній день в результаті лабораторних випробувань знайдені залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації для ґрунтів різної літології.

Моделювання реакції ґрунту на сейсмічну дію являє собою класичну задачу інженерної сейсмології про поширення сейсмічної хвилі, що падає знизу з пружного півпростору

(скельну основу), в товщі верхніх осадових шарів. Реакція ґрунту повинна розраховуватися з урахуванням нелінійних механізмів перетворення сейсмічних хвиль в ґрунтах. Обчислення проводяться в частотній області ітеративно. Спочатку вибираються приблизні середні значення модуля зсуву і коефіцієнта поглинання в ґрунтових шарах відповідно до заданих значеннями деформацій. За залежностями модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від деформації визначаються ефективні модулі зсуву і коефіцієнти поглинання ґрунту. За ними знову розраховуються деформації і напруження. Якщо розраховані деформації істотно відрізняються від заданих, цикл обчислень повторюється.

Розрахунки амплітудно-частотних характеристик виконувалися з використанням програми SHAKE. В основу роботи програми покладено метод вирішення Канаї хвильового рівняння і алгоритми швидкого Фур'є-перетворення [4].

В ході обчислень визначається амплітудно-частотна характеристика середовища для випадку нормального падіння плоскої поперечної хвилі на горизонтально-шарувату товщу.

Дана програма дозволяє здійснювати рішення, як для випадку лінійного пружного середовища, так і враховувати непружні і нелінійні особливості поведінки ґрунтів. Для врахування особливостей нелінійного поведіння ґрунтів в програмі використовується еквівалентна лінійна модель. Еквівалентна лінійна модель заснована на припущенні, що модуль зсуву і коефіцієнт загасання є функціями деформації зсуву. У програмі SHAKE значення модуля зсуву і коефіцієнту загасання визначаються на підставі ітераційного процесу так, щоб вони відповідали рівням деформацій в кожному шарі. Залежності модуля зсуву і коефіцієнту загасання від деформації зсуву для кожного інженерно-геологічного елемента, що складає розріз, вибираються на основі моделей, отриманих для різних порід (рис. 4).

В умовах багатометрової осадової товщі в районі досліджень складно уявити поширення сейсмічних коливань без нелінійних ефектів. Оцінки, отримані для непружної моделі середовища, на думку авторів, більше відповідають реальній ситуації, ніж оцінки, отримані для лінійної пружної моделі середовища. Основні результати і висновки в цьому звіті отримані в рамках нелінійного непружного середовища.

Розрахунки амплітудно-частотних характеристик геологічного середовища виконувалися для 10 моделей, що відповідають свердловинам ВСП і характеризують можливі варіації геологічної будови і фізичних властивостей проммайданчика.

Амплітудно-частотні характеристики середовища для різних розрахункових моделей наведено на рис. 5.

Як видно з графіків амплітудно-частотних характеристик, для природної основи проммайданчика перший резонансний максимум відповідає частоті 2,0-2,3 Гц.

Для подальших розрахунків було виконано статистичну обробку сукупності амплітудно-частотних характеристик та отримано загальну для проммайданчика амплітудно-частотну характеристику з 84% ймовірністю неперевикнення (рис. 5).

Отримана амплітудно-частотна характеристика геологічного середовища характеризує фільтруючі особливості ґрунтового масиву і буде використана для розрахунків синтетичних акселерограм і спектрів відгуку для подальших розрахунків будівель та споруд на сейсмічні впливи прямим динамічним способом.

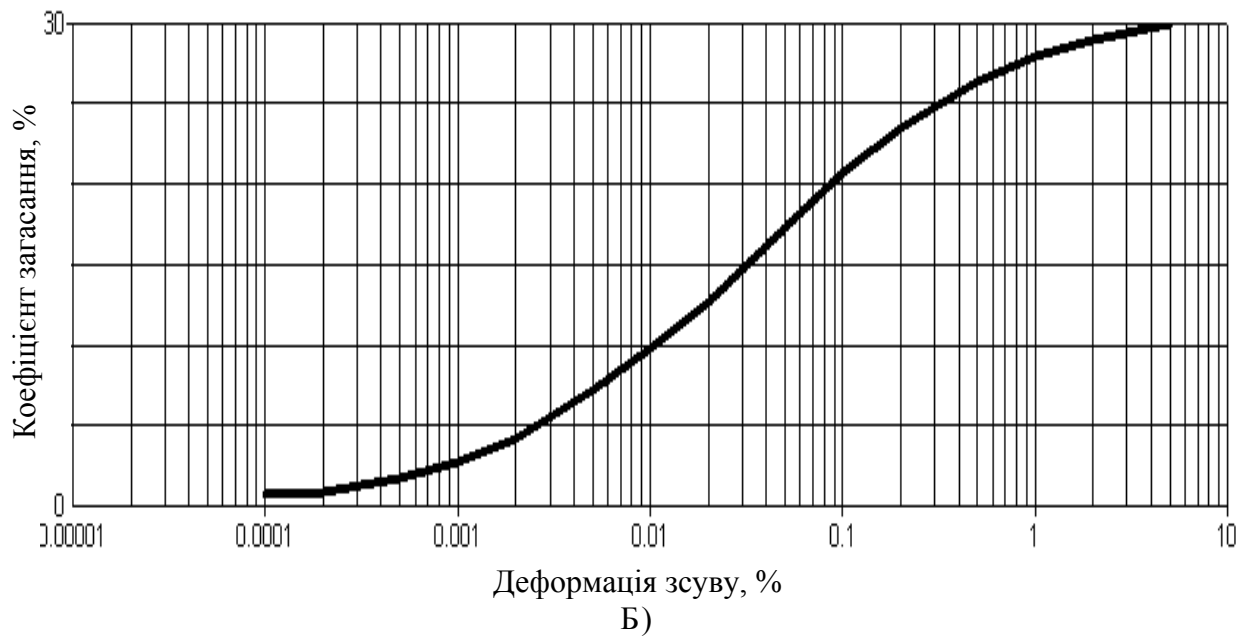
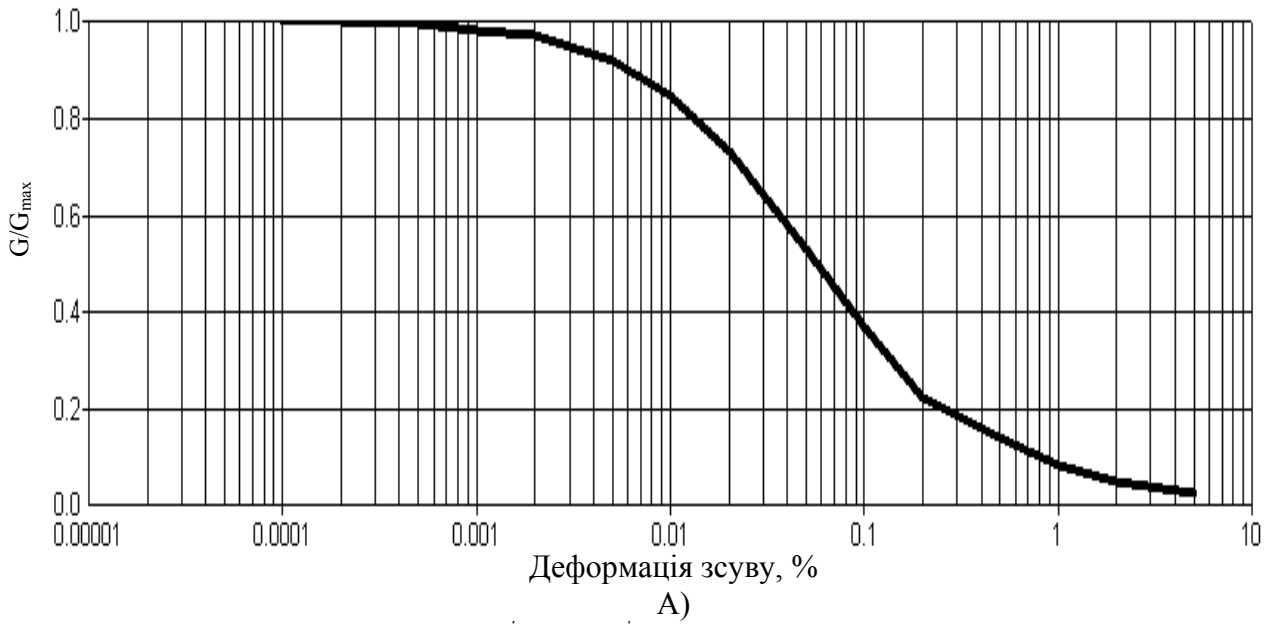


Рисунок 4 – Приклад моделі залежності модуля зсуву (а) і коефіцієнта загасання (б) від деформації зсуву для піску

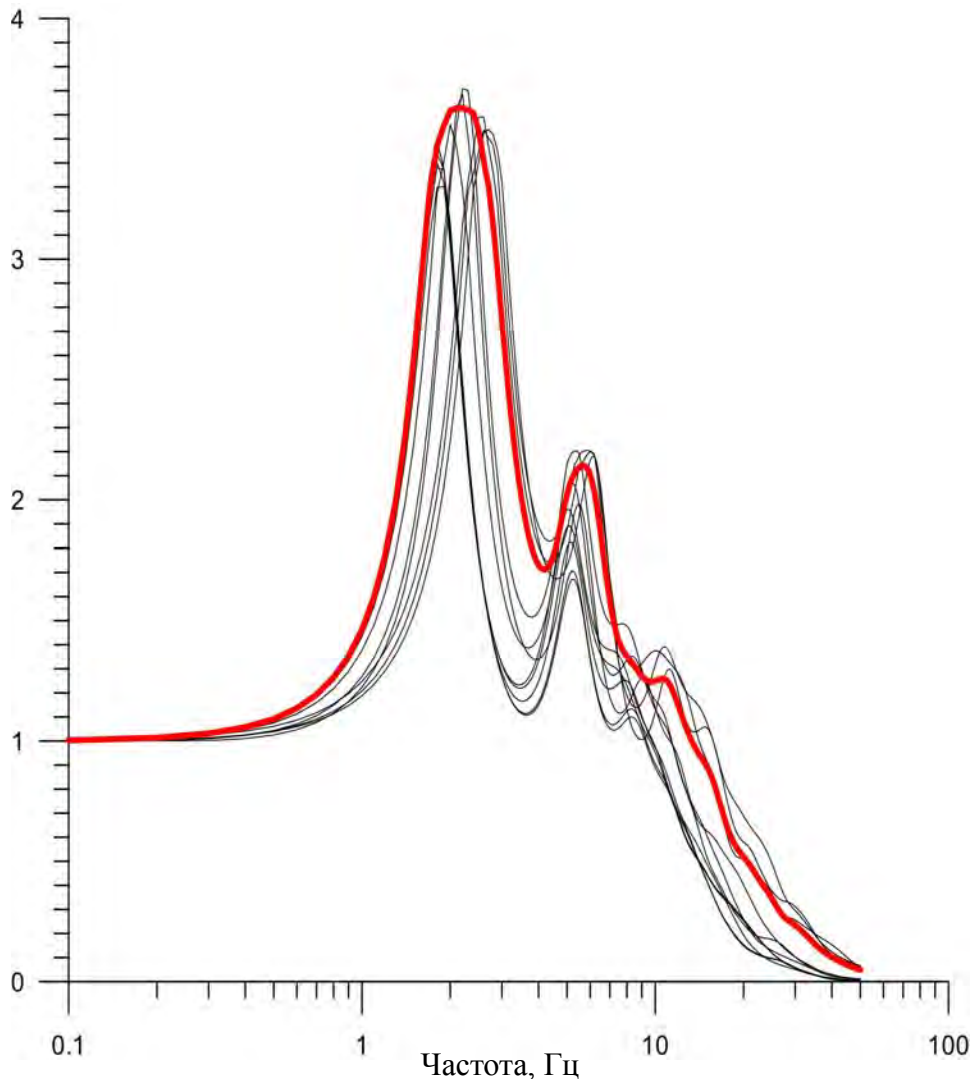


Рисунок 5 – Амплітудно-частотні характеристики середовища

4. Результати.

В роботі розглянуті приклади побудови швидкісних моделей геологічного середовища і методика розрахунку амплітудно-частотних характеристик ґрунтової товщі промайданчика при сейсмічній дії рівня проектного та максимального розрахункового землетрусу.

Для отримання швидкісної моделі геологічного середовища промайданчика проводились свердловинні сейсмозвідувальні роботи методом вертикального сейсмічного профілювання (ВСП) і польові сейсмозвідувальні роботи методом заломлених хвиль (МЗХ).

Розрахунки амплітудно-частотних характеристик геологічного середовища виконувалися з використанням програми SHAKE для моделей, що відповідають свердловинам ВСП і характеризують можливі варіації геологічної будови і фізичних властивостей промайданчика.

Для врахування особливостей нелінійної непружної поведінки ґрунтів в даній роботі використовувалася еквівалентна лінійна модель. Еквівалентна лінійна модель заснована на припущенні, що модуль зсуву і коефіцієнт загасання є функціями деформації зсуву. Залежності модуля зсуву і коефіцієнта загасання від деформації зсуву для кожного інженерно-геологічного елемента, що складає розріз, вибираються на підставі моделей, отриманих для різних порід.

Для подальших розрахунків виконано статистичну обробку сукупності амплітудно-частотних характеристик та отримано загальну для промайданчика амплітудно-частотну характеристику з 84% ймовірністю неперевищення.

Робота виконана на основі власних досліджень без зовнішньої фінансової допомоги.

Список використаної літератури

1. ДБН України В.1.1.12:2014 Будівництво в сейсмічних районах України. – Київ: Мінбуд України, 2014. – 110 с.
2. Кендзера О.В., Семенова Ю.В. Вплив резонансних і нелінійних властивостей ґрунтів на сейсмічну небезпеку будівельних майданчиків // Геофізичний журнал № 2, 2016. – С. 3-18.
3. Кендзера О.В., Семенова Ю.В. Розрахункові акселерограми для прямого динамічного методу визначення сейсмічних навантажень // Геофізичний журнал № 4, 2019. – С. 210-216.
4. Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B. (1972). “SHAKE, a computer program for earthquake response analysis of horizontal layered sites” Report No. EERC72-12.

References

1. DBN of Ukraine B.1.1.12: 2014 Construction in seismic areas of Ukraine. - Kyiv: Ministry of Construction of Ukraine, 2014. - 110 p.
2. Kendera O.V, Semenova Yu.V. Influence of resonant and nonlinear properties of soils on seismic danger of construction sites // Geophysical Journal № 2, 2016. - P. 3-18.
3. Kendzera O.V, Semenova Yu.V. Calculated accelerograms for the direct dynamic method for determining seismic loads // Geophysical Journal № 4, 2019. - P. 210-216.
4. Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B. (1972). “SHAKE, a computer program for earthquake response analysis of horizontal layered sites” Report No. EERC72-12.