

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна

На правах рукопису

УДК 550.34.01

СЕМЕНОВА ЮЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

**МЕТОДИКА ВСТАНОВЛЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ГРУНТОВИХ КОМПЛЕКСІВ ПРИ СЕЙСМІЧНОМУ
МІКРОРАЙОНУВАННІ**

04.00.22 – ГЕОФІЗИКА

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Науковий керівник:

КЕНДЗЕРА ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ

Заст. директора з наукової роботи

ІГФ НАН України, канд. фіз.-мат. наук,

член-кореспондент НАН України

КИЇВ-2016

ЗМІСТ

	ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1	СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПРОБЛЕМИ МЕТОДОЛОГІЇ СЕЙСМІЧНОГО МІКРОРАЙОНУВАННЯ	11
	Висновки до розділу 1	31
РОЗДІЛ 2	МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕКЦІЇ ҐРУНТОВИХ КОМПЛЕКСІВ НА СЕЙСМІЧНІ ВЛИВИ	33
2.1.	Лінійне моделювання	35
2.2.	Еквівалентне лінійне моделювання	41
2.3.	Нелінійне моделювання	45
	Висновки до розділу 2	53
РОЗДІЛ 3.	РОЗРОБКА МЕТОДИКИ АПРОКСИМАЦІЇ РЕАЛЬНИХ ҐРУНТОВИХ КОМПЛЕКСІВ НЕЛІНІЙНОЮ ДЕФОРМАЦІЙНОЮ МОДЕЛЛЮ	54
3.1.	Аналіз факторів, що впливають на зменшення модуля зсуву і збільшення коефіцієнта поглинання	56
3.2	Вплив вибору залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації на параметри частотної характеристики моделі ґрунтової товщі	72
	Висновки до розділу 3	76
РОЗДІЛ 4.	МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ҐРУНТОВИХ КОМПЛЕКСІВ З УРАХУВАННЯМ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЕЙ СЕРЕДОВИЩА І МОДЕЛЕЙ РЕАКЦІЇ ҐРУНТІВ НА СЕЙСМІЧНІ ВПЛИВИ (ЛІНІЙНЕ, ЕКВІВАЛЕНТНЕ ЛІНІЙНЕ ТА НЕЛІНІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ)	78

4.1	Вплив сейсмічних властивостей ґрунту на параметри його частотної характеристики	79
4.2	Вплив потужності осадових відкладів на частотні характеристики ґрунтової товщі	82
4.3.	Вплив нелінійних властивостей ґрунтів на їх реакцію при сейсмічних впливах різної інтенсивності	86
4.4.	Вплив похибок у вхідних даних на результати розрахунків частотної характеристики моделі ґрунтової товщі	92
	Висновки до розділу 4	97
РОЗДІЛ 5.	ВПРОВАДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ҐРУНТОВИХ КОМПЛЕКСІВ	100
5.1.	Частотні характеристики ґрунтів для будівельного майданчика НСК «Олімпійський» в Києві	103
5.2.	Частотні характеристики ґрунтів під будівельними майданчиками житлових висотних будинків в Одеській області	117
5.3	Частотні характеристики ґрунтів під будівельними майданчиками житлових висотних будинків в Києві	118
5.4.	Частотні характеристики ґрунтів ділянок розташування основних споруд Кременчуцької ГЕС	119
5.5.	Частотні характеристики майданчика компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів – Богородчани»	120
	Висновки до розділу 5	122
	ВИСНОВКИ	124
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	128

ВСТУП

Актуальність теми. Характер і розподіл руйнувань при землетрусах в значній мірі визначається реакцією місцевих ґрунтових умов на сейсмічний вплив. Руйнівний ефект визначають спектральний склад та інтенсивність сейсмічних коливань. При сильних сейсмічних впливах поведінка ґрунтів стає нелінійною і проблема оцінки реакції ґрунту суттєво ускладнюється. В таких умовах реакція ґрунту залежить як від складу, фізичних параметрів, потужності і водонасиченості ґрунтових шарів, так і від інтенсивності землетрусу і частотного складу коливань в його джерелі та на кривлі консолідованого фундаменту під майданчиком. При інтенсивних землетрусах може спостерігатися ущільнення і просідання, розпушування і набухання рихлих ґрунтів, а в деяких випадках - розрідження водонасичених ґрунтів та інші небезпечні явища. Нелінійність реакції ґрунту призводить до суттєвої зміни форми і спектра сейсмічних коливань, що розповсюджуються в ґрунтових шарах. Резонансні частоти, на яких спостерігаються підсилення коливань ґрунтів при цьому, виявляються залежними від інтенсивності сейсмічних впливів. При інтенсивних впливах значення резонансних частот можуть помітно понизитись відносно значень, встановлених у результаті проведення інструментальних досліджень методом реєстрації слабких землетрусів, вибухів і короткоперіодних мікросейсм.

Найточніший метод визначення частотних характеристик ґрунтів потребує реєстрації максимально можливих землетрусів безпосередньо на самому майданчику. В умовах України використання цього методу є практично не реальним, у зв'язку з тим, що за короткий час, відведений для сейсмологічних досліджень під проектування, одержати записи землетрусів, в умовах слабкої і помірної сейсмічності, як правило, не вдається. Інші методи, рекомендовані чинними нормативними документами [ДБН В.1.1-12:2014; РСН 65-87; РСН 60-86], базуються на уявленнях про лінійну поведінку ґрунтів при сейсмічних впливах. Нелінійні явища в ґрунтах на даний час не враховуються.

Зростаючі темпи і об'єми будівництва висотних будівель і важливих інженерних споруд вимагають освоєння нових територій, які за експертними оцінками часто характеризуються складними інженерно-геологічними умовами та погіршеними сейсмічними властивостями. Міста розширюються, освоюючи для забудови зазвичай території, ґрунти яких відносяться до III і IV категорій за сейсмічними властивостями, згідно ДБН В.1.1-12:2014. Такі ґрунти мають суттєві нелінійні властивості, які будуть проявлятися по-різному, в залежності від інтенсивності і частотного складу сейсмічних впливів. З огляду на це, врахування нелінійних властивостей ґрунтів є необхідним. Зазначені фактори викликають необхідність удосконалення методики визначення частотних характеристик ґрунтової товщі з врахуванням її нелінійних властивостей для територій із високою і помірною інтенсивністю прогнозованих сейсмічних впливів, до яких відноситься значна частина території України, що обумовлює актуальність теми дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. 1) 1.5.2.149, ДНР теми 0106U000913 «Розвиток теорії та методики дослідження довкілля з метою прогнозування сейсмічної небезпеки» (2006 - 2010 рр.); 2) 1.5.2.160, ДНР теми 107U0022195 «Моніторинг геофізичних полів з метою зниження ризиків від небезпечних природних явищ на території України (2007-2011 рр.)»; 3) 1.5.2.208, III-8-11, ДНР теми 0111U000229 «Розвиток методів прогнозування сейсмічної небезпеки (2011 - 2015 рр.); 4) III-24-12 «Геофізичний моніторинг геодинамічних процесів на території України у зв'язку з вирішенням проблем екологічної та сейсмічної небезпеки». ДНР 0112U003046; 5) III-27-14 «Сейсмічні та геофізичні спостереження на платформній частині території України у 2014-2018 рр.», ДНР 0114U000231; 6) III-8-16 «Розвиток методів вивчення сейсмічності території України та оцінки параметрів сейсмічної небезпеки майданчиків важливих і екологічно небезпечних об'єктів» ДНР 0116U000130; 7) II-7-12 «Геофізичні дослідження будови і динаміки геологічного середовища для зниження небезпеки від

загрозливих явищ ендегенного походження на території України та Росії», ДНР 0112U003451.

У 2016 р. автору призначено стипендію Президента України для молодих вчених.

Мета і задачі роботи. Метою роботи є наукове обґрунтування, розробка та реалізація удосконаленої методики визначення резонансних властивостей ґрунтових комплексів з врахуванням їх нелінійних властивостей для сейсмічного мікрорайонування будівельних майданчиків України.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

1. Розвинути методику розрахунку частотних характеристик ґрунтів з врахуванням їх нелінійної поведінки при інтенсивних сейсмічних впливах. Удосконалена методика необхідна для сейсмічного мікрорайонування будівельних майданчиків на території України.
2. Встановити основні фактори, які визначають параметри амплітудно-частотної характеристики ґрунтової товщі, та дослідити закономірності їх впливу.
3. Розробити алгоритм побудови розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтової товщі для математичного еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання її реакції на сейсмічні впливи.
4. Провести порівняльний аналіз результатів розрахунку реакції ґрунтів під реальними будівельними майданчиками на сейсмічні впливи методами: лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного математичного моделювання - і встановити межі їх використання.
5. Встановити граничні допустимі значення епістемічних і випадкових похибок у параметрах розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтів, при яких забезпечується одержання стійких розв'язків задачі побудови амплітудно-частотних характеристик методом математичного еквівалентного лінійного моделювання.
6. Застосувати та впровадити удосконалену методику розрахунку частотних характеристик ґрунтів з врахуванням їх нелінійної реакції на інтенсивні

сейсмічні впливи при проектуванні, новому будівництві, реконструкції і експлуатації будівель і споруд різного призначення у сейсмічних районах України.

Об'єктом досліджень є реакція ґрунтової товщі під будівельними майданчиками на сейсмічні впливи різної інтенсивності, з урахуванням нелінійних властивостей середовища.

Предметом досліджень є методика моделювання реакції ґрунтової товщі під будівельними майданчиками на сейсмічні впливи для задач сейсмічного мікрорайонування, сейсмостійкого проектування та будівництва

Методи досліджень. Аналіз теоретичних і практичних методів визначення реакції ґрунтів на сейсмічні впливи, вибір оптимального програмного забезпечення для моделювання сейсмічних впливів в нелінійних моделях ґрунтових комплексів, розробка алгоритмів побудови моделей ґрунтових комплексів з врахуванням нелінійних властивостей, формування бази даних про нелінійні деформаційні характеристики ґрунтів, методи математичного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи різної інтенсивності, практичне застосування розробок для побудови частотних характеристик ґрунтової товщі під реальними будівельними майданчиками в Києві і Одесі та інших сейсмічних районах країни.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше запропоновано удосконалену методику визначення резонансних властивостей ґрунтових комплексів під будівельними майданчиками країни, яка враховує нелінійну поведінку ґрунтів при інтенсивних сейсмічних впливах. В основі методики лежить аналітично-емпіричний підхід до розрахунку частотних характеристик ґрунтів.
2. Сформовано нову базу даних, яка в графічному і цифровому вигляді містить інформацію про залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації для різних типів ґрунтів, характерних для майданчиків, розташованих на території України, зокрема в Києві, Одесі та в місцях розташування ряду важливих об'єктів.

3. Вперше розроблено та застосовано на практиці алгоритм побудови розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтів, з підбором їх деформаційних характеристик із створеної бази даних. Моделі необхідні для математичного еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи різної інтенсивності.

4. Вперше встановлено граничні значення епістемічних і випадкових похибок у параметрах розрахункових моделей ґрунтів, при яких забезпечується одержання стійких розв'язків задачі побудови амплітудно-частотних характеристик методом еквівалентного лінійного моделювання.

5. Вперше в Україні при сейсмічному мікрорайонуванні ряду будівельних та експлуатаційних майданчиків (НСК «Олімпійський», газоперекачувальних станцій газопроводу «Кременчук - Ананів - Богородчани», гідротехнічних споруд Кременчуцької ГЕС та висотних будинків в Києві і Одеській області) впроваджено амплітудно-частотні характеристики ґрунтових товщ, побудовані з врахуванням нелінійних властивостей ґрунтів.

Практичне значення одержаних результатів. Розвинуті в дисертаційній роботі методи та алгоритми дозволяють на сучасному рівні вирішувати важливу наукову і практичну проблему визначення (прогнозування) кількісних характеристик сейсмічної небезпеки на будівельних і експлуатаційних майданчиках для цілей сейсмостійкого проектування важливих об'єктів. Вирішено задачу побудови частотних характеристик ґрунтових комплексів під досліджуваними майданчиками шляхом їх теоретичного розрахунку з врахуванням нелінійної поведінки геологічного середовища під дією інтенсивних сейсмічних впливів. Показано, що чисельне вирішення нелінійних задач сейсмології на сучасному рівні знань, вимагає врахування даних польових та лабораторних досліджень, якими встановлено експериментальні кореляційні зв'язки між напруженнями і деформаціями з врахуванням літологічного складу, фізико-механічних параметрів, глибини залягання, величини і тривалості додаткових сейсмологічних навантажень.

Нові теоретичні та методичні розробки автора мають достатні фізико-математичні та інженерно-геологічні обґрунтування. З їх використанням розраховано «аналітично-емпіричні» частотні характеристики ґрунтових комплексів з врахуванням нелінійних властивостей ґрунтів під будівельними майданчиками. Розвинуту автором методику впроваджено при сейсмостійкому проектуванні таких об'єктів, як: НСК «Олімпійський», газоперекачувальні станції газопроводу «Кременчук - Ананів - Богородчани», гідротехнічні споруди Кременчуцької ГЕС, ряд висотних будинків в м. Києві та в Одеській області.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, результати та висновки дисертації, що виносяться на захист, одержані автором самостійно та ґрунтуються на його особистих дослідженнях. В роботах, виконаних у співавторстві, дисертанту належить програмний супровід [1,2,6,8-12], розрахунки частотних характеристик ґрунтів [1,2,6,8-12], аналіз результатів та формулювання висновків [2,3,4,5].

Апробація результатів дисертації. Результати, отримані на різних етапах роботи, були представлені на наукових конференціях: IX міжнародна наукова конференція «Моніторинг геологічних процесів», (Київ, 2009); XVI міжнародна конференція «Свойства, структура, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы», (Воронеж, 2010); Наукова конференція-семінар «Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах», (Львів, 2012); 5-та міжнародна наукова конференція молодих вчених і студентів «Фундаментальная и прикладная геологическая наука: достижения, перспективы, проблемы и пути их решения», (Баку, 2013); II міжнародна наукова конференція молодих вчених «Современные задачи геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства», (Єреван-Гюмрі-Цахкадзор, 2015); Десята ювілейна Всеукраїнська науково-технічна конференція «Будівництво у сейсмічних районах України», (Одеса, 2015).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 12 статтях та 10 тезах.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків та списку літератури, який включає 207 публікацій. Робота викладена на 147 сторінках і містить 51 рисунок

Автор висловлює вдячність науковому керівнику, члену-кореспонденту НАН України Кендзері Олександровичу Володимировичу за постановку задач, об'єктивну критику та цінні наукові поради.

Достовірність отриманих результатів забезпечується чіткою фізичною і математичною постановкою задач поширення хвиль в шаруватому середовищі; дотриманням початкових і граничних умов; використання класичних методів статистичної обробки даних, механіки пружних і непружних середовищ; а також чисельних методів інтегрування рівнянь руху і методів розв'язання диференціальних рівнянь; повнотою використання залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації, що узгоджуються із даними сейсмічних спостережень; застосуванням рекомендованих світовою сейсмологічною спільнотою для практичного використання обчислювальних програмних продуктів, які пройшли ретельне тестування та перевірку.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПРОБЛЕМИ МЕТОДОЛОГІЇ СЕЙСМІЧНОГО МІКРОРАЙОНУВАННЯ

Метою сейсмічного мікрорайонування (СМР) будівельних майданчиків є прогноз поведінки ґрунтів при можливому сильному землетрусі для попередження руйнування будівель і споруд при землетрусах [Сейсмическое..., 1977; Оценка..., 1988; Кендзера, 2010]. Незважаючи на велику кількість робіт в цій галузі, прогнозування поведінки ґрунтів при сильних сейсмічних впливах залишається одною з найактуальніших проблем сейсмології.

Ступінь пошкодження об'єкта під час землетрусу залежить не лише від рівня сейсмічних впливів, але і від якості сейсмостійкого проектування і будівництва. Забезпечення необхідної якості можливе лише при умові правильного прогнозування кількісних параметрів сейсмічної небезпеки майданчика, що здійснюється за допомогою комплексу робіт з СМР [Кендзера, 2015; Kendzera, 2015]. На цю тему в науковій літературі існує велика кількість публікацій: статті, збірники праць конференцій, монографії та ін. В це число входять основоположні «класичні» праці СМР як вітчизняних – С.В. Медведєва, Н.В. Шебаліна, Е.Ф. Саваренського, так і зарубіжних – К.Сюехіро, Н.Ньюмарка, Е.Розенблюта, Ш.Окамото та інших.

Перші повідомлення про вплив ґрунту на прояви сили землетрусу можна зустріти в працях російських та іноземних вчених вже на початку ХХ століття. В постановці проблеми врахування впливу ґрунтових умов значна заслуга належить відомому вченому І.В. Мушкетову [Мушкетов, 1903].

Одна з перших спроб врахувати вплив ґрунту на сейсмічний ефект землетрусу належить Г. Фарбенксу, який описав землетрус в Каліфорнії в 1906 р.

Першу геологічну карту Мессіни склав і наніс на неї інформацію про ступінь руйнувань різних споруд М. Баратта, який досліджував наслідки Калабро-Месінського землетрусу 1908 р. [Baratta, 1910].

Значно вплинули на розвиток СМР дослідження А.Зіберга, який в 1911 р. склав карту бальності для європейських країн [Заалишвили, 2009]. Він ввів поняття зон силового поля, обумовленого землетрусом: зона нормального силового поля, яка знаходиться на глибині залягання кристалічних порід, де ізосейсти мають згладжений вигляд, і зона збуреного поля, яка відносяться до приповерхневої частини ґрунтового комплексу і описується складною формою ізосейст [Заалишвили, 2009]. Коливання кристалічних порід використовуються як вхідний рух землетрусу, а перераховані на поверхню ґрунту – як проектний рух при прогнозованому землетрусі. Таким чином, Зіберг в 1911 р. вперше розділив задачі сейсмології, щодо одержання прогнозованих сейсмічних впливів на будівельному майданчику, і задачі антисейсмічного (сейсмостійкого) будівництва, щодо врахування прогнозованих впливів при проектуванні сейсмостійких споруд. Для кількісного врахування впливу ґрунтів на зміну інтенсивності сейсмічних струшувань, були введені так звані ґрунтові коефіцієнти, які характеризують відношення прискорень на поверхні осадової ґрунтової товщі до прискорень на поверхні кристалічного фундаменту. При переході від алювію і пісків до торф'яників значення коефіцієнтів змінювались в 3 – 16 разів відповідно, що давало приріст бальності 1 – 4 бали (шкала Меркалі). До «безпечних» порід були віднесені кварцити, щільні вапняки, мармури, доломіти. Пісковики, граніти, базальти, туфи мали приріст інтенсивності 1-3 бали. Зіберг відмітив можливість резонансного підсилення коливань в рихлих ґрунтах і небезпечність будівництва на гірських схилах, складених рихлими відкладами, особливо водонасиченими.

Прирости бальності, представлені Зібергом, були багато в чому незрозумілими. Ґрунти, які значно різнилися за сейсмічними властивостями попадали в одну категорію. Наприклад, інтенсивність на алювіальних, піщаних, водоносних відкладах може відрізнятись за сучасними уявленнями на 3 – 4 бали від інтенсивності на кристалічних породах, а не на два бали, як вважав Зіберг. При великих розходженнях приросту бальності, згідно

запропонованої ним таблиці, відпадала можливість їх співставлення. Саме тому, в подальшому, при СМР майданчиків вносилися уточнення, вводилися додаткові параметри, які краще характеризували фізико-механічні властивості різних типів ґрунтів.

Ідея використання ґрунтових коефіцієнтів, запропонована Рейдом, Тамсом і Зібером, виявилась плідною. В роботі [Singh et al., 1988] відмічається, що в 1985 р. в Мехіко-Сіті коефіцієнт підсилення досягав 56, тобто на поверхні рихлого ґрунту прискорення в 56 раз перевищували коливання на скальному ґрунті. Відповідний показник досягав 40 при землетрусі на о-ві Хоккайдо [Kudo, 1995]. Дослідженню коефіцієнтів підсилення присвячені роботи [Abbis, 1989; Dravinski, 1983; Rogers et al., 1984; Seed et al., 1988; Hauksson et al., 1987; Aki, 1988; Suetomi, 2004]. Російські вчені В.В. Попов, С.М. Медведев і К.І. Добровольський, на основі спеціальних польових досліджень для кількісної оцінки впливу локальних ґрунтових умов на сейсмічний ефект, також підтримали ідею використання ґрунтових коефіцієнтів.

Вплив локальних ґрунтових умов на величину руйнувань вагомо підтвердили матеріали макросейсмічних досліджень Японського землетрусу 1923 р. Результати досліджень викладено в роботі [Сюехиро, 1935]. Було встановлено, що на рихлих водонасичених відкладах ріки Судіми, спостерігалися більші руйнування, ніж на щільніших делювіальних суглинках, з яких склалися схили пагорбів.

Підтвердженням того, що на ступінь сейсмічної небезпеки території сильніше впливають ґрунтові умови, ніж магнітуда або енергія землетрусу, стали наслідки землетрусу в провінції Квебек в Долині Лоуренса (Канада) в 1925 р. На відстані понад 100 км від вогнища були виявлені найсильніші пошкодження і руйнування в будівлях, в основі яких були рихлі відклади ріки Св. Шарля. При цьому сталеві конструкції зерносховища були зігнуті, бетонні перекриття скинуті, основи колон з перенапруженого залізобетону зім'яті. В той же час на відстані приблизно 800 м від вогнища землетрусу в великому

готелі, побудованому на скельному схилі, мешканці майже не відчули цей землетрус. Локальна інтенсивність на рихлих відкладах склала при цьому 8 балів, а на скельних ґрунтах – 3 бали згідно модифікованої макросейсмічної шкали Меркалі (MM) [Smith, 1962]. Таким чином, відмінність в поведінці споруд, обумовлена ґрунтовими умовами, досягала 5 балів. При цьому до сейсмічного ефекту, обумовленого фізико-механічними властивостями ґрунтів, очевидно, додалися, резонансні ефекти.

В роботі [Кригера и др., 1980], досліджувалися спектральні характеристики коливань ґрунтів, збурених вибухами для імітації реальних сейсмічних впливів. Було встановлено збільшення сейсмічної інтенсивності в результаті замочування лесових ґрунтів.

Деякі дослідники а початковій стадії досліджень недооцінювали вплив фізико-механічних властивостей ґрунту на інтенсивність проявів землетрусу [Бовенко, Донцова, 1987; Халтурин и др., 1990; Beresnev et al., 1994]. Ці дослідники застосовували спрощений підхід (диференціацію ґрунтів за їх сейсмічними властивостями), але з часом їх підходи удосконалювалися. Зазначимо, що метод інженерно-геологічних аналогій застосовують лише на першій з трьох стадій СМР майданчиків. Кількісні оцінки потребують спеціальних інструментальних досліджень методами сейсмічних жорсткостей і методом реєстрації землетрусів, спеціальних вибухів і високочастотних мікросейсм.

Кількісна оцінка сейсмічної небезпеки ґрунтів за допомогою розробленого в кінці 1950-х років інструментального методу СМР (метод сейсмічних жорсткостей) на той час була найбільш обґрунтованою. Враховуючи, що сильні землетруси відбуваються рідко, метод сейсмічних жорсткостей С.В.Медведєва [Медведев, 1962] на десятиліття став основним при СМР майданчиків.

Приклади руйнівних землетрусів останніх десятиліть (Спітак, 1988; Лома Пріета, 1989; Нортридж, 1994; Кобе, 1995; Нефтегорськ, 1995; Тайвань, 1999; Гуджарат, 2001) показують, що пошкодження будівель і споруд на

різних ґрунтових умовах істотно відрізняються. Часто руйнуються міцні і, на перший погляд, «сейсмостійкі» споруди. В той час, як менш міцні малоповерхові будівлі - залишаються не пошкодженими. Подібне явище мало місце під час землетрусу 19 вересня 1985 року з $M = 8,0$ на узбережжі Мексики. На відстані 400 км, в нижній частині Мехіко-Сіті, розташованої на пухких озерних відкладах, що підсилили коливання на певних частотах в спектрі землетрусу, переважали руйнування 5 – 15 поверхових будинків. У той же час на відстані декількох кілометрів в будівлях, розташованих на вулканічних (метаморфічних) породах, землетрус відчувався мало або взагалі не викликав пошкоджень. Інструментально було встановлено, що амплітуди прискорення коливань на критичних частотах на скельних ґрунтах становили лише 10% від виміряних на ґрунтах в районах, де спостерігалися сильні пошкодження. Сильні руйнування в Мехіко-Сіті від віддалених землетрусів траплялися і раніше, що знайшло відображення в будівельних нормах. Однак при землетрусі 1985 р. підсилення амплітуди коливань в Мехіко-Сіті перевищило очікуване [Lermo et al., 1988; Singh et al., 1988], що підтвердило необхідність формування більш надійних і адекватних моделей поведінки ґрунту при сильних і тривалих сейсмічних впливах.

В роботі [Шейдеггер, 1981] стверджується, що головною причиною пошкодження будівель при низьких частотах коливань (нижче 2 Гц) є резонансні підсилення прискорення коливань ґрунту.

Довгий час залишалося незрозумілим, яка величина прискорення ґрунту є границею поділу слабких і сильних рухів. Основоположник інженерної сейсмології професор Сюехіро, за результатами аналізу записів руйнівного Японського землетрусу 1923 року, писав про можливе «жахливе» прискорення на пухких ґрунтах р. Судіми рівному $\ddot{y}_{max} = 0,3g$ [Сюехіро, 1935].

Аналіз сучасних уявлень про зв'язок інтенсивності сейсмічних струшувань (бальністю) і прискоренням коливань ґрунту показує, що в сейсмічній шкалі ММ (модифікованій шкалі Меркалі) з 1955-х рр. величина пікових прискорень ґрунтів зросла, принаймні, в 5 разів і досягла для 7-9 балів

значень $0,1 - 0,55 g$, відповідно [Поляков, 1978]. В той же час реєстрація прискорень, що перевищують g , робить застосування зазначеного параметра в сейсмостійкому будівництві, на перший погляд, невизначеним і недоцільним. В роботі [Заалишвили, 2009] відзначається, що хоча використання пікових прискорень, очевидно, є переважним для цілей сейсмостійкого будівництва, більш реальним є застосування деякого ефективного його значення. Для ділянки Пакойма з виявленим прискоренням $\dot{y}_{max} = 1,15 - 1,25 g$, наприклад, ефективно прискорення ґрунтів було оцінено Ньюмарком в $0,75 g$.

В роботі [Ньюмарк, Розенблют, 1980] вказується, що Хаузнер, виходячи з деяких припущень про фізико-механічні властивості гірських порід, прийшов до висновку, що максимально можливе прискорення ґрунту може досягати $0,5g$. У той же час на основі теоретичних розрахунків Амбрасейс показав, що можливими є землетруси з прискоренням ґрунтів до $2g$. Взагалі інженери при обстеженні епіцентральної зони сильного землетрусу, як правило, приходили до висновку, що там повинні були реалізуватися коливання з дуже високими прискореннями. До того, як з'явилися перші записи прискорень при так званих сильних рухах, відповідні прискорення ґрунтів встановлювалися за величиною виконаної роботи при переміщенні предметів (тобто за зміщеннями) та рядом інших способів [Ambraseys, 1970]. Відзначимо, що за деякими даними при землетрусі в Ассамі (1897 р.) реальне прискорення ґрунтів значно перевищувало $0,42 g$ і досягало $1,5 g$ [Ньюмарк, Розенблют, 1980]. Про таку можливість писали Фремд і Штейнберг [Фремд, Штейнберг, 1973; Zaalishvili. 1998].

Минуло багато років і розрахунки Амбрасейса підтвердилися найдраматичнішим чином за макросейсмічними проявами і результатами аналізу записів цілого ряду сильних землетрусів.

Так, при землетрусі в Ірані в 1990 р. були зареєстровані пікові прискорення ґрунтів $0,5 g$, тоді як в епіцентрі прискорення мали б досягати $0,7 g$ [Moinfar, Naderzadeh, 1994]. В Японії при землетрусі на острові Хоккайдо в 1993 р., при головному поштовху з магнітудою $M = 7,8$ прискорення досягало

0,4 – 0,9 g. При найсильнішому афтершоці того ж землетрусу з магнітудою $M = 6,5$ було зареєстровано максимальне прискорення 1,6g. В той же час амплітуда прискорення коливань ґрунтів другої горизонтальної складової була в 4 рази меншою і становила 0,4 g [Kudo, 1995]. Остаточно підтвердила висновок про відсутність різкої зовнішньої границі в шкалі прискорень реєстрація прискорення ґрунтів при Нортріджському землетрусі з величиною 1,82g в США (1994 р.), результати дослідження якого опубліковані в роботі [Finn et al., 1994]. Подібний висновок підтверджується даними інструментальних спостережень Нахаїнського землетрусу в Канаді (1986 р.), при якому прискорення ґрунтів досягало значення 2,37 g [Петров, 1997].

В роботі [Заалишвили, 2009] вказується, що при оцінці сейсмічної небезпеки не можна надійно визначати інтенсивність землетрусу в конкретному пункті одним лише піковим прискоренням як величиною, що залежить лише від магнітуди і епіцентральної відстані. Підтвердження цього можна знайти в роботі [Kudo, 1995], в якій відмічається, що пошкодження будівель в місці зареєстрованого високого прискорення 1,6g були незначними. Автор пояснює це нелінійністю поведінки ґрунту. Таке ж явище спостерігалось і при Нотріджському землетрусі в районі з прискоренням 1,82g [Trifunac, Todorovska, 1998].

Спостереження за сейсмічними хвилями показують, що при розповсюдженні хвилі від джерела амплітуди коливань зменшуються внаслідок розходження і загасання сейсмічних хвиль. В роботі [Chopra, 1981] відзначається, що загасання коливань, пов'язане з поглинанням енергії геологічним середовищем, є показником нелінійної поведінки ґрунтів і залежить від багатьох факторів.

З'ясуванням природи поглинання енергії сейсмічних хвиль вперше почали займатися Б.Б. Голицин [Голицин, 1912] і Х. Джеффріс [Jeffreys, 1917]. В даний час існує велика кількість літературних джерел, в яких розглядається природа поглинання сейсмічних хвиль в ґрунтових середовищах. Різними авторами пропонуються різні механізми поглинання.

Один з них пояснює теорія в'язкого тертя, заснована на властивості неідеально пружних (в'язких тіл) чинити опір при переміщенні однієї частини середовища відносно іншої. Фізична сутність цього явища була розвинута і детально досліджена Л.І.Мандельштамом, М.А. Леонтовичем і отримала розвиток в роботах Л.Д. Ландау і Є.М. Лівшиця [Ландау, Лівшиц, 1954].

Другий механізм ґрунтується на припущенні Л. Больцмана, згідно з яким деформація залежить не тільки від напруження в даний момент часу, але і від напруження в усі попередні моменти часу, тобто матеріал володіє «пам'яттю» (пружно-в'язке середовище Кельвіна – Фойгта). Теорію, засновану на врахуванні пружної післядії, активно розвивали Кельвін, Фойгт та Б.В. Дерягин [Дерягин, 1931], а також підтвердили інші дослідники (див. бібліографію [Menzel H., 1954]).

З інших пояснень фізичної природи неідеальної пружності ґрунтових середовищ можна привести гіпотезу О. Форч [Fortsch et al., 1948], згідно якої при поширенні сейсмічних хвиль в твердому середовищі виникає сила тертя, пропорційна швидкості переміщення частинок середовища одна відносно одної. Френкель запропонував теорію поширення сейсмічних хвиль в водонасичених осадових породах, згідно якої, в результаті тертя між твердою і рідкою фазою, може бути перехід пружної енергії в інші її види, зокрема в електричну [Френкель, 1944]. В подальшому М. Біо [Biot, 1954] удосконалив теорію поглинання в насичених пористих середовищах, розглядаючи в якості основного механізму, що приводить до втрат енергії, в'язке тертя між частинками.

В сучасній літературі даних про природу загасання хвиль напружень в ґрунтах є дуже мало. Фізична природа поглинання енергії при коливаннях залишається мало вивченою. На сьогоднішній день нема єдиної теорії поглинання хвиль, яка б достатньо повно і з урахуванням всіх фізичних явищ могла б пояснити закономірності поглинання сейсмічних хвиль в різних породах. Можливо це можна пояснити тим, що загасання є частотно-залежною величиною і, відповідно, вивчення впливу різних факторів в значній мірі

залежить від частотних можливостей вимірювальної апаратури. Більшість даних отримано для високочастотного діапазону (50 – 100 Гц) [Берзон и др., 1963; Васильев, 1962]. В той час як діапазон частот, який вивчається при СМР, складає від 0,05 до 20 Гц. Саме цей діапазон представляє найбільший інтерес при СМР, оскільки саме в ньому знаходяться частоти коливань основних типів будівель, споруд та їх відповідальних конструкцій, а також максимуми спектрів коливань при сильних землетрусах. Поява потужних джерел коливань багатократної дії дозволила при визначенні коефіцієнтів поглинання знизити діапазон частот в бік частот реальних землетрусів. Але це не допомогло створити єдину теорію поглинання хвиль.

По сьогоднішній день нема єдиної думки про те, що в більшій мірі впливає на параметри затухання сейсмічних хвиль в ґрунтових товщах: ступінь суцільності середовища чи літологічний склад порід [Вознесенский и др., 2014]. Ті фактори, які сприяють збільшенню суцільності і жорсткості середовища, призводять до поліпшення її добротності та зменшення коефіцієнта поглинання. Саме на ці сейсмічні характеристики середовища впливає збільшення тиску і температури з глибиною. Крім параметрів середовища поглинання залежить також від частоти коливань [Лоссовский, 2000]. На даний момент існують різні точки зору на цю залежність. Більшість дослідників вважають, що залежність має степеневий характер, але, з іншого боку, в обмеженому діапазоні частот вона непогано апроксимується лінійною залежністю. Оскільки експериментальних робіт з вивчення поглинання існує дуже мало, всі вище перераховані питання і суперечки залишаються досі без однозначних відповідей.

В роботі [Поляков, 1978] відмічається, що, з точки зору інженера-проектувальника, особливий інтерес представляють частотні особливості коливань ґрунтів. Залежно від типу і потужності пластів коливання на одних частотних інтервалах можуть вибірково підсилюватися, а на інших - не змінюватися, або практично повністю поглинатися. Це явище є пов'язане з

збудженням хвилями різних типів власних коливань ґрунтових пластів поблизу вільної поверхні.

Питанням підсилення сейсмічних впливів ґрунтовими умовами присвячено багато публікацій [Мушкетов, 1903; Сюехиро, 1935; Медведев, 1962; Кригер и др., 1980; Dravinski, 1983; Rogers et al., 1984; Hauksson et al., 1987; Singh et al., 1988; Seed et al., 1988; Оценка влияния..., 1988; Aki, 1988; ; Abbis, 1989; Kudo, 1995; Suetomi, 2004; Заалишвили, 2009; Алёшин, 2010; Стародуб, 1986, 1996, 1998; Малицький, 1998, 2003, 2008; Кендзера, 1989, 1996, 2010, 2015].

При збігу частот коливань ґрунтів з власними частотами коливань будівель (споруд) виникають резонансні явища, які є одною з найпоширеніших причин їх пошкоджень і руйнувань. При виникненні резонансу, різко зростають напруження в конструкціях споруд і ймовірність їх руйнування підвищується. Особливо небезпечним є резонансне підсилення коливань будівель і споруд, в яких центр тяжіння значно віддалений від точки опори, що характерно для висотних будівель, мостових опор, труб та ін. Як правило, об'єкти такого типу характеризуються низькими значеннями власних загасань.

При землетрусі Лома-Прієта в Каліфорнії (1989 р.) з $M = 7,1$ найбільше постраждала частина Сан-Франциско, розташована на молодих морських глинистих відкладеннях. Зареєстровані сейсмограми землетрусу показали, що, у порівнянні з іншими ділянками, амплітуди сейсмічних коливань на молодих морських глинистих відкладеннях були підсилені в 6 – 10 разів для коливань з частотами близько 1 Гц і в 2 – 3 рази з частотами 3 – 5 Гц [Вознесенський Е.А., 1999]. Варто відзначити, що власні частоти багатьох зруйнованих 3-4-поверхових будинків якраз складали 2,5 – 3 Гц.

Драматичний також приклад Мехіко, розташованого в 300 км від епіцентру землетрусу 1985 р. з $M = 8,1$. В окремих частинах міста резонансне підсилення сейсмічних коливань з періодами близько 2 с досягло 75 разів. Це

призвело до вибіркового руйнування 15-25-поверхових будівель (з близькими власними періодами коливань) і до загибелі 10 тис. осіб.

У зв'язку з можливістю виникнення резонансних явищ для проектування сейсмостійких будівель необхідні не тільки відомості про силу і місце можливих землетрусів, але й надійні дані про власні періоди коливань проєктованих об'єктів і резонансні властивості ґрунтів в їх основі. Ґрунтова товща під будівельним майданчиком веде себе як фільтр: на деяких частотах вона передає коливання майже без змін, а на інших - підсилює їх, або послаблює. При проектуванні сейсмостійких будівель і споруд важливо не допускати, щоб максимуми частотної характеристики ґрунтової товщі співпадали з власними частотами будівель і споруд.

Найточніший метод оцінки резонансних властивостей ґрунтів ґрунтується на визначенні їх частотної характеристики, яка є комплексною функцією частоти. Частотна характеристика (ЧХ) дозволяє отримати інформацію про зміну, в заданому частотному діапазоні, інтенсивності коливань на поверхні ґрунтової товщі або у внутрішніх точках середовища.

Іноді замість терміна амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) в літературі використовують поняття коефіцієнта спектрального посилення М. Бат [Бат, 1980]. Гусев А.А. [Гусев, 2002] пропонує користуватися близькими за змістом термінами «приріст логарифма спектра реакції» або «приріст логарифма спектра Фур'є».

ЧХ середовища можна визначати емпірично, або розраховувати теоретично. Для розрахунку ЧХ використовують моделі середовища побудовані за даними при його будову і фізико-механічні властивості.

Емпіричні частотні характеристики ґрунту визначаються за допомогою прямого методу реєстрації коливань на поверхні ґрунту та в свердловинах на кривлі фундаменту з подальшим діленням спектрів коливань на поверхні на спектр коливань на підшві осадового шару. За допомогою опосередкованих методів, наприклад методу Накамури [Nakamura, 2000]. А також шляхом реєстрації землетрусів, спеціальних вибухів та мікросейсм на «еталонних

грунтах» і на різних ділянках (таксонометричних одиницях) досліджуваних майданчиків.

Найкращим вважається метод, заснований на реєстрації коливань від сильних землетрусів. Однак такі землетруси відбуваються досить рідко і, як правило, лише в сейсмоактивних регіонах. На жаль усі емпіричні методи вимагають або проведення тривалих спостережень, або відносно затратного буріння свердловин, а також розв'язання некоректних (по Адамару) обернених задач сейсмології. З огляду на зазначене, актуальними стають розрахункові методи побудови частотних характеристик ґрунтової товщі будівельного майданчика шляхом розрахунку сейсмічних коливань в сейсмогеологічних моделях ґрунтової товщі, побудованих за даними інженерно-геологічних вишукувань під будівництво. Розрахункові методи є економічно вигідними завдяки малій затратності. Вони широко використовуються в країнах з слабкою і невисокою сейсмічністю.

Слід зазначити, що розрахункові методи забезпечують достатньо точні результати лише при наявності надійних інженерно-геологічних та сейсмологічних даних про будову ґрунтової товщі будівельного майданчика, а також про літологію геологічних шарів і їх фізико-механічні властивості. На основі зазначених даних будуються моделі ґрунтового середовища під будівельним майданчиком, які є вхідними даними при використанні розрахункових методів визначення його частотних характеристик.

На даний час загальноприйнятими вважаються два типи моделей ґрунтових середовищ: з довільними границями розділу та горизонтально-шаруваті вертикально-неоднорідні моделі.

Для розрахунку сейсмічних полів в моделях середовища з довільними границями розділу використовуються метод скінчених елементів [Гогелія А.А., Напетваридзе Ш.Г., 1977; Галлагер Р., 1984], метод кінцевих різниць [Luco E.J. et al., 1995], комбінований матрично-скінченоелементний метод [Стародуб Ю.П., 1998], променевий метод [Аки К., Ричардс П., 1983], метод Акі-Ларнера [Horigike M. et al., 1990]. Перевагою цих методів є відсутність

обмежень на геометрію границь, а недоліком - практична відсутність можливості побудови за реально існуючими результатами інженерно-геологічних вишукувань, моделей, які б адекватно і надійно відображали реальне середовище. З досвіду відомо, що навіть незначні похибки у параметрах складно побудованих моделей приводять до суттєвих змін в просторовому розподілі параметрів сейсмічних полів на досліджуваному будівельному майданчику.

Отримання даних для побудови горизонтально – шаруватих моделей середовища є значно простішим і реальнішим. Розраховані в таких моделях поля є стійкіші до похибок у вхідних даних. У зв'язку з цим використання саме горизонтально-шаруватих моделей передбачається ДБН В.1.1-12:2014 та Єврокод-8. Для розрахунків частотних характеристик таких моделей геологічного середовища використовується матричний метод Томпсона-Хаскела [Haskell N.A., 1951]. Ще в 1950 р. В. Томпсоном, а в 1953 р. Н. Хаскелом вперше було запропоновано метод побудови інтерференційних полів шляхом моделювання пружних хвиль в шаруватому ізотропному півпросторі з плоско паралельними границями. Матричний метод розвинуто в роботах [Haskell 1953, 1960, 1962; Ратникова, 1973; Кеннет, 1979; Акі, Річардс, 1983; Молотков 1984,; Стародуб, 1996, 1998; Малицький, 2010]. Зокрема, Л.А. Молотков отримав стійкі алгоритми розрахунку сейсмограм для всіх кутів поширення сейсмічних хвиль. Він узагальнив матричний метод для низькочастотних хвиль в неоднорідних пружних концентричних циліндричних і сферичних шарах, оточених пружним середовищем. Було введено поняття характеристичної матриці, яка визначається фізичними параметрами всього середовища. Згідно матричного формалізму кожен пружний шар характеризується деякою матрицею з фізичними параметрами, а вся система описується так званою характеристичною матрицею всього середовища.

При оцінюванні сейсмічної небезпеки все більше уваги останнім часом приділяється нелінійним явищам, які виникають в ґрунтах при досить

інтенсивних землетрусах [Singh et al., 1988; Woods, 1991; Yoshida, Iai, 1998; Павленко, 2009; Заалишвили 2009; Hashash et al., 2010; Алешин, 2010; Bolisetti, 2014].

Традиційна сейсмологія заснована на припущенні лінійної залежності напружень і деформацій у часовому діапазоні від 0,01 с до 10000 років. Про відхилення від цієї залежності сейсмологи знають давно [Алешин, 2010]. Вважалось, що нелінійні процеси відбуваються тільки в зоні вогнищ землетрусів, а, починаючи з деякої референц-сфери, процеси поширення сейсмічних хвиль розвиваються відповідно до лінійних уявлень. З квазілінійності сейсмічних процесів в далекій від вогнища зоні впливає принцип суперпозиції і багато інших простих і корисних для аналізу сейсмічних полів наслідків. У зв'язку зі складністю опису нелінійних процесів ними часто нехтували.

Значний інтерес до нелінійних процесів і нелінійних властивостей ґрунтів з'явився лише порівняно недавно з впровадженням в практику вібраційних методів збудження коливань для вивчення геологічного середовища. Сучасний сейсмічний вібратор дозволяє створювати динамічні напруження в ґрунті близько 1 кгс/см^2 [Алешин, 2010]. За традиційними уявленнями вважалося, що ці напруження не настільки великі, щоб бути причиною значних нелінійних спотворень сигналу. Але в дійсності нелінійні ефекти виявилися досить значними і різноманітними. На віброграмах чітко реєструвалися кратні частоти. При взаємодії двох вібраторів з різними частотами коливань виникали різницеві і сумарні биття та інші ефекти.

В роботі [Алешин, 2010] наведено результати експерименту, які вказують на те, що в нелінійному середовищі відмічається зростання вищих гармонік сигналу по мірі його розповсюдження і спостерігаються пов'язані з цим ефектом спотворення форми коливань в хвилі. Ефект являється принциповим для встановлення факту нелінійності, і історично саме його виявлення підтвердило важливість врахування нелінійних процесів в твердому середовищі. Одночасно із зростанням гармонік в дисипативному середовищі

має місце протилежний процес підвищеного поглинання високочастотних складових, завдяки чому на деякій відстані від джерела відмічається максимум нелінійних спотворень сигналу, які спостерігаються до моменту, поки процеси високочастотної фільтрації не стають переважаючими.

Першою роботою, в якій піднімалося питання кількісної оцінки нелінійності в ґрунтах для цілей СМР будівельних майданчиків, була теоретична робота А.В. Ніколаєва [Николаев, 1967]. В ній відмічається необхідність врахування нелінійних властивостей ґрунтів при сильних сейсмічних впливах, а також, що в формуванні хвильових полів визначальну роль грає фізична нелінійність у вигляді нелінійного зв'язку між напруженнями і деформаціями. Пізніше А.А. Гвоздев і В.В. Кузнецов [Гвоздев, Кузнецов, 1977] дослідили нелінійні явища в епіцентральної зоні невеликого вибуху. Їх дослідження підтвердили, що в формуванні сейсмічних хвиль в реальних середовищах основне значення має нелінійний зв'язок між напруженнями і деформаціями. Експериментальні дослідження проводилися на ділянках з відомим складом ґрунтів і розподілом інтенсивності сейсмічних проявів, що дозволило вивчити вплив параметрів нелінійності для різних реальних ґрунтів. Дослідження в основному обмежувались розглядом зони остаточних деформацій [Николаев, 1987; Родин, 1974; Родионов и др., 1986]. Це в деякій мірі «огрубляло» результати досліджень [Заалишвили, 2009]. Але саме дослідження різного роду фундаментальних ефектів, пов'язаних з нелінійними змінами в хвильовому полі, дозволили отримати необхідні вихідні дані для цілей СМР [Николаев, 1984].

Слід відзначити велику різноманітність робіт присвячених розгляду нелінійних властивостей ґрунтів та нелінійних сейсмічних процесів в них. В публікаціях представлено результати як лабораторних [Kokusho et al., 1982; Seed, Idriss, 1982; Вознесенский, 1999 та ін.], так і польових експериментів. [Васильев и др., 1981; Гвоздев и др., 1982; Алешин 2010 та ін.] Багаточисленні теоретичні аспекти пов'язані з нелінійністю впливу середовищ викладено в

працях [Савин, Рущицкий, 1976; Гушин, Шалашов, 1981; Назаров, Сутин, 1989; Rushchitsky, 2011; Рущицкий, 2014].

Довгий час вважалося, що на пухких ґрунтах рівень амплітуди є приблизно вдвічі вищим [Аптикаев, 2001]. Це положення впливало з спостережуваного підвищення сейсмічної інтенсивності на пухких ґрунтах на один бал. Слід зазначити, що в існуючих будівельних нормах СНиП II-7-81 [СНиП II-7-81, 1987], ДБН В.1.1: 12-2014 [ДБН В.1.1: 12-2014] макросейсмічну бальність помилково пов'язують тільки з рівнем амплітуди прискорення в коливаннях. Насправді зв'язок між амплітудою зміщень, швидкостей і прискорень коливань є статистично обумовленим (див. Додаток до ДСТУ «Шкала сейсмічної інтенсивності») [Національний..., 2010]. Зростання амплітуди коливань є пропорційним кореню квадратному з акустичної жорсткості ґрунтів (добуток швидкості хвилі на густину середовища) було підтверджено експериментально при реєстрації слабких коливань. У нормативних вітчизняних документах з мікрорайонування постулюється, що на ґрунтах I-ї категорії за сейсмічними властивостями (див. таблицю 5,1 ДБН В.1.1-12:2014), у порівнянні з ґрунтами II-ї категорії, відбувається зменшення сейсмічної інтенсивності на один бал. На ґрунтах III-ї категорії, навпаки, може бути посилення сейсмічної інтенсивності на один бал. При цьому передбачаються зміни в рівні амплітуд по складному імовірнісному співвідношенню. Слід враховувати також, що приріст сейсмічної інтенсивності пов'язаний не тільки із змінами амплітуди прискорення коливань, але і з їх тривалістю.

В роботі [Vooge et al, 1980] амплітуда швидкостей на пухких ґрунтах в середньому в 1,7 разів вища, ніж на скельних. У такому випадку, за рекомендаціями нормативного документу [РСН 65-87, 1988], приріст сейсмічної інтенсивності, розрахований за формулою

$$\Delta I = 3,3 \lg \frac{A_i}{A_s}, \text{ приблизно дорівнює } 0,76 \text{ бала.}$$

У роботі [Jouner et al., 1981] ця оцінка була дещо знижена (зміна амплітуди в 1,5 рази призводить до зміни інтенсивності на 0,6 бала).

Зустрічаються роботи, в яких відзначається, що на пухких ґрунтах підвищення рівня коливань може не спостерігатися. Наприклад, в роботі [Trifunac, 1976] стверджується, що на пухких ґрунтах не спостерігається підвищення рівня прискорень в сейсмічних коливаннях (швидше навпаки).

В роботі [Mc Guire, Bamhard, 1979] показано, що на скельних ґрунтах при однаковій інтенсивності струшувань більш високий рівень відношення амплітуд пікових прискорень (в середньому в 2,25 рази) спостерігається при зміні сейсмічної інтенсивності на одиницю.

У роботах Кемпбелла [Campbell, 1981, 1982] наводяться оцінки різниці між амплітудами прискорення в коливаннях, які реєструються на ґрунтах різного типу. Показано, що впливом пухкого шару потужністю $H < 5$ м, який залягає на скельних породах, можна знехтувати. В той же час, нехтування шаром алювію $5 < H < 10$ м призводить до того, що рівень амплітуд на поверхні ґрунту виявляється на 26% вищим. У більш пізній роботі Кемпбелла [Campbell, 1997] наводиться оцінка різниці між амплітудами на ґрунтах I-ї і II-ї категорій. Ця різниця виявилася невеликою і мала тенденцію збільшуватися з епіцентральною відстанню.

Близькі результати було отримано в Італії і опубліковано в роботах [Chiaruttini et al., 1979, 1981]. Автори цих робіт вважають, що відмінностей в прискореннях для скельних і нескельних ґрунтах немає. Помітне зростання амплітуд спостерігається тільки для тонкого шару алювію, що лежить на скельній основі. З матеріалів, наведених у роботі [Fukushima, Tanaka, 1990], випливає, що для пухких ґрунтів, по відношенню до середніх, спостерігається збільшення амплітуди прискорень на 42%, а для скельних ґрунтів – зменшення на 37%. Тобто, відмінності в сейсмічному ефекті на пухких і скельних ґрунтах досягають 0,9 бала [РСН 65-87, 1988].

У роботі [Spudich et al., 1997] описано, що різниця в амплітудах коливань на пухких і скельних ґрунтах склала всього 19%. Найбільша різниця, за результатами спектрального аналізу, спостерігається в діапазоні частот 0,6 – 1,0 Гц – 64%. В роботі [Atkinson, Booge, 1997] відзначається

підсилення коливань на ґрунтах II-ї категорії потужністю понад 60 м, що залягають на корінних породах. Стосовно ґрунтів I-ї категорії в діапазоні частот 0,5 – 2,0 Гц відбувається підсилення приблизно в 1.9 раз, в діапазоні 5,0 – 10,0 Гц - приблизно в 1,5 рази. На частоті 20 Гц підсилення амплітуд не відбувається (усереднені оцінки).

Аналіз прояву більшості руйнівних землетрусів показує, що, як правило, чим «м'якший» ґрунт, тим він небезпечніший в сейсмічному відношенні [Заалишвили, 2009].

В роботі [Duke et al., 1972] в результаті аналізу записів землетрусу в Сан Фернандо (1971 р.) виявлено, що на епіцентральных відстанях менше 50 км спостерігаються більш високі амплітуди коливань на скельних ґрунтах, а на відстанях понад 50 км – на пухких ґрунтах. Фізична причина цього явища не аналізувалася.

Отже, в ряді випадків зростання сейсмічної інтенсивності на пухких ґрунтах може супроводжуватися не підвищенням, а пониженням рівня коливань. Пояснення описаних вище ефектів зміни бальності майданчика внаслідок впливу місцевих умов стає зрозумілим в результаті теоретичного моделювання частотних характеристик для моделей ґрунтових товщ.

Відмітимо, що для деяких типів ґрунтів прояви нелінійності в залежності «напруження – деформація» спостерігаються для статичних умов при навантаженнях, вдвічі менших, ніж при динамічних впливах [Нюмарк, Розенблют, 1980; Brokaw, Foster, 1976]. Адже недаремно ще 30 – 40 років тому використовували «сейсмічний коефіцієнт», який враховували при прискореннях 0,1 – 0,2g [Ломнітс, Розенблют, 1981]. Саме з таких значень прискорень, очевидно, варто очікувати прояв нелінійних явищ. При сильних сейсмічних впливах різко зменшується міцність рихлих ґрунтів, їх структурні зв'язки слабшають, а швидкості поперечних хвиль зменшуються [Finn et al., 1975; Murphy, O'Brien, 1977].

При сильних землетрусах були зафіксовані резонансні та нелінійні явища, які спричинили руйнівні наслідки [Мишель, 1989; Chateau, 1994;

Iwasaki et al., 1981; Morris, 1983]. В той же час продовжуються спроби оцінити прогнозовану сейсмічну небезпеку деяких ділянок за допомогою традиційних способів. Сейсмічний вплив розглядається у вигляді мікросейсм [Gatmiri et al., 1994; Kanai et al., 1966; Skipp et al., 1990] або навіть у вигляді коливань від руху поїздів [Гарагозов, Текаев, 1983] тощо. Звичайно лінійне представлення полегшує вирішення практичних задач при малих впливах [Bharatha, Levinson, 1977], але такі спрощені представлення для інтенсивних землетрусів не можна застосовувати [Васильев и др., 1987], особливо на ґрунтах з низькою жорсткістю [Красный и др., 1976].

Для найкращого наближення параметрів розрахункового (прогнозованого з заданою імовірністю неперевищення) землетрусу з урахуванням впливу локальних ґрунтових умов методами СМР необхідно враховувати нелінійні властивості ґрунтів. При інтенсивних сейсмічних впливах закони, засновані на теорії малих деформацій, практично не виконуються. В таких умовах змінюються модулі пружності ґрунтів, падає їх несуча здатність.

Нелінійність змінює звичні співвідношення між параметрами коливань різних категорій ґрунту. Твердження, яке міститься в чинних нормативних документах, що амплітуди прискорень для ґрунтів I категорії в два рази нижчі, а для ґрунтів III категорії на стільки ж вищі від амплітуд на середніх ґрунтах (див. табл. 6.5 ДБН В.1.1-12 до: 2014 [ДБН В.1.1-12:2014, 2014], стає невірним при високих інтенсивностях сейсмічних впливів.

Аналіз опублікованих матеріалів [Ишихара, 2006; Вознесенский, 1999] показує, що при прискореннях сейсмічних коливань $0,1g$, що в середньому відповідає семибальним сейсмічним впливам, починається прояв нелінійних ефектів, пов'язаних з різким зниженням міцності пухких ґрунтів, їх структурні зв'язки слабшають, а швидкості поперечних хвиль зменшуються. Провести різку межу між поняттям міцний і рихлий ґрунт в цьому випадку важко.

Найбільш значні і часті сейсмічні прояви на території України пов'язані з великими підкоровими землетрусами із зони Вранча в Східних Карпатах

[Кендзера, 2015]. На території України ці землетруси викликають коливання з широким частотним діапазоном і тривалістю в десятки хвилин, завдяки чому вони здатні викликати резонансні явища у висотних будинках і протяжних спорудах. Варто відмітити, що в останні роки в країні стрімко зростають темпи і збільшуються об'єми будівництва саме висотних будівель, а також інших складних інженерних споруд. Це змушує займатися розробкою і впровадженням нових методів визначення кількісних параметрів сейсмічної небезпеки, нових проектних рішень та підходів щодо забезпечення сейсмостійкості будинків і споруд.

Останнім часом все ширше застосовуються інструментальні методи, за допомогою яких вивчаються особливості слабких рухів ґрунту для прогнозування ефекту сильних землетрусів. При цьому не враховується, що при сильних сейсмічних рухах ґрунту значну роль відіграють нелінійні явища, які особливо сильно проявляються в пухких осадових ґрунтах – супісках, суглинках, водонасичених глинах. Більш того, в ряді випадків вони мають вирішальне значення і вимагають детального дослідження, створення методів розрахунку приросту бальності за рахунок місцевих ґрунтових умов. На жаль, проблемі дослідження та врахування нелінійних явищ приділялося мало уваги.

В практиці СМР недостатньо дослідженими на сьогоднішній день залишаються резонансні явища. У будівельні нормативи увійшли лише рекомендації щодо розрахунку переважаючих періодів коливань ґрунтової товщі. Використання мікросейсм для врахування резонансних явищ теоретично виправдане, але на практиці його трудно застосувати через наявність похибок, викликаних впливом зосереджених джерел природних і техногенних перешкод.

Існуюча технологія інструментальних методів СМР заснована на уявленнях про лінійність сейсмічних властивостей ґрунтів, значення яких можна визначити використовуючи спектральні характеристики записів слабких сейсмічних коливань від віддалених і місцевих землетрусів, а також від штучних джерел (наприклад, вибухів). Приріст бальності, визначений

цими методами, не залежать від амплітуди коливань ґрунту. Для оцінки реальної сейсмічної небезпеки необхідно враховувати нелінійні властивості ґрунтів при інтенсивних сейсмічних впливах [Idriss, Seed, 1968; Suetomi, Yoshida, 1988; Kramer, 1996; Kokusho, 1999; Stewart et al., 2008]. Найкраще це можна було б зробити, використовуючи записи сильних сейсмічних рухів при максимальних землетрусах із небезпечних (для конкретного будівельного майданчика) сейсмоактивних зон, зареєстрованих безпосередньо на майданчику. Але сильні землетруси відбуваються не часто, у зв'язку з чим в реальних умовах за час, відведений для геолого-геофізичних (в тому числі сейсмологічних) досліджень під проектування, одержати їх записи практично не можливо.

Результати, отримані з допомогою традиційних способів СМР, часто суттєво розходяться з даними макросейсмічних обстежень наслідків сильних землетрусів. Адекватне врахування нелінійних та резонансних властивостей ґрунтів при СМР покликане значно зменшити ці розходження.

Подальше вдосконалення методики СМР для цілей сейсмічного захисту вимагає детального врахування резонансних і нелінійних властивостей ґрунтів під кожним будівельним або експлуатаційним майданчиком в сейсмічних районах країни.

Висновки до розділу 1

В розділі наведено огляд розвитку та сучасного стану методів прогнозування поведінки ґрунтів під час землетрусів при СМР будівельних та експлуатаційних майданчиків з метою забезпечення науково обґрунтованими кількісними характеристиками прогнозованої сейсмічної небезпеки робіт із сейсмічного захисту існуючих об'єктів і сейсмостійкого проектування нових будинків і споруд. Наведено результати критичного аналізу існуючих концепцій, методів і підходів. Описано основні досягнення і невирішені проблеми в галузі СМР територій. Показано, що для надійного прогнозування параметрів сейсмічних коливань при сильних землетрусах необхідно удосконалити методику врахування нелінійних властивостей ґрунтів та

передбачити можливість виникнення і урахування резонансних явищ в ґрунтових комплексах.

Обґрунтовано, що подальший розвиток методики СМР будівельних майданчиків потребує удосконалення розрахункових способів побудови частотних характеристик ґрунтової товщі з врахуванням їх нелінійних властивостей для територій з слабкою і помірною місцевою сейсмічністю, до яких відноситься територія України. Частотна характеристика описує реакцію ґрунтового комплексу, заданого в вигляді моделі вертикально-неоднорідного геологічного середовища із загасанням, на сейсмічні коливання при розрахункових землетрусах. Як правило, в якості розрахункових приймаються: а) максимальний розрахунковий землетрус, який не буде перевищений на досліджуваному майданчику з імовірністю 99% за найближчі 50 років; б) проектний землетрус, який не буде перевищений на майданчику з імовірністю 90% за аналогічний інтервал часу.

Урахування нелінійних ефектів при побудові ЧХ ґрунтових комплексів передбачає використання для формування розрахункових моделей ґрунтової товщі даних про глибину залягання шарів, їх літологічний склад і відповідних емпіричних співвідношень між модулем зсуву і коефіцієнтом поглинання від величини зсувної деформації, підібраних для кожного шару із сформованої автором бази даних польових і лабораторних досліджень.

Вдосконалена методика побудови ЧХ ґрунтових комплексів дозволить ввести ряд уточнень в діючі державні будівельні норми і стандарти України, які при правильному сейсмостійкому проектуванні дозволять суттєво знизити собівартість сейсмостійкого будівництва шляхом запобігання виникненню резонансних ефектів в будинках і спорудах.

В наступному розділі розглянуто теоретичні та методологічні основи методів моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи. Критично проаналізовано результати розрахунку частотних характеристик ґрунтової товщі отримані із використанням основних підходів. Обґрунтовано висновки про можливості, умови і границі їх застосування.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕКЦІЇ ҐРУНТОВИХ КОМПЛЕКСІВ НА СЕЙСМІЧНІ ВПЛИВИ

Математичне моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи представляє собою класичну задачу інженерної сейсмології, тобто задачу про поширення в товщі ґрунтових шарів сейсмічних коливань, які падають знизу з пружного півпростору. Реакція ґрунтової товщі повинна розраховуватися з врахуванням всіх механізмів перетворення сейсмічних хвиль в ґрунтах і з урахуванням нелінійних властивостей ґрунтів.

Зазначена задача вперше була теоретично вирішена Канаї [Kanai, 1952] для системи осадових шарів, що характеризуються в'язкою пружністю Кельвіна-Фойгта. Був описаний рух точки на поверхні осадової товщі викликаний поперечними коливаннями, що поширюються вертикально вгору з лежачого нижче півпростору [Kanai, 1952]. На основі теорії багатократно відбитих хвиль було розроблено процедури розрахунку коливань поверхні осадової товщі за коливаннями лежачої нижче скельної основи або прилеглих виходів скельних порід.

Головною метою математичного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи є дослідження спектральних особливостей коливань ґрунтової товщі, складеної ґрунтами різного типу.

Результати, в залежності від умов задачі, можуть бути представлені в вигляді амплітудної і фазової частотних характеристик заданої моделі ґрунтової товщі; осцилограми (акселерограми, велисограми, сейсмограми) на вільній поверхні, або у внутрішніх точках середовища тощо.

При моделюванні реакції ґрунту на сейсмічні впливи, в межах теорії поширення сейсмічних коливань в середовищах із загасанням, ключовим елементом є представлення циклічної роботи ґрунту в вигляді матеріальної моделі, яка встановлює зв'язок дотичних напружень і зсувної деформації. Моделювання реакції ґрунту в умовах циклічних навантажень дозволяє отримати деформаційні характеристики в заданих діапазонах деформацій. У

різні часи створювалися прості раціональні моделі геологічного середовища, які б характеризували найбільш важливі аспекти поведінки ґрунтів. До таких моделей, зокрема, відносяться: лінійно-пружна, в'язко пружна, нелінійно-пружна, пружно-пластична та інші.

В даний час у світовій практиці інженерної сейсмології широко використовуються три класи моделей поведінки ґрунтів: лінійна, еквівалентна лінійна і нелінійна моделі. Ці моделі спираються на залежності «напруження—деформація» (схематичне представлення приведенне на рис. 2.1), які описують як загальні закономірності поведінки ґрунтів, так і їх нелінійні властивості.

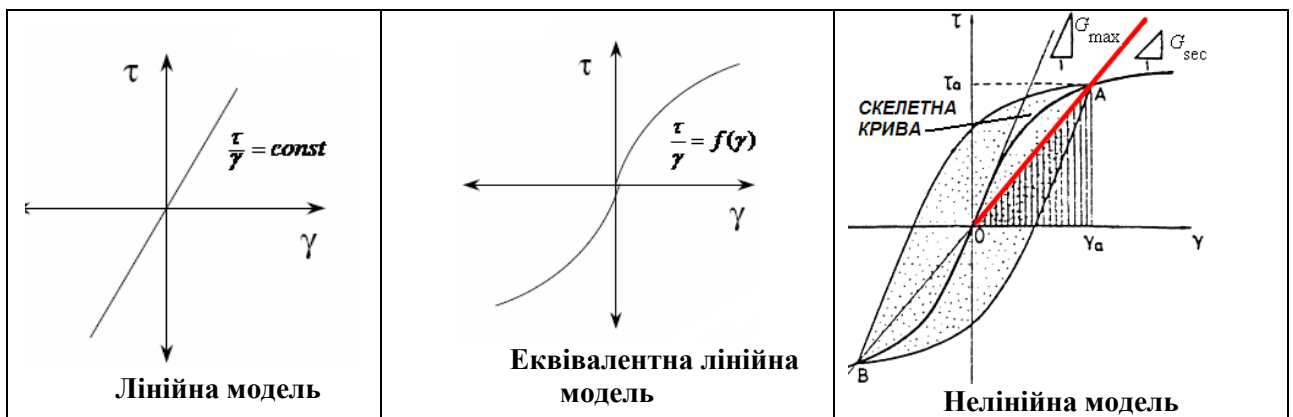


Рис.2.1. Схематичне представлення узагальнених класів моделей поведінки ґрунтів при сейсмічних впливах

В лінійній моделі залежність «напруження—деформація» є лінійною, а в еквівалентній лінійній і нелінійній моделі – гістерезисною. Основні параметри ґрунту, які визначають форму гістерезисних залежностей, це: коефіцієнт поглинання D , модуль зсуву G і максимальний модуль зсуву. Форма залежності також визначається законом зменшення модуля зсуву і законом збільшення коефіцієнта поглинання при навантаженні ґрунту.

Модель відповідного класу повинна застосовуватися в рамках певних уявлень про особливості будови та реакції ґрунту на сейсмічні навантаження різної інтенсивності. Особливості реакції ґрунту характеризуються формою гістерезисної петлі.

2.1 Лінійне моделювання

В умовах невеликих (нижчих 10^{-6}) деформацій ґрунту виправданим буде застосування лінійної (пружної) моделі. В такому випадку основним параметром для адекватного моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи буде модуль зсуву G [Ишихара, 2006].

При лінійному моделюванні приймаються наступні допущення:

1. Вважається, що навантаження на ґрунт є далекими від границі міцності геологічного матеріалу і не викликають його руйнування. Така модель не може описати виникнення тріщин, розривів тощо.

2. Деформації є малими. Зв'язок «напруження – деформація» - лінійний. На його лінійній ділянці справджується закон Гука .

Розглянемо одномірну задачу і ряд ускладнюючих геотехнічних умов, які ілюструють вплив ґрунтових товщ на характеристики коливань на поверхні.

Одномірне моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи базується на припущенні, що всі зміщення викликані поперечними хвилями, які поширюються від корінних порід вертикально вгору.

Однорідний абсолютно пружний шар на жорсткому півпросторі. Розглянемо модель середовища, яка складається з однорідного абсолютно пружного шару, потужністю H , який підстиляється жорстким півпростором (див. рис.2.2).

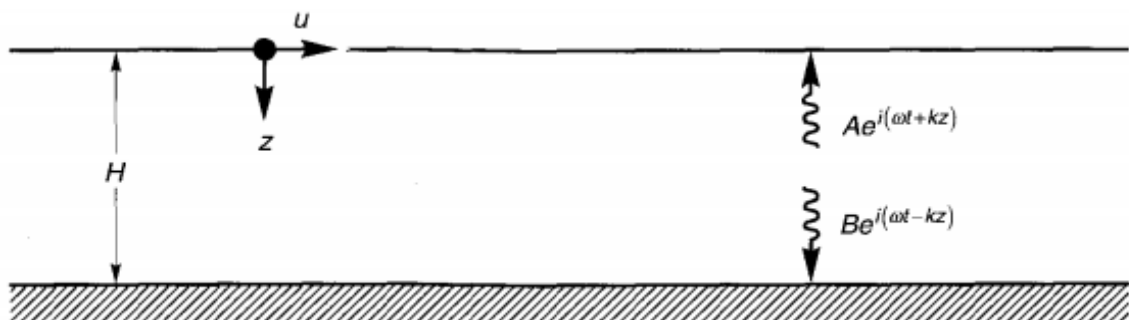


Рис. 2.2. Однорідний абсолютно пружний шар потужністю H на жорсткому півпросторі.

При поширенні поперечної хвилі вертикально вгору, горизонтальні зміщення можна виразити формулою [Аки, Ричардс, 1983]:

$$u(z,t) = Ae^{i(\omega t + kz)} + Be^{i(\omega t - kz)}, \quad (2.1)$$

де ω – кутова частота коливань, k – хвильове число, A і B – амплітуди коливань, що поширюються вгору і вниз, відповідно.

На вільній поверхні $z = 0$, тоді зсувні напруження і, відповідно, деформація дорівнюють нулю, що описується рівнянням

$$\tau(0,t) = G\gamma(0,t) = G \frac{\partial u(0,t)}{\partial z} = 0. \quad (2.2)$$

Підставляючи рівняння (2.1) в рівняння (2.2), отримаємо $A = B$. Зміщення може бути виражене за допомогою рівняння

$$u(z,t) = 2A \frac{e^{ikz} + e^{-ikz}}{2} e^{i\omega t} = 2A \cos kz e^{i\omega t}. \quad (2.3)$$

Рівняння (2.3) описує стоячу хвилю з амплітудою $2A \cos kz$, яка представляє собою суперпозицію коливань, що поширюються в напрямках вгору і вниз.

З рівняння (2.3) можна визначити функцію, яка описує співвідношення амплітуд зміщення в будь-яких двох точках ґрунтового шару. При виборі цих точок у верхній і нижній частині шару ґрунту, отримаємо:

$$F(\omega) = \frac{u_{\max}(0,t)}{u_{\max}(H,t)} = \frac{2Ae^{i\omega t}}{2A \cos kHe^{i\omega t}} = \frac{1}{\cos kH} = \frac{1}{\cos(\omega H / v_s)} \quad (2.4)$$

Модуль функції (2.4) є частотною характеристикою шару ґрунту [Kramer, 1996]:

$$|F(\omega)| = \sqrt{\{\operatorname{Re}[F_1(\omega)]\}^2 + \{\operatorname{Im}[F_1(\omega)]\}^2} = \frac{1}{|\cos(\omega H / v_s)|}. \quad (2.5)$$

З рівняння (2.5) можна зробити висновок, що зміщення на поверхні завжди більші ніж на корінних породах (оскільки знаменник не може бути більшим одиниці).

Таким чином $|F(\omega)|$ – це співвідношення амплітуди руху на вільній поверхні до амплітуди руху на корінних породах на частоті ω

Оскільки $\omega H / V_s$ наближається до $\pi/2 + n\pi$, знаменник рівняння (2.5) прямує до нуля, що означає нескінченне підсилення коливань, тобто при наявності збуджуючого сигналу буде мати місце ефект резонансного підсилення коливань (див. Рис 2.3).

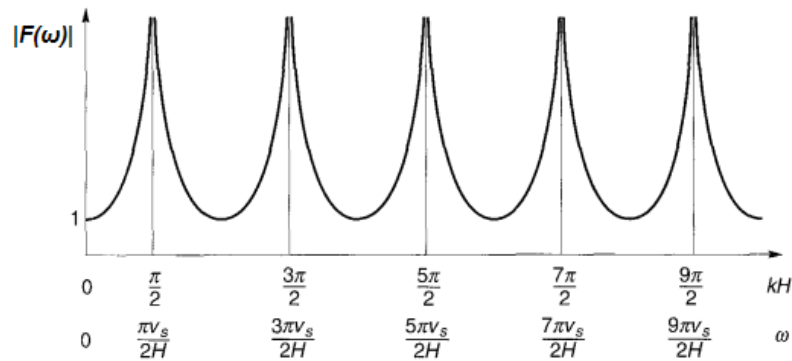


Рис 2.3. Частотна характеристика однорідного абсолютно пружного шару, що підстиляється жорстким півпростором

Розглянутий випадок показує, що реакція ґрунту на сейсмічний вплив в значній мірі залежить як від частотного складу вхідного руху, так і від частоти, на якій відбувається підсилення коливань. Остання залежать від потужності шару ґрунту і швидкості поперечної хвилі в ньому.

Очевидно, що нескінченні підсилення, через явище загасання коливань в геологічному середовищі, фізично не можуть відбуватися. Для вивчення впливу загасання коливань в лінійному середовищі розглянемо їх поширення в однорідному пружному шарі з поглинанням.

Однорідний абсолютно пружний шар з поглинанням на жорсткому півпросторі. Припустимо, що поведінка ґрунтового шару описується моделлю Кельвіна – Фойгта (Kelvin – Voight). В цьому випадку отримаємо хвильове рівняння [Kramer, 1996]:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} . \quad (2.6)$$

Розв'язок рівняння має вигляд

$$u(z,t) = Ae^{i(\omega t + k^* z)} + Be^{i(\omega t - k^* z)}, \quad (2.7)$$

де k^* – комплексне хвильове число з дійсною частиною k_1 і уявною k_2 .

Повторюючи алгебраїчні перетворення (2.2 - 2.5) з комплексним хвильовим числом, одержимо частотну характеристику ґрунтового шару з загасанням у вигляді:

$$|F(\omega)| = \frac{1}{\cos k^* H} = \frac{1}{|\cos(\omega H / v_s^*)|}. \quad (2.8)$$

v_s^* - комплексне значення швидкості поперечної хвилі.

Однорідний шар ґрунту з поглинанням на пружному півпросторі. В попередніх випадках розглядався ґрунтовий шар на жорсткому півпросторі. У випадку пружного півпростору частина енергії стоячих хвиль вертається з ґрунтового шару вниз в пружний півпростір. Частотна характеристика в такому випадку має вигляд

$$F(\omega) = \frac{1}{\cos k_s^* H + ia_z^* \sin k_s^* H} = \frac{1}{\cos(\omega H / v_{ss}^*) + ia_z^* \sin(\omega H / v_{ss}^*)}. \quad (2.9)$$

Горизонтально-шарувата ґрунтова товща, що підстиляється пружним півпростором. Одношарові ґрунтові моделі є корисними для описання фізичного змісту впливу ґрунтових умов на коливання поверхні майданчика при сейсмічних впливах. Однак для моделювання реакції на сейсмічні впливи реальних умов ґрунтового середовища під будівельним майданчиком такі моделі не підходять. Реальні ґрунтові товщі, як правило, складаються ґрунтовими шарами з вертикальною мінливістю фізико-механічних властивостей.

Розглянемо систему N горизонтальних шарів (рис. 2.4), поведінка кожного з яких описується моделлю Кельвіна – Фойгта.

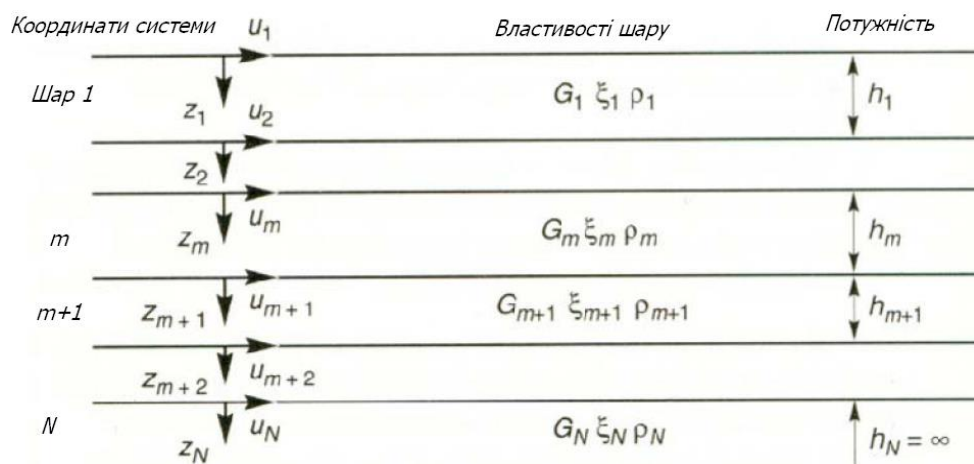


Рис.2.4. Багатошарова модель ґрунтового середовища з поглинанням на пружному півпросторі.

Загальний розв'язок хвильового рівняння (2.6) у цьому випадку, має вигляд

$$U(z) = Ae^{ikz} + Be^{-ikz}, \quad (2.10)$$

де A і B – амплітуди хвиль, що поширюються вгору і вниз по осі Z ;

k – комплексне хвильове число:

$$k^2 = \frac{\rho\omega^2}{G + i\omega\eta} = \frac{\rho\omega^2}{G^*}, \quad (2.11)$$

де η – в'язкість, G – модуль зсуву, G^* - комплексний модуль зсуву, який може бути розрахований за однією з формул (2.12-2.114):

$$G^* = G(1 - 2D^2 + i2D\sqrt{1 - D^2}) \quad [\text{Udaka, 1975}], \quad (2.12)$$

$$G^* = G(1 - D^2 + i2D) \quad [\text{Kramer, 1996}], \quad (2.13)$$

$$G^* = G(1 - i2D) \quad [\text{Kramer, 1996}]. \quad (2.14)$$

Амплітуди A і B змінюються від шару до шару і пов'язані формулами (2.15 – 2.16), які витікають з умов неперервності напружень і зміщень на границях шарів:

$$A_{j+1} + B_{j+1} = A_j e^{ik_j h_j} + B_j e^{-ik_j h_j}, \quad (2.15)$$

$$A_{j+1} - B_{j+1} = \alpha_j (A_j e^{ik_j h_j} + B_j e^{-ik_j h_j}), \quad (2.16)$$

де
$$\alpha_j = \frac{k_j G_j^*}{k_{j+1} G_{j+1}^*}.$$

З формул (2.15 і 2.16) можуть бути отримані рекурентні формули для амплітуд зміщень A_{j+1} B_{j+1} в шарі $j+1$ через амплітуди в шарі j :

$$A_{j+1} = \frac{1}{2} A_j (1 + \alpha_j) e^{ik_j h_j} + \frac{1}{2} B_j (1 - \alpha_j) e^{-ik_j h_j}, \quad (2.17)$$

$$B_{j+1} = \frac{1}{2} A_j (1 - \alpha_j) e^{ik_j h_j} + \frac{1}{2} B_j (1 + \alpha_j) e^{-ik_j h_j}, \quad (2.18)$$

або

$$\begin{Bmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \alpha_j) e^{ik_j h_j} & (1 - \alpha_j) e^{-ik_j h_j} \\ (1 - \alpha_j) e^{ik_j h_j} & (1 + \alpha_j) e^{-ik_j h_j} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_j \\ B_j \end{Bmatrix}. \quad (2.19)$$

Враховуючи, що на вільній поверхні напруження рівні нулю, отримаємо $A_I = B_I$, тобто амплітуди падаючої і відбитої хвилі завжди рівні на вільній поверхні.

Амплітуди хвиль (A і B) в межах моделі ґрунтової товщі розраховуються на кожній частоті (в припущенні, відомих жорсткості і поглинання в межах кожного шару) і використовуються для розрахунку реакції на поверхні.

Застосовуючи рекурентні формули (2.17) і (2.18) послідовно до всіх шарів від 1 до j , можна виразити амплітуди хвиль у всіх шарах через A_1 і B_1 . Частотна характеристика, яка пов'язує амплітуди зміщення в i -му і j -му шарах, має вигляд

$$H_{ij}(\omega) = \frac{|u_i(\omega)|}{|u_j(\omega)|} = \frac{a_i(\omega) + b_i(\omega)}{a_j(\omega) + b_j(\omega)}. \quad (2.20)$$

Частотна характеристика багат шарової ґрунтової товщі є складнішою, але вона так само розраховується, як і у випадку одного шару на півпросторі. Для її розрахунку використовуються комп'ютерні програми, наприклад: SHAKE, PROSHAKE, EERA та інші.

Швидкість $\dot{u}(z,t)$ і прискорення $\ddot{u}(z,t)$ пов'язанні зі зміщенням наступним чином:

$$\dot{u}(z,t) = \frac{\partial u}{\partial t} = i\omega u(z,t) \quad \text{і} \quad \ddot{u}(z,t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 u(z,t). \quad (2.21)$$

Тому рівняння частотної характеристики (2.20) описує підсилення коливань також для прискорень і швидкостей від шару i до j .

Реакція ґрунтової товщі на поверхні розраховується шляхом множення амплітудного спектру Фур'є вхідного сигналу на півпросторі на частотну характеристику ґрунтової товщі:

$$Y_i(\omega) = H_{ij}(\omega)Y_j(\omega), \quad (2.22)$$

де $Y_i(\omega)$ - амплітудний спектр Фур'є на поверхні, $Y_j(\omega)$ – амплітудний спектр Фур'є вхідного сигналу на півпросторі, $H_{ij}(\omega)$ – частотна характеристика шаруватої ґрунтової товщі.

Зсувна деформація на глибині z в час t може бути отримана з рівняння (2.7):

$$\gamma(z,t) = \frac{\partial u}{\partial z} = ik(Ae^{ikz} - Be^{-ikz})e^{i\omega t} \quad (2.23)$$

Відповідні зсувні напруження на глибині z і в час t будуть:

$$\tau(z,t) = G^* \gamma(z,t). \quad (2.24)$$

2.2. Еквівалентне лінійне моделювання

В умовах деформацій середньої величини ($10^{-5} - 10^{-3}$), реакція ґрунту стає в'язко пластичною, при цьому модуль зсуву G зменшується при збільшенні деформації зсуву. В процесі навантаження виникає дисипація енергії, яка в ґрунтах, в основному, не залежить від швидкості і має гістерезисний характер. При цьому, для оцінки енергопоглинаючих властивостей ґрунту використовується безрозмірний коефіцієнт відносного поглинання. Крива, яка показує зменшення модуля зсуву із зростанням деформації $G/G_{max}(\gamma)$

називається скелетною (характеристичною) кривою (див. рис. 2.1.) Ширина гістерезисної кривої пов'язана з площею, обмеженою цією кривою, і визначається дисипацією енергії, яка описується коефіцієнтом поглинання D .

Деформації середньої величини не викликають прогресуючої зміни властивостей ґрунту, тому модуль зсуву і коефіцієнт поглинання в цьому випадку не залежать від кількості циклів. Такий різновид поведінки ґрунту характеризується наявністю гістерезису «стабільного» типу (non-degraded hysteresis type) [Ишихара К., 2006]. В якості аналітичного інструменту в такому випадку використовується еквівалентна лінійна модель заснована на концепції в'язкої пружності.

Еквівалентне лінійне моделювання було розроблено Айдріссом, Сідом, Шнайбелем та ін. [Idriss, Seed, 1968; Schnabel et al., 1972]. Це один з перших розроблених способів моделювання, який дозволяє враховувати нелінійні властивості ґрунтів. Програми еквівалентного лінійного моделювання базуються на отриманому Канаї [Kanai, 1952] розв'язку задачі про розповсюдження сейсмічних коливань в горизонтально-шаруватій ґрунтовій товщі.

Оскільки лінійний підхід вимагає постійних значень модуля зсуву G і коефіцієнта поглинання D в кожному шарі, проблема полягає в тому, щоб визначити ці значення таким чином, щоб вони відповідали величині збуджуваних в шарах деформацій. Для цього вводиться поняття рівня деформацій. В лабораторних тестах з оцінювання залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації зазвичай використовується гармонійне навантаження, і рівень деформацій характеризується його амплітудою. Однак зсувні деформації, які збуджуються в ґрунті реальним землетрусом, є нерегулярними. Максимальні пікові амплітуди досягаються рідко і лише в кількох випадках протягом запису. Очевидно, що гармонійне навантаження відповідає більш жорстким умовам навантаження, ніж у випадку коливань в реальних сейсмічних хвилях, за умови, що їх максимальні пікові амплітуди є однаковими. З огляду на це, рівень деформацій при землетрусі

прийнято характеризувати в термінах ефективних зсувних деформацій, які емпірично оцінюються як 50 – 70% від величин максимальних зсувних деформацій (див. Рис.2.5). В роботі [Kramer, 1996] вказано, що в більшості випадків ефективні зсувні деформації приймаються рівними $\sim 65\%$ від максимальних пікових значень.

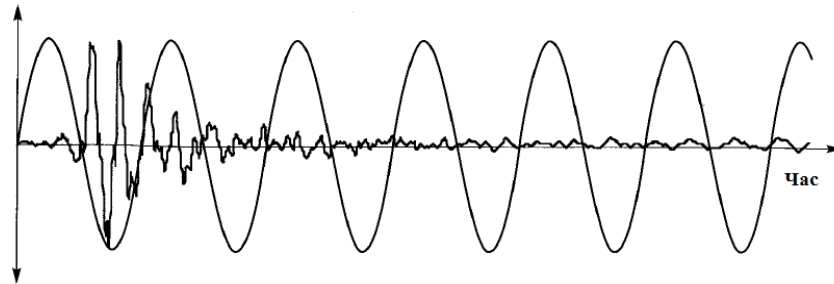


Рис. 2.5. Залежності деформації від часу з однаковими максимальними піковими амплітудами. В випадку поширення хвиль від землетрусів ефективні зсувні деформації приймаються рівними $\sim 65\%$ від максимального пікового значення амплітуди (з роботи [Kramer, 1996]).

Оскільки розрахований рівень деформацій при обчисленні реакції ґрунту на сейсмічні впливи залежить від значень модуля зсуву і коефіцієнта поглинання, для забезпечення відповідності цих параметрів до рівня деформацій у всіх шарах – використовуються ітеративні обчислення, процедура яких схематично зображена на рис. 2.6.

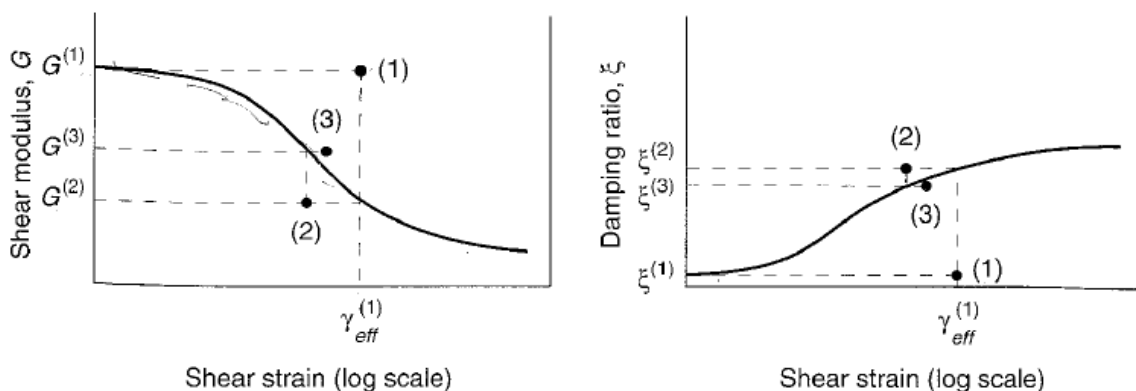


Рис. 2.6. Ілюстрація з роботи [Kramer, 1996] до процедури ітеративних обчислень: по заданих початкових значеннях G^1 і D^1 вираховуються ефективні зсувні деформації $\gamma_{eff}^{(1)}$. Верхній індекс вказує на номер ітерації.

Оскільки ефективні зсувні деформації $\gamma_{eff}^{(1)}$, як правило, є вищими, ніж деформації, які відповідають G^1 і D^1 , то їх приводять у відповідність з емпіричними значеннями залежностей G і D від величини деформацій, підібраними з бази даних для реальних параметрів кожного шару. Після цього проводиться наступна ітерація. В ній використовуються G^2 і D^2 відповідні величині $\gamma_{eff}^{(2)}$. Ітеративні розрахунки повторюються до досягнення значень G і D , які відповідають реальним деформаціям [Kramer, 1996].

Алгоритм процедури ітеративного обчислення є наступним:

1. Для кожного шару ініціалізуються початкові значення G_i і D_i при малих значеннях деформації зсуву.
2. Розраховуються зміщення ґрунту i , відповідно, максимальні значення деформації зсуву в кожному шарі.
3. Використовуючи максимальне значення зсувних деформацій розраховується ефективна деформація зсуву γ_{eff} в кожному шарі:

$$\gamma_{eff}^i = R_\gamma \gamma_{max}^i$$
де верхній індекс означає номер ітерації, R_γ - відношення ефективної деформації до максимальної, яке залежить від магнітуди M землетрусу, приймається однаковим для всіх шарів моделі ґрунтової товщі та розраховується за формулою: $R_\gamma = (M - 1)/10$.
4. За розрахованим ефективним значенням зсувних деформацій вибираються нові параметри $G^{(i+1)}$ і $D^{(i+1)}$ для наступної ітерації.
5. Кроки 2 – 4 повторюються до тих пір, поки різниця між розрахованими значеннями модуля зсуву і коефіцієнта поглинання в двох послідовних ітераціях не стане менше деякого заздалегідь заданого значення для всіх шарів. Зазвичай в 3 – 5 ітераціях досягається різниця $<(5 \div 10)\%$ [Kramer, 1996].

Ітеративні обчислення забезпечують відповідність динамічних параметрів рівням деформацій у всіх шарах ґрунтової товщі.

При проведенні розрахунків реакції ґрунту з використанням описаної вище ітераційної процедури, для врахування нелінійної поведінки ґрунтової товщі, у вхідній розрахунковій моделі для кожного шару мають бути задані відповідні емпіричні залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації.

Еквівалентний лінійний підхід для одномірного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи вперше був реалізований в програмному комплексі SHAKE [Schnabel et al., 1972], який працює під операційною системою DOS. На сьогоднішній день еквівалентний лінійний підхід реалізовано в програмних продуктах PROSHAKE [Schnabel, Lysmer, Seed, 1972; PROSHAKE..., 1998], EERA [Bardet, Tobita, 2001], DEEPSOIL [Hashash, 2012] та в ряді інших, які працюють під оперативною системою Windows. Еквівалентне лінійне моделювання широко використовується в практиці сейсмостійкого будівництва Північної Америки.

Обмеженням еквівалентного лінійного моделювання є прийняте допущення, що деформація стає рівною нулю при припиненні навантаження, і оскільки в'язко пружний матеріал знаходиться в умовах, коли напруження не досягають границі міцності матеріалу, то розривів і руйнувань в ньому не виникає [Kramer, 1996]. Таким чином, при моделюванні реакції ґрунту на інтенсивні землетруси слід використовувати нелінійне моделювання.

2.3. Нелінійне моделювання

Для зсувної деформації, що перевищує 10^{-2} , помітна зміна характеристик ґрунту буде викликана не тільки збільшенням зсувної деформації, але і наявністю певної кількості циклів навантаження. Така різновидність роботи ґрунту характеризується гістерезисом «прогресуючого» типу (degraded hysteresis type) [Ишихара, 2006]. Вважається, що ступінь зміни модуля зсуву і коефіцієнта поглинання при прикладенні циклічного навантаження залежить від ступеня зміни ефективного напруження усестороннього стиску при

нерегулярному прикладенні зсувних напружень в часі. Для таких умов встановлюється закон зміни ефективних напружень і виводиться рівняння, яке описує напружено-деформований стан на кожному етапі процесу навантаження, розвантаження і повторного навантаження. Найчастіше для цього використовується закон Мезінга (Masing law). Для аналізу реакції на сейсмічні навантаження ґрунту, напружено-деформований стан якого характеризується деформаціями близькими до умов можливого руйнування, необхідно використовувати чисельний метод з покроковим інтегруванням рівняння руху. В якості аналітичного інструменту в цьому випадку застосовується нелінійне моделювання. При інтегруванні рівнянь руху, з малим кроком по часу, можна використовувати будь-яку нелінійну модель залежності «напруження – деформація», або вдосконалену конституційну модель. На кожному кроці обчислень для визначення властивостей ґрунту (в даний момент часу) звертаються до одної з практично використовуваних залежностей «напруження – деформація». Таким чином, вся нелінійна залежність «напруження – деформація» задається серією лінійних наближень з малим кроком по часу. При розрахунках з використанням нелінійних моделей різні дослідники використовували різні нелінійні залежності «напруження – деформація».

У програмних продуктах для одновимірного нелінійного моделювання реакції ґрунту залежність «напруження – деформація» описується наступними циклічними нелінійними моделями:

- Ромберга – Осгуда - в програмі CHARSOIL [Streeter et al, 1974];
- Айвена – в програмі NONLI3 [Joyner, Chen, 1975];
- Мартіна – Давиденкова - в програмі MASH [Martin, Seed, 1978];
- гіперболічною моделлю - в програмі DESRA [Lee, Finn, 1978], TARA [Finn et al., 1986; Finn et al., 1989];
- Хардина – Дрневіча – Кундалла – Пайка (HDCP) - в програмі TESS1 [Pyke, 1985];

- Айвена – Мроза (ІМ – модель) - в програмі NERA [Bardet, Tobita, 2001];
- модифікованою гіперболічною моделлю - в програмі DEEPSOIL [Hashash, Park, 2001].

Програми DESRA, TARA та їх модифікації базуються на припущенні, що поведінка ґрунту може вважатися пружною при малих приростах навантаження, але модулі зсуву змінюються при кожному такому прирості. Ці програми дозволяють розрахувати можливий рівень порового тиску та імовірність розрідження ґрунту. Вони можуть застосовуватися також для аналізу поведінки розрідженого ґрунту. Зміни порового тиску в них пов'язуються з об'ємними деформаціями ґрунту, в умовах дренавання води. Враховується одномірна дифузія.

Програма NERA (Nonlinear Earthquake site Response Analyses) заснована на моделі середовища, запропонованій В. Айвеном [Iwan, 1967] і З. Мрузом [Mroz, 1967], яка коротко називається ІМ моделлю. Як зображено на рис. 2.7, модель передбачає використання нелінійних залежностей «напруження-деформація», для ряду $j = 1 \div n$ механічних елементів, що мають різну жорсткість K_j і опір ковзання R_j , причому $R_1 < R_2 < \dots < R_n$.

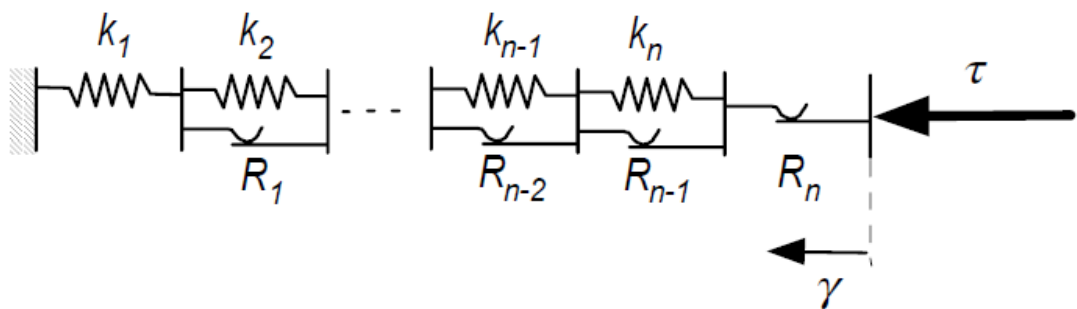


Рис. 2.7. Схематичне представлення ІМ моделі [Iwan,1967, Mroz,1967] [Bardet, Tobita, 2001]

Спочатку залишкові напруження дорівнюють нулю. При монотонно зростаючому навантаженні елемент j деформується, поки напруження зсуву τ досягає величини опору ковзання. Після цього елемент j зберігає додатне залишкове напруження рівне R_j .

Напруження і деформація пов'язані наступним співвідношенням:

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = H, \quad (2.25)$$

де тангенціальний модуль зсуву:

$$H = \begin{cases} H_1 = k_1, & 0 \leq \tau < R_1; \\ H_2 = (k_1^{-1} + k_2^{-1})^{-1}, & R_1 \leq \tau < R_2; \\ \dots \\ H_{n-1} = (k_1^{-1} + k_2^{-1} + \dots + k_{n-1}^{-1})^{-1}, & R_{n-2} \leq \tau < R_{n-1}; \\ H_n = (k_1^{-1} + k_2^{-1} + \dots + k_{n-1}^{-1} + k_n^{-1})^{-1}, & R_{n-1} \leq \tau < R_n; \\ 0, & \tau = R_n \end{cases} \quad (2.26)$$

Тангенціальний модуль зсуву H пов'язаний з модулем зсуву G наступним рівнянням

$$H_i = \frac{G_{i+1}\gamma_{i+1} - G_i\gamma_i}{\gamma_{i+1} - \gamma_i}, \quad i=2, \dots, n-1, \quad H_n = 0, \quad (2.27)$$

і може бути розрахований при заданій залежності $G(\gamma)$.

Припускаючи, що напруження зсуву τ від початку дорівнює нулю,

$$R_i = G_i\gamma_i, \quad i=1, \dots, n...$$

Рівняння, що описує динаміку ґрунтового середовища (2.26), розв'язується з використанням методу центральних різниць.

В програмному комплексі DEEPSOIL [Hashash, 2012], при моделюванні реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи, нелінійна поведінка ґрунтів розраховується шляхом вирішення динамічного рівняння руху в часовій області з малими приростами по часу

Рівняння руху в часовій області має вигляд:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g(t), \quad (2.27)$$

де $\{\ddot{u}\}$ – вектор прискорення, $\{\dot{u}\}$ – вектор швидкостей, $\{u\}$ – вектор зміщень, $\{I\}$ – одиничний вектор, $\ddot{u}_g(t)$ – вхідна акселерограма.

$$[M] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & & & 0 \\ 0 & & m_3 & & 0 \\ 0 & & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix}, \quad (2.28)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & & & & \\ -C_1 & C_1 + C_2 & -C_2 & & & \\ & -C_2 & C_2 + C_3 & -C_3 & & \\ & & & & & -C_{n-1} \\ & & & & -C_{n-1} & C_{n-1} \end{bmatrix}, \quad (2.29)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & & & & \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 & & & \\ & -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 & & \\ & & & & & -K_{n-1} \\ & & & & -K_{n-1} & K_{n-1} \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

де $[M]$ — матриця мас, $[C]$ — матриця поглинання, $[K]$ — матриця жорсткості.

Для вирішення рівняння (2.27) використовується прямий метод інтегрування – метод Ньюмарка β (Newmark β method) [Newmark, 1959]. Метод Ньюмарка β є стійким і не вносить алгоритмічні похибки [Chopra, 1995].

Для апроксимації швидкості і зміщення в момент $t + \Delta t$ використовуються наступні формули:

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1 - \gamma)\Delta t] \ddot{u}_i + (\gamma\Delta t) \ddot{u}_{i+1}, \quad (2.31)$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t) \dot{u}_i + [(0,5 - \beta)(\Delta t)^2] \ddot{u}_i + [\beta(\Delta t)^2] \ddot{u}_{i+1}, \quad (2.32)$$

де $\beta=0,5$; $\gamma=0,25$ – параметри, які визначають точність і стійкість інтегрування.

Матриці маси $[M]$, поглинання $[C]$ і жорсткості $[K]$ обновлюються і переформовуються з врахуванням зміни властивостей ґрунту на кожному кроці приросту по часу. Для цього на кожному кроці по часу програма звертається до циклічної модифікованої гіперболічної моделі, напружено-деформований стан якої описується рівнянням:

$$\tau = \frac{G_{mo}\gamma}{1 + \beta \left(\frac{G_{mo}}{\tau_{mo}} \gamma \right)^S} = \frac{G_{mo}\gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^S},$$

де G_{mo} – початковий модуль зсуву; τ_{mo} – напруження, при 1-но відсотковій деформації; γ_r – зсувна деформація, що відповідає порогу міцності; β і S – параметри, які регулюють форму кривої.

Нелінійна циклічна залежність між напруженнями і деформаціями складається з двох функцій, одна з яких визначає характер серединної кривої (скелетна або характеристична крива), а інша відображає петлю гістерезису.

Скелетна крива, представлена на рис. 2.8, виражається функцією: $\tau = f(\gamma)$

Зазвичай функцію, що описує скелетну криву, отримують з випробувань ґрунтів на монотонне навантаження (поступово зростаюче навантаження).

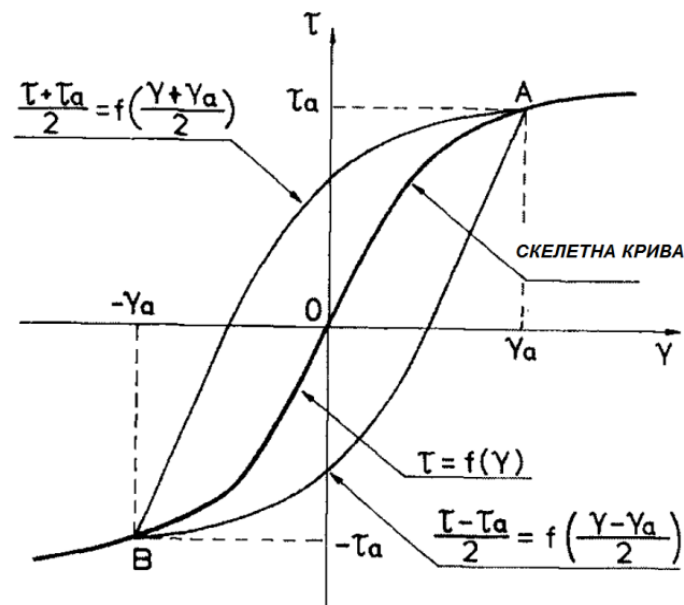


Рис. 2.8. Криві деформування і скелетна крива.

Гілки навантаження і розвантаження, по заданій скелетній кривій, будуються з використанням закону Мезінга (Masing law). Він полягає у виконанні наступних розширених правил Мезінга (Masing rule) [Masing, 1926]

1. При першому навантаженні залежність «напруження-деформація» співпадають з скелетною кривою.

2. Якщо напруження або деформація змінюють знак в деякій точці (γ_r, τ_r) , то розвантаження кривої відбувається вздовж кривої $\frac{\tau - \tau_r}{2} = f\left(\frac{\gamma - \gamma_r}{2}\right)$.

3. Якщо криві розвантаження і повторного навантаження перевищать максимальні напруження, досягнуті в минулих циклах навантаження, і перетнуть скелетну криву, то після перетину вони будуть слідувати вздовж неї до точки наступної зміни знаку напруження.

4. Якщо криві розвантаження і повторного навантаження перетинають аналогічні криві попереднього циклу, то після перетину вони будуть спрямовані вздовж відповідних кривих попереднього циклу.

Досвід показав, що одновимірне моделювання зазвичай буває достатньо. Саме його використовують в практиці зарубіжної інженерної сейсмології. Лише в деяких інженерно-геологічних ситуаціях (розрахунок зміщення схилів, фундаментів та ін.) необхідно застосовувати методи дво- або тривимірне моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи [Kramer, 1996]. При цьому, також, виявляється недостатнім використання поперечних хвиль і приходиться враховувати сейсмічні впливи від поздовжніх хвиль. Програми тривимірне моделювання використовуються, наприклад, для розрахунків взаємодії будівля-ґрунт. Методи вирішення дво- і тривимірних задач використовують ті ж алгоритми розрахунку що і одномірні методи, як в частотній (еквівалентне лінійне моделювання), так і в часовій області (нелінійне моделювання). Дво- і тривимірне моделювання реакції ґрунту для складно побудованих і латерально неоднорідних моделей геологічного середовища проводиться з використанням методу скінчених елементів і скінчених різниць.

З розглянутих вище методів моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи для врахування нелінійної поведінки ґрунтів, в умовах, коли зміна властивостей ґрунту не залежить від кількості циклів, використовують

еквівалентне лінійне моделювання, а в умовах, коли наявність циклів навантаження викликає зміну властивостей ґрунту – нелінійне моделювання.

Чинними в Україні нормативними документами [ДБН В.1.1-12:2014; РСН 65-87; РСН 60-86] передбачається використання лінійного моделювання для всього діапазону зсувних деформацій ґрунту. Нелінійні явища при цьому не враховуються. Хоча нелінійна поведінка будинків і конструкцій – враховується достатньо широко.

Використання програмних продуктів для еквівалентного лінійного моделювання і нелінійного моделювання потребує додаткових параметрів в вигляді залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від зсувної деформації, які можуть бути отримані в результаті польових або лабораторних досліджень за допомогою динамічних випробувань ґрунтів. В Україні такі випробування не проводилися. Дослідження зміни модуля зсуву і коефіцієнта поглинання, при деформаціях різної величини вимагають наявності складної і високоточної апаратури. В основному, вони проводяться, в Японії і США.

Різноманіття ґрунтів і наявність великої кількості результатів динамічних випробувань ґрунтів, проведених в різних умовах за кордоном, потребує узагальнення наявного досвіду лабораторних і польових досліджень зміни динамічних параметрів при деформаціях різної величини. В зв'язку з чим, актуальною стала задача розробки методики вибору для кожного шару розрахункових моделей ґрунту відповідних залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від зсувної деформації. Вибрані залежності повинні максимально точно відображати нелінійні властивості реальних типів ґрунту в кожному шарі геологічного розрізу на конкретних будівельних майданчиках. Вирішення цієї задачі є необхідним для ефективного застосування методів еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання для розрахунку реакції ґрунтової товщі в реальних умовах будівельних майданчиків на території України. Вирішенню даної проблеми присвячено наступний розділ.

Висновки до розділу 2

В розділі розглянуто теоретичні і методологічні основи методів: лінійного, еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання, які використовуються для розрахунку реакції ґрунту на сейсмічні впливи. Розглянуті методи моделювання дозволяють розраховувати спектральні характеристики і акселерограми на вільній поверхні або у внутрішніх точках шаруватої ґрунтової товщі при падінні сейсмічних коливань з нижнього півпростору на її підшову. Серед розглянутих методів діючими нормативними документами [ДБН В.1.1-12:2014; РСН 65-87; РСН 60-86] передбачається використання лише лінійного моделювання. В той же час приходиться констатувати, що багато будівельних майданчиків України розташовані на ґрунтах III та IV категорії за сейсмічними властивостями. Такі ґрунти можуть мати суттєві нелінійні властивості, які будуть проявлятися по-різному, в залежності від інтенсивності і частотного складу сейсмічного впливу. З огляду на це, необхідним є врахування нелінійних властивостей ґрунтів, яке здійснюється з використанням еквівалентного лінійного або нелінійного моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи. Застосування еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання пов'язане з труднощами правильного задання в розрахункових сейсмогеологічних моделях ґрунтової товщі законів зменшення модуля зсуву і збільшення коефіцієнта поглинання при різних сейсмічних навантаженнях на ґрунти майданчика (залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації). Вирішенню цієї проблеми присвячено наступний розділ.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ АПРОКСИМАЦІЇ РЕАЛЬНИХ ҐРУНТОВИХ КОМПЛЕКСІВ НЕЛІНІЙНОЮ ДЕФОРМАЦІЙНОЮ МОДЕЛЛЮ

Механізм поведінки ґрунту при динамічних навантаженнях є складним і залежить від багатьох факторів. Дослідження в галузі поведінки ґрунтів при сейсмічних навантаженнях в наш час активно розвиваються, чому значною мірою сприяють лабораторні та польові випробування ґрунтів під впливом динамічних навантажень.

Відомо, що деформаційні характеристики ґрунту при значних навантаженнях є нелінійними [Ишихара, 2006]. Ця властивість нелінійності виражається через модуль зсуву і коефіцієнт поглинання, величини яких змінюються, в залежності від величини деформації зсуву при сейсмічних впливах. При малих деформаціях модуль зсуву вважається максимальним і позначається G_{\max} . Він пов'язаний з швидкістю поперечних хвиль V_s рівнянням:

$$G_{\max} = V_s^2 \rho.$$

На сьогоднішній день є багато публікацій [Seed, Idriss, 1970; Roblee, Chiou, 2004; Lanzo et al., 2009; Ishibashi, Zhang, 1993 та ін.], в яких викладено результати лабораторних та польових досліджень залежності модуля зсуву $G(\gamma)$ і коефіцієнта поглинання $D(\gamma)$ від величини зсувної деформації γ . При розрахунках реакції ґрунту на сейсмічні впливи, з використанням еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання, виникає необхідність правильного вибору залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ для кожного шару моделі ґрунтової товщі з літературних джерел. При цьому потрібно, щоб вони якомога точніше відображали реальну зміну параметрів від величини зсувної деформації. Всі доступні результати вивчення залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, одержані різними дослідниками і опубліковані в різних джерелах, були зібрані, проаналізовані і систематизовані в створеній автором базі даних.

Сформована база даних включає в себе залежності $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ для різних типів ґрунтів, характерних для будівельних майданчиків в Києві, Одесі та в місцях розташування ряду важливих об'єктів на території України. База даних створена в *.xls* форматі в числовому та графічному вигляді, оскільки саме цей формат дозволяє зручно та швидко підбирати необхідні дані і використовувати їх основними програмними продуктами для еквівалентного лінійного або нелінійного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи (наприклад EERA, NERA [Bardet, Tobita, 2001], PROSHAKE [Schnabel et al., 1972; EduPro Civil System, 1998], DEEPSOIL [Hashash, Park, 2001]).

При створенні бази даних залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ було враховано, які параметри фізико-механічних властивостей ґрунтів визначаються в обов'язковому порядку при проведенні інженерних вишукувань для будівництва на території України, згідно вимог [ДБН А.2.1-1-2014]. Параметри, необхідні для цілеспрямованого пошуку в базі даних реологічних залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, визначаються за даними науково-технічних звітів про результати інженерно-геологічних вишукувань під будівництво для конкретних будівельних майданчиків.

Автором проаналізовано результати дослідження впливу різних факторів на форму залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$. Аналіз літературних даних показав неоднозначність висновків, одержаних різними авторами, щодо впливу таких фізичних параметрів ґрунту як структурні зв'язки і коефіцієнт пористості на характер досліджуваних залежностей. За результатами аналізу виділено основні параметри, за якими швидко і ефективно можна апроксимувати кожен шар моделі ґрунтової товщі, відповідними йому залежностями $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ використовуючи створену базу даних. Для глинистих порід – це індекс пластичності та глибина залягання; для піщаних порід – розмір частинок, їх процентний вміст і глибина залягання.

3.1. Аналіз факторів, що впливають на зменшення модуля зсуву і збільшення коефіцієнта поглинання

Ще в 1970-х роках в результаті лабораторних випробувань було встановлено перші залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації. Результати було викладено в роботах [Seed, Idriss, 1970; Hardin, Drnevich, 1972].

Характер залежностей модуля зсуву і коефіцієнта загасання від величини деформації залежить від складу ґрунту, вологості, структурних зв'язків між частинками, глибини залягання тощо.

Сучасні польові і лабораторні методи визначення залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації детально описано, наприклад, в оглядових роботах С. Крамера [Kramer, 1996] і Е.А. Вознесенського [Вознесенский, 2014]. В загальному, польові і лабораторні методи визначення цих характеристик ґрунту поділяються на дві групи, в залежності від того, малі чи великі деформації збуджуються в ґрунтах.

Цікавими є результати вивчення залежності коефіцієнта поглинання і модуля зсуву від коефіцієнта пористості. Б.Хардин і В.Дрневич виділили коефіцієнт пористості як один з головних показників, які впливають на коефіцієнт поглинання і модуль зсуву. Результати їх експериментів на резонансній колонці з ґрунтами непорушеного складу свідчать про зменшення коефіцієнта поглинання із збільшенням коефіцієнта пористості [Hardin, Drnevich, 1972]. В той час як результати досліджень нормально ущільнених глин, виконані К. Стокі і В. Айзенхауером в 1981р. на досконалішій апаратурі, навпаки, не виявили помітної залежності поглинання і модуля зсуву від пористості [Isenhower et al., 1981].

Івасакі [Iwasaki et al., 1978] і Кокушо [Kokusho, 1980] проводили детальні дослідження динамічних властивостей ґрунтів, в залежності від деформації, на стандартному японському піску «Тоюога». Дослідження проводили при напруженні усестороннього стиску 100 кПа. На рис. 3.1 і рис. 3.2 приведено

результати досліджень на зразках різної пористості. З рис. 3.1 видно, що зменшення модуля зсуву під дією деформації практично не залежить від величини коефіцієнта пористості для піщаних порід.

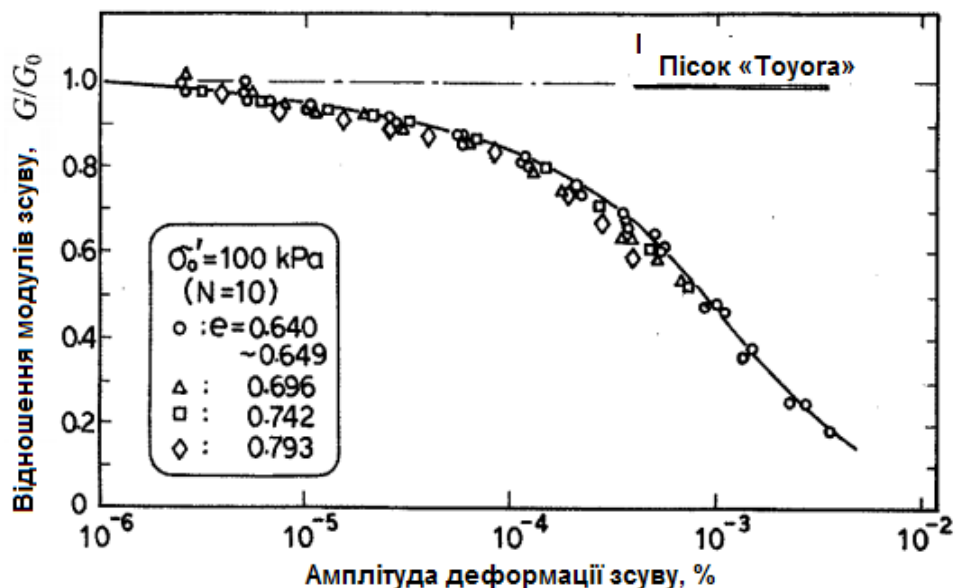


Рис. 3.1. Залежність нормалізованого модуля зсуву від деформації зсуву для піску «Тоуога» [Kokusho, 1980]. Різними значками показано результати для різного за величиною коефіцієнта пористості.

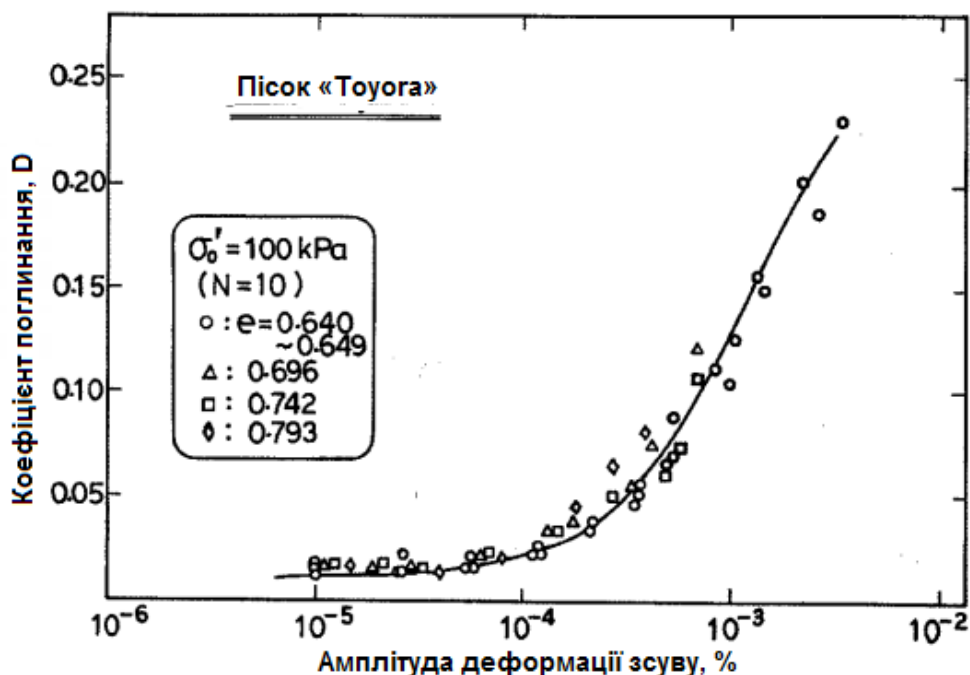


Рис. 3.2. Залежність коефіцієнта поглинання від деформації зсуву для піску «Тоуога» [Kokusho, 1980]

З рис. 3.2. видно, що коефіцієнт поглинання D збільшується при зростанні деформації зсуву і досягає $\sim 0,25$ при величині зсувної деформації 0,5%. Відношення між коефіцієнтом поглинання і деформацією зсуву не залежить від пористості зразка. Аналогічні результати були отримані для незв'язних ґрунтів в дослідях С. Сагасета [Sagasetta, 1991]. В своїй роботі С. Сагасета відзначає, що коефіцієнт поглинання і модуль зсуву дослідженого ним піску, які залежать від зсувної деформації і напруження усестороннього стиску, виявилися практично не залежними від коефіцієнта пористості. В той же час, при узагальненні серії польових досліджень іншими дослідниками, наприклад [Кондратьев, 1986], відмічається, що в водонасичених піщаних ґрунтах коефіцієнт поглинання лінійно зростає із збільшенням коефіцієнта пористості.

Характер впливу кислотності середовища на поглинаючі властивості розглянуто в роботі Ю. Ванга і В. Сью [Wang et al., 2006]. Відзначається, що мінімальне значення коефіцієнта поглинання зменшується із зменшенням значення рН ґрунту.

Івасакі [Iwasaki et al., 1978] і Кокушо [Kokusho, 1980] вивчили також вплив кількості циклів навантаження на зміну динамічних параметрів піску «Тоуога». Згідно з результатами досліджень, величини модуля зсуву, отримані в ході 2-го та 10-го циклів навантажень, відрізняються не більше ніж на 10% при деформації зсуву понад 10^{-4} . Приблизно така ж залежність характерна і для коефіцієнта поглинання. Слід відмітити, що при кількості циклів, яка перевищує 10, їх вплив стає несуттєвим. Отже, практично у всіх випадках розрахунку реакції піщаного ґрунту на сейсмічні впливи можна нехтувати зміною модуля зсуву і коефіцієнта поглинання внаслідок збільшення кількості циклів навантаження. Виняток складає випадок недренованого піщаного ґрунту при великій деформації зсуву, при якому відбувається значне збільшення тиску порової води.

Японські вчені досліджували вплив напруження усестороннього стиску від деформації [Iwasaki et al., 1978; Tatsuoka, Iwasaki, 1978; Kokusho, 1980]. Зокрема, Кокушо [Kokusho, 1980] узагальнив результати досліджень на

трьохосьове циклічне стискування (див. рис. 3.3 і 3.4). В цих дослідженнях зразки були ущільнені під тиском 20...300 кПа і потім піддані циклічному осьовому навантаженню у недренованих умовах.

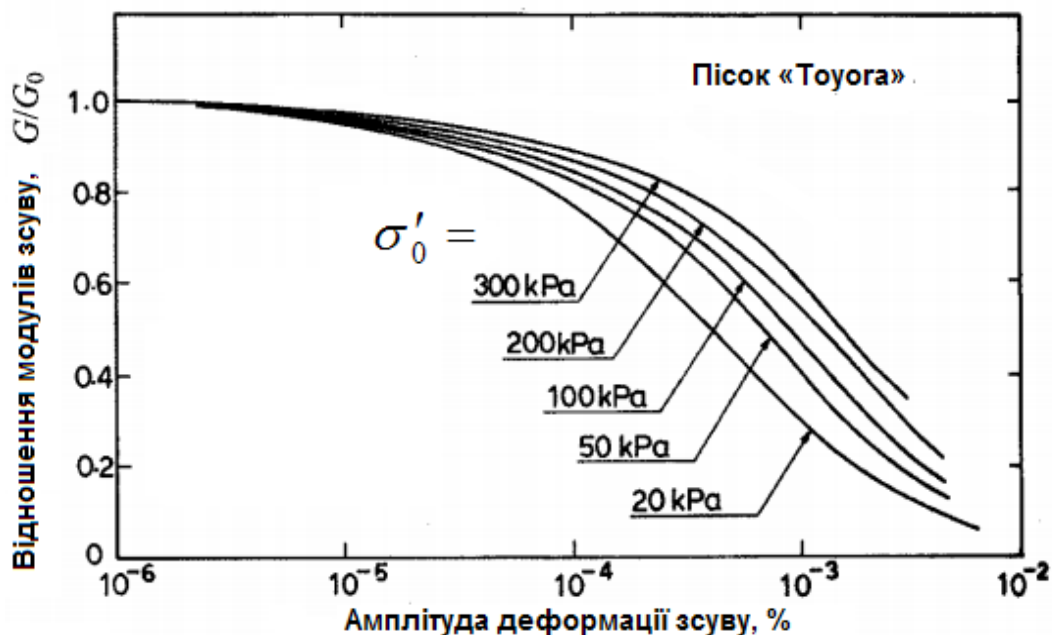


Рис. 3.3. Вплив величини напруження усестороннього стиску на модуль зсуву в залежності від деформації [Kokusho, 1980].

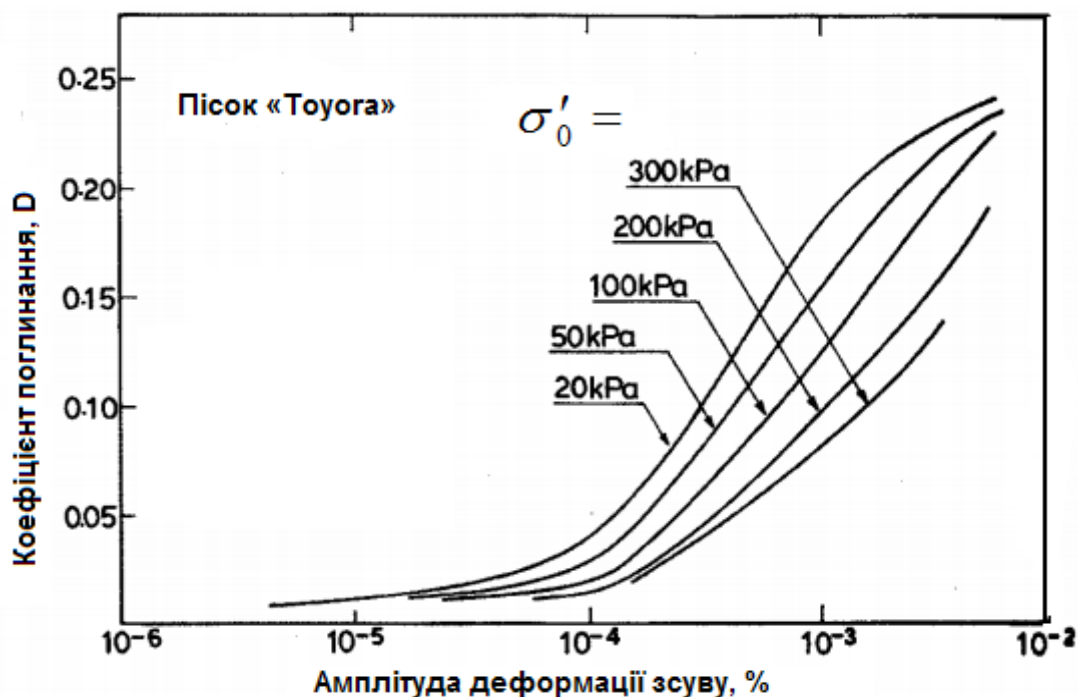


Рис. 3.4. Вплив величини напруження усестороннього стиску на коефіцієнт поглинання, в залежності від деформації [Kokusho, 1980]

З рис. 3.3 видно, що швидкість зменшення модуля зсуву зростає разом з деформацією при зменшенні стискуючих напружень. Таку закономірність можна пояснити, розглянувши залежність напруження усестороннього стиску від міцності τ_f і початкового модуля зсуву G_0 .

Нехай міцність піску виражається через критерій руйнування Кулона – Мора:

$$\tau_f = \sigma'_0 \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.1)$$

де φ - кут внутрішнього тертя.

Формула для розрахунку модуля зсуву при малих деформаціях запишеться як:

$$G_0 = 8400 \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_0)^{0,5} \quad (3.2)$$

де e – коефіцієнт пористості.

Підставляючи (3.1) і (3.2) в рівняння для визначення еталонної деформації $\gamma_r = \tau_f / G_0$, отримаємо для чистих пісків відношення еталонної деформації до напруження усестороннього стиску:

$$\gamma_r \sim (\sigma'_0)^{0,5} \quad (3.3)$$

З рівняння (3.3) видно, що еталонна деформація зростає разом з напруженням усестороннього стиску. Відповідно, збільшення напруження усестороннього стиску призводить до збільшення модуля зсуву при заданому рівні деформації, що підтверджують результати емпіричних досліджень (див. рис. 3.3).

Аналізуючи поглинаючі характеристики для піску «Тоуога», отримані під час тих же досліджень (див. рис. 3.4), можна зробити висновки, що коефіцієнт поглинання зростає із зменшенням напруження усестороннього стиску. Цей факт можна розглядати як логічний наслідок, якщо припустити, що коефіцієнт поглинання пов'язаний з відношенням модулів G/G_0 залежністю

$$D = \frac{2r-1}{\pi r+1} \left(1 - \frac{G}{G_0} \right).$$

Результати досліджень, проілюстровані на рис. 3.1 і 3.2, свідчать про наявність залежності між відношенням модулів зсуву $\frac{G}{G_0}$, коефіцієнтом поглинання D і величиною деформації зсуву γ , яка приймається в якості робочого параметра.

Результати приведених вище досліджень описують реакцію піску під дією циклічного навантаження в недренованих умовах. Кокушо [Kokusho, 1980] проводив також серії трьохосьових навантажень зразків при наявності дренажу. Результати цих досліджень показали, що при величинах деформацій від 10^{-6} до 5×10^{-3} дренажу практично не впливає ні на модуль зсуву, ні на характеристики поглинання піску «Тоуога». Це цілком логічно, якщо врахувати, що ефект дилатансії починає проявлятися, коли деформація перевищує 5×10^{-3} [Ишихара, 2006].

Аналіз літературних даних про вплив структурних зв'язків в глинистих ґрунтах на залежності коефіцієнта поглинання і модуля зсуву від величини зсувної деформації привів до неоднозначних висновків.

Широкомасштабні лабораторні дослідження по виявленню залежності деформаційних характеристик зв'язних ґрунтів від деформації проводилися багатьма дослідниками. Основні результати викладено в роботах [Seed, Idriss, 1970; Kovacs et al., 1971; Hardin, Drnevich, 1972; Taylor, Parton, 1973; Andrus, 2003; Stokoe, 2004 та ін.]. Всі вони вказують, що модуль зсуву для глин значно зменшується при перевищенні напруженнями порога пружності.

Андерсон і Річарт [Anderson, Richart, 1976] проводили комплексні дослідження на зразках п'яти видів глин з непорушеною структурою відібраних дослідниками в лабораторіях США. Глини характеризувались невеликим числом пластичності (від 20 до 45), величиною недренованої міцності на зсув в діапазоні 70...85 кПа. Тільки у одного зразку недренованої глини міцність на зсув складала 15 кПа. На рис. 3.5 представлено узагальнені результати

досліджень з використанням приладу для резонансного випробування колонок ґрунту. Видно, що модуль зсуву починає зменшуватись тільки після того, як деформація досягає 5×10^{-5} . Це явище не відповідає поведінці незв'язних ґрунтів, де модуль зсуву починає зменшуватися при деформації приблизно 10^{-5} (див. рис. 3.1 і рис. 3.2).

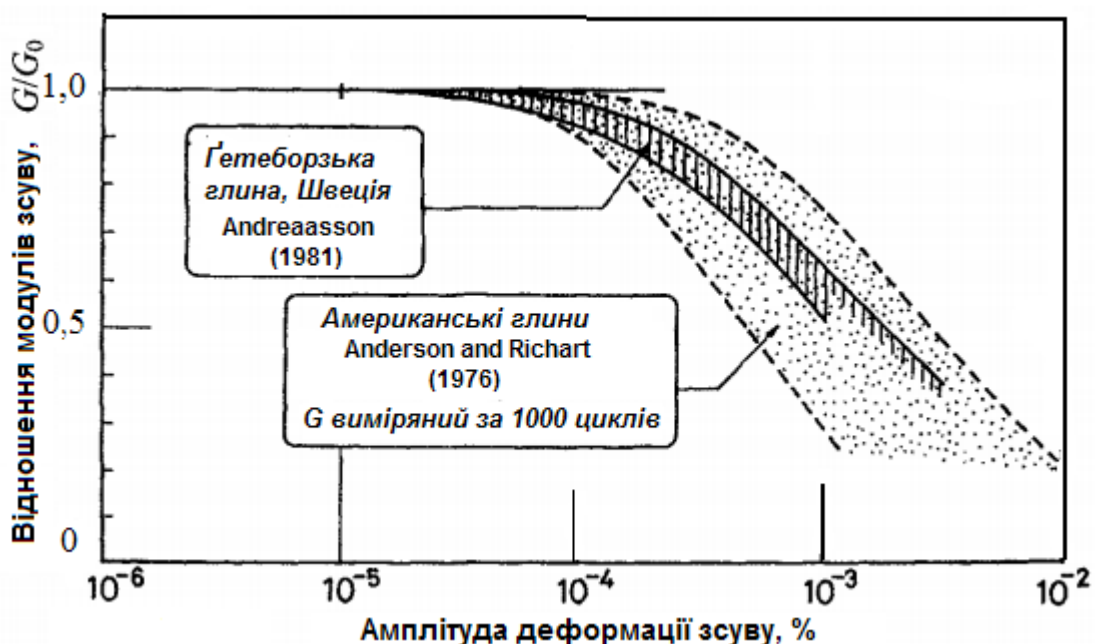


Рис.3.5. Криві зменшення модуля зсуву для глин.

Андреассон [Andreasson, 1979, 1981] досліджував також залежність модуля зсуву від деформації на зразках пластичних глин, відібраних на трьох ділянках в районі Гетеборга (Швеція). Число пластичності глин змінювалося від 20 до 60. Зразки непорушеної структури випробували в лабораторії з використанням приладу для резонансного випробування колонок. Проводилися також польові випробування величин модуля зсуву при великих рівнях деформації. На рис. 3.5 видно, що крива зменшення модуля зсуву гетеборзької глини по формі подібна до графіка, побудованого Андерсеном і Річартом [Anderson, Richart, 1976] для американських зразків глин.

Кім, Новак [Kim, Novak, 1981] і Кокушо [Kokusho et al., 1982] досліджували вплив напруження усестороннього стиску на зміну модуля зсуву і

коефіцієнта поглинання в умовах консолідації зразків при зростанні величини зсувної деформації. За результатами циклічних випробувань [Kokusho et al., 1982] було встановлено, що зміна напруження усестороннього стиску в межах від 45 до 500 кПа практично не впливає на деформування зв'язних ґрунтів непорушеної структури з числом пластичності 35...55. Вплив напруження усестороннього стиску на характер залежності коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації є незначним.

В роботі [Iwasaki et al., 1978] вказується, що на зменшення модуля зсуву впливають ефективні напруження усестороннього стиску, особливо для ґрунтів з низькою пластичністю: із збільшенням ефективних напружень усестороннього стиску (див. рис. 3.6) поріг «нелінійної поведінки» проявляється при більших значеннях зсувної деформації.

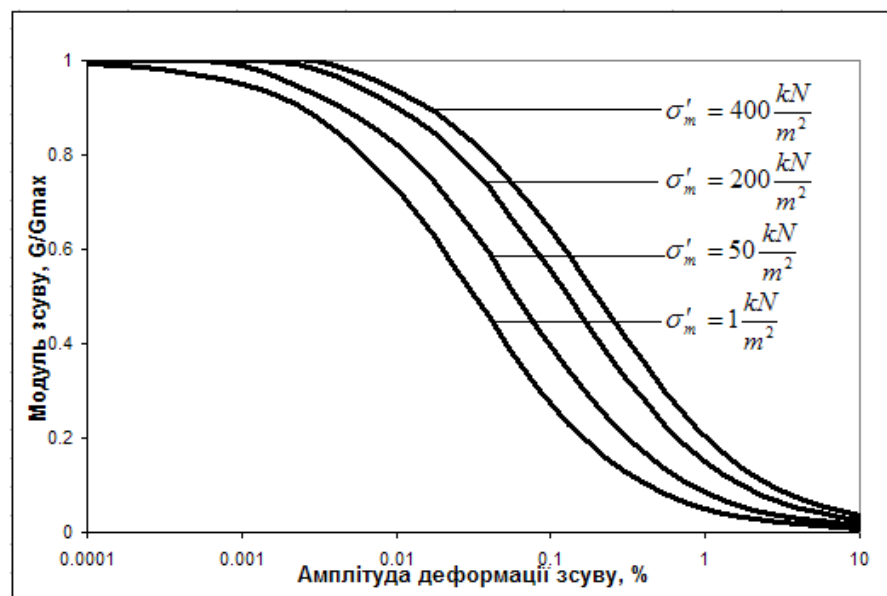


Рис. 3.6. Залежність модуля зсуву від величини зсувної деформації для ґрунтів при різних ефективних напруженнях усестороннього стиску (з роботи [Iwasaki et al., 1978]).

В роботі [Ishibashi, Zhang, 1993] була знайдена залежність ефективних напружень усестороннього стиску σ'_m та індексу пластичності PL від модуля зсуву G . Цю залежність представлено у вигляді рівняння

$$\frac{G}{G_{\max}} = K(\gamma, PL)(\sigma'_m)^{m(\gamma, PL) - m_0},$$

$$\text{де } K(\gamma, PL) = 0,5 \left\{ 1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0,000102 + n(PL)}{\gamma} \right)^{0,492} \right] \right\},$$

$$m(\gamma, PL) - m_0 = 0,272 \left\{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0,000556}{\gamma} \right)^{0,4} \right] \right\} \exp(-0,0145 PL^{1,3}),$$

$$n(PL) = 0 \text{ для } PL=0,$$

$$n(PL) = 3,37 \times 10^{-6} PL^{1,404} \text{ для } 0 < PL \leq 15,$$

$$n(PL) = 7,0 \times 10^{-7} PL^{1,976} \text{ для } 15 < PL \leq 70,$$

$$n(PL) = 2,7 \times 10^{-5} PL^{1,115} \text{ для } PL > 70.$$

Ішібаші та Занг [Ishibashi, Zang, 1993] вивели емпіричне співвідношення, яке пов'язує коефіцієнт поглинання ґрунту з його модулем зсуву і пластичністю:

$$h = 0,333 \frac{1 + \exp(-0,0145 PL^{1,3})}{2} \left[0,586 \left(\frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 1,547 \frac{G}{G_{\max}} + 1 \right].$$

В цій же роботі вказується, що особливо помітним є вплив напруження усестороннього стиску на модуль зсуву і коефіцієнт поглинання в ґрунтах з низькою пластичністю. В роботі [Ishibashi, Zhang, 1993] приводяться залежності $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ для ґрунтів з низьким рівнем пластичності.

Кокушо [Kokusho et al., 1982] досліджував вплив історії консолідації (нормальне ущільнення, переущільнення, довготривале прикладення ущільнюючого тиску) на зразках природних глин непорушеної структури з числом пластичності 40...60. За результатами узагальнення даних випробувань встановлено, що історія консолідації ґрунту не чинить помітного впливу на зміну модуля зсуву і коефіцієнта поглинання. Тому модуль зсуву і коефіцієнт поглинання будуть зменшуватися або збільшуватися, в широкому діапазоні деформацій зсуву, в тій же пропорції, що і для зразків, які не піддавалися консолідації.

Студер [Studer et al., 1980] одним з перших почав досліджувати деформаційні характеристики пісків з вмістом гравію. Ці дослідження були викликані необхідністю вивчення ділянки під будівництво камененакидної греблі і атомної станції. Відібрані зразки ущільнювалися в форми діаметром 15 см і висотою 30 см. Отримані в результаті досліджень залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації представлено на рис. 3.7. і рис. 3.8.

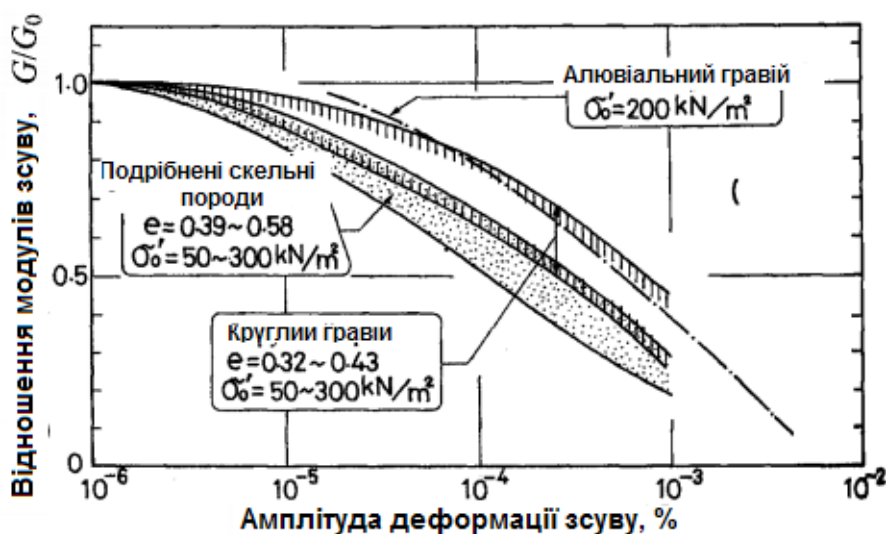


Рис.3.7. Залежність модуля зсуву від деформації для крупнозернистих ґрунтів [Kokusho, 1980].

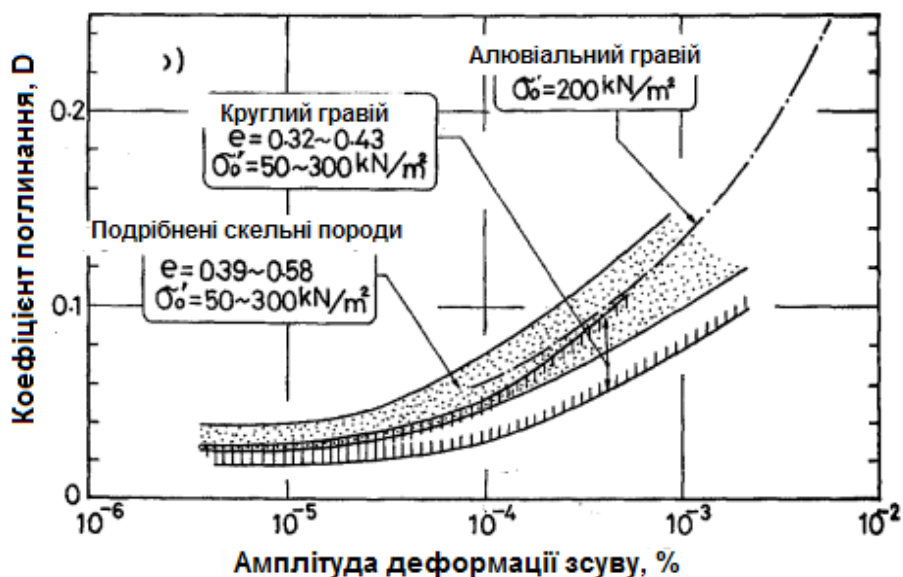


Рис.3.8. Залежність коефіцієнта поглинання від деформації для крупнозернистих ґрунтів [Kokusho, 1980].

З рис. 3.7 видно, що зменшення модуля зсуву для щебеню і круглого гравію появляється при рівні деформації 5×10^{-6} , що є меншим, ніж для чистих пісків. Тому, при моделюванні реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи з врахуванням нелінійних властивостей ґрунту при виборі для розрахунків залежності модуля зсуву від деформації для гравелистих ґрунтів не варто використовувати залежності, одержані для пісків, що, наприклад, допускалося в роботах [Seed, Idriss, 1982 та ін.]. Коефіцієнт поглинання для гравелистих ґрунтів починає збільшуватись приблизно на тому ж рівні деформації, що і для піщаних.

Подібні серії досліджень проводилися на зразках роздроблених скельних порід [Kokusho et al., 1982]. Результати цих досліджень відображають тенденцію до зниження модуля зсуву і зростання коефіцієнта поглинання при збільшенні деформації зсуву, що підтверджено дослідженнями Студера [Studer et al., 1980].

Результати досліджень, щодо впливу напружень усестороннього стиску на модуль зсуву і на коефіцієнт поглинання на зразках з 25- і 50%-ним вмістом гравію, представлено в роботі [Tanaka et al., 1987]. Вони вказують на високу ступінь нелінійності поведінки такого ґрунту навіть при низьких напруженнях усестороннього стиску. Це пояснюється різким зменшенням модуля зсуву і зростанням коефіцієнта поглинання при зменшенні напружень усестороннього стиску. Модуль зсуву і коефіцієнт поглинання починають змінюватися при більш низькому рівні зсувної деформації. Зменшення модуля зсуву починається при нижчому рівні деформації при збільшенні кількості циклів навантаження. Однак ці властивості ґрунту не є постійними. Вони лише характеризують його конкретний стан.

В роботах [Zen et al., 1978; Kokusho et al., 1982] вперше було відзначено вплив пластичності ґрунту на форму кривої зниження модуля зсуву. Модулі зсуву ґрунтів з високою пластичністю зменшуються повільніше, ніж модулі зсуву низько пластичних ґрунтів. В роботах [Sun et al., 1988; Vuceti, Dobry,

1991] було проаналізовано велику кількість експериментальних даних і зроблено висновки, що на форму кривої зменшення модуля зсуву більше впливає величина індексу пластичності, ніж інші показники. Проаналізувавши, велику кількість динамічних випробувань різних глинистих ґрунтів, Вучетіч запропонував криву, представлену на рис. 3.9, яка пов'язує порогову деформацію зсуву і число пластичності для таких ґрунтів. При цьому враховується, що коефіцієнт поглинання почне збільшуватися по мірі виходу деформації зсуву за межі ділянки пружності [Vucetic, 1994a,b].

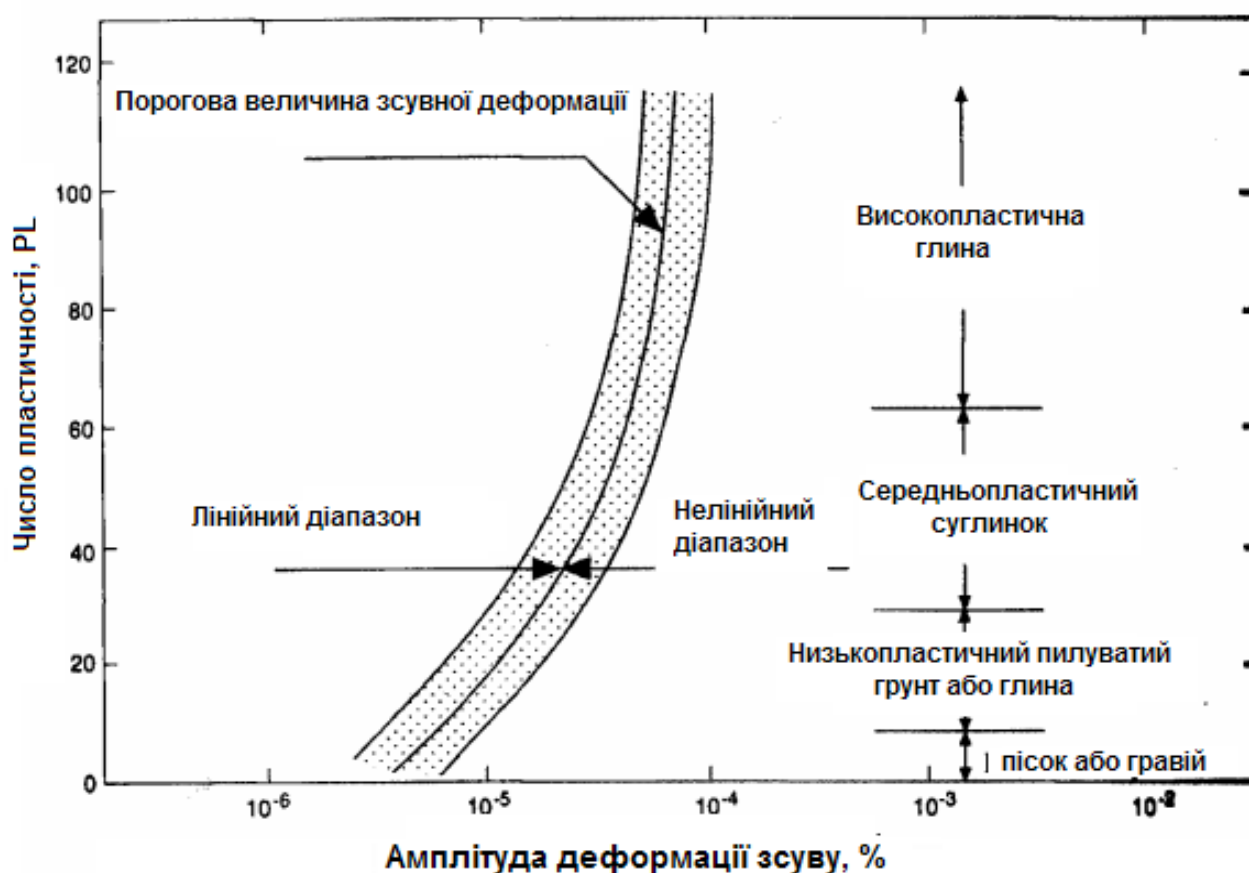


Рис. 3.9. Взаємозв'язок порогових значень деформації зсуву і пластичності ґрунтів [Vucetic, 1994a,b].

За результатами проведених робіт були побудовані залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації для ґрунтів з різними індексами пластичності PI (див. рис. 3.10 і 3.11).

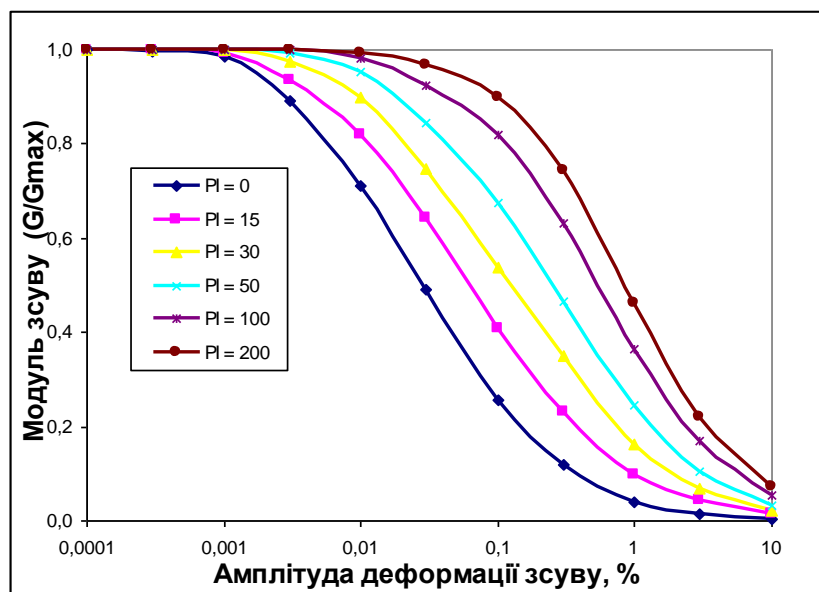


Рис. 3.10. Залежність модуля зсуву від величини зсувної деформації для глинистих ґрунтів з різними індексами пластичності (з роботи [Vucetic, Dobry, 1991]).

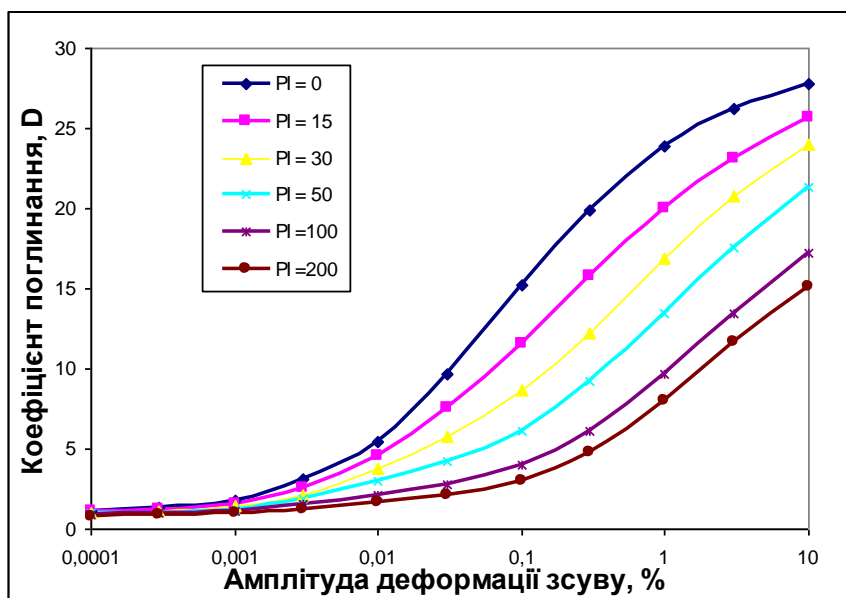


Рис. 3.11. Залежність коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації для глинистих ґрунтів з різними індексами пластичності (з роботи [Vucetic, Dobry, 1991]).

Отже, саме число пластичності, за думкою багатьох авторів [Lanzo, 2009; Vucetic, Dobry, 1991 та ін.], впливає, як на зменшення модуля зсуву, так і на

величину коефіцієнта поглинання і контролює форму кривої. Дослідження Г. Ланзо [Lanzo, 2009] для глин з числом пластичності 15 і 30 показали, що чим нижче число пластичності, тим більшим є коефіцієнт поглинання. Найчіткіше це проявляється при величині зсувної деформації 0,01%. З графіків на рис. 3.10 і 3.11, побудованих за результатами досліджень [Vucetic and Dobry, 1991], видно, що поріг «нелінійної поведінки» знаходиться значно далі в області зсувної деформації для ґрунтів з високою пластичністю. Ця інформація є важливою при прогнозуванні реакції ґрунту на сейсмічні впливи. Для ґрунтів з індексом пластичності $PL=0$ залежність модуля зсуву та коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації приблизно співпадає з аналогічною залежністю для крупнозернистих ґрунтів.

Айдріс [Idriss, 1999] за результатами нових досліджень модифікував залежності $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, представлені в роботі [Vucetic, Dobry, 1991] для ґрунтів з індексом пластичності $PL=30, 50$ і 100 . Відмінності в значеннях залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ з робіт [Vucetic and Dobry, 1991] і [Idriss, 1999] представлено в Таблицях 3.1 і 3.2.

Таблиця 3.1. Відношення модуля зсуву G до його максимального значення G_{max} для ґрунтів з різною пластичністю при різних величинах деформації зсуву за даними [Vucetic, Dobry, 1991] і [Idriss, 1999]

Деформація зсуву (%)	Відношення G до G_{max}					
	PI=30 [Vucetic and Dobry, 1991]	PI = 30 [Idriss, 1999]	PI=50 [Vucetic and Dobry, 1991]	PI = 50 [Idriss, 1999]	PI=100 [Vucetic and Dobry, 1991]	PI = 100 [Idriss, 1999]
0,0001	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00
0,0003	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00
0,001	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00
0,003	0,975	0,99	0,992	0,99	1,000	1,00
0,01	0,898	0,91	0,953	0,95	0,982	0,98
0,03	0,749	0,75	0,846	0,85	0,925	0,93

0,1	0,537	0,55	0,676	0,68	0,818	0,82
0,3	0,350	0,36	0,465	0,48	0,631	0,63
1	0,162	0,17	0,246	0,28	0,365	0,38
3	0,070	0,09	0,105	0,14	0,169	0,18
10	0,023	0,04	0,034	0,06	0,054	0,07

Таблиця 3.2. Коефіцієнт поглинання для ґрунтів з різною пластичністю при різних величинах деформації зсуву за даними [Vucetic and Dobry, 1991] і [Idriss, 1999]

Деформація зсуву (%)	Коефіцієнт поглинання для ґрунтів з різною пластичністю, %					
	PI=30 [Vucetic and Dobry, 1991]	PI = 30 [Idriss, 1999]	PI=50 [Vucetic and Dobry, 1991]	PI = 50 [Idriss, 1999]	PI=100 [Vucetic and Dobry, 1991]	PI = 100 [Idriss, 1999]
0,0001	1,03	0,2	0,96	0,2	0,90	0,2
0,0003	1,13	0,5	1,04	0,5	0,95	0,5
0,001	1,41	0,8	1,27	0,8	1,14	0,8
0,003	2,15	1,4	1,93	1,4	1,56	1,2
0,01	3,74	3,0	2,95	2,4	2,08	1,9
0,03	5,80	5,1	4,20	3,9	2,82	2,8
0,1	8,64	8,5	6,15	6,2	4,03	4,0
0,3	12,25	12,3	9,17	9,3	6,08	6,2
1	16,86	16,9	13,41	13,4	9,68	9,7
3	20,80	21,1	17,57	17,6	13,46	13,9
10	24,00	26,3	21,35	22,8	17,20	19,1

З таблиць 3.1 і 3.2. видно, що модуль зсуву в роботах [Vucetic, Dobry, 1991] і [Idriss, 1999] відрізняються, починаючи з деформації зсуву 0,003%, а коефіцієнт поглинання, згідно [Idriss, 1999], є значно меншим ніж згідно даних [Vucetic, Dobry, 1991] при значеннях деформації в діапазоні 0,0001% ÷ 0,1%. Зазначені особливості необхідно враховувати при розрахунках реакції ґрунту на сейсмічні впливи, оскільки зміна параметрів в зазначеному діапазоні зсувної деформації може внести суттєві корективи в результати розрахунків сейсмічних

впливів для ділянок на слабосейсмічних територіях, до яких відноситься значна частина України.

В роботі [Roblee, Chiou, 2004] викладено результати досліджень впливу розміру частинок піщаних порід з різним процентним вмістом на залежності $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, деякі з них представлені на рис. 3.12 і 3.13.

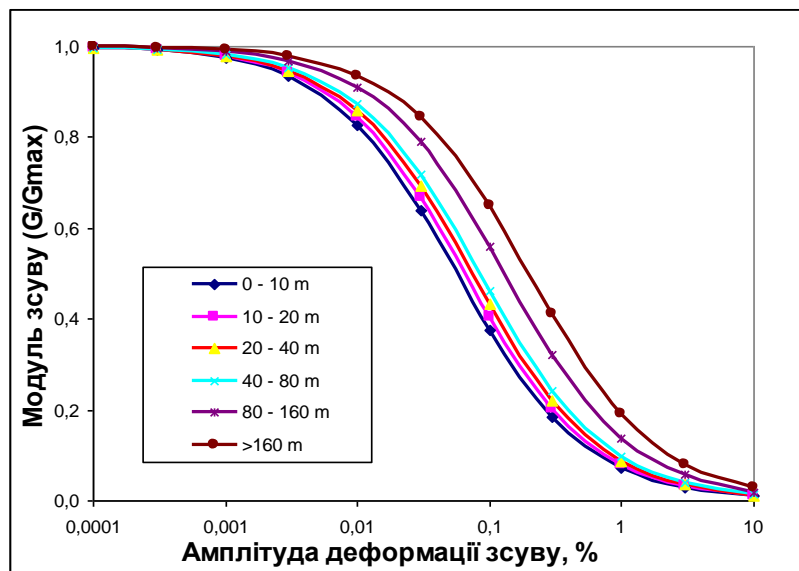


Рис. 3.12. Залежність модуля зсуву від величини зсувної деформації для ґрунтів з вмістом менше 30% частинок з розмірами $d < 0,075$ мм для різної глибини залягання шарів ґрунту (з роботи [Roblee, Chiou, 2004]).

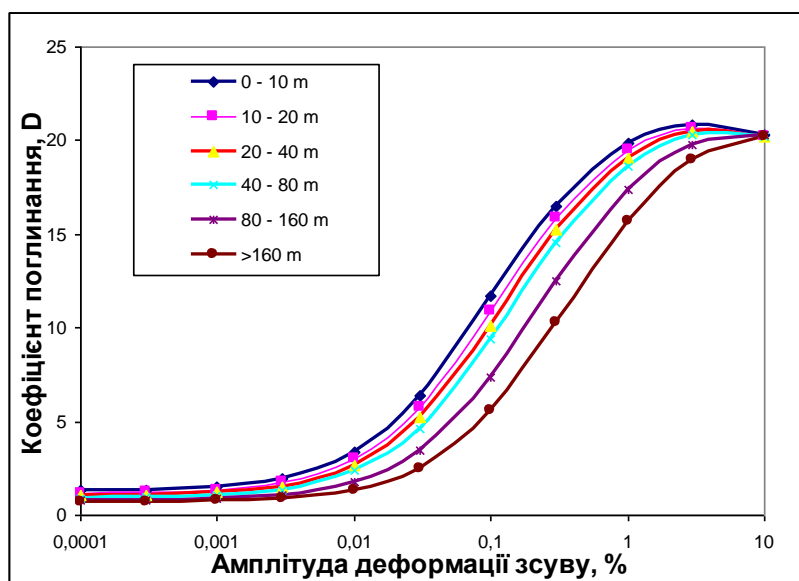


Рис. 3.13. Залежність коефіцієнта поглинання від зсувної деформації для ґрунтів з вмістом менше 30% частинок з розмірами $d < 0,075$ мм для різної глибини залягання шарів ґрунту (з роботи [Roblee, Chiou, 2004]).

Залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації, представлені в роботі [Roblee, Chiou, 2004], є модифікацією залежностей з роботи [EPRI, 1993] з врахуванням отриманих нових результатів досліджень.

В роботі [Yoshida, Iai, 1998] відзначається, що залежності модуля зсуву і поглинання від величини деформації, розраховані з використанням записів реальних землетрусів, добре узгоджуються з залежностями, отриманими в лабораторних і польових умовах. Завдяки цьому, зазначені емпіричні залежності можуть з високим рівнем надійності використовуватися при моделюванні реакції ґрунтів на сейсмічні впливи з урахуванням нелінійних властивостей ґрунтів.

3.2. Вплив вибору залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації на параметри частотної характеристики моделі ґрунтової товщі

Удосконалення методики побудови розрахункових сейсмогеологічних моделей здійснене автором шляхом введення в них додаткової інформації про нелінійні властивості ґрунтів, які описуються залежностями модуля зсуву G і коефіцієнта поглинання D від величини деформації γ . При побудові моделей ґрунту використовувалася створена автором база даних про залежність модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації для кожного шару ґрунтових товщ під конкретними будівельними майданчиками.

Автором проведено дослідження впливу епістемічних похибок, які вносяться при виборі відповідних залежностей, на параметри розрахованої частотної характеристики моделі ґрунтової товщі.

На Рис. 3.14 представлено частотну характеристику ґрунтової товщі під будівельним майданчиком в Печерському районі Києва, розраховану із застосуванням еквівалентного лінійного моделювання за допомогою

програмного продукту PROSHAKE. Нелінійні характеристики шарів моделі ґрунтової товщі апроксимувались залежностями $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ двома способами: 1) з врахуванням літологічного складу та фізико-механічних властивостей кожного із шарів, 2) без врахування літологічного складу та фізико-механічних властивостей кожного із шарів (тобто з наявністю епістемічних похибок в описанні фізико-механічних властивостей та літологічного складу моделі ґрунтової товщі).

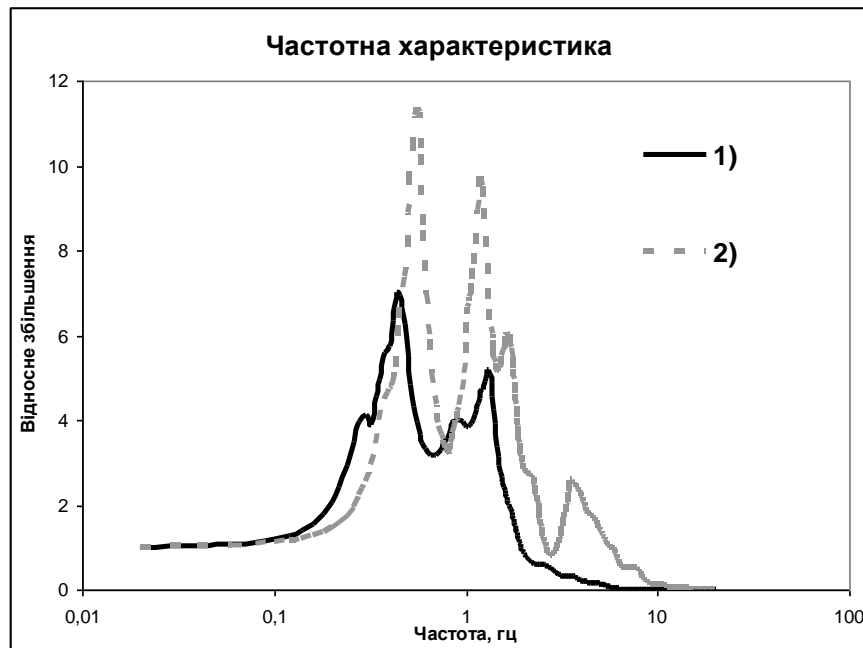


Рис. 3.14. АЧХ ґрунтової товщі під будівельним майданчиком в Печерському районі Києва розраховані з врахуванням нелінійних властивостей ґрунтів: 1) вибір залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ від деформації зсуву виконувався з врахуванням літології кожного із шарів, 2) залежності $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ від деформації зсуву приймалися без врахування літологічного складу шарів ґрунтової товщі.

З рис. 3.14 видно, що у випадку, коли літологічний склад та фізико-механічні властивості при апроксимації нелінійних характеристик кожного із шарів залежностями $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ задаються з похибками, в розрахованій АЧХ моделі ґрунтової товщі в частотному діапазоні від 1 до 10 Гц з'являються додаткові максимуми і спостерігається збільшення коефіцієнтів підсилення у

всіх максимумах характеристики. В табл. 3.3 наведено числові значення максимумів АЧХ представлених на рис. 3.14

Таблиця 3.3. Числові значення АЧХ представлених на рис. 3.14

Номер максимуму АЧХ	Використання $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ з врахуванням літологічного складу та фізико-механічних властивостей кожного із шарів		Використання $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ без врахування літологічного складу та фізико-механічних властивостей кожного із шарів	
	Частота, Гц	Коефіцієнт підсилення	Частота, Гц	Коефіцієнт підсилення
1	0,44	7,01358	0,56	11,37226
2	1,32	5,20448	1,2	9,7236
3	-	-	3,58	2,58074

З таблиці видно, що, коли при апроксимації кожного шару моделі ґрунтової товщі відповідними залежностями $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ не враховувався літологічний склад та фізико-механічні властивості ґрунтових шарів, то у цьому випадку розрахунок АЧХ може привести до результатів з суттєвими похибками, а саме:

- до появи більшої кількості максимумів АЧХ (частина з яких будуть хибними);
- до неконтрольованого зміщення максимумів АЧХ, як в сторону нижчих частот, так і в сторону вищих, на 10 – 20 %;
- до зміни значень відносного підсилення коливань в 1,6 – 1,9 разів.

Для моделі ґрунтової товщі під будівельним майданчиком по вул. Березняківська, 30 в Києві, з використання еквівалентного лінійного моделювання і програмного продукту PROSHAKE та апроксимацією реологічних властивостей шарів ґрунту, складених пісками, з використанням залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, опублікованих в різний часовий період в роботах: а) [Roblee, Chiou, 2004]; б) [Seed, Idriss, 1970] - було розраховано частотні

характеристики ґрунту. Інші параметри розрахункової моделі в обох випадках були однаковими. Результати розрахунку представлено на рис. 3.15.



Рис. 3.15. АЧХ ґрунтової товщі під будівельним майданчиком по вул. Березняківська, 30 в Києві розраховані з врахуванням нелінійних властивостей для шарів ґрунту складених пісками за даними: а) [Roblee and Chiou, 2004]; б) [Seed, Idriss, 1970]

З рис. 3.15 видно, що при використанні залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, отриманих в результаті досліджень деформаційних характеристик ґрунтів в 2000-х роках, порівняно із залежностями, отриманими в 1970-х роках, спостерігається незначне збільшення ширини частотної області АЧХ, на якій спостерігається підсилення сейсмічних коливань ґрунту, і чіткіше проявляються його максимуми. Зміщення частот максимумів при цьому не спостерігається. Таким чином, можна сформулювати наступні висновки.

- При використанні застарілих числових залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, можна недооцінити частотний діапазон резонуючого підсилення сейсмічних коливань.
- Залежності $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, отримані за результатами лабораторних та польових досліджень в 2000-х роках потребують уточнення інформації про основні параметри, які визначають характер залежностей модуля зсуву і

коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації (число пластичності для глинистих порід, розмір частинок та їх процентний вміст для піщаних порід).

Висновки до розділу 3

У третьому розділі представлено результати збору, аналізу і систематизації матеріалів лабораторних та польових досліджень деформаційних характеристик ґрунтів, одержаних дослідниками в Японії та США. Деформаційні характеристики ґрунту є нелінійними. Ця властивість ґрунтів виражається через модуль зсуву і коефіцієнт поглинання, величини яких можуть суттєво змінюватися, в залежності від величини деформації зсуву при сейсмічних навантаженнях.

При еквівалентному лінійному і нелінійному моделюванні реакції ґрунту на сейсмічні впливи необхідно в розрахункових сейсмогеологічних моделях ґрунтової товщі задавати для кожного шару додаткові параметри, які характеризують нелінійні властивості ґрунтів, а саме залежності $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$. Отримати в лабораторних або польових умовах такі залежності для кожного шару ґрунту верхньої частини розрізу під будівельним майданчиком в умовах України практично неможливо. У зв'язку з цим, рекомендується використовувати фондові матеріали і матеріали опубліковані зарубіжними авторами.

1. За результатами детального вивчення результатів закордонних досліджень зміни динамічних параметрів ґрунтів при деформаціях різної величини, автором створено базу даних залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ для різних типів ґрунтів, характерних для майданчиків на території України. Зокрема для майданчиків в містах Києві та Одесі, а також для майданчиків розташування ряду важливих об'єктів на території країни. База даних створена в форматі .xls в числовому та графічному вигляді. Використаний формат дозволяє зручно та оперативно підбирати дані при використанні таких програмних продуктів для

еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи як: EERA, NERA[Bardet, Tobita, 2001], PROSHAKE [Schnabel et al., 1972; EduPro Civil System, 1998], DEEPSOIL [Hashash, Park, 2001] та ін.

2. Досліджено вплив літологічного складу та фізико-механічних параметрів ґрунту на зменшення модуля зсуву і збільшення коефіцієнта поглинання. Виділено основні параметри, за якими швидко і ефективно можна апроксимувати нелінійні властивості кожного із шарів моделі ґрунтової товщі відповідними залежностями $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ зі створеної бази даних. Наявна в базі даних інформація про реологічні властивості ґрунтів дозволяє максимально точно (на рівні сучасних знань) врахувати нелінійні властивості ґрунтів при математичному моделюванні їх реакції на сейсмічні впливи. Для глинистих порід - це індекс пластичності PL та глибина залягання; для піщаних порід - розмір частинок, їх процентний вміст та глибина залягання.

3. Досліджено вплив епістемічних похибок, які можуть виникнути при виборі залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ для ґрунтових шарів розрахункової сейсмогеологічної моделі, на параметри її частотної характеристики, обчислюваної з використанням програмного продукту PROSHAKE для математичного еквівалентного лінійного моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи.

Розроблений автором методологічний підхід формування розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтової товщі, шляхом введення залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, які відображають нелінійні властивості ґрунту, дозволяє максимально наблизити обчислювані частотні характеристики ґрунтової товщі до реальних, що значно підвищить обґрунтованість і точність кількісних параметрів сейсмічної небезпеки на досліджуваних будівельних і експлуатаційних майданчиках, необхідних для розробки ефективних заходів із забезпечення сейсмостійкості проєктованих і наявних об'єктів.

РОЗДІЛ 4

МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВИХ КОМПЛЕКСІВ З УРАХУВАННЯМ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЕЙ СЕРЕДОВИЩА І МОДЕЛЕЙ РЕАКЦІЇ ГРУНТІВ НА СЕЙСМІЧНІ ВПЛИВИ (ЛІНІЙНЕ, ЕКВІВАЛЕНТНЕ ЛІНІЙНЕ ТА НЕЛІНІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ)

При інтенсивних сейсмічних впливах значну роль відіграють нелінійні явища, які особливо сильно проявляються в пухких осадових ґрунтах: супісках, суглинках, водонасичених глинах тощо. Провести чітку границю між поняттями щільний та пухкий ґрунт - складно. Велике різноманіття типів ґрунтів, відмінності літологічного складу та фізико-механічних властивостей унеможливають узагальнення законів розвитку нелінійних явищ, що відбуваються в них при значних сейсмічних впливах. В той же час, кожен з методів математичного моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи має свої обмеження і не може без обґрунтування використовуватися у будь-яких сейсмологічних і ґрунтових умовах майданчика. Ці умови мають вирішальне значення при СМР територій, з огляду на що, дослідження їх впливу є актуальною сейсмологічною задачею.

В розділі приведено результати застосування лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного методів математичного моделювання реакції ґрунтів будівельних майданчиків на сейсмічні впливи, як для простих сейсмогеологічних моделей ґрунтових комплексів, так і складних моделей ґрунтових товщ, близьких до будови верхньої частини розрізу геологічного середовища під реальними будівельними майданчиками. Проведено аналіз впливу сейсмологічних та геолого-геофізичних факторів на прояви нелінійності і спектральний склад коливань на вільній поверхні майданчиків, в результаті якого встановлено границі застосування кожного із зазначених методів моделювання.

За наявності одного однорідного осадового шару на півпросторі, період його основної форми коливань можна оцінити за відомою емпіричною формулою [Kanai, 1952]: $T = 4H/V_s$, де T – період коливань ($T = 1/f$, де f – частота коливань в Гц); H – потужність осадової товщі (шару); V_s – швидкість поперечної хвилі.

При довільній кількості шарів ґрунтового середовища під будівельним майданчиком, період основної форми коливань можна оцінити за формулами В.1 і В.2 Додатку В ДБН В.1.1-12:2014 [ДБН В.1.1-12:2014, 2014]. В них враховані значення пружних параметрів шарів і півпростору, але не враховується ні літологічний склад шарів, ні їх реологічні властивості. Хоча, ще в 1961 році відомий сейсмолог А.Л. Льовшин відзначав, що відмінність впливу осадової товщі на будівельному майданчику, складеної галечником і пісками, можна встановити «шляхом дослідження їх видимих частот» [Левшин, 1961]. Справа в тому, що галечник у водонасиченому стані (з піщаним заповнювачем понад 30 %) і піски характеризуються близькими за значеннями швидкостями поширення в них поздовжніх і поперечних коливань: V_p і V_s . Відношення V_s/V_p також не дозволяє однозначно визначити літологічний склад зазначених шарів ґрунту. З іншого боку, за даними спектрального аналізу, ширина спектрального діапазону зареєстрованих сейсмічних коливань на поверхні середовища, що складається з пісків, є більшою від ширини спектрального діапазону коливань галечника в 1,5 – 2 рази. При цьому, вид частотної характеристики ґрунту суттєво відрізняється для пісків і водонасичених галечників [Заалишвили, 2009].

4.1. Вплив сейсмічних властивостей ґрунту на параметри його частотної характеристики

У зв'язку із скороченням територій гідних для житлового і промислового будівництва, нові об'єкти все частіше зводяться на земельних ділянках з складними інженерно-геологічними умовами. В результаті, багато будівельних

майданчиків на території країни розташовані на несприятливих для будівництва грунтах III-ї і IV-ї категорій за сейсмічними властивостями. Відомо, що такі ґрунти мають нелінійні властивості, які будуть проявлятися по-різному, в залежності від інтенсивності і частотного складу сейсмічного впливу.

На рис. 4.1 представлено результати математичного еквівалентного лінійного моделювання АЧХ моделі ґрунтової товщі, яка складається з одного шару на півпросторі. Розглядається випадок нормального падіння поперечної хвилі з нижнього півпростору. Параметри шару по черзі приймають значення, які відповідають ґрунтам від I до IV-ї категорії за сейсмічними властивостями. Категорія ґрунту визначається по Таблиці 5.1 ДБН В.1.1-12:2014 [ДБН В.1.1-12:2014, 2014]. Одним з основних показників сейсмічних властивостей ґрунтів в задачах СМР є величина швидкості об'ємних (поздовжніх та поперечних) хвиль. Відомо, що їх відношення є важливою характеристикою речового складу, типу і фізичного стану ґрунту.

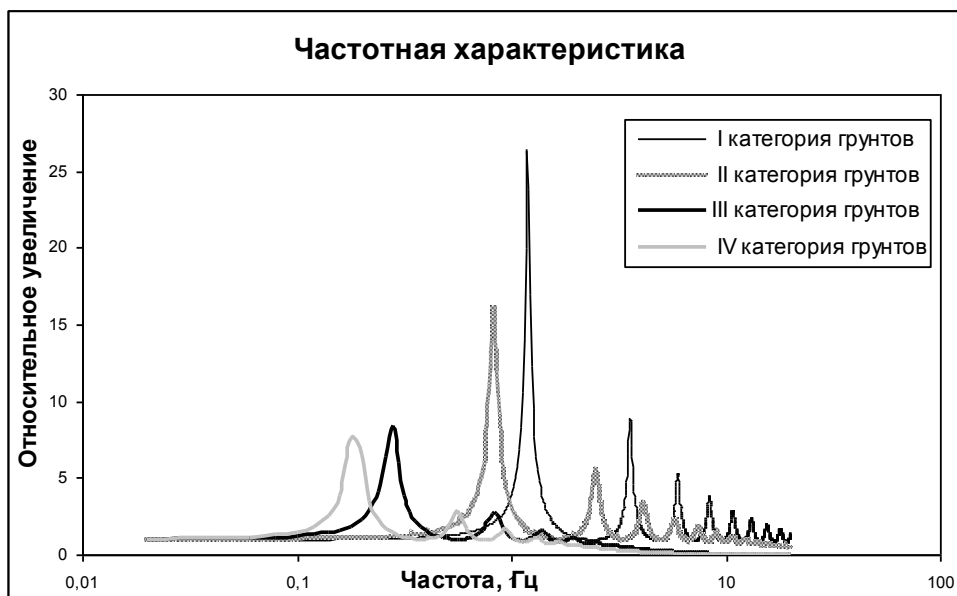


Рис. 4.1. АЧХ одношарової і однакової за товщиною моделі ґрунтів різних категорій за сейсмічними властивостями по [ДБН В.1.1-12: 2014, 2014].

Для побудови частотних характеристик ґрунтів різних категорій за сейсмічними властивостями використовувався адаптований автором для вирішення задач СМР в умовах України програмний продукт PROSHAKE

[Schnabel et al., 1972; PROSHAKE..., 1998], в якому застосовується технологія еквівалентного лінійного моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи.

Аналізуючи реакції ґрунтів на сейсмічні впливи, отримані в такий же спосіб як АЧХ представлені на рис. 4.1, можна дійти висновку, що з погіршенням сейсмічних властивостей ґрунтів максимуми частотної характеристики зміщуються в бік низьких частот. Тобто, більш пухкі, водонасичені ґрунти при інших рівних умовах будуть характеризуватися більш низькочастотними власними коливаннями, ніж, наприклад, щільні глинисті або великоуламкові ґрунти. Частоти, яким відповідають максимальні підсилення сейсмічних коливань, називають резонансними. У разі збігу такої частоти з частотою коливання будівлі, може виникнути резонансне підсилення сейсмічних коливань і руйнування конструкцій. У пружній постановці задачі період основної форми коливань ґрунтової товщі визначається її потужністю і швидкістю поширення об'ємних хвиль, яка зростає із збільшенням міцності (покращанням сейсмічних властивостей) ґрунту. При однаковій потужності ґрунтової товщі, як видно з рис. 4.1, за інших рівних умов, менш міцним ґрунтам буде відповідати менша резонансна частота коливань.

З рис. 4.1 також впливає, що з погіршенням сейсмічних властивостей ґрунтів підсилення амплітуди коливань зменшується. Тобто, максимальна амплітуда коливань на щільному ґрунті буде перевищувати максимальну амплітуду коливань на пухкому ґрунті. В той час як, з досвіду макросейсмічних досліджень відомо, що на пухких ґрунтах спостерігається більші пошкодження будівель. Пояснюється це тим, що під дією сейсмічних коливань ґрунт може змінювати свої властивості. Частина контактів між частинками ґрунту розривається, внаслідок чого помітно знижується міцність ґрунту і, відповідно, будівлі на таких ґрунтах можуть осідати, перекошуватися тощо. При досить сильних сейсмічних впливах такі ґрунти можуть навіть розріджуватися, тобто зовсім втрачаються зв'язки між частинками ґрунту. Зазначені явища описуються в нелінійній теорії поширення сейсмічних коливань в моделях з нелійними властивостями ґрунтів. В ґрунтах III та IV категорії за сейсмічними властивостями зміна параметрів модуля зсуву і коефіцієнта

поглинання може бути більшою, ніж в ґрунтах I та II категорії. Зменшення коефіцієнта підсилення коливань в слабких за сейсмічними властивостями ґрунтах, у порівнянні з ґрунтами II категорії за сейсмічними властивостями або скельними ґрунтами, при великих амплітудах коливань пояснюється перевагою впливу поглинання над підсиленням коливань.

4.2. Вплив потужності осадових відкладів на частотні характеристики ґрунтової товщі

Для дослідження впливу потужності ґрунтової товщі осадових відкладів на особливості формування спектра коливань, були розраховані амплітудні частотні характеристики однотипних моделей ґрунтів з різною потужністю H при слабких сейсмічних впливах з максимальним піковим прискоренням $\ddot{u}_{\max} = 0,07g$, що приблизно відповідає 6-ти – 7-ми бальним землетрусам згідно ДСТУ-Б-В.1.1-28:2010 "Шкала сейсмічної інтенсивності". Застосовувалося еквівалентне лінійне моделювання. Розрахунки виконувалися програмним комплексом PROSHAKE. Результати представлено на рис. 4.2, з якого видно, що із збільшенням потужності осадового шару максимум його частотної характеристики зміщується в бік низьких частот.

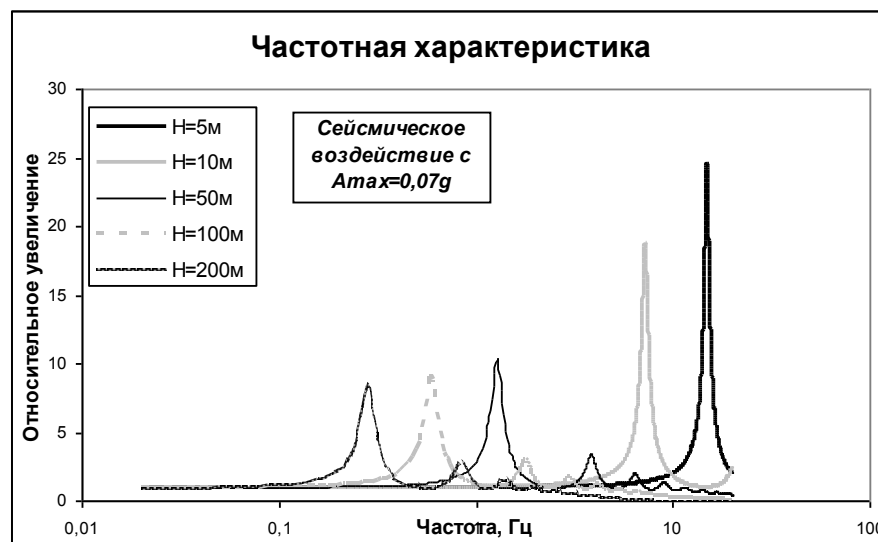


Рис. 4.2 АЧХ ґрунтових комплексів різної потужності H , розраховані з використанням еквівалентного лінійного моделювання (PROSHAKE) для випадку падіння з нижнього півпростору сейсмічного сигналу з $\ddot{u}_{\max} = 0,07g$.

На рис. 4.3 наведено результат розрахунку амплітудних частотних характеристик аналогічних моделей ґрунтів при сейсмічному впливі з максимальним піковим прискоренням $\ddot{u}_{\max} = 0,43g$, що приблизно відповідає 9-бальному землетрусу на вільній поверхні ґрунту.

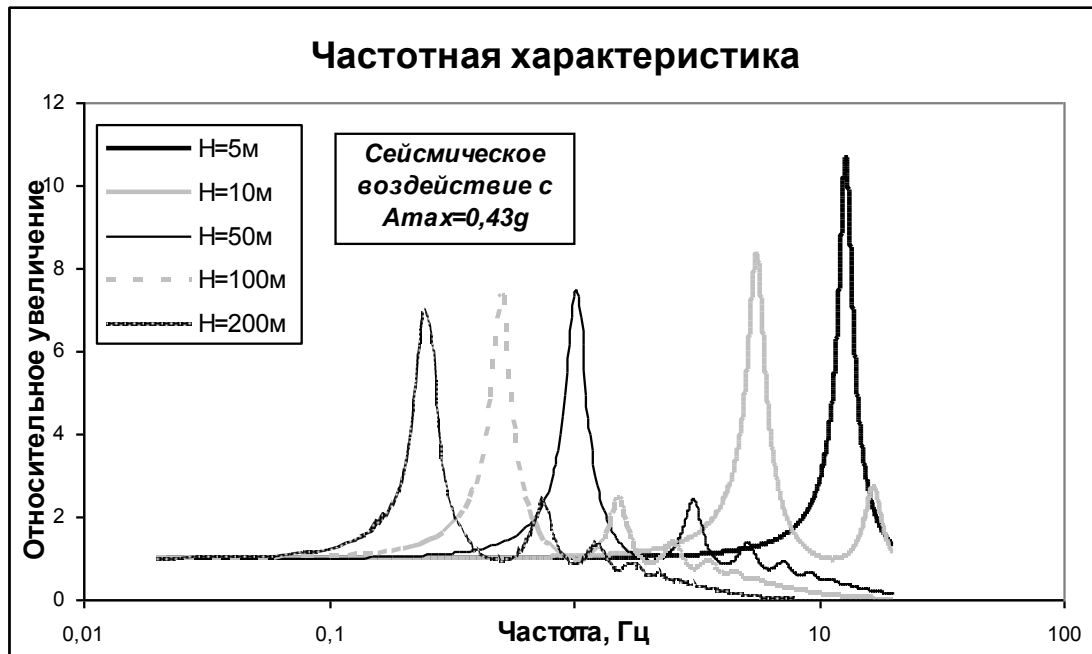


Рис. 4.3. АЧХ ґрунтових комплексів різної потужності, розраховані з використанням еквівалентного лінійного моделювання (PROSHAKE) для випадку падіння з нижнього півпростору сейсмічного сигналу з $\ddot{u}_{\max} = 0,43g$.

Аналіз результатів представлених на рис. 4.2 і 4.3 і одержаних в аналогічних умовах, дозволив зробити висновки, що незалежно від величини сейсмічного впливу зберігається обернений зв'язок між переважаючою частотою ґрунтової товщі і її потужністю H . Але коефіцієнт підсилення при інтенсивніших сейсмічних впливах, як видно з рис. 4.3, стає меншим, ніж при слабкому сейсмічному впливі, що явно видно із порівняння рис. 4.2 і 4.3. Спостережене зменшення коефіцієнта підсилення можна пояснити високим поглинанням сейсмічної енергії ґрунтами. При інтенсивному землетрусі проявляється нелінійність, яка призводить до зниження коефіцієнта підсилення коливань ґрунтом. Слід відмітити також, що максимуми АЧХ на рис. 4.3 є

зміщеними в низькочастотну область, відносно АЧХ на рис. 4.2. Отже, із збільшенням амплітуди сейсмічних коливань все сильніше порушується справедливість рівнянь В.1 і В.2, рекомендованих для розрахунку резонансних періодів ґрунтових комплексів в додатку В до нормативного документу [ДБН В.1.1-12: 2014].

На рис. 4.4 зображено АЧХ ґрунтових комплексів різної потужності, розраховані для випадку падіння з нижнього півпростору сейсмічного сигналу з максимальними піковими прискореннями $\ddot{u}_{\max} = 0,07g$ та $\ddot{u}_{\max} = 0,43g$. Розрахунок проводився з використанням програмного комплексу PROSHAKE і реалізованого в ньому методу лінійного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи.

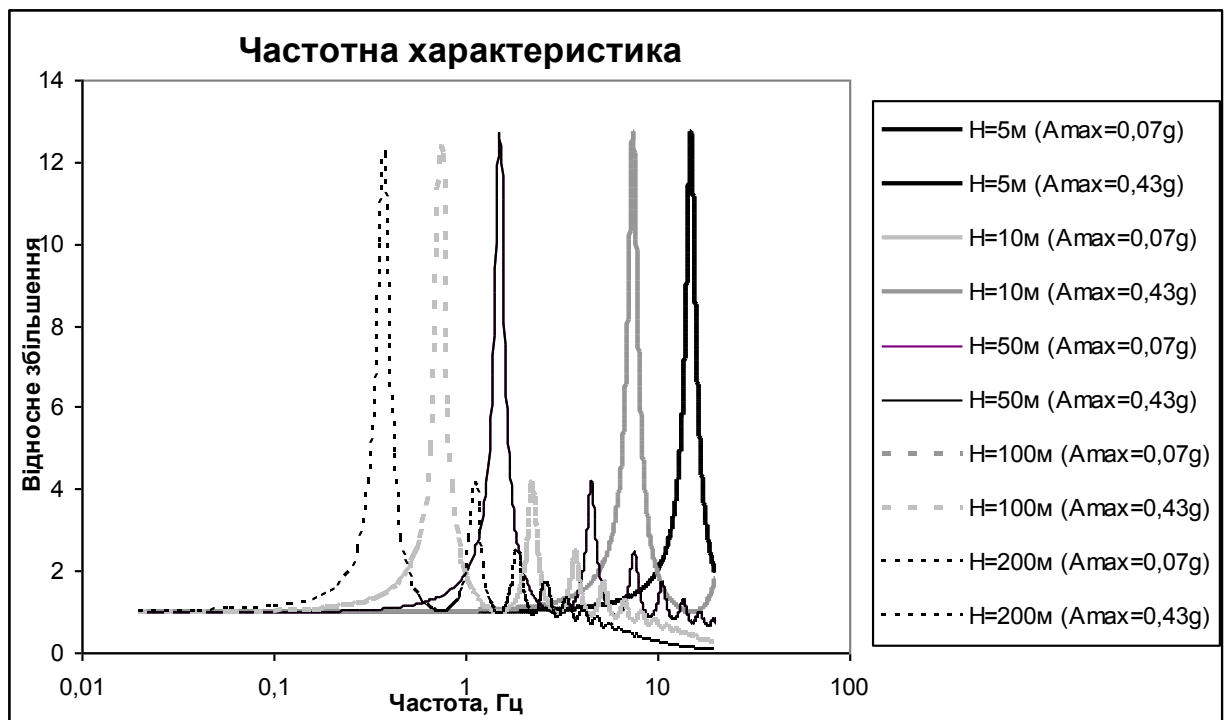


Рис. 4.4. АЧХ ґрунтових комплексів різної потужності H , розраховані для випадку падіння з нижнього півпростору сейсмічних сигналів з $\ddot{u}_{\max} = 0,07g$ та

$\ddot{u}_{\max} = 0,43g$ з використанням програмного комплексу PROSHAKE і реалізованого в ньому методу лінійного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи.

З рис. 4.4 видно, що при використанні методу лінійного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи, значення коефіцієнтів підсилення є однаковими у випадках падіння з нижнього півпростору сейсмічних сигналів з різною амплітудою для різних моделей ґрунтових комплексів і різної потужності шарів ґрунту. Такі результати є наслідком того, що лінійне моделювання не передбачає залежності реакції середовища від величини інтенсивності землетрусу і відповідно від спектрального складу. Відзначимо, що використання саме лінійного моделювання передбачається чинними нормативними документами [ДБН В.1.1-12:2014; РСН 60-86; РСН 65-87] для вирішення завдань, пов'язаних з прогнозуванням поведінки ґрунтів при сильних сейсмічних впливах. Такий стан справ ставить на порядок денний необхідність і актуальність удосконалення методики розрахункових методів сейсмічного мікрорайонування, шляхом врахування нелінійних властивостей ґрунтів і використання нелінійних методів розрахунку їх реакції на сейсмічні впливи.

У зв'язку з тим, що, як видно з рис. 4.2 ÷ 4.4, потужність осадових відкладів має суттєвий вплив на параметри розрахованих частотних характеристик ґрунтової товщі, при сейсмічному мікрорайонуванні необхідно детально досліджувати вплив всього розрізу осадової товщі під будівельним майданчиком до кристалічного фундаменту, а не лише верхні 10 м, як рекомендовано чинними нормативними документами [ДБН В.1.1-12:2014; РСН 60-86; РСН 65-87]. Розрахункові сейсмогеологічні моделі ґрунтової товщі, які формуються за даними інженерно-геологічних вишукувань під будівництво, повинні відображати пошарову будову верхньої частини розрізу від вільної поверхні до поверхні корінних порід. Одержання цих матеріалів необхідно передбачити при черговому удосконаленні нормативного документу ДБН А.2.1-1-2014. «Інженерні вишукування для будівництва».

4.3. Вплив нелінійних властивостей ґрунтів на їх реакцію при сейсмічних впливах різної інтенсивності

При моделюванні методами лінійного, еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання реакції ґрунтів з нелінійними властивостями на сейсмічні впливи різної інтенсивності було одержано наступні результати.

На рис. 4.5 приведено обвідні набору АЧХ моделі ґрунтового середовища під будівельними майданчиками в Києві, отримані з використанням програмного комплексу PROSHAKE для випадків падіння з нижнього півпростору серії слабких та інтенсивних сейсмічних сигналів. Розрахунки проведено: а) лінійним моделюванням, в) еквівалентним лінійним моделюванням.



Рис. 4.5. Обвідні серії АЧХ ґрунтового середовища під будівельним майданчиком на перетині вулиць Червоногвардійської та Краківської в Києві отримані: а) лінійним моделюванням, в) еквівалентним лінійним моделюванням з використанням програмного комплексу PROSHAKE.

Аналізуючи рис. 4.5 приходимо до висновку, що АЧХ, отримані в результаті лінійного моделювання (коефіцієнт поглинання і модуль зсуву вважаються сталими величинами для кожного шару незалежно від рівня деформації), суттєво відрізняються від АЧХ, отриманих за допомогою еквівалентного лінійного моделювання (в якому враховується, що коефіцієнт поглинання і модуль зсуву залежать від рівня деформації). В АЧХ, одержаних за допомогою лінійного моделювання спостерігається більша кількість яскраво виражених піків і значно завищені коефіцієнти підсилення сейсмічних коливань. При врахуванні нелінійних властивостей ґрунтів, максимуми АЧХ переміщуються в низькочастотну область, що обумовлено впливом поглинання. Таке явище можна пояснити наступним механізмом. Нелінійність, пов'язана з неоднорідністю геологічного середовища, трансформує (іншими словами «перекачує») енергію низько - і середньо частотних коливань у високочастотну область, де вона інтенсивно поглинається. На низькочастотні коливання поглинання впливає відносно слабо. Вони поширюються в ґрунтовій товщі без суттєвих енергетичних втрат. Аналогічні ефекти спостерігалися також іншими дослідниками, наприклад [Алешин, 2010; Сакс и др., 2003].

На рис. 4.6 приведено АЧХ ґрунтового середовища під будівельним майданчиком багатопверхового житлового будинку по вул. Глибочицька в Києві, отриману в результаті лінійного, еквівалентного лінійного і нелінійного математичного моделювання з використанням програмних продуктів PROSHAKE, EERA, DEEPSOIL для випадку падіння з нижнього півпростору сейсмічного сигналу з максимальним піковим прискоренням $\ddot{u}_{max} = 0,07g$.

В результаті лінійного моделювання, як і в попередньому випадку, результати якого представлені на рис. 4.5, на АЧХ спостерігається більша кількість піків, відмічене їх зміщення в високочастотну область та одержано завищені значення коефіцієнтів підсилення сейсмічних коливань. Програмні продукти EERA, PROSHAKE і DEEPSOIL дали схожі результати при еквівалентному лінійному і нелінійному моделюванні.

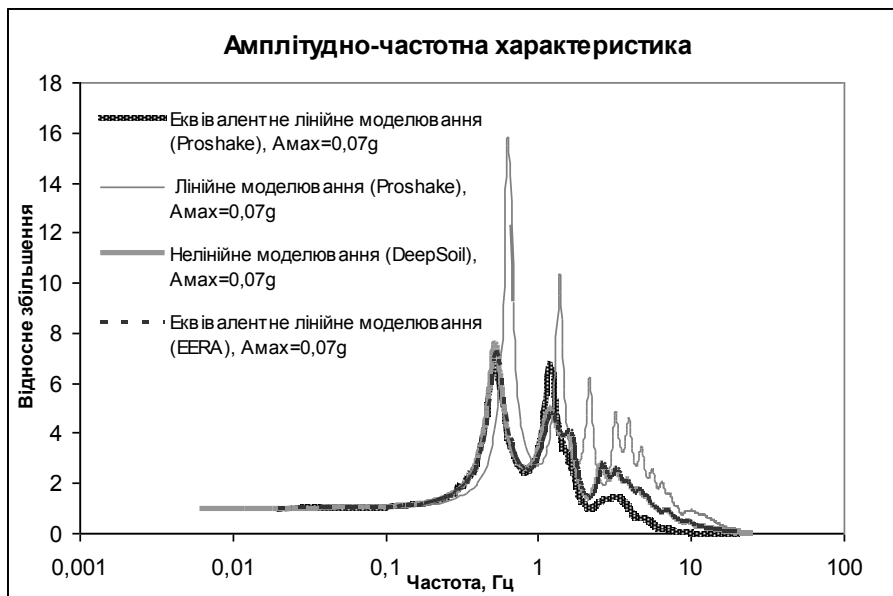


Рис. 4.6. АЧХ ґрунтового середовища під майданчиком будівництва багатоповерхового житлового будинку по вул. Глибочицька в м. Києві, розраховані для випадку падіння з нижнього півпростору сейсмічного сигналу з $\ddot{u}_{max} = 0,07g$.

На рис. 4.7 приведено три реалізації горизонтальної компоненти розрахункової акселерограми, які моделюють землетрус з максимальним піковим прискоренням $\ddot{u}_{max} = 0,07g$. Акселерограми отримані із застосуванням лінійного, еквівалентного лінійного і нелінійного методів моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи з використанням програмних продуктів PROSHAKE, NERA та DEEPSOIL.

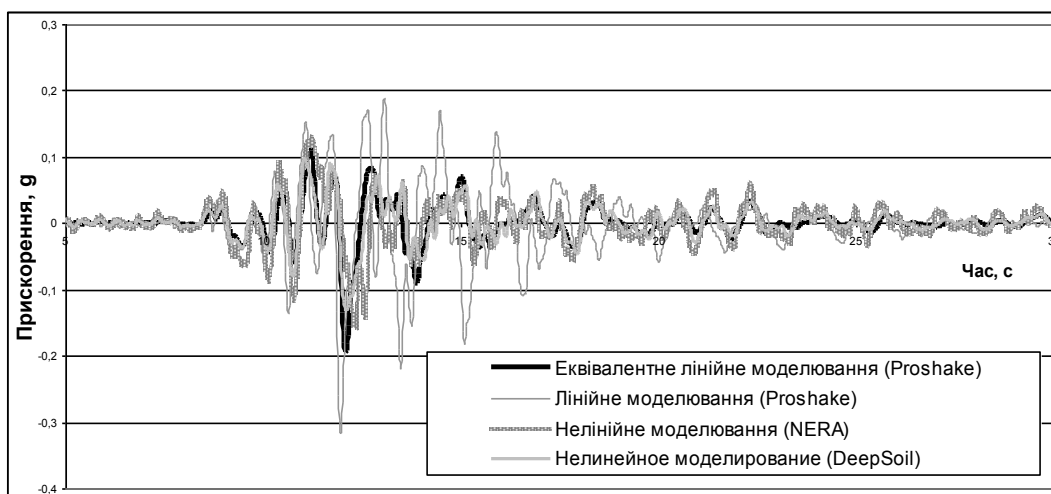


Рис.4.7. Горизонтальна компонента розрахункової акселерограми, яка моделює вплив землетрусу з $\ddot{u}_{max} = 0,07g$.

На рис. 4.9 приведено відповідні спектри реакції одиничних осциляторів з власним затуханням 5 % на реалізації розрахункових акселерограм, представлених на рис. 4.7. На рис. 4.8 приведено три реалізації горизонтальної компоненти розрахункової акселерограми, які моделюють землетрус з максимальним піковим прискоренням $\ddot{u}_{max} = 0,43g$. Акселерограми побудовані аналогічними методами, як і на рис. 4.7. Відмінність лише у використанні потужнішого сейсмічного впливу.

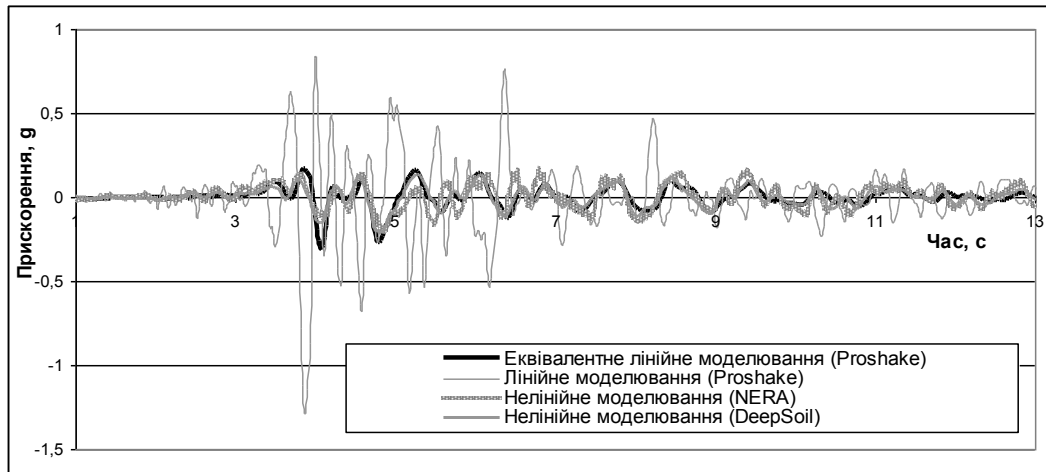


Рис.4.8. Горизонтальна компонента розрахункової акселерограми, що моделює вплив землетрусу з $\ddot{u}_{max} = 0,43g$.

На рис. 4.10 приведено відповідні спектри реакції одиничних осциляторів з власним затуханням 5 % на реалізації розрахункових акселерограм, представлених на рис. 4.8.

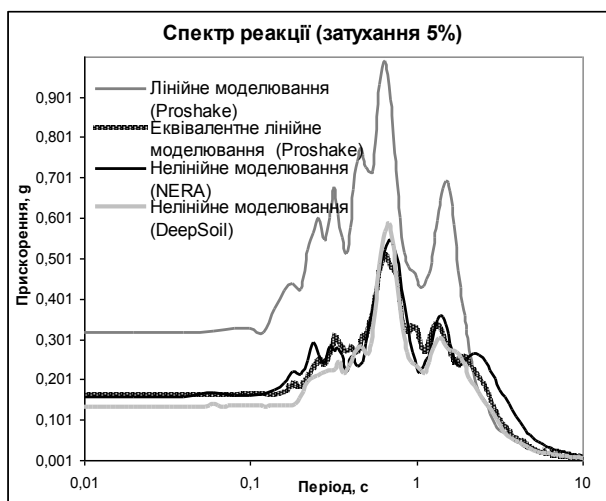


Рис.4.9. Спектр реакції одиничних осциляторів на землетрус з $\ddot{u}_{max} = 0,07g$

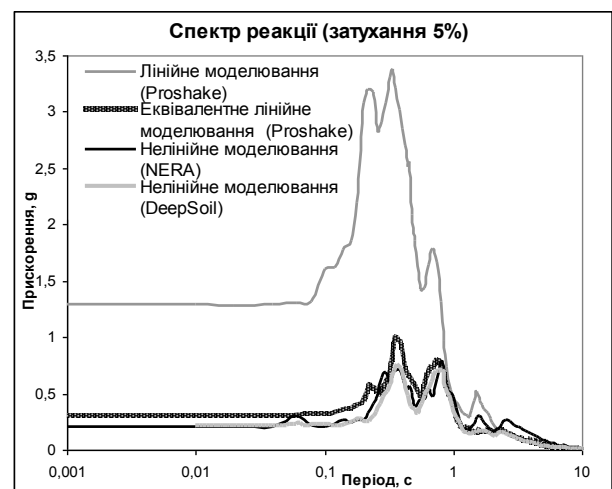


Рис.4.10. Спектр реакції одиничних осциляторів на землетрус з $\ddot{u}_{max} = 0,43g$

Порівняльний аналіз результатів лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання розрахункових акселерограм, АЧХ та спектрів реакції одиничних осциляторів показав, що із збільшенням амплітуди падаючого сигналу на нижній півпростір, внаслідок прояву нелінійної поведінки ґрунтів, збільшується розходження в результатах моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи. При моделюванні впливу землетрусу з $\ddot{u}_{max} = 0,07g$ результати еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання є відносно добре узгодженими. При моделюванні впливу землетрусу з $\ddot{u}_{max} = 0,43g$ результати еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання дещо відрізняються. Аналіз спектрів реакції, представлених на рис. 4.9 та 4.10, показав, що при використанні програмного продукту NERA спостерігається розширення спектру реакції в сторону більших періодів, як в випадку падіння хвилі з $\ddot{u}_{max} = 0,07g$ так і з $\ddot{u}_{max} = 0,43g$. При моделюванні впливу інтенсивних землетрусів доцільно використовувати нелінійне моделювання, в той час як при моделюванні слабких та середніх сейсмічних впливів, з достатньою точністю можна використовувати еквівалентне лінійне моделювання. Воно вимагає меншої кількості вхідних даних і є стійкішим до наявності в них випадкових помилок. Нелінійне моделювання розроблялося для розрахунків на інтенсивні сейсмічні впливи, тому його використання для прогнозування реакції ґрунтової товщі на слабкі сейсмічні впливи може призвести до заниження оцінки їх впливу.

Варто також відмовитися від використання лінійного моделювання реакції на сейсмічні впливи реальної ґрунтової товщі, складеної ґрунтами III та IV категорії за сейсмічними властивостями, оскільки відомо, що в таких ґрунтових умовах при значних сейсмічних впливах поведінка ґрунтів стає нелінійною.

Дослідження процесів передачі через ґрунтове середовище сейсмічних коливань, які спостерігалися (були зареєстровані) при реальних землетрусах, з використанням методів лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання, проводились багатьма вченими [Saada, Bianchini, 1987; Midorikawa, 1993; Ishihara et al, 1992; Iai et al., 1995; Kramer, 1996; та ін.]. В результаті були отримані висновки, що лінійне моделювання часто призводить

до появу «хибних» резонансів. Близькість результатів еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання залежить від сейсмічних властивостей ґрунтів і, відповідно, від прояву їх нелінійних властивостей. Обидва методи дають близькі до реальних (одержаних із спостережень) оцінки реакції ґрунту при невеликих деформаціях. Нелінійне моделювання дає кращі результати при великих деформаціях.

Таким чином, при використанні та інтерпретації результатів розрахунків, одержаних із застосуванням різних методів моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи, необхідно враховувати зазначені в Розділі 2 особливості і допущення, які лежать в основі алгоритмів реалізації кожного методу, а також врахувати обмеження щодо можливості їх застосування.

Проаналізувавши власні результати і досвід використання кожного з методів моделювання, представлений в роботах [Saada, Bianchini, 1987, Midorikawa, 1993; Ishihara et al, 1992; Iai et al., 1995; Kramer, 1996; Arulanandan, Scott, 1994 и др.; Yoshida, Iai, 1998; Stewart et. al., 2008; Алешин, 2010], для цілей сейсмостійкого проектування сформульовано рекомендації щодо використання розрахункових методів лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання реакції ґрунтової товщі в умовах будівельних майданчиків України:

1. При моделюванні реакції ґрунтової товщі, складеної ґрунтами I категорії за сейсмічними властивостями, допускається використання лінійної залежності «напруження – деформація» в діапазоні очікуваної максимальної сейсмічної інтенсивності до 9 балів включно.

2. Для ґрунтової товщі, складеної ґрунтами II категорії, лінійне моделювання припустиме при очікуваній максимальній інтенсивності до 8 балів.

3. Для ґрунтової товщі, складеної ґрунтами III і IV категорії, необхідно враховувати їх нелінійні властивості при очікуваній інтенсивності, починаючи з 6 балів включно. Для будівельних майданчиків з очікуваною максимальною інтенсивністю 6–7 балів необхідно застосовувати еквівалентне лінійне моделювання, а для майданчиків з очікуваною максимальною інтенсивністю 8 – 9 балів - слід використовувати нелінійне моделювання.

Оскільки для переважної частини України, згідно карт ЗСР-2004, прогнозуються сейсмічні впливи, які не перевищують 6 – 7 балів, то, в більшості випадків, виправданим буде застосування еквівалентного лінійного моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи.

4.4. Вплив похибок у вхідних даних на результати розрахунків частотної характеристики моделі ґрунтової товщі

Необхідна точність розрахунків моделювання реакції ґрунтових умов на сейсмічні впливи обумовлюється коректністю постановки задачі та стійкістю розв'язку [Бакушинский и др., 1989; Иванов и др., 1978; Васин, 1993].

Для перевірки стійкості розв'язку, при наявності випадкових похибок в параметрах вхідної розрахункової моделі ґрунтової товщі, були співставлені АЧХ однієї і той самої моделі ґрунтового середовища, розраховані без внесення похибок і при внесенні випадково розподілених похибок різної величини. Для розрахунків використано ряд теоретичних і реальних моделей ґрунтового середовища. Нижче представлено результати розрахунків одержаних при використанні моделі ґрунтової товщі під будівельним майданчиком житлового комплексу на пров. Новопечерський, 5 в Печерському районі Києва. При розрахунках в параметри розрахункової моделі ґрунтової товщі (швидкість поперечних хвиль, потужність та густина кожного шару), по черзі, вносилися випадкові похибки різної величини в межах $\pm(1, 5, 10, 15, 20, 25, 30)\%$.

При розрахунках було використано програмний продукт PROSHAKE та метод еквівалентного лінійного моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи, оскільки в більшості випадків саме його застосування в умовах країни є найбільш обґрунтованим. Вхідними даними слугували розрахункові моделі ґрунтової товщі. В табл. 4.1 представлено параметри (без похибок) розрахункової моделі середовища під майданчиком проектного житлового комплексу в пров. Новопечерський, 5 в Печерському районі Києва, яку було взято за основу для проведення розрахунків.

Таблиця 4.1. Розрахункова модель ґрунтової товщі під будівельним майданчиком проектованого житлового комплексу на пров. Новопечерський, 5 в Печерському районі м. Києва (свердловини: 7, 24, 25, 105, 106)

№ № п/п	Літологічний склад	Інтервал глибин Н, м	Швидкість сейсмічних хвиль		Декременти поглинання сейсмічних хвиль		Густина порід ρ , г/см ³
			Поздовж- ньої V_P , м/сек	Попереч- ної V_S , м/сек	Поздов- жньої ν_P	Попе- реч- ної ν_S	
1	Насипний ґрунт	0-17	230	130	1,6	1,4	1,6
2	Пісок дрібний пилуватий щільний	17-32,4	540	280	1,3	1,2	1,8
3	Пісок дрібний, з прошарками супіску, щільний	32,4-34,4	480	260	1,2	0,9	1,94
4	Супісок піщанистий з прошарками піску та суглинку, пластичний	34,4-43,8	470	250	0,5	0,3	1,9
5	Суглинок важкий, пилуватий з прошарками супіску та глини	43,8-49,8	600	300	0,3	0,5	1,83
6	Глина легка, пилувата	49,8-54,8	1500	340	0,2	0,4	1,83
7*	Пісок легкий з прошарками глин	54,8 – 100,0	1600	340	0,5	0,6	1,81
8*	Мергель, крейда	100,0 – 115,0	1800	1000	0,06	0,06	1,87
9*	Пісок каолінітовий	115 - 125	2100	520	0,45	0,6	1,9
10*	Вапняк, глина, алевроліт	125 - 225	2600	920	0,3	0,4	1,98
11*	Пісок, пісковик	225-280	2800	1300	0,15	0,2	1,94
12*	Граніт, діорит	280-∞	5200	2800	0,09	0,1	2,6

Примітка: * позначені параметри, взяті за даними по регіону. РГВ = 26,7 м.

На рис 4.11 представлено АЧХ моделі ґрунтового середовища під будівельним майданчиком житлового комплексу в Печерському районі м. Києва, розраховані з наявністю у вхідних параметрах моделі випадкових похибок в межах $\pm(1\div 30)\%$.

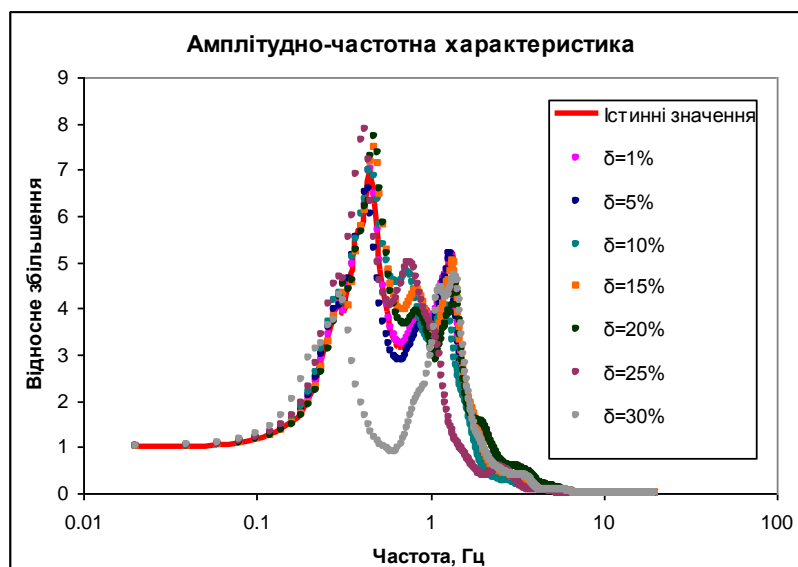


Рис 4.11. АЧХ моделі середовища під майданчиком в Печерському районі м. Києва, розраховані з наявністю у вхідних параметрах моделі випадкових похибок в межах $\pm(1\div 30)\%$.

На рис. 4.12 представлено середнє квадратичне відхилення значень АЧХ, розрахованих для моделі ґрунту з випадковими похибками від 1 до 30 % у її вхідних параметрах.

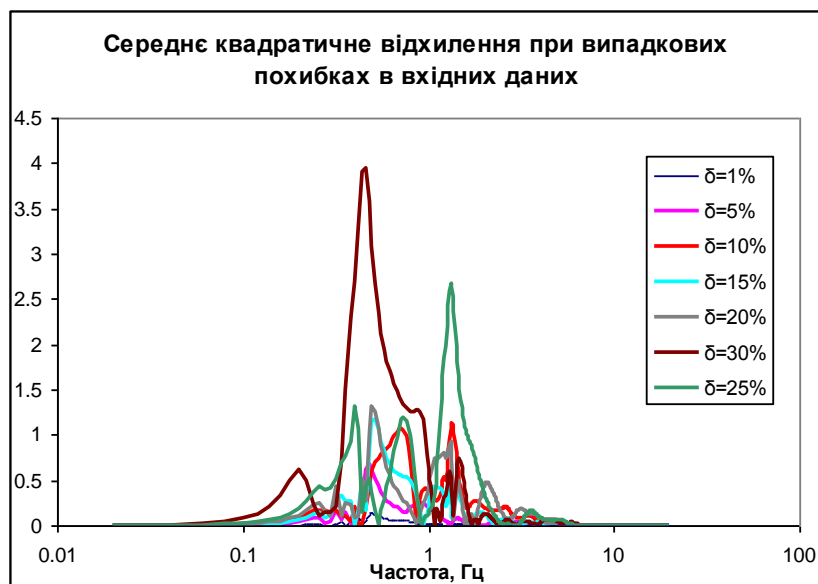


Рис 4.12. Середнє квадратичне відхилення значень АЧХ, розрахованих для моделі ґрунту з випадковими похибками від 1 до 30 % у її вхідних параметрах.

На рис. 4.13 представлено розраховане максимальне середнє квадратичне відхилення значень АЧХ, отриманих для розрахункової моделі середовища з випадковими похибками від 1 до 30% у її вхідних параметрах.

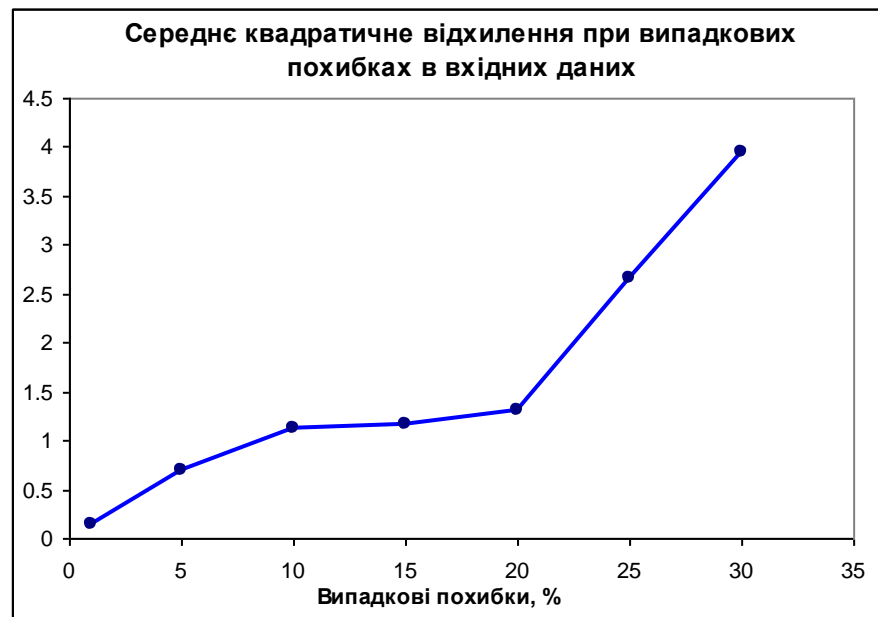


Рис 4.13. Максимальне середнє квадратичне відхилення значень АЧХ, отриманих для розрахункової моделі середовища з випадковими похибками від 1 до 30% у її вхідних параметрах.

Аналіз отриманих результатів дослідження стійкості розв'язку задач моделювання амплітудних частотних характеристик моделей ґрунту, приклад яких представлено на рис. 4.11 ÷ 4.13, дозволив сформулювати наступний висновок. При розрахунку амплітудних частотних характеристик моделей ґрунтових товщ методом еквівалентного лінійного моделювання стійкість розв'язку забезпечується при наявності випадкових похибок в параметрах вхідної розрахункової моделі до $\pm 20\%$.

За результатами розрахованих значень, представлених на рис. 4.11, було досліджено вплив відносних похибок у вхідних даних на такі параметри розрахованих АЧХ моделі ґрунтової товщі як: частоти абсолютних максимумів $f_{\text{макс}}$, відповідні їм коефіцієнти підсилення коливань і відносна ширина частотної області підсилення. Відносна ширина частотної області підсилення

сейсмічних коливань $\Delta f_{\text{відн}}$ АЧХ розраховувалася за формулою з роботи [Берзон и др., 1962]:

$$\Delta f_{\text{відн}} = (f_{\text{в}} - f_{\text{н}}) / f_{\text{макс}},$$

де $f_{\text{в}}$ і $f_{\text{н}}$ – граничні частоти, які відповідають точкам, в яких коефіцієнт підсилення дорівнює 0,7 від максимального.

На рис. 4.14 представлено результати впливу відносних похибок у вхідних даних на зазначені вище параметри АЧХ.

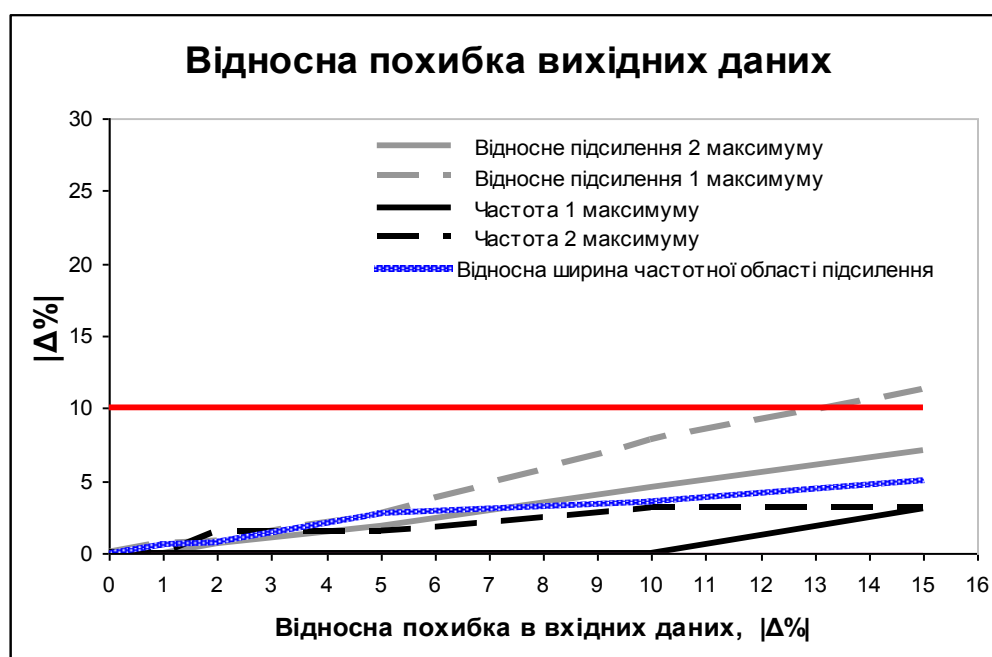


Рис.4.14. Відносні похибки параметрів АЧХ в %, обумовлені відносними похибками у вхідних даних розрахункової моделі.

З рис. 4.14 видно, що, при незначному розкиді (до $\pm 15\%$) вхідних параметрів, відносна похибка отриманих результатів у всіх параметрах АЧХ не перевищує 10%. Найбільш стійкими до похибок в параметрах моделі ґрунтової товщі, за результатами розрахунків, виявились відносна ширина частотної області $\Delta f_{\text{відн}}$ та значення частоти резонансного підсилення сейсмічних коливань $f_{\text{макс}}$. Зміщення резонансних частот при відносних похибках у вхідних даних до 15% не перевищило 5%. Абсолютна похибка розрахованої частоти першого абсолютного максимуму, обумовлена відносними похибками у вхідних параметрах, які не перевищують 15%, становить $\pm 0,02$ Гц, а другого

абсолютного максимуму $\pm 0,04$ Гц. Аналогічні результати були отримані і для інших розрахункових моделей.

Отримані результати дозволяють дійти висновку, що, при визначенні частотного діапазону на якому можуть виникати резонансні підсилення сейсмічних коливань, при відносній похибці у вхідних параметрах моделі ґрунтової товщі до $\pm 15\%$, його межі потрібно розширити на $0,08$ Гц (по $0,04$ Гц в обидва боки), а при наявності у вхідних параметрах моделі відносних похибок $\pm 5\%$ - на $0,04$ Гц (по $0,02$ Гц в обидва боки).

Висновки до розділу 4

В розділі представлено результати виконаного автором математичного лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання реакції на сейсмічні впливи ряду ґрунтових моделей, які відрізняються за потужністю осадових відкладів (H) і категорією ґрунтів за сейсмічними властивостями (від I-ї до IV-ї) згідно [ДБН В.1.1-12:2014, 2014]. Математичне моделювання здійснено з використанням програмних продуктів: PROSHAKE, EERA, NERA, DEEPSOIL. Для зондування моделей використовувалися вхідні акселерограми з різною величиною максимальних пікових прискорень $\ddot{u}_{\max} = 0,07g$ і $\ddot{u}_{\max} = 0,43g$. Такі максимальні пікові прискорення приблизно відповідають землетрусам з інтенсивністю 6-7 і 8-9 балів, відповідно. Результати, одержані для теоретичних і реальних ґрунтових моделей, представлено у вигляді: АЧХ, розрахункових акселерограм та спектрів реакції на них одиничних осциляторів з власним загасанням 5% від максимального.

Порівняльний аналіз отриманих результатів дозволив зробити наступні висновки:

- лінійне моделювання призводить до одержання завищених коефіцієнтів підсилення та до появи хибних резонансних піків на високих частотах.

Настільки значні теоретичні коефіцієнти підсилення сейсмічних коливань, в реальних ґрунтових умовах не спостерігаються;

- лінійне моделювання не передбачає впливу інтенсивності падаючого сигналу на частотні характеристики ґрунтової товщі. В такому випадку, підсилення в АЧХ спостерігаються на однакових частотах, незалежно від величини амплітуди падаючої хвилі.

- врахування нелінійних властивостей ґрунтів, як при еквівалентному лінійному, так і при нелінійному моделюванні їх реакції на сейсмічні впливи, призводить до зменшення коефіцієнта підсилення сейсмічних коливань та зміщення резонансних частот в низькочастотну область.

Дослідження впливу потужності осадових відкладів та сейсмічних властивостей ґрунтів на частотні характеристики дозволило встановити, що погіршення сейсмічних властивостей ґрунтів і збільшення потужності осадових відкладів зміщують максимуми частотної характеристики в бік низьких частот. Це свідчить про необхідність особливо уважного ставлення до проведення детальних досліджень ґрунтових умов для сейсмостійкого проектування і будівництва висотних і важливих об'єктів на майданчиках з ґрунтами III та IV категорії за сейсмічними властивостями. Надійне визначення параметрів ґрунтової товщі та правильне врахування її нелінійної поведінки при сейсмічних впливах є необхідним для адекватної оцінки кількісних параметрів сейсмічної небезпеки на будівельних майданчиках. Врахування підсилення сейсмічних впливів в діапазоні низьких частот є важливим для сейсмостійкого проектування висотних і протяжних споруд, оскільки вони характеризуються низькими власними частотами коливань. Для об'єктів, розташованих на території України, це є особливо важливим, через вплив сильних підкорових землетрусів із зони Вранча, низькочастотні коливання від яких є довготривалими і поширюються на великі відстані без значного загасання, що може привести до небезпечних резонансних явищ в спорудах і будинках.

Зазначимо також необхідність збільшити в ДБН А.2.1-1-2014 нормативне значення глибини досліджень під будівництво верхньої частини розрізу

осадової товщі до кристалічного фундаменту, оскільки потужність осадового шару має суттєвий вплив на сейсмічний ефект на поверхні. При збільшенні потужності осадового шару, складеного ґрунтами III та IV категорії за сейсмічними властивостями, резонансні частоти зміщуються в низькочастотну область, що може виявитися небезпечним для протяжних та висотних об'єктів з високими значеннями періодів власних коливань.

В розділі сформульовано рекомендації щодо доцільності використання лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного методів – для моделювання реакції ґрунтової товщі під будівельними майданчиками України на сейсмічні впливи.

Оскільки для переважної частини України, згідно карт ЗСР-2004, максимальна фонова сейсмічність становить 6-7 балів, то, в більшості випадків, доцільним є застосування, для прогнозування реакції ґрунтової товщі під будівельними майданчиками, методу еквівалентного лінійного моделювання.

Перевірено стійкість розв'язку задачі побудови частотних характеристик ґрунтової товщі під будівельними майданчиками до випадкових похибок в параметрах її розрахункової моделі. Обчислення проведені за допомогою програмного комплексу PROSHAKE з використанням еквівалентного лінійного моделювання реакції реальних ґрунтових умов на будівельних майданчиках України при сейсмічних впливах різної інтенсивності.

Встановлено, що забезпечується стійкість розв'язків задачі розрахунку частотних характеристик ґрунтових товщ методом еквівалентного лінійного моделювання, при наявності в параметрах їх розрахункових моделей випадкових відносних похибок, які не перевищують 20%.

РОЗДІЛ 5

ВПРОВАДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ҐРУНТОВИХ КОМПЛЕКСІВ

В даному розділі представлено результати застосування розрахованих частотних характеристик моделей ґрунтових комплексів з врахуванням їх нелінійних властивостей при визначенні сейсмічної небезпеки ряду існуючих і проєктованих об'єктів, таких як:

- НСК «Олімпійський» в м. Києві;
- основні споруди Кременчуцької ГЕС;
- компресорна станція «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів - Богородчани»;
- лікувальний корпус Одеської обласної лікарні по вул. Ак.Воробйова, 3;
- 24-х поверховий оздоровчий комплекс з апартаментами та паркінгом за адресою вул. Французький бульвар, 60/1 в м. Одесі;
- торгівельний комплекс з вбудованими приміщеннями громадського призначення та підземним паркінгом по вул. Люстдорфська дорога, 55 в Одесі;
- торгівельний комплекс по вул. Краснова, 3 в Одесі;
- готельний комплекс «Імперіал» по вул. Дерibasівська, 25 в Одесі;
- 10 житлових комплексів в Києві за адресами: вул. Березняківська, 30; вул. Глибочицька; пр-кт. Перемоги, 6; вул. Польова, 38; пр-кт Григоренка; пр-кт Оболонський (біля озера Опечень); пров. Новопечерський, 5; вул. Ізюмська; перетин вул. Червоногвардійської та Краківської (діл. № 11, 11-а); пров. Ясинуватський, 11;
- 16 житлових комплексів в Одесі за адресами: пер. Аркадіївський, 9/1; вул. Ген. Бочарова, 35, 53, 45а; вул. Бугаєвська, 3 (будинки № 1, 2); вул. Армійська, 8б; вул. Генерала Цветаєва, 11; вул. Маліновського 16/1; вул. Дюківська, 6; переулок Катаєва, 3; вул. Заславського, 9; вул. Вільямса, 59; пр. Нечипоренко; вул. Корольова 5/2;

– 8 житлових комплексів в Одеській області за адресами: вул. Григорівського десанту, 18 в м. Южний; вул. Левітана, 118д (будинки № 1, 2, 3) в с. Мізікевича, Овідіопольського р-ну; мікрорайон № 9 (будинки № 10,12, 12А) м. Іллічівська; вул. Приморська, 2 в с. Крижанівське.

Для побудови частотних характеристик моделей ґрунтових товщ під перерахованими будівельними майданчиками використано адаптований автором для вирішення задач СМР в умовах України програмний продукт PROSHAKE [Schnabel et al., 1972; PROSHAKE..., 1998]. В PROSHAKE реалізована технологія лінійного та еквівалентного лінійного моделювання. При розрахунках частотних характеристик використовувалося еквівалентне лінійне моделювання реакції ґрунтів під кожним із названих вище майданчиків на сейсмічні впливи. Розрахункові моделі ґрунтів формувалися за матеріалами інженерно-геологічних вишукувань та створеної автором бази даних про залежність модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації. Приклад сформованої розрахункової моделі ґрунтового середовища під будівельним майданчиком представлено в таблиці 5.1. Сейсмічні коливання, які використовувалися для розрахунку частотних характеристик ґрунтових комплексів, вибиралися із баз сильних сейсмічних рухів, зареєстрованих на сейсмічних станціях, розташованих на виходах скельних порід. Прикладом такої сейсмічної станції може служити сейсмічна станція «Київ IRIS» в Житомирській області України.

Амплітудні частотні характеристики (АЧХ) ґрунтової товщі розраховувалися для кожної із розрахункових моделей, як обвідна, сімейства АЧХ, одержаних для різних випадків падіння з нижнього півпростору сейсмічних коливань (сейсмограм, велісограм і акселерограм) з різним спектральним складом і максимальними піковими прискореннями.

Таблиця 5.1 Розрахункова модель ґрунтової товщі під будівельним майданчиком по вул. Березняківська, 30

№ п/п	Літологічний склад	Інтервал глибин Н, м	Швидкість сейсмічних хвиль		Густини порід ρ , г/см ³	Робота з якої було взято параметри нелінійних властивостей	
			Поздовжньої VP, м/сек	Поперечної VS, м/сек		Залежність модуля зсуву від амплітуди деформації зсуву	Залежність коефіцієнта поглинання від амплітуди деформації зсуву
1	Насипний ґрунт: пісок дрібнозернистий, злежаний, слабо вологий з домішками будівельного сміття	0-0,8	380	180	1,6	[Seed et al., 1984]	[Seed et al., 1984]
2	Намивний ґрунт: пісок дрібнозернистий, слабо вологий, середньої щільності та щільний	0,8-5,0	690	260	1,77	[Roblee and Chiou, 2004]	[Roblee and Chiou, 2004]
3	Пісок мілкий та пісок пилюватий, середньої щільності та щільний, з лінзами піску пластичного супіску	5,0-27,2	640	240	2,09	[Roblee and Chiou, 2004]	[Roblee and Chiou, 2004]
4	Пісок глауконітовий мілкий, щільний, водонасичений з прошарками пластичного супіску	27,2-46	930	350	2,18	[Roblee and Chiou, 2004]	[Roblee and Chiou, 2004]
5*	Пісковик, кремнистий, мергель	46-66	1600	340	1,9	[Idriss, 1999]	[Idriss, 1999]
6*	Пісок каолінітовий водонасичений	66-86	2100	520	1,9	[Seed et al., 1984]	[Seed et al., 1984]
7*	Вапняк, мергель	86-180	2300	650	2,0	[Idriss, 1999]	[Idriss, 1999]
8*	Глина	180-240	2600	920	1,98	[Vuceti, Dobry, 1991]	[Vuceti, Dobry, 1991]
9*	Пісок, пісковик, алевроліт	240-295	2800	1300	1,94	[Seed et al., 1984]	[Seed et al., 1984]
10*	Граніт, діорит	295 - ∞	5200	2800	2,6	[Idriss, 1999]	[Idriss, 1999]

При генеруванні розрахункових акселерограм побудовані АЧХ ґрунтової товщі під будівельним майданчиком перемножувалися на обвідні амплітудних спектрів, розрахованих для поверхні консолідованого фундаменту за всією сукупністю наявних в базах даних ІГФ НАН України спектрів прискорень сейсмічних коливань, зареєстрованих на українських і близьких зарубіжних сейсмічних станціях при сильних підкорових землетрусах із зони Вранча (Румунія) і близьких до будівельного майданчика потенційно сейсмоактивних зон, в яких можуть виникнути небезпечні для проектного об'єкту землетруси. При виборі розрахункових акселерограм на поверхні консолідованого фундаменту враховувалося взаємне положення вогнищевих зон і будівельних майданчиків.

5.1. Частотні характеристики ґрунтів для будівельного майданчика НСК «Олімпійський» в Києві

Майданчик НСК «Олімпійський» адміністративно знаходиться на території Печерського району м. Києва. В якості інженерно-геологічної основи СМР території НСК «Олімпійський» використано матеріали досліджень, виконаних Інститутом АТЗТ «Київсоюзшляхпроект» [Технічний звіт..., 2008].

За гідрогеологічними умовами, літологічним складом і фізико-механічними властивостями порід у верхній 10-метровій частині геологічного розрізу [Технічний звіт..., 2008], які мають основний вплив на приріст сейсмічної інтенсивності згідно [ДБН В.1.1-12:2014], в межах досліджуваного майданчика за результатами СМР методами інженерно-геологічних аналогій та сейсмічних жорсткостей було виділено три ділянки (таксонометричні одиниці) (див. рис. 5.1).

Район 1. Східна частина території НСК «Олімпійський» - таксонометрична одиниця ТОЗ.

До глибини 10,1 – 14,4 м територія ТО3 складена (зверху-вниз): ґрунтовим шаром потужністю до 0,5 м; насипними відкладами з мало вологого дрібного піску середньої щільності потужністю 0,9-2,7 м; піском пилюватим середньої щільності мало вологим потужністю 9,5-9,6 м; глиною важкою від напівтвердої до тугопластичної (коефіцієнт пористості глин $e = 0,680-0,780$; показник текучості $I_L = 0,24-0,35$) потужністю 7,1-11,4 м. Ґрунтові води в цьому районі знаходяться на глибині 8,4-14,4 м. Всі ґрунти (крім ґрунтового шару і насипних утворень загальною потужністю близько 3,0 м), які складають геологічний розріз в інтервалі 0,0-10,0 м, відносяться до II категорії за сейсмічними властивостями.

Район 2. Центральна частина стадіону, яка включає футбольне поле і бігові доріжки – таксонометрична одиниця ТО2.

До глибини 10,0-14,0 м територія ТО2 складена (зверху-вниз): ґрунтовим шаром потужністю до 0,5 м; насипними утвореннями з піску дрібного середньої щільності від мало вологого до насиченого водою потужністю 0,6-2,6 м; супісками пластичної і текучої консистенції (коефіцієнт пористості глин $e = 0,850$; показник текучості $I_L = 0,96$) потужністю від 2,2 до 6,9 м; глиною легкою пилюватою туго пластичною (коефіцієнт пористості глин $e = 0,760$; показник текучості $I_L = 0,32$) потужністю 1,0-2,5 м; піском пилюватим, середньої щільності і щільним, насиченим водою потужністю 1,8-10,3 м. Глибина залягання рівня ґрунтових вод складає 1,0-1,6 м. Для даної території потужність ґрунтів, що відповідають III категорії за сейсмічними властивостями, в інтервалі 0,0-10,0 м перевищує 5,0 м.

Район 3. Західна частина території НСК «Олімпійський» – таксонометрична одиниця ТО1.

До глибини 11,0-15,0 м складена ґрунтами IV категорії за сейсмічними властивостями, представленими насипними відкладами (піском, суглинком, глиною з тонкими прошарками піску, дрібного щебеню з включенням

будівельного сміття і побутових відходів). Ґрунтові води залягають тут на глибині 10,0-11,4 м.

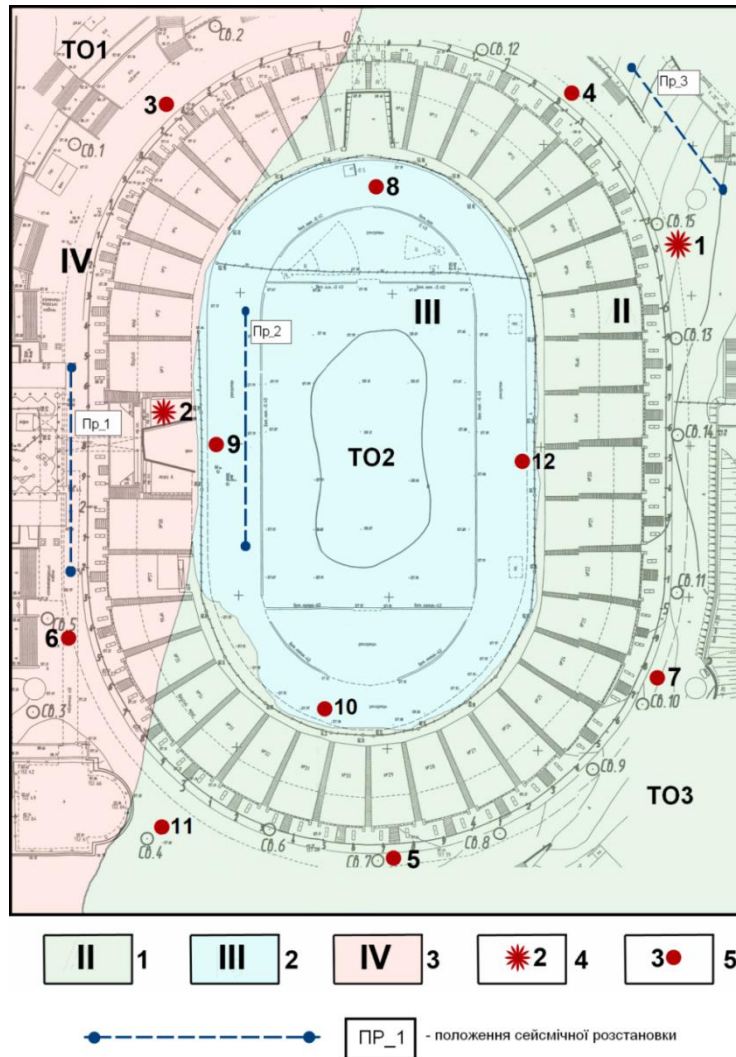


Рис. 5.1. Схема районування будівельного майданчика НСК «Олімпійський» за сейсмічними властивостями ґрунтів. Склали: О.М. Останін, О.М. Складар.
Умовні позначення: 1 – ділянка з переважанням у верхній 10-метровій частині геологічного розрізу ґрунтів II категорії за сейсмічними властивостями; 2 – ділянка з переважанням у верхній 10-метровій частині геологічного розрізу ґрунтів III категорії за сейсмічними властивостями; 3 – ділянка з переважанням у верхній 10-метровій частині геологічного розрізу ґрунтів IV категорії за сейсмічними властивостями; 4 – пункти цілодобової реєстрації мікросейсм; 5 – пункти з 3-и годинними інтервалами реєстрації мікросейсм. Пр_1 – положення сейсмічних профілів.

Уточнена з урахуванням впливу локальних ґрунтових умов прогнозована інтенсивність сейсмічних струшувань на території розташування

відповідальних споруд НСК «Олімпійський» в м. Києві (територія розміщення трибун стадіону - ТО1 і ТО3) складає 6 балів за шкалою MSK-64 з допустимим сейсмічним ризиком - 1% (період повторюваності землетрусу 5000 років).

Прогнозована інтенсивність сейсмічних струшувань на ТО2 складає 7 балів за шкалою MSK-64 з допустимим сейсмічним ризиком 1% (період повторюваності землетрусу 5000 років). Для ТО2 розрахункові акселерограми не генерувалися, оскільки на території футбольного поля не будуть зводитися споруди, сейсмічний ризик яких необхідно визначати по карті ЗСР-2004-С.

АЧХ ґрунтової товщі під будівельним майданчиком НСК «Олімпійський» розраховано для кожної ТО окремо, як обвідну сімейства АЧХ моделей ґрунтового середовища, побудованих за сейсмогеологічними даними для кожної пробуреної свердловини (СВ) в межах досліджуваної таксонометричної одиниці. В межах будівельного майданчика НСК «Олімпійський» було пробурено 48 свердловин і відповідно побудовано 48 АЧХ.

На рис. 5.2. приведено обвідну АЧХ ґрунтової товщі ділянки ТО1. Обвідна АЧХ для ділянки ТО1 була розрахована за максимальними значеннями АЧХ моделей ґрунтових товщ в місцях розташування 20 свердловин в межах ТО1 (СВ6 – 15, 17 – 19, СВ38 – 44).

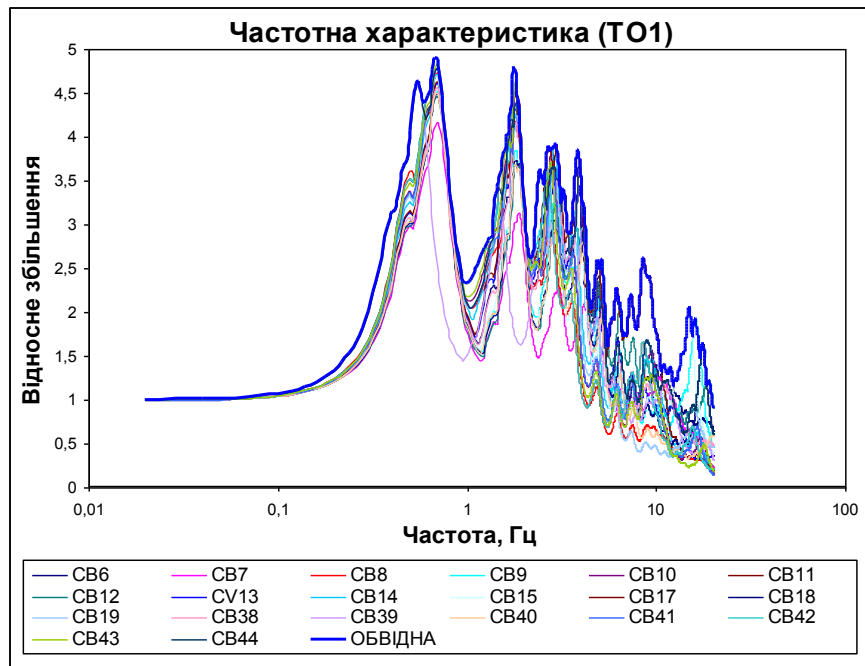


Рис. 5.2. АЧХ ґрунтової товщі в місцях розташування кожної із 20 свердловин пробурених на ділянці ТО1 майданчика НСК «Олімпійський» та їх обвідна.

З рис. 5.2 видно, що обвідна АЧХ для ТО1 має декілька максимумів на різних частотах. Резонансні підсилення сейсмічних коливань в межах району ТО1, варто очікувати в діапазонах $0,34 \div 0,9$ Гц, $1,3 \div 2,1$ Гц, $2,32 \div 4,2$ Гц.

На рис. 5.3 приведено АЧХ ґрунтової товщі для 20-ти свердловин, пробурених в межах ділянки ТО2 (СВ20 – 33, СВ45 – 50) та їх обвідна.

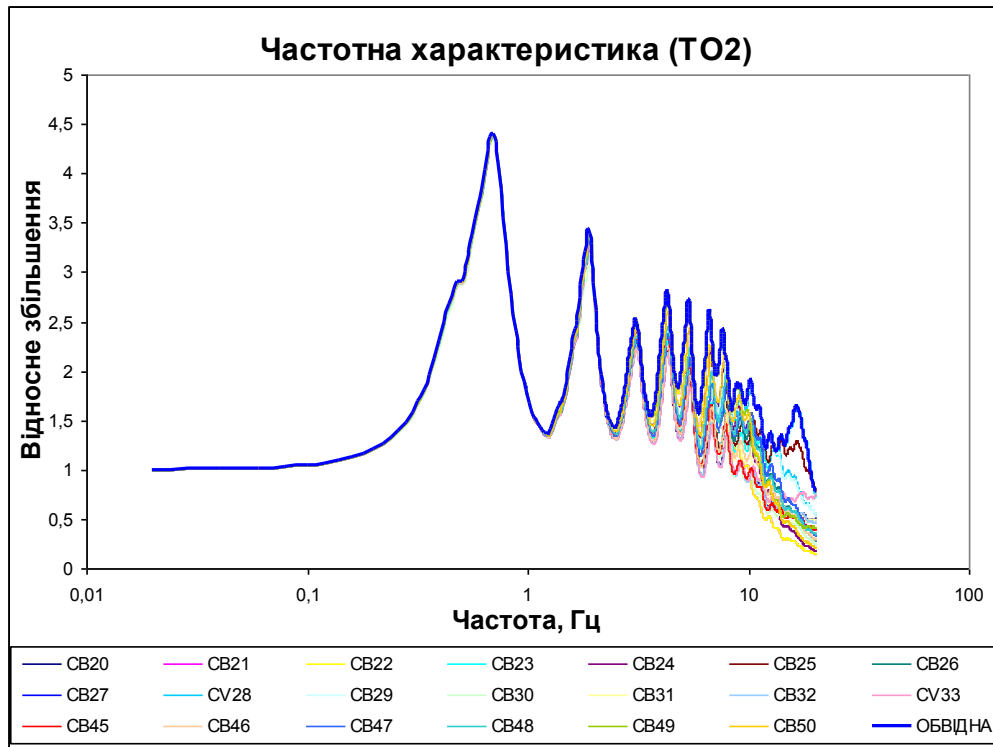


Рис. 5.3. АЧХ ґрунтової товщі в місцях розташування 20 свердловин на ділянці ТО2 майданчика НСК «Олімпійський», та їх обвідна

З рис. 5.3 видно, що найбільші підсилення сейсмічних коливань варто очікувати в частотних діапазонах $0,4 \div 0,9$ Гц, $1,6 \div 2,06$ Гц.

Як видно з рис. 5.2 ÷ 5.4 частотні характеристики ґрунтової товщі для кожної з виділених ділянок мають відмінні резонансні властивості. В той же час спостерігається схожість частотних характеристик ґрунтів в місцях свердловин, які розташовані в межах однієї таксонометричної одиниці і мають, відповідно, близьку геологічну будову. Дані результати підтверджують доцільність використання узагальнених моделей ґрунтових товщ для невеликих за розміром ділянок, геологічна будова яких відноситься до однієї таксонометричної одиниці.

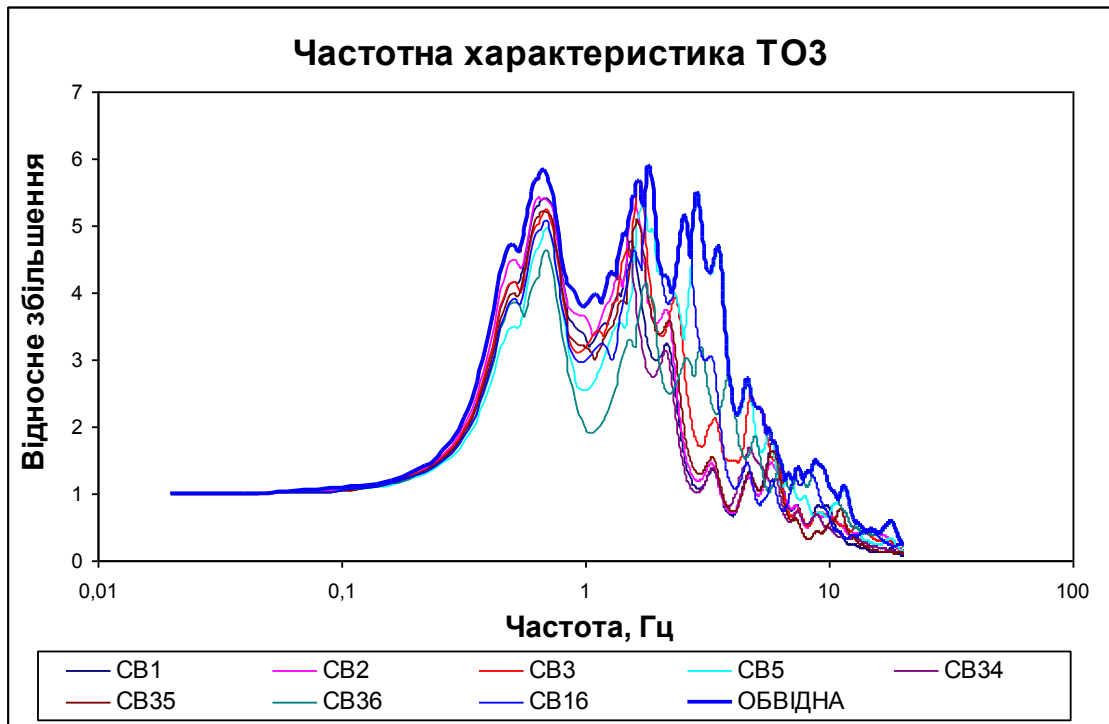


Рис. 5.4. АЧХ ґрунтової товщі в місцях розташування 8-ми свердловин на ділянці ТОЗ майданчика НСК «Олімпійський», та їх обвідна.

На рис. 5.4 приведено АЧХ моделей ґрунтових товщ в місцях розташування 8 свердловин в межах ТОЗ (CB1–3, CB5, CB16, CB34–36) та їх обвідна.

Обвідні АЧХ ґрунтового середовища ТО1, ТО2 та ТО3 майданчика НСК «Олімпійський», представлені на рис. 5.2 ÷ 5.4, були використані для генерування розрахункових акселерограм, які моделюють землетруси із зони Вранча і землетруси з близьких вогнищевих зон.

Враховувалося, що середня частота повторюваності землетрусів з $6.4 < M < 8.0$ для зони Вранча не перевищує декількох подій за століття [Constantinescu, Enescu, 1985]. Враховуючи унікальність землетрусів зони Вранча, при побудові розрахункових акселерограм максимально використовувалася інформація про особливості випромінювання сейсмічної енергії з вогнищ і закономірності розповсюдження сейсмічних коливань, які містяться в реальних записах землетрусів з цієї зони на різних сейсмічних станціях.

Для встановлення параметрів можливих сейсмічних впливів використано наявну в Інституті геофізики НАН України базу цифрових сейсмічних записів землетрусів зони Вранча, зареєстрованих молдавськими сейсмологами в Кишиневі; білоруськими - в Плещеніцах і Гомелі; українськими - в Чернівцях і Чорнобилі; югославськими - в Ніші тощо. Крім цього, є велика кількість матеріалів цифрової реєстрації слабких і проміжних за величиною сейсмічних подій на сейсмічних станціях: «Київ-IRIS», «Київ-ІГФ», «Десна», «Сквира», «Полтава», на майданчиках Чорнобильської, Южно-Української і Запорізької, Рівненської та Хмельницької АЕС, Київської ГЕС та на ряді сейсмічних станцій Карпатського регіону.

Наявність сейсмограм з відновлюваними динамічними характеристиками коливань відкриває можливість застосування способу генерування розрахункових акселерограм, в якому амплітудний спектр прогнозованого прискорення $A(\omega)$ розраховується за допомогою регіональних емпіричних співвідношень, а фазовий спектр $\varphi(\omega)$ запозичується з реальних записів слабких землетрусів зони Вранча, зареєстрованих поблизу майданчика [Ohsaki., 1979; Кендзера, 1996; Кендзера та ін., 1997].

Для генерування розрахункових акселерограм застосовувався спосіб, в якому амплітудний спектр прогнозованого прискорення $A(\omega)$ розраховується за допомогою регіональних емпіричних співвідношень, а фазовий спектр $\varphi(\omega)$ береться з реальних записів слабких землетрусів зони Вранча, зареєстрованих в районі розташування майданчика [Кендзера А.В., 1996].

Для побудови теоретичного амплітудного спектру прискорень $A(\omega)$, який відповідає заданій компоненті коливань ґрунту на досліджуваному майданчику при розрахункових землетрусах із зони Вранча, використовувалися залежності між параметрами цих подій у вогнищі і параметрами амплітудних спектрів акселерограм, зареєстрованих на різних епіцентральных відстанях при різних землетрусах із зони Вранча.

За всією сукупністю зареєстрованих часових функцій прискорень (акселерограм) коливань ґрунту при землетрусах зони Вранча будувалися

рівняння, які описують зміну на різних частотах - f рівня амплітудного спектра Фур'є акселерограм коливань - $|A_i(f)|$, в залежності від магнітуди землетрусів - M і гіпоцентральної відстані - Δ :

$$\log |A_i(f)| = a_i(f)M - b_i(f)\log(\Delta^2) + c_i(f) \pm \sigma_i(f), \quad (5.1)$$

де індекс i - приймає значення: R , T , Z - і позначає належність відповідної змінної до компонент коливань, відповідно: радіальної, тангенціальної горизонтальних або вертикальної (див. рис. 5.5); a_i , b_i , c_i - регіональні коефіцієнти; σ_i - оцінка дисперсії.

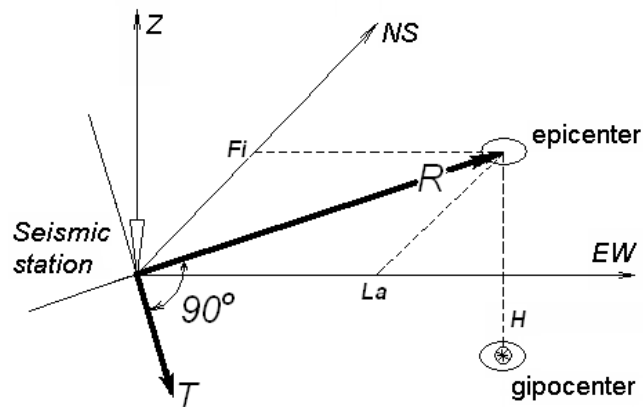


Рис. 5.5. Схема напрямів, яким відповідають компоненти повного вектора сейсмічних коливань на акселерограмах: Z – вертикальна, NS і EW – горизонтальні „північ-південь” і „схід-захід”, R - радіальна (в протилежному напрямі від вогнища землетрусу) і T - тангенціальна (нормальна до радіальної) горизонтальні складові

Для визначення регіональних значень коефіцієнтів рівняння (5.1) використовувалися записи землетрусів зони Вранча з магнітудами $3.8 < M < 6.0$ і глибинами $80 < H < 172$ км.

Амплітудні спектри Фур'є для прискорень заздалегідь згладжувалися за допомогою методу періодограм [Марпл-мл., 1990]. О системи рівнянь (5.1) для кожної з частот f розв'язувалися відноснорегіональних коефіцієнтів a_i , b_i и c_i методом найменших квадратів. З використанням визначених таким чином залежностей (5.1) були побудовані середні теоретичні амплітудні спектри для

розрахункових землетрусів із зони Вранча в районі розташування досліджуваного майданчика НСК «Олімпійський» у Києві.

На рис. 5.6 приведено обвідні амплітудних спектрів компонент розрахункових акселерограм $|A'(\omega)|$ для 99%-ої імовірності неперевикнення розрахункових впливів за найближчі 50 років.

Видно, що максимальні за амплітудою коливання спостерігаються на горизонтальній тангенціальній компоненті. Амплітудний спектр коливань на вертикальній компоненті є приблизно нижчим, але при цьому більш високочастотним.

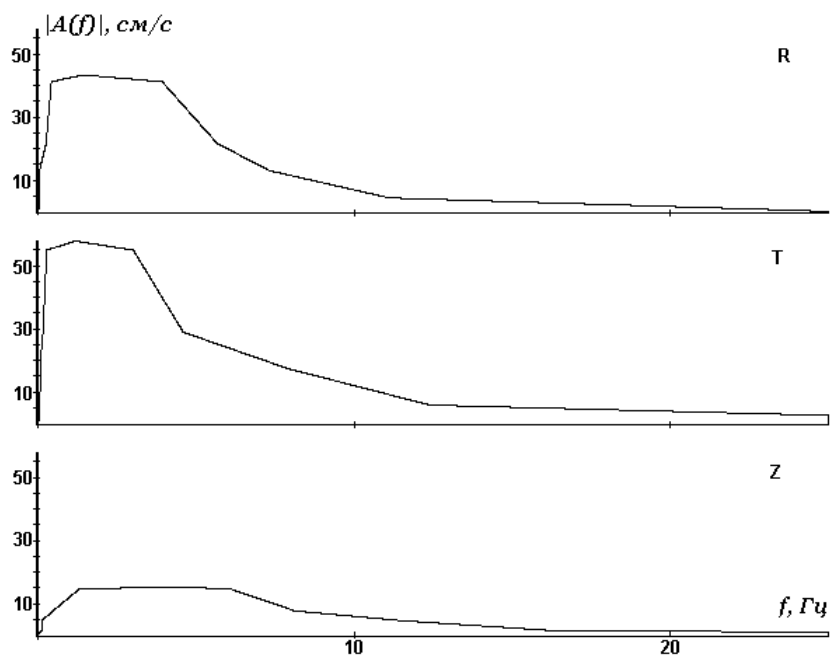


Рис. 5.6. Обвідні амплітудних спектрів розрахункових акселерограм, використані для моделювання спектрів розрахункового землетрусу $I = 6$ балів із зони Вранча в м. Києві для вертикальної - Z, радіальної, - R і тангенціальної - T компонент

Для врахування фільтруючих (резонансних) властивостей ґрунтів на конкретному майданчику, теоретичні спектри множили на нормовані (на максимальне для всіх компонент значення) узагальнені теоретичні частотні характеристики середовища – $H_k(i\omega)$. Індекс k відповідає різним складовим записів і приймає значення: Z – для вертикальної, R - для радіальної горизонтальної і T – для тангенціальної горизонтальної компонент коливань.

Узагальнюючі (обвідні) амплітудні теоретичні частотні характеристики $|H_k(i\omega)|$ представлені на рис. 5.2 – 5.4.

Амплітудні спектри розрахункових акселерограм по компонентах одержувалися в результаті множення теоретичних амплітудних спектрів розрахункових акселерограм на нормовану амплітудну узагальнюючу теоретичну частотну характеристику середовища – обвідну амплітудних частотних характеристик моделей ґрунтової товщі під досліджуваним майданчиком [Технічний звіт..., 2008].

На рис. 5.7 представлено побудовані описаним вище способом амплітудні спектри розрахункової акселерограми, моделюючі 6-бальний землетрус із зони Вранча на майданчику НСК «Олімпійський» у Києві.

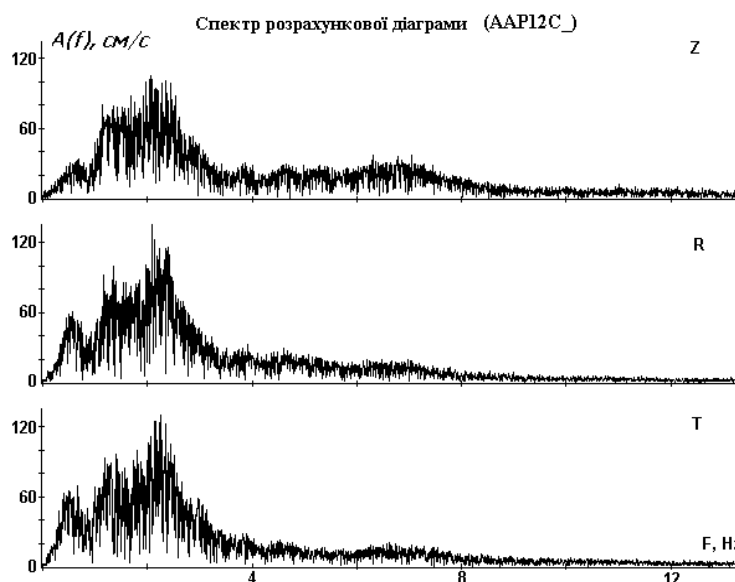


Рис. 5.7 Амплітудні спектри розрахункової акселерограми для моделювання 6-бального землетрусу із зони Вранча на майданчику НСК «Олімпійський».

Складові коливальні: R – горизонтальна радіальна, T – горизонтальна тангенціальна, Z – вертикальна.

Для формування фазового спектру розрахункової акселерограми використовувалися спектри, розраховані за відповідними складовими записів землетрусів із зони Вранча, зареєстрованих на сейсмічній станції «Київ». Можливість використання емпіричного фазового спектру записів реальних

землетрусів для синтезу розрахункових акселерограм показана в роботах [Hartzell, 1978; Ohsaki, 1979; Izutani, Katagiri, 1992].

Розрахункові акселерограми для моделювання землетрусів зони Вранча на досліджуваному майданчику синтезувалися за допомогою регуляризованого алгоритму зворотного перетворення Фур'є [Кендзера та ін., 1997].

На рис. 5.8 приведено приклад графіка трикомпонентної розрахункової акселерограми для моделювання прискорень коливань ґрунту які з імовірністю 99% не будуть перевищені за найближчі 50 років на таксонометричній одиниці ТОЗ майданчика НСК «Олімпійський» при підкорових землетрусах із зони Вранча.

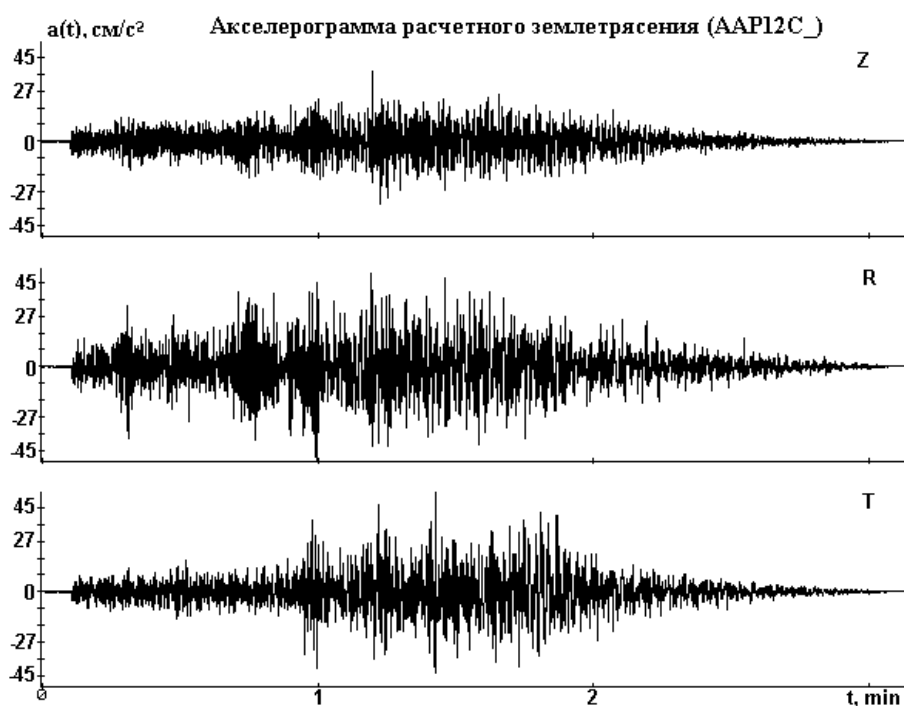


Рис.5.8. Графік трикомпонентної розрахункової акселерограми для моделювання 6-бального розрахункового землетрусу із зони Вранча на вільній поверхні таксонометричної одиниці ТОЗ майданчика НСК «Олімпійський».

Для побудови розрахункових акселерограм, моделюючих вплив близьких вогнищевих зон, вибрано методику, рекомендовану нормативним документом РБ - 006 – 98 [Руководство по ядерной..., 2000].

Акселерограми синтезувалися за допомогою регуляризованого варіанту зворотного перетворення Фур'є [Кендзера та ін., 1997] на основі середніх статистичних залежностей між параметрами вогнищ прогнозованих землетрусів і динамічними параметрами сейсмічних рухів на майданчику. Основи підходу викладені Е.Г. Бугаєвим в роботах [Бугаєв, 1987; 1984].

Для визначення значення пікового максимального прискорення ґрунту \ddot{u}_{max} доцільно користуватися декількома міжнародно-визнаними співвідношеннями між бальністю майданчика і прискоренням коливань ґрунту відомих робіт: С.В. Медведєва [Медведєв., 1984], Ф.Ф. Аптікаєва [Apticaev., 1982], Д. Мерфі, Л. О'Брайена [Murphy J., O'Brien L., 1978], Ю.К. Чернова, В.Ю. Соколова [Чернов Ю.К., Соколов В.Ю., 1983] і К. Кемпбела [Campbell K., 1981]. Ці співвідношення отримані з різних вибірок даних. Вони дають дещо відмінні, хоча і близькі оцінки \ddot{u}_{max} .

Одержані за методикою [Бугаєв Е.Г., 1987; 1984] теоретичні спектри прискорень множилися на нормовані узагальнені теоретичні частотні характеристики геологічного середовища під ділянками майданчика. Спосіб їх побудови описано в попередніх розділах.

Фазові спектри розрахункових акселерограм визначалися як результат сумування фазових спектрів записів реальних землетрусів і вибухів з близьких вогнищевих зон з фахових частотних характеристик геологічного середовища під майданчиком, в якості якої приймався фазовий спектр одної з реалізацій теоретичної частотної характеристики середовища.

Як вхідний матеріал для імітації близьких землетрусів використовувався набір цифрових записів близьких землетрусів. Записи модифікувалися таким чином, щоб обвідна прискорення коливань і значення періодів в максимальній фазі відповідали землетрусам з розрахунковими значеннями параметрів.

Трикомпонентні набори розрахункових акселерограм, які використовувалися для моделювання розрахункових землетрусів з місцевих вогнищевих зон, синтезувалися з використанням різних комбінацій теоретичних спектрів розрахункових акселерограм, частотних характеристик

моделей середовища під майданчиком, а також фазових спектрів, розрахованих для різних записів реальних подій.

На рис. 5.10 приведено графіки теоретично побудованих амплітудних спектрів розрахункового землетрусу з вогнищем поблизу досліджуваного будівельного майданчика.

Для врахування впливу середовища під майданчиком ці спектри перемножувалися на нормовані узагальнені теоретичні частотні характеристики середовища $H_k(i)$, представлені на рис. 5.2–5.4.

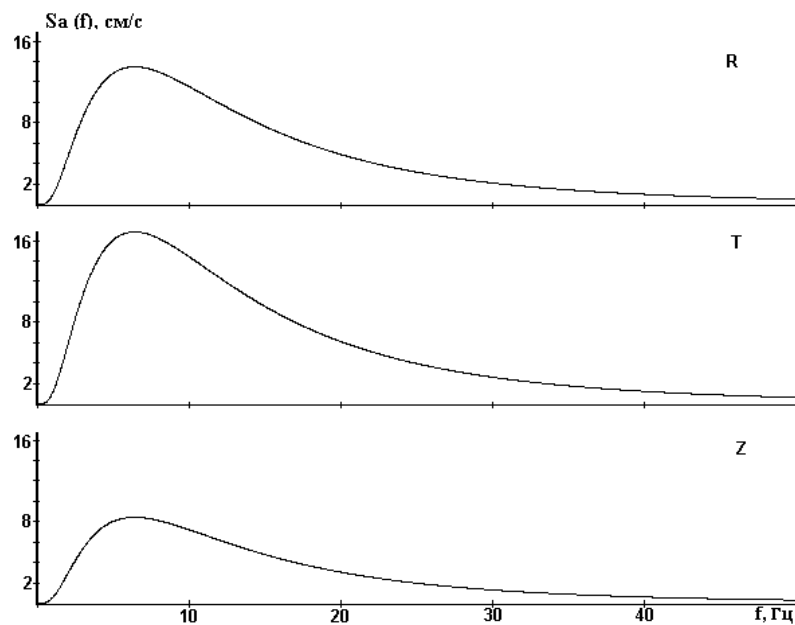


Рис. 5.9. Обвідні амплітудних спектрів розрахункових акселерограм, які моделюють місцеві 6-бальні землетруси на досліджуваному майданчику.

Фазові спектри розрахункових акселерограм отримано в результаті сумування фазових спектрів записів реальних землетрусів з фазовою характеристикою геологічного середовища під будівельним майданчиком.

Для розрахунку фазових спектрів розрахункових акселерограм використовувалися реальні записи близьких сейсмічних подій, модифіковані з врахуванням умов майданчика. Їх модифікація здійснювалася так, щоб обвідна розрахованого на їх основі прискорення, а також значення періодів в максимальній фазі коливань відповідали місцевим землетрусам з розрахунковими параметрами.

Розрахункові акселерограми синтезувалися за допомогою регуляризованого алгоритму зворотного перетворення Фур'є.

На рис. 5.10 зображено графіки трикомпонентної розрахункової акселерограми для моделювання локального розрахункового землетрусу на вільній поверхні ґрунту ТОЗ досліджуваного майданчика.

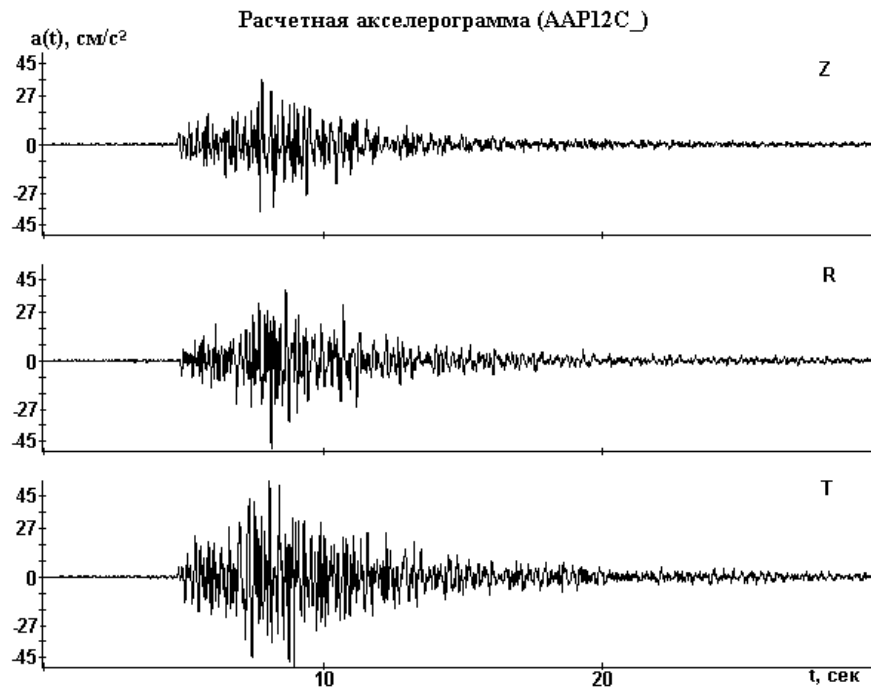


Рис. 5.10. Приклад графіка трикомпонентної розрахункової акселерограми для моделювання локального 6-бального розрахункового землетрусу на вільній поверхні ділянки таксонометричної одиниці ТОЗ майданчика НСК «Олімпійський».

Для майданчика НСК «Олімпійський» побудовано по п'ять реалізацій трикомпонентних розрахункових акселерограм для моделювання 6-бальних розрахункових землетрусів (РЗ) для ТОЗ і максимальних розрахункових землетрусів (МРЗ) із локальних потенційно сейсмоактивних зон для ТО1. При їх генеруванні використовувалися різні комбінації теоретичних обвідних спектрів розрахункових акселерограм, нормованих частотних характеристик геологічного середовища під майданчиком і фазових спектрів різних записів близьких землетрусів, модифікованих з врахуванням умов майданчика.

Модельовані розрахунковими акселерограмами сейсмічні прискорення з імовірністю 99% не будуть перевищені за найближчі 50 років.

В аналогічний спосіб, з використанням частотних характеристик ґрунтових товщ під будівельними та експлуатаційними майданчиками, було побудовано розрахункові акселерограми для ряду інших об'єктів.

5.2. Частотні характеристики ґрунтів під будівельними майданчиками житлових висотних будинків в Одеській області

На рис. 5.11 представлено амплітудні частотні характеристики (АЧХ) побудовані для моделей ґрунтових товщ під будівельними майданчиками висотних будинків в м. Одесі та в Одеській області.

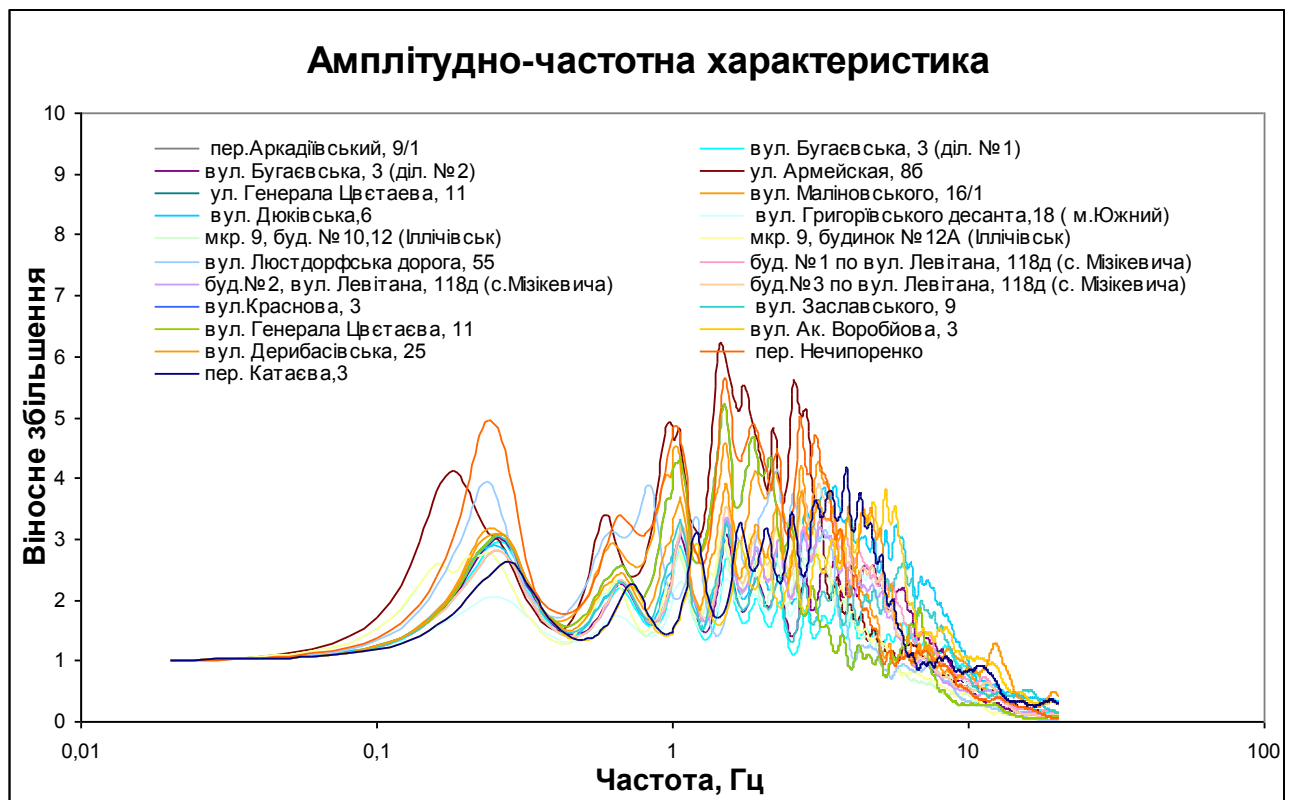


Рис. 5.11. АЧХ моделей ґрунтового середовища під будівельними майданчиками Одеси та Одеської області.

АЧХ ґрунтів під будівельними майданчиками Одеської області мають велику кількість чітко виражених максимумів і широкий частотний діапазон можливого резонансного підсилення сейсмічних коливань.

По АЧХ моделей ґрунтових товщ, представлених на рис. 5.11, було визначено частотні діапазони можливого резонансного підсилення сейсмічних коливань локальними ґрунтовими умовами для кожного будівельного майданчика. Для всіх будівельних майданчиків Одеської області перший максимум частотної характеристики спостерігається в низькочастотному діапазоні від 0,15 до 0,35 Гц, що очевидно є проявом великої (від 1400 до 1600 м) потужності осадових відкладів. Наступні максимуми частотних характеристик ґрунтових товщ під будівельними майданчиками Одеської області спостерігаються в частотному діапазоні від 0,5 до 10 Гц. Таким чином, можна зробити висновки, що при сейсмостійкому проектуванні будівництва необхідно проводити детальні дослідження резонансних властивостей ґрунтів під будівництво незалежно від поверховості будівель та складності конструкції, оскільки власні частоти коливань, як одноповерхових так і висотних будівель, зазвичай, лежать в цьому частотному діапазоні.

За отриманими результатами сформульовано рекомендації щодо запобігання виникненню резонансних ефектів у проєктованих об'єктах за рахунок збігу частот максимальних коливань в падаючих сейсмічних коливаннях з максимумами частотних характеристик ґрунтів і частот власних коливань будинків та споруд.

5.3. Частотні характеристики ґрунтів під будівельними майданчиками житлових висотних будинків в Києві

На рис. 5.12 представлено розраховані АЧХ моделей ґрунтових товщ під деякими будівельними майданчиками висотного будівництва в Києві.

Видно, що АЧХ моделей ґрунтових товщ під будівельними майданчиками в Києві характеризуються одним або двома максимумами в

частотному діапазоні від 0,2 до 2 Гц. Цей низькочастотний діапазон можливого підсилення коливань обов'язково потрібно враховувати при проектуванні висотного сейсмостійкого будівництва в Києві, оскільки найбільшу небезпеку для висотних будівель тут представляють низькочастотні коливання від підкорових вогнищ сильних землетрусів, що відбуваються в Східних Карпатах (зона Вранча, Румунія).

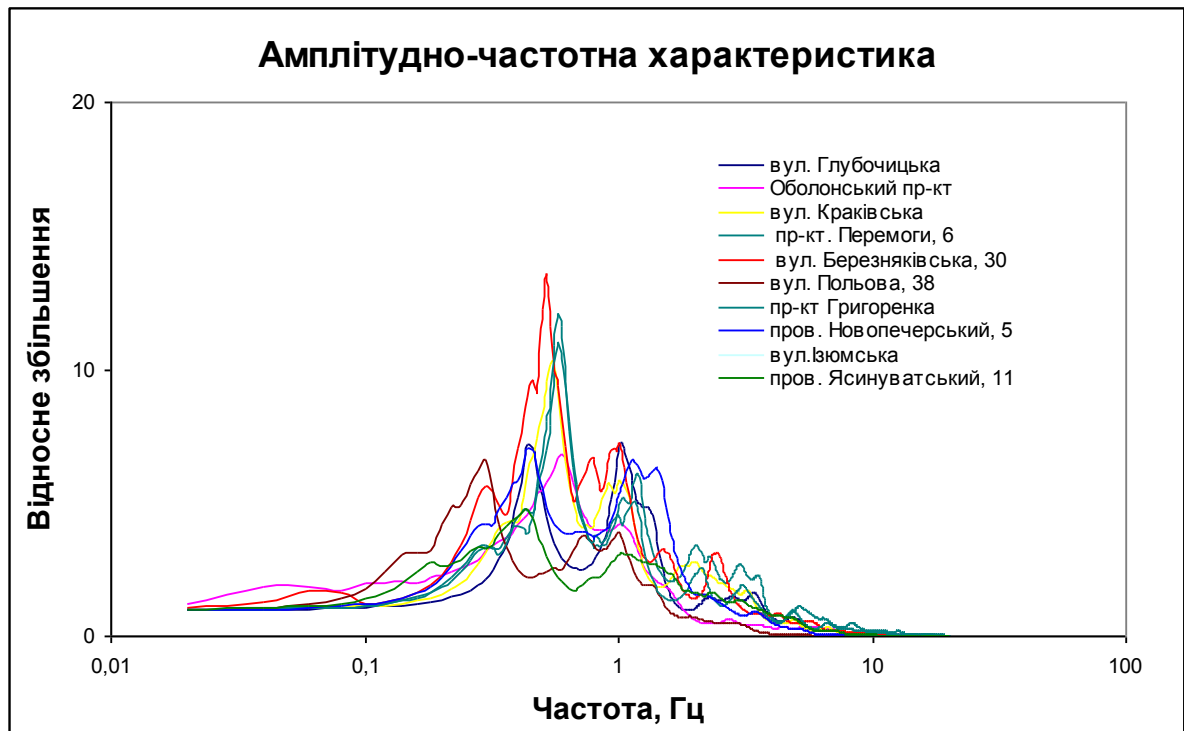


Рис. 5.12. АЧХ характеристики моделей ґрунтового середовища під будівельними майданчиками Києва.

5.4. Частотні характеристики ґрунтів ділянок розташування основних споруд Кременчуцької ГЕС

Для території розміщення основних споруд Кременчуцької ГЕС розраховувались АЧХ для правого і лівого берега окремо. На рис. 5.13 представлено результати розрахунку АЧХ ґрунтового середовища в місцях розташування основних споруд Кременчуцької ГЕС для правого і лівого берегів.

З рис. 5.13 видно, що АЧХ мають схожу форму, але різні частотні діапазони підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами. Максимум АЧХ ґрунтової товщі правого берега Кременчуцької ГЕС знаходиться в частотному діапазоні від 1,1 до 3,4 Гц, а максимум АЧХ лівого берега - від 0,6 до 1,8 Гц. Побудовані АЧХ використано при генеруванні наборів розрахункових акселерограм для моделювання сейсмічних впливів від місцевих землетрусів і землетрусів зони Вранча на споруди Кременчуцької ГЕС.

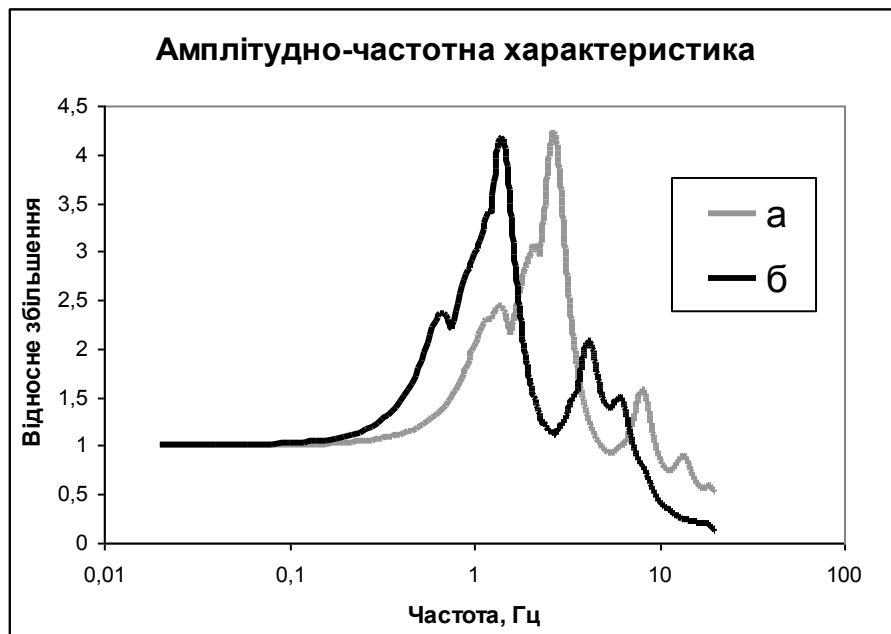


Рис. 5.13. АЧХ ґрунтового середовища в місцях розташування основних споруд Кременчуцької ГЕС а) на правому березі; б) лівому березі.

5.5. Частотні характеристики ґрунтів майданчика компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів - Богородчани»

На рис. 5.14 представлено результати розрахунку АЧХ ґрунтового середовища під майданчиком реконструкції компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів - Богородчани».

АЧХ ґрунтового середовища під майданчиком компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів – Богородчани»

характеризується широким частотним діапазоном резонансного підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами від 0,9 Гц до 10 Гц. В зазначеному частотному діапазоні спостерігаються три максимуми, з яких перші два мають досить великий коефіцієнт підсилення. Тому найбільші підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів – Богородчани» можуть спостерігатись в частотному діапазоні від 1,35 Гц до 2,8 Гц.

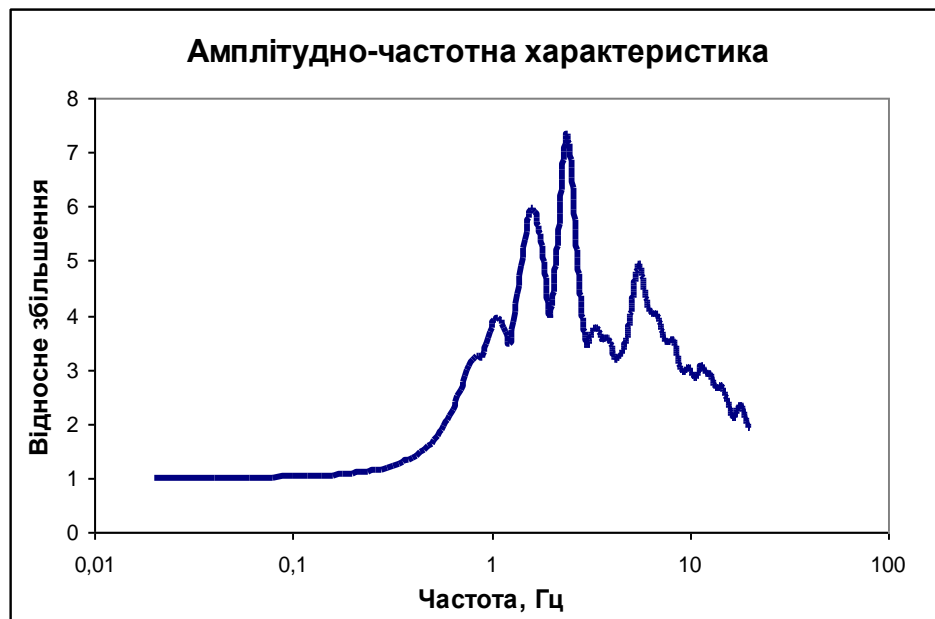


Рис.5.14. АЧХ ґрунтового середовища під майданчиком реконструкції компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів – Богородчани».

Частотні характеристики ґрунтових комплексів використано при генеруванні наборів розрахункових акселерограм для моделювання сейсмічних впливів від місцевих землетрусів і землетрусів зони Вранча на проєктовані об'єкти компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів – Богородчани».

Проаналізувавши всі розраховані АЧХ моделей ґрунтових середовищ під будівельними майданчиками, представленими в даному розділі можна зробити висновки, що коефіцієнт підсилення має значний розкид. Це, очевидно, є

наслідком нелінійної поведінки ґрунтів і їх фільтруючих властивостей. Можна стверджувати, що пошуки одної чіткої залежності, яка б пов'язувала тип ґрунту, чи його категорію за сейсмічними властивостями, з очікуваними максимальними прискореннями є не продуктивними. Така залежність буде відображати лише загальні тенденції. При прогнозуванні небезпечних (для конкретних об'єктів) сейсмічних впливів необхідно будувати частотні характеристики, які описують їх складну залежність від будови ґрунтових комплексів, від впливу реологічних властивостей кожного із шарів ґрунту під досліджуваними майданчиками, при сейсмічних впливах різної величини.

Всі представлені в розділі АЧХ ґрунтових товщ під будівельними та експлуатаційними майданчиками були використані для побудови розрахункових акселерограм, які, в свою чергу, були застосовані при проектуванні нових і визначенні сейсмостійкості існуючих будинків і споруд.

Врахування резонансних властивостей ґрунтів на етапі проектування забезпечує запобігання збігу власних частот коливань будівель з власними частотами коливань ґрунтової товщі і, відповідно, забезпечує стійкість проєктованих будівель при сейсмічних впливах.

Висновки до розділу 5

В даному розділі наведено результати розрахунку частотних характеристик ґрунтових комплексів під будівельними майданчиками проєктованих та експлуатаційних об'єктів, розташованих на території України, зокрема в Києві, Одесі та в місцях розташування ряду важливих об'єктів. Частотні характеристики розраховувалися за розвинутою автором методикою, яка, згідно рекомендацій нормативного документу Єврокод-8, враховує реологічну поведінку ґрунтів при значних сейсмічних навантаженнях. Методика ґрунтується на застосуванні аналітично-емпіричного підходу до визначення частотних характеристик коливань ґрунтів з врахуванням їх

нелінійної реакції. Цим вона є точнішою (більш досконалою), у порівнянні з підходами рекомендованими для практичного використання чинними в Україні нормативними документами ДБН В.1.1-12:2014; РСН 60-86; РСН 65-87. Покращена методика дозволяє точніше визначати кількісні параметри сейсмічної небезпеки, необхідні для сейсмостійкого проектування та будівництва.

По розрахованих АЧХ визначено резонансні частоти, на яких спостерігається значне підсилення сейсмічних коливань локальними ґрунтовими умовами. Сформульовано рекомендації щодо запобігання виникненню резонансних ефектів у проєктованих об'єктах. Наявність частотних характеристик, які максимально точно (на рівні сучасних знань) відображають вплив ґрунтової товщі під майбутньою забудовою, дозволяє зменшити її вартість і одночасно підвищити сейсмостійкість завдяки розробці проєктних рішень, які виключають збіг власних частот проєктованої будівлі з максимумами частотної характеристики геологічного середовища.

ВИСНОВКИ

В практиці сейсмічного мікрорайонування (СМР) в Україні, регламентованій чинними нормативними документами ДБН В.1.1-12:2014; РСН 60-86; РСН 65-87 - при визначенні впливу локальних ґрунтових умов на параметри сейсмічної небезпеки майданчика, враховуються лише лінійні механізми перетворень сейсмічних хвиль в при поверхневій ґрунтовій товщі і не в повній мірі враховуються резонансні властивості ґрунтових комплексів.

Дисертація містить раніше не захищені наукові положення, які в сукупності розв'язують важливу наукову і практичну задачу визначення резонансних властивостей ґрунтових комплексів з врахуванням їх нелінійних властивостей для цілей сейсмостійкого проектування будівель та споруд. Основні результати дисертаційної роботи зводяться до наступного:

1. Розвинуто методику визначення резонансних властивостей ґрунтових комплексів під будівельними майданчиками, яка враховує нелінійну поведінку ґрунтів при сейсмічних впливах. В основі методики лежить аналітично-емпіричний підхід до розрахунку частотних характеристик ґрунтів. Підсилення коливань ґрунтами має складний вигляд, залежить від багатьох факторів і може суттєво відрізнятися для різних будівельних майданчиків. При сейсмостійкому проектуванні будинків і споруд необхідно правильно враховувати фільтруючі властивості ґрунтових комплексів з врахуванням можливого суттєвого збільшення коливань на «резонансних» частотах. Частотні характеристики слід розраховувати з урахуванням впливу реологічних властивостей ґрунтових товщ і нелінійних методів розрахунку їх частотних характеристик.

2. Сформовано базу даних, яка в графічному і цифровому вигляді містить інформацію про залежність модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації для різних типів ґрунтів, характерних для майданчиків, розташованих на території України, зокрема в Києві, Одесі та в місцях розташування ряду важливих об'єктів. Запропоновано в якості індикаторних параметрів в алгоритмі підбору деформаційних характеристик

для шарів ґрунту в розрахункових моделях використовувати: для глинистих порід - індекс пластичності та глибина залягання; для піщаних - розмір частинок, їх процентний вміст і глибина залягання.

3. Розроблено та впроваджено при сейсмічному мікрорайонуванні майданчиків будинків і відповідальних споруд розташованих на території України алгоритм побудови розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтової товщі з врахуванням її нелінійних деформаційних характеристик.

Відзначено, що в Державних будівельних нормах України ДБН А.2.1-1-2014 необхідно збільшити нормативне значення глибини досліджень під будівництво верхньої частини розрізу осадової товщі з нормативних 10 метрів до кривлі консолідованого фундаменту, оскільки потужність осадового шару має суттєвий вплив на сейсмічний ефект на поверхні. При збільшенні потужності осадового шару, складеного ґрунтами III та IV категорії за сейсмічними властивостями, резонансні частоти зміщуються в низькочастотну область, що може виявитися небезпечним для протяжних та висотних об'єктів з високими значеннями періодів власних коливань.

4. Для умов України встановлено межі використання методів лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного математичного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи для будівельних майданчиків з різними категоріями ґрунтів за сейсмічними властивостями та різною величиною прогнозованої сейсмічної інтенсивності (бальності):

- При моделюванні реакції ґрунтової товщі, складеної ґрунтами I категорії за сейсмічними властивостями, допускається використання лінійної залежності «напруження–деформація» в діапазоні очікуваної максимальної сейсмічної інтенсивності до 9 балів включно.

- Для ґрунтової товщі, складеної ґрунтами II категорії, лінійне моделювання припустиме при очікуваній максимальній інтенсивності до 8 балів.

- Для ґрунтової товщі, складеної ґрунтами III і IV категорії, необхідно враховувати їх нелінійні властивості при очікуваній інтенсивності,

починаючи з 6 балів включно. Для будівельних майданчиків з очікуваною максимальною інтенсивністю 6–7 балів необхідно застосовувати еквівалентне лінійне моделювання, а для майданчиків з очікуваною максимальною інтенсивністю 8 – 9 балів - слід використовувати нелінійне моделювання.

Оскільки для переважної частини України, згідно карт ЗСР-2004, максимальна фонові сейсмічність становить 6-7 балів, то, в більшості випадків, доцільним є застосування, для прогнозування реакції ґрунтової товщі під будівельними майданчиками, методу еквівалентного лінійного моделювання.

5. Встановлено граничні значення епістемічних і випадкових похибок у параметрах розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтів, при яких забезпечуються одержання стійких розв'язків задачі побудови амплітудно-частотних характеристик методом еквівалентного лінійного моделювання. Стійкість розв'язків задачі розрахунку частотних характеристик ґрунтових товщ методом еквівалентного лінійного моделювання, забезпечується при наявності в параметрах їх розрахункових моделей випадкових відносних похибок, які не перевищують 20%.

6. Удосконалену методику визначення резонансних властивостей ґрунтових комплексів впроваджено при визначенні сейсмічної небезпеки майданчиків: НСК «Олімпійського», газоперекачувальних станцій газопроводу «Кременчук - Ананів - Богородчани», гідротехнічних споруд Кременчуцької ГЕС, ряду висотних будинків в м. Києві та в Одеській області. Розраховано частотні характеристики ґрунтів з врахуванням їх нелінійних властивостей та визначено резонансні частоти, на яких спостерігається значне підсилення сейсмічних коливань локальними ґрунтовими умовами кожного із майданчиків. Сформульовано рекомендації щодо запобігання виникненню резонансних ефектів у проєктованих об'єктах за рахунок збігу максимальних частот коливань в падаючих сейсмічних хвилях з максимумами частотних характеристик ґрунтів і частот власних коливань

будинків та споруд. Наявність частотних характеристик, які максимально повно відображають вплив ґрунтової товщі під майбутньою забудовою, дозволяє значно зменшити її вартість і одночасно підвищити сейсмостійкість шляхом розробки проектних рішень, які перешкоджають збігу власних частот проектованої будівлі з максимумами частотної характеристики ґрунтової товщі.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- Abbis C. P., 1989. Seismic amplification -Mexico City. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 18(1), 78—88.
- Aki K., 1988. Local site effects on ground motion, *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II Recent Advances in Ground-Motion Evaluation: Proc. of the A.S.C.E. Specialty Conference, June 27—30, Park City, Utah*. P. 103—155.
- Ambraseys N. N., 1970. Factors controlling the earthquake response foundation materials: *Proc. of the 3rd Europ. Symp. Earthquake Eng. Sofia*. P. 309—323.
- Anderson D. G., Richart F. E., 1976. Effect of straining on shear modulus of clays. *J. Geotechnical Engineering Division (ASCE)* 102(GT9), 975—987.
- Andreasson B., 1979. Deformation Characteristics of Soft, High-Plastic Clays under Dynamic Loading Conditions. Thesis, Dept. of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Andreasson B., 1981. Dynamic Deformation Characteristics of a Soft Clay: *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Loise, Missouri, Vol.1*, P. 65—70.
- Andrus R. D., Zhang J., Ellis B. S., Juang C. H., 2003. Guide for estimating the dynamic properties of South Carolina soils for ground response analysis. Rep. No. FHWA-SC-03-07, South Carolina Department of Transportation, Columbia, S.C.
- Apticaev F. F., 1982. On the correlation of MM intensity with parameters of ground shaking: *Proc. of the VII Europ. Conf. Earthquake Eng., Greece. Athens, Vol. 2*, P. 95—102.
- Archuleta R. J., 1998. Direct observations of nonlinearity in accelerograms. In: *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Rotterdam: Balkema, P. 787—792.
- Arulanandan K., Scott R. F. (eds.), 1994. Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems. *Conference Proceedings, Davis, CA, Vol. 2*.

- Atkinson G. M., Boore D. M., 1997. Some Comparisons Between Recent Ground-Motion Relations. *Seismol. Res. Lett.* 68(), 24—40.
- Baratta M., 1910. *La Catastrofe Sismica Calabro-Messinese (28 Dicembre 1908)*, Soc. Geogr. Ital., Rome, 496 p.
- Bardet J. P., Ichii K., Lin C. H., 2000. EERA: A Computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis of Layered soil deposits, Department of Civil Engineering, University of Southern California.
- Bardet J. P., Tobita T., 2001. NERA. A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered Soil Deposits. Los Angeles: Univ. of Southern California. 44 p.
- Bersenev I. A., Wen K.-L., Yeh Y. T., 1994. Source, path, and site effects on dominant frequency and spatial variation of strong ground motion recorded by SMART1 and SMART2 arrays in Taiwan. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* 23, 583—597.
- Bharatha S., Levinson M., 1977. On physically nonlinear elasticity. *J. Elasticity* 7, 307—324.
- Biot M.A., 1954. Theory of stress-strain relations in anisotropic viscoelasticity and relaxation phenomena. *J. Appl. Phys.* 25(11), 1385—1391.
- Bolisetti C., Whittaker A., Mason H., Almufti I., Willford M., 2014. Equivalent linear and nonlinear site response analysis for design and risk assessment of safety-related nuclear structures. *Nuclear Engineering and Design*, 107—121. Online publication date: 1-Aug-2014. 10.1016/j.nucengdes.2014.04.033.
- Bonnet G., Heitz J. F., 1994. Non-linear seismic response of a soft layer: Proc. of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, Balkema, Vol. 1. P. 361—364.
- Boore D. M., Joyner W. B., Oliver A. A., Page R. A., 1980. Peak acceleration, velocity and displacement from strong motion records. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 70, 305—321.

- Brocaw M. P., Foster G. W., 1976. Effect of rapid loading and duration of stress on the strength properties of wood tested in compression and flexure media. Wisc. U.S. Department of Agriculture. Forest Products Laboratory. 180 p.
- Campbell K. W., 1982. Near-source scaling characteristics of peak horizontal acceleration for moderate-to-large earthquake: Proc. of the Workshop XVI. The dynamic characteristics of faulting inferred from recordings of strong ground motion. Rpt. 82-591. USGS, Vol. 1. P. 455—476.
- Campbell K. W., 1997. Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra. *Seismol. Res. Lett.* 68(1), 154—179.
- Campbell K., 1981. Near source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71(6), 2039—2070.
- Chameau J. L., 1994. Liquefaction potential evaluation: Proc. of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, (abstract). Vol. 1.
- Chiaruttini C., Siro L., 1981. The correlation of peak ground horizontal acceleration with magnitude, distance, and seismic intensity for Friuli and Ancona, Italy, and the Alpidic beh. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71(6), 1993—2009.
- Chiaruttini C., Crosilla F., Siro L., 1979. Some maximized acceleration analysis of the 1976 Friuli earthquakes. *Boll. Geof. Teor. Appl.* XXL, 38—52.
- Chopra A. K., 1981. Dynamics of structures: a primer. *Earthquake Engineering Research.* 126 p.
- Chopra A. K., 1995. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- Constantinescu L., Enescu D., 1985. Cutremurele din Vrancea in cadru stiintific si tehnologic. Bucuresti: Editura Academici Republicii Socialiste Romania. 230 p.
- Dravinski M., 1983. Amplification of P, SV and Rayleigh Waves by Two Alluvial Valleys -J. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2(2), 66—77.

- Duke C. M., Johnsen K. E., Larson L. E., Engman D. C., 1972. Effects of site classification and distance on instrumental indices in the San Fernando earthquake. Rpt. UCLA-ENG-7247. Los Angeles, 50 p.
- Electrical Power Research Institute, EPRI, 1993. Guidelines for determining design basis ground motions. Volume 1: Method and guidelines for estimating earthquake ground motion in eastern North America, Rpt. No. EPRI TR-102293, Palo Alto, CA.
- Finn W. D. L., Iai S., Matsunavga Y., 1994. Effect of site conditions of ground motions: Proc. of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, abstract. Vol. 2.
- Finn W. D. L., Semih S., Tezcan S. S., Ipek M., 1975. A Parametric Study of Soil Amplification: Proc. of the 5th European Conference on Earthquake Engineering. Vol. 1. No 20. Istanbul.
- Finn W. D. L., Yogendrakumar M., 1989. TARASFL-program for analysis of liquefaction induced flow deformations. Department of Civil Engineering, Univ. of British Columbia, Vancouver.
- Finn W. D. L., Yogendrakumar M., Yoshida N., Yoshida M., 1986. TARA-3: a program for nonlinear static and dynamic effective stress analysis. Soil dynamics group, Univ. of British Columbia, Vancouver.
- Fortsch O., Schulze G. A., 1948. Wellenausbreitung und experimentale Seismic. Geophysic. DVB. Teil II. № 18. S. 23—25.
- Fukushima Y., Tanaka T., 1990. A New Attenuation Relation for peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan. Bull. Seismol. Soc Am. 80(4), 757—783.
- Gatmiri B., Khodabandeh C., Davoodi M. R., Militanovich Z., 1994. Local site effects for seismic microzonation of three cities in North Iran: Proc. of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, abstract. Vol. 1.
- Hardin B. O., Drnevich V. P., 1972. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. Journal of the Soils Mechanics and Foundation Engineering Division. ASCE 98(SM7), 667—692.

- Hartzell S. H., 1978. Earthquake aftershocks as Green's functions. *Geophys. Res. Lett.* 5, 1—4.
- Hashash Y. M. A., Park D., 2001. Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment. *Engineering Geology* 62(1-3), 185—206.
- Hashash Y. M. A., Phillips C., Groholski D. R., 2010. Recent advances in non-linear site response analysis: Fifth International Conference in Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. San Diego, CA. CD-Volume: OSP 4.
- Hashash Y., 2012. DeepSoil User Manual and Tutorial. Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign. 107 p.
- Haskell N. A., 1951. Asymptotic Approximation for the Normal Modes in Sound Channel Wave Propagation. *J. Appl. Phys.* 22, 157—168.
- Haskell N. A., 1953. The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 43, 17—34.
- Hauksson E., Teng T. -L., Henyey T. L., 1987. Results from a 1500 m deep, three-level downhole seismometer array: site response, low Q values, and f_{\sim} . *Bull. Seismol. Soc. Am.* 77, 1883—1904.
- Horike M., Uebayashi H., Takeuchi Y., 1990. Seismic response in three-dimensional sedimentary basin due to S-wave incidence. *J. Phys. Earth* 38, 261—284.
- Iai S., Morita T., Karneoka T., Matsunaga Y., Abiko K., 1995. Response of a Dense Sand Deposit During 1993 Kushiro-Oki Earthquake. *Soils and Foundations* 35, 115—131.
- Idriss I. M., 1999. An Update to the Seed-Idriss Simplified Procedure for Evaluating Liquefaction Potential: Proc. of TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction, Federal Highway Administration, Washington DC, 10 January 1999.
- Idriss I. M., Seed H. B., 1968. Seismic response of horizontal soil layers. *Proc. Am. Soc. Civil Eng., J. Soil Mech. Found. Div.* 94, 1003—1031.

- Isenhower W. M., Stokoe K. H., 1981. Strain Rate Dependent Shear Modulus of San Francisco Bay Mud: Proc. of the International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soils Dynamics, University of Missouri-Rolla. Vol. 2. P. 597—602.
- Ishibashi I., Zhang X. J., 1993. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils Found.* 33(1), 182—191.
- Ishihara K., Kokusho T., Silver M. L., 1992. Recent developments in evaluating liquefaction characteristics of local soils: Proc. of the 12th Int. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro 1989. General state-of-the-art report, Rotterdam, Brookfield, Vol. 4, P. 2719—2734.
- Iwan W. D., 1967. On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems. *J. Appl. Mech.* 34, 612—617.
- Iwasaki T. Tatsouka F., Takagi Y., 1978b. Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading. *Soils Found.* 18(1), 39—56.
- Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K., Yasuda S., 1978a. A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan: Proc. of the 2nd Int. Conf. on Microzonation for Safer Construction, Research and Application, San Francisco, California, 2. P. 885—896.
- Iwasaki T., Tokida K., Mc Guire R., Tatsuoka F., 1981. Assessment of the probability of liquefaction on of uncompacted sandy deposits: Struct. Safety and Reliab. Proc. I cossar '81: 3rd. Int. Conf. Trodneim, June 23—25, 1981. Amsterdam. P. 231—240.
- Izutani Y., Katagiri F., 1992. Empirical Green's function corrected for source effect. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 21, 341—349.
- Jeffreys H., 1917. The viscosity of the Earth. *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* 77(5), 449—456.
- Joyner W. B., Boore D. M., Porcella R. L., 1981. Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records. *Earthquakes Notes* 52(1), 80—81.
- Joyner W. B., Chen A. T. F., 1975. Calculation of nonlinear ground response in earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 65(5), 1315—1336.

- Joyner W. B., Warrick R. E., Fumal T. E., 1981. The effect of Quaternary alluvium on strong ground motion in the Coyote Lake, California, earthquake of 1979. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71, 1333—1349.
- Kanai K., 1952. Relation between the nature of surface layer and the amplitudes of earthquake motions. *Bull. Earth. Res. Inst., Tokyo Univ.* 30, 31—37.
- Kanai K., Hisrano K., Yoshizawa S., Asada T., 1966. Observation of strong earthquake motion in Matsushiro area, part 1. *Bull. Earth. Res. Inst., Tokyo Univ.* 44, 1269—1296.
- Kendzera O., 2015. Seismic hazard and seismic protection in Ukraine. In: *Earth reality along the silk road and scientific cooperation. Atatürk Üniversitesi: ERZURUM*, P. 61—72.
- Kennett B. L. N., 1979. Theoretical reflection seismograms for elastic media. *Geophys. Prosp.* 27(2), 301—321.
- Kim T. C., Novak M., 1981. Dynamic properties of some cohesive soils of Ontario. *Canadian Geotech. J.* 18(3), 371—389.
- Kokusho T., 1980. Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range. *Soils Found.* 20, 45—60.
- Kokusho T., 1999. Effect of nonlinear soil properties on seismic amplification in surface layers: 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (Lisbon), P. 913—918.
- Kokusho T., Matsumoto M., 1998. Nonlinearity in site amplification and soil properties during the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake. *Soils Found. Special Issue*, 1—9.
- Kokusho T., Yoshida Y., Esashi Y., 1982. Dynamic properties of soft clay for wide strain range. *Soils Found.* 22(4), 1—18.
- Kovacs W. D., Seed H. B., Chan C. K., 1971. Dynamic moduli and damping ratios for a soft clay. *ASCE. J. Soil Mech. Found. Div.* 97(SM1), 59—75.
- Kramer S. L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 672 p.

- Kudo K., 1995. Topics of Effects of surface geology on strong-ground motion from the recent earthquakes in Japan and the activity of Japanese Working Group on effects on surface geology: Proc. of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, Vol. 4., P. 2635—2641.
- Lanzo G., Pagliaroli A., Tommasi P., Chiocci F. L., 2009. Simple shear testing of sensitive very soft offshore clay for wide strain range. *Canadian Geotech. J.* 46(11), 1277—1288.
- Lee M. K. W., Finn W. D. L., 1978. DESRA-2, Dynamic Effective Stress Response Analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential. Soil mech. series, 38, Department of Civil Engineering, Univ. of British Columbia, Vancouver.
- Lermo J., Rodriguez M., Singh S. K., 1988. The Mexico earthquake of September 19, 1985 – Natural periods of sites in the valley of Mexico from microtremor measurements and strong motion data. *Earthquake Spectra* 4(4), 805—814.
- Luco E. J., Wong H. I., de Barros F. C. P., 1995. Three-dimensional response of a cylindrical crack in a layered half-space. *Earthquake Eng. Struc. Dynamics* 19, 799—817.
- Marmarelis P. Z., Marmarelis V. Z., 1978. Analysis of Physiological Systems. The White-Noise Approach. N.Y.; L.: Plenum, 994 p.
- Martin P. P., Seed H. B., 1978. MASH: A computer program for the non-linear analysis of vertically propagating shear waves in horizontally layered deposits. University of California, Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 78-23, Berkeley, California.
- Masing G., 1926. Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing. Proc. Intern. Congr. Appl. Mech. 332—335.
- Mc Guire R. K., Bamhard T. P., 1979. The usefulness of ground motion duration in predicting the severity of seismic shaking. Working paper. 17 p.
- Menzel H., 1954. On the propagation of seismic waves in a solid body with elastic afterworking. *Geophys. Prospecting* 2, 139—150.

- Midorikawa S., 1993. Nonlinearity of site amplification during strong ground shaking. *J. Seism. Soc. Japan* 46, 207—216.
- Moinfar A.A., Nadersadeh A., 1994. Strong motion characteristics and acceleration distribution during the Manjil, IRAN Earthquake of 20 June 1990: Proc. of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, abstract. Vol. 1.
- Morris D. V., 1983. A Note on Earthquake-Induced liquefaction. *Geotechnique* 33(4), 451—454.
- Mroz Z., 1967. On the description of anisotropic work hardening. *J. Mech. Phys. Solids* 15, 163—175.
- Murphy J., O'Brien L., 1977. Analysis of World-Wide strong motion data sample of develop and improved correlation between peak acceleration, seismic intensity and other physical parameters. Technical Report, US Nuclear Regul. Gomm. USA, P. 1—73.
- Murphy J., O'Brien L., 1978. Analysis of world-wide strong motion data sample of develop and improved correlation between peak acceleration, seismic intensity and other physical parameters. Technical Report, US Nuclear Regul. Comm. USA, P. 1—73.
- Nakamura Y., 2000. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications II. Proc. of the 12th World Conf. on Earthquake Engineering. Paper 2656. 8 p.
- Newmark N. M., 1959. A method of computation for structural dynamics. *J. Eng. Mech. Div.* 85, 67—94.
- Ohsaki Y., 1979. On the significance of phase content in earthquake ground motions. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 7, P. 427—439.
- ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. User's Manual, EduPro Civil Systems, Washington, USA, 1998, 54 p.
- Pyke R. M., 1985. TESS1: A Computer Program or Nonlinear Ground Response Analysis, California: User Manual, TAGA Engineering Software Services, Lafayette.

- Roblee C., Chiou B., 2004. A proposed geindex model for design selection of non-linear properties for site response analyses, Proceedings, International Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and Their Impact on Modeling Dynamic Soil Response, University of California, Berkeley, CA.
- Rogers A. M., Borchardt R. D., Covington P. A., Perkins D. M., 1984. A comparative ground response study near Los Angeles using recordings of Nevada nuclear tests and the 1971 San Fernando earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 74, 1925—1949.
- Rushchitsky J.J., 2011. *Theory of waves in materials*. Copenhagen: Ventus Publishing ApS., – 270 p.
- Saada A., Bianchini G. S. (eds.), 1987. *Proc. Int. Workshop on Constitutive Equation for Granular Noncohesive soils*. Case Western Reserve University, Cleveland.
- Sagaseta C., Cuellar V., Pastor M., 1991. *Cyclic loading: Proc. of the tenth European conference on soil mechanics and foundation engineering*. Vol. 3. P. 981—990.
- Schnabel P. B., Lysmer J., Seed H. B., 1972. *SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*. Report No. EERC 72-12. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 102 p.
- Seed H. B., Idriss I. M., 1970. *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis*, Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 48 p.
- Seed H. B., Idriss I. M., 1982. *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*. Monograph, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA.
- Seed H. B., Romo M. P., Sun J. I., Jaime A., Lysmer J., 1988. The Mexico earthquake of September 19, 1985 — relationships between soil conditions and earthquake ground motion. *Earthquake Spectra* 4(4), 687—789.
- Singh S. K., Lermo J., Domínguez T., Ordaz M., Espinoza J. M., Mena E., Quas R., 1988. A study of amplification of seismic waves in the Valley of Mexico with respect to a hill zone site (CU). *Earthquake Spectra* 4, 653—673.

- Skipp B. O., Aspinall W. P., Mallard D. J., Ritchie M. E., 1990. A. On the use of microearthquake networks in seismic hazard assessment in Britain: Proc. of the 9th European Conf. on Earthquake Eng. Vol. 4. P. 221.
- Smith W. E. T., 1962. Earthquakes of Eastern Canada and Adjacent Areas, 1534-1927: Publication of the Dominion Observatory, Ottawa 26, P. 271—301.
- Spudich P., Fletcher J. B., Hellweg M., Boatwright J., Sullivan C., Joyner W. B., Hanks T. C., Boore D. M., McGarr A., Baker L. M., Lindh A. G., 1997. SEA96 — A New Predictive Relation for Earthquake Ground Motions in Extensional Tectonic Regimes. *Seismol. Res. Lett.* 68(1), 190—198.
- Stewart J. P., Kwok A. O., Hashash Y. M. A, Matasovic N., Pyke R., Wang Z., Yang Z., 2008. Benchmarking of Nonlinear Geotechnical Ground Response Analysis Procedures. Pacific Earthquake Engineering Research Center Report 2008/04. University of California, Berkeley.
- Stokoe K.H., Darendeli M.B., Gilbert R.B., Menq F.-Y., Choi W.-K., 2004. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves: Proc. NSF/PEER Int. Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and their Impact on Modeling Dynamic Soil Response, Univ. of California at Berkeley, Berkeley, Calif. <http://peer.berkeley.edu/lifelines/Workshop304>.
- Streeter V.L., Wylie E. B., Richart Jr., F.E., 1974. CHARSOIL: Soil motion computations by characteristics method. *J. Geotech. Eng. Div.* 100 (3), 247—263.
- Studer J., Zingg N., Prater E. G., 1980. Investigation on Cyclic Stress-Strain Characteristics of Gravel Material: Proc. of the seventh World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, 3. P. 355—362.
- Suetomi I., Sawada S., Yoshida N., Ishida E., Goto Y., 2004. Upper limit of amplification factor caused by shear strength in nonlinear response: Proc. of the 11th International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering and the 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Vol.2, P. 165—172.

- Suetomi I., Yoshida N., 1988. Nonlinear behavior of surface deposit during the 1995 Hyogokennambu earthquake. *Special Issue of Soils and Foundations* 2, 11—22.
- Sun J. I., Golekorkhi R., Seed H. B., 1988. Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils. Rep. No. UCB/EERC-88/15, Univ. of California at Berkeley, Berkeley, Calif.
- Tanaka Y., Kudo K., Yoshida Y., Ikemi M., 1987. A study on the mechanical properties of gravel—Dynamic properties of reconstituted sample. Central Research Institute of Electric Power Industry, Report U87019.
- Tatsuoka F., Iwasaki T., Takagi Y., 1978. Hysteretic damping of sands and its relation to shear modulus. *Soils Found.* 18, 25—40.
- Taylor P. W., Parton I. M., 1973. Dynamic torsion testing of soils: Proc. of the 8th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, P. 425—432.
- Trifunac M. D., Todorovska M. I., 1998. Nonlinear soil response as natural passive isolation mechanism — the 1994 Northridge, California, earthquake. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 17(1), 41—51.
- Vucetic M., 1994a. Cyclic Characterization for Seismic Regions Based on PI: Proc. of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India. Vol. 1, P. 329—332.
- Vucetic M., 1994b. Cyclic Threshold Shear Strains in Soils. *J. Geotech. Eng.* 120, 2208—2228.
- Vucetic M., Dobry R., 1991. Effect of soil plasticity on cyclic response. *J. Geotech. Eng.* 117, 89—107.
- Wang Y. H., Siu W. K., 2006. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. II. Effects of structure on mechanical properties. *Can. Geotech. J.* 43(6), 601—618.
- Woods R. D., 1991. Field and laboratory determination of soil properties at low and high strains, SOA paper: Proc. of the 2 Int. Conf on Recent Advances in Geotechn. Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Luis, P. 1727—1741.

- Yoshida N., Iai S., 1998. Nonlinear site response and its evaluation and prediction. In: The effects of Surface Geology on Seismic Motion. Balkema, Rotterdam, P. 71—90.
- Zaalishvili V. B., 1998. Instrumental method of seismic microzonation: Proc. of the 11th European Conf. on Earthquake Eng. Paris, 10 p.
- Zen K., Umehara Y., Hamada K., 1978. Laboratory tests and in situ seismic survey on vibratory shear modulus of clayey soils with various plasticities: Proc. of the 5th Japanese Earthquake Engineering Symp., Japan, 721—728.
- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. Москва: Мир, 1983. 520 с.
- Алешин А. С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. Москва: ООО "Светоч Плюс", 2010. 293 с.
- Аптикаев Ф. Ф. Сильные движения грунта при землетрясениях (сейсмические воздействия): Автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук. Москва: ИФЗ РАН, 2001. 47 с.
- Бакушинский А. Б., Гончарский А. В. Некорректные задачи. Численные методы и приложения. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 199 с.
- Бат М. Спектральный анализ в геофизике. Москва: Недра, 1980. 356 с.
- Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. Москва: Стройиздат, 1982. 448 с.
- Берзон И. С., Епинаньева А. М., Парийская Г. Н., Стародубовская С. П. Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. Москва: Изд-во АН СССР, 1962. 507 с.
- Бовенко В. Г., Донцова Г. Ю. Сейсмическое микрорайонирование территории предполагаемого строительства в слабоактивном районе. В кн.: Инженерно-сейсмологические и геофизические исследования при инженерных изысканиях для строительства. Москва: Наука, 1987. С. 23—87.
- Бугаев Е. Г. Оценка расчетного сейсмического воздействия заданной обеспеченности для особо ответственных объектов. Вопросы инженерной сейсмологии. 1984. Вып. 25. С. 32—90.

- Бугаев Е. Г. Экспресс-метод оценки количественных характеристик сейсмических воздействий заданной вероятности превышения. В кн.: Оценка сеймотектонических условий площадок строительства атомных энергетических установок. Москва: Энергоатомиздат, 1987. С.68—78.
- Васильев Ю. И. Две сводки констант затухания горных пород. Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1962. № 5. С. 595—602.
- Васильев Ю. И. Новая задача инженерной сейсмологии — расчет зон текучести в слое грунта при сильном землетрясении. Проблемы нелинейной сейсмологии. 1987. С. 145—149.
- Васильев Ю. И., Гвоздев А. А., Иванова Л. А. и др. Остаточные деформации мягкого грунта при взрывах и землетрясениях. Проблемы нелинейной сейсмологии. 1981. № 11. С. 17—26.
- Васин В. В., Агеев А. Л. Некорректные задачи с априорной информацией. Екатеринбург: УИФ Наука, 1993. 261 с.
- Введенская А. В., Голубева Н. В., Рупрехтова Л. Особенности напряженного состояния изгиба Карпатской дуги и параметры механизма развития очага землетрясения 4.03.1977 г. В кн.: Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия. Москва: 1980. С. 106—133.
- Вознесенский Е. А. Динамическая неустойчивость грунтов. Москва: УРСС Эдиториал, 1999. 263 с.
- Вознесенский Е. А., Кушнарера Е. С., Фуникова В. В. Природа и закономерности затухания волн напряжений в грунтах. Москва: Флинта, 2014. 104 с.
- Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. Москва: Мир, 1984. 431 с.
- Гарагозов Дж., Текаев А. Ф. Оценка сейсмоопасности грунтов по данным колебаний, вызванных проходящими поездами. Изв. АН ТССР. Сер. физ.-тех., хим. и геол. 1983. № 3. С. 56—64.
- Гвоздев А. А., Зволинский Н. В., Ковшов А. Н. Сейсмические колебания земной поверхности в зависимости от местных условий. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 9. С. 10—29.

- Гвоздев А. А., Кузнецов В. В. О явлении частичного откола. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 2. С. 21—27.
- Гогелия А. А., Напетваридзе Ш. Г. Применение метода конечных элементов при сейсмическом микрорайонировании. В кн.: Сейсмическое микрорайонирование. Москва: Наука, 1977. Р. 161—164.
- Голицин Б. Б. О дисперсии и затухании сейсмических поверхностных волн. Изв. Имп. АН. 1912. № 2. Вып. 6. С. 219—236.
- Гусев А. А. О сейсмологической основе норм сейсмостойкого строительства в России. Физика Земли. 2002. № 12. С. 56—70.
- Гущин В. В., Шалашов Г. М. О возможности использования нелинейных сейсмических эффектов в задачах вибрационного просвечивания Земли. В кн.: Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. Москва: Наука, 1981. С. 144—155.
- ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво в сейсмічних районах України. Київ: Мінрегіобуд України, Укрархбудінформ, 2014. 110 с.
- Дерягин Б. В. О затухании и дисперсии сейсмических волн. Журн. геофизики. 1931. Т. 1. № 1-2. С. 207—221.
- Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. Москва: Наука, 2009. 350 с.
- Иванов В. К., Васин В. В., Танана В. П. Теория линейных некорректных задач и ее приложения. Москва: Наука, 1978. 206 с.
- Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях. СПб.: НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. 383 с.
- Кендзера А. В. Моделирование расчетных акселерограмм вранчевских землетрясений для промышленной площадки ЧАЭС. В кн.: Проблеми Чорнобильської зони відчуження. Київ: Наук. думка, 1996. Вип. 3. С. 29—38.
- Кендзера А.В., А.М. Скляр, А.А. Роман, Е.С. Исичко, И.И. Илиеш, Г.Р. Стародуб, В.С. Князева О возможности использования эмпирических

- передаточных функций среды при микрорайонировании территорий со сложным геологическим строением. Оценка эффекта сильных землетрясений. Вопросы инженерной сейсмологии. Вып.30. М.: Наука. 1989. С.82-89.
- Кендзера О. В. Сейсмічна небезпека і захист від землетрусів (практичне впровадження розробок Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України). Вісник НАН України. 2015. № 2. С. 44—57. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2015_2_10.
- Кендзера О. В. Сейсмічна небезпека і сейсмічний захист в Україні. Укр. географ. журн. 2015. № 3. С. 9—15. <http://dx.doi.org/10.15407/ugz2015.03>.
- Кендзера О. В., Семенова Ю. В. Врахування амплітудно-частотних характеристик ґрунтової товщі при сейсмічному микрорайонуванні будівельного майданчика в м. Одесі. Вісник КНУ імені Тараса Шевченка. Геологія. 2010. № 49. С. 10—13.
- Кендзера О., Пронишин Р., Вербицький С., Вербицький Ю. Розвиток методів прогнозування кількісних характеристик сейсмічних впливів для території України. Кінцевий звіт по темі № д.р. UA01004860Р. Львів, 1997. 129с.
- Кондратьев О. К. Сейсмические волны в поглощающих средах. Москва: Недра, 1986. 176 с.
- Красный Ю. М., Швец Н. С., Виноградова Л. Г. К методике определения динамического модуля упругости глинистого грунта с учетом влияния задержанной упругости. Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура. 1976. № 12. С. 159—162.
- Кригер Н. И., Алешин А. С., Кожевников А. Д., Миндель И. Г. Сейсмические характеристики лессовых пород в связи с геологическим окружением и техногенезом. Москва: Наука, 1980. 96 с.
- Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Механика сплошных сред. 2-е изд. Москва: Гостехиздат, 1954. 796 с.
- Левшин А. Л. Определение уровня грунтовых вод сейсмическими методами. Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1961. № 9. С. 1314—1338.

- Ломнитц Ц., Розенблют Э. Сейсмический риск и инженерные решения. Москва: Недра, 1981, 683 с.
- Лоссовский Е. К. Об измерении поглощения сейсмических волн. Геология и геофизика 2000. Т. 41. № 4. С. 589—597.
- Малицкий Д. В. Основные принципы решения динамической задачи сейсмологии на основе рекуррентного подхода. Геофиз. журн. 1998. № 5. С.96-98.
- Малицкий Д.В., Пак Р.М. Распространение сейсмических волн SH в слоистой среде (прямая задача). Геофизический журнал. 2003. Т25. № 5. С.118-121.
- Малицкий Д.В., Хитряк О.И. Математическое моделирование волновых процессов в слоистом полупространстве с использованием матриц шестого порядка. Геоинформатика. 2008. Т4. С.44-48.
- Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. Москва: Мир, 1990. 584 с.
- Медведев С. В. Инженерная сейсмология. Москва: Гос. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. 283 с.
- Медведев С. В. Ускорения колебаний грунта при сильных землетрясениях. Вопросы инженерной сейсмологии. 1984. Вып. 25. С. 43—50.
- Мишель А. Г. Вероятностные оценки надежности оснований и грунтовых сооружений при динамических воздействиях по критериям разжижения. Изв. ВНИИ гидротехн. 1989. № 214. С. 80—83.
- Мушкетов И. В. Материалы по Ахалкалакскому землетрясению 19-го декабря 1899 г. СПб, 1903. XI. 80 с.
- Назаров В. Е., Сутин А. М. Теория параметрического приемника звука с нелинейным слоем. Акуст. журн. 1989. Т. 35. С. 877—881.
- Національний стандарт ДСТУ-Б-В.1.1-28:2010 «Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Шкала сейсмічної інтенсивності». Київ: Держбуд України, 2010. 78 с

- Немчинов Ю. И., Марьенков Н. Г., Хавкин А. К., Бабик К. Н. Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости. Киев, 2012. 384 с.
- Николаев А. В. Проблемы нелинейной сейсмологии. В сб.: Проблемы нелинейной сейсмологии. Москва: Наука, 1987. С. 5—20.
- Николаев А. В. Сейсмические исследования Земли вибрационными источниками. Вестн. АН СССР. 1984. № 10. С. 76—87.
- Николаев А. В. Сейсмические свойства рыхлой среды. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. № 2. С. 23—31.
- Никонов А. А. Сильнейшее в восточной Европе Карпатское землетрясение 26 октября 1802 г. — новые материалы и оценки. Докл. РАН. 1996. Т. 347. № 1. С. 99—102.
- Ньюмарк Н., Розенблют Э. Основы сейсмостойкого строительства. Москва: Госстройиздат, 1980. 344 с.
- Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. Отв. ред. О. В. Павлов. Москва: Наука, 1988. 224 с.
- Павленко О. В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. Москва: Научный мир, 2009. 260 с.
- Петров А. А. Повышение сейсмостойкости вертикальных резервуаров с жидкостью: Труды II Нац. конф. по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию. Москва: РЭФИА, 1997. С. 49—50.
- Поляков С. В. Последствия сильных землетрясений. Москва: Стройиздат, 1978. 311 с.
- Ратникова Л. И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. Москва: Наука, 1973. 124 с.
- Родин В. Г. Сейсмология ядерных взрывов. Москва: Мир, 1974. 190 с.
- Родионов В. Н., Сизов Л. А., Цветков В. М. Основы геомеханики. Москва: Недра, 1986. 301 с.

- РСН 65-87 «Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. Москва: Госстрой РСФСР, 1988. 14 с.
- Руководство по ядерной и радиационной безопасности: Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ (РБ-006-98). Нормативный документ. Москва: НТЦ ЯРБ, 2000. 76 с.
- Рущицкий Я.Я. О нелинейно упругой волне Стоунли. Прикладная механика, т.50, №6, 2014. С.39-54.
- Саваренский Е. Ф. Сейсмические волны. Москва: Недра, 1972, 293 с.
- Савин Г.Н., Рущицкий Я.Я. Элементы механики наследственных сред: учебное пособие. – Киев: Вища школа, 1976, 250 с.
- Сагалова Е. А. К вопросу о сейсмическом районировании территории Буковины. В кн.: Сейсмичность Украины. Киев: Наук. думка, 1969. С. 70—81.
- Сакс М. В., Синюхина С. В., Алешин А. С. Оценка влияния неупругости грунта на характеристики колебаний при землетрясении. Физика Земли. 2003. № 8. С. 41—47.
- Сейсмический риск и инженерные решения. Под ред. Ц. Ломнитца и Э. Розенблюта. Москва: Недра, 1981. 375 с.
- Сейсмическое микрорайонирование. Под ред. С. В. Медведева. Москва: Наука, 1977. 248 с.
- СНиП II-7-81. Строительство в сейсмических районах. Москва: Госстрой РСФСР, 1987. 46с.
- Стародуб Ю.П. Математичне моделювання динамічних задач сейсміки для вивчення будови земної кори. Пряма задача. Т.1. Львів: Наукова бібліотека ім. В.Стефаніка НАН України, 1996. 172 с.
- Стародуб Ю.П. Математичне моделювання динамічних задач сейсміки для вивчення будови земної кори. Обернена задача. Т.2. Львів: Наукова бібліотека ім. В.Стефаніка НАН України, 1996. 106 с

- Стародуб Ю.П. Структура поля механических волн на свободной границе горизонтально–слоистого локально–неоднородного неидеально–упругого полупространства. Докл. АН УССР. Сер. А. 1986. №6. С. 43–47.
- Стародуб Ю.П., Брич Т.Б. Моделирование хвильових полів у сейсмогеологічних розрізах нафтових родовищ комбінованим матрично–скінченоелементним методом. Геофиз. журн. 1998. № 6. С. 63–70.
- Сюзьхиро К. Инженерная сейсмология. Москва: Эк. жизнь, 1935. 167 с.
- Технічний звіт за результатами інженерно-геологічних вишукувань для складання проекту, робочого проекту функціонування НСК «Олімпійський» (471/08-ІГ-ТЗ). Київ: Фонди Інституту по вишукуванню та проектуванню автомобільних шляхів та мостів (АТЗТ Київсоюзшляхпроект), 2008. 124 с.
- Уломов В. И. О сейсмических воздействиях на высотные здания и сооружения г. Москвы. Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008. № 2. С. 24—65.
- Фремд В. М., Штейнберг В. В. Инструментальное изучение сильных землетрясений. В кн.: Вопросы инженерной сейсмологии. Москва: Наука, 1973. Вып.15. С. 139—150.
- Френкель Я. И. К теории сейсмических и сейсмoeлектрических явлений. Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз. 1944. Т. VIII. № 4. С. 133—149.
- Халтурин В. И., Шомахмадов А. М., Гедакян Э. Г. и др. Усиление макросейсмического эффекта в Ленинакане. Техногенные факторы и проблемы прогноза сейсмического эффекта: Тез. докл. Всесоюз. конф., посвященной 80-летию Г.А. Мавлянова. Ташкент: Фан, 1990. С. 28—30.
- Чернов Ю. К., Соколов В. Ю. Некоторые соотношения между параметрами колебаний грунта и макросейсмической интенсивностью землетрясений. В кн.: Оценка сейсмической опасности. Москва: Наука, 1983. С. 96—107.
- Шейдеггер А. Е. Физические аспекты природных катастроф. Москва: Недра, 1981. 232 с.