**Реферат**

наукової роботи Семенової Ю.В. за темою:

**«МЕТОДИКА ВСТАНОВЛЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙҐРУНТОВИХ КОМПЛЕКСІВ ПРИ СЕЙСМІЧНОМУ МІКРОРАЙОНУВАННІ»**,

представленої на Премію Президента України для молодих вчених 2018 р.

***Актуальність досліджень.*** 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 крівлі 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, а саме Державними будівельними нормами «Будівництво у сейсмічних районах України» ДБН В.1.1-12:2014, 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 розширяються, 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 проявлятись 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 досліджень.

Підтвердженням актуальності теми досліджень є і той факт, що робота виконана у відповідності з планами держбюджетних науково-дослідних робіт Інституту Геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України.

***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.

***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 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.

Отримані результати сприяють можливості здешевлення сейсмостійкого будівництва за рахунок врахування вибіркового підсилення (послаблення) ґрунтами сейсмічних хвиль на певних частотах, яке залежить від будови ґрунтового середовища, його нелінійних властивостей та величини сейсмічного впливу.

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.

**ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

***У вступі*** обґрунтовується актуальність роботи, формулюється мета та основні завдання дослідження, вказується наукова новизна отриманих результатів, їх практичне застосування.

***У першому розділі*** наведено огляд розвитку та сучасного стану методики проведення робіт з сейсмічного мікрорайонування (СМР) будівельних майданчиків для прогнозування поведінки ґрунтів під час землетрусів. Приведено результати аналізу існуючих концепцій, методів і підходів.

Суттєвий вплив на спектральний склад і величину коливань на вільній поверхні майданчиків мають фільтруючі властивості осадових порід ґрунтової товщі. Ґрунтова товща вибірково підсилює (або послаблює) коливання в певних частотних діапазонах. Такий фільтр характеризується своєю частотною характеристикою, яка протягом багатьох років практично не міняється. Причиною потенційно небезпечного вибіркового підсилення сейсмічних коливань є інтерференція сейсмічних хвиль, багаторазово відбитих в шарах, і резонансні ефекти при збігу періодів коливань в падаючих сейсмічних хвилях з періодами, які відповідають максимумам частотних характеристик ґрунтової товщі.

Резонансні явища є одною з найпоширеніших причин пошкоджень і руйнувань будівель і споруд. 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.

Чинними нормативними документами ДБН В.1.1-12:2014, які регламентують проектування і будівництво у сейсмічних районах України, не достатньо враховуються резонансні та нелінійні властивості ґрунтів, хоча відомо, що при інтенсивних сейсмічних впливах нелінійні явища відіграють важливу роль. Особливо сильно вони проявляються в рихлих осадових ґрунтах, на яких, останнім часом все частіше зводять нові будинки і промислові споруди. З огляду на це, існує нагальна потреба в детальних дослідженнях та розробці відповідних методів прогнозування поведінки ґрунтів з погіршеними сейсмічними властивостями при інтенсивних сейсмічних впливах.

Вказано, що для врахування нелінійних властивостей ґрунтів при розрахунку їх частотних характеристик доцільно використовувати емпіричні залежності коефіцієнта поглинання і модуля зсуву від величини зсувної деформації. Використання точніших, науково обґрунтованих даних дозволить забезпечити необхідну сейсмостійкість будинків і споруд та, одночасно, суттєво знизити собівартість сейсмостійкого будівництва шляхом запобігання виникненню в них резонансних ефектів.

***У другому розділі*** розглянуто теоретичні та методологічні основи розрахункових методів математичного моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи. Методи 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 підошву.

При розрахунку реакції ґрунту на сейсмічні впливи різної інтенсивності відповідальним кроком є вибір ідеалізованої моделі його лінійної або нелінійної поведінки. В даний час у світовій практиці інженерної сейсмології використовуються три моделі поведінки ґрунтів: лінійна, еквівалентна лінійна і нелінійна. Всі ці моделі спираються на залежності «напруження-деформація», які описують як загальні закономірності поведінки ґрунтів так і їх нелінійні властивості.

Якщо припустити, що деформації ґрунту будуть невеликими (нижчі 10-6), то виправданим буде застосування лінійної (пружної) моделі, і ключовим параметром для адекватного моделювання буде модуль зсуву *G*.

Якщо передбачаються деформації середньої величини (10-5 - 10-3), реакція ґрунту стає в’язко-пластичною, при цьому *G* зменшується при збільшенні деформації зсуву *γ*. В процесі навантаження виникає дисипація енергії, яка в ґрунтах має гістерезисний характер. Крива *G/Gmax(γ)*, яка показує зменшення модуля зсуву із зростанням деформації, передає ту ж інформацію, що і скелетна (характеристична) крива. Для оцінки енергопоглинаючих властивостей ґрунту використовується безрозмірний коефіцієнт відносного поглинання *D*.

Деформації середньої величини не викликають прогресуючої зміни властивостей ґрунту, тому *G* і *D*, в цьому випадку, не залежать від кількості циклів. Такий різновид реакції ґрунту характеризується наявністю гістерезису «стабільного» типу (non-degraded hysteresis type). В якості аналітичного інструменту в такому випадку використовується еквівалентна лінійна модель, яка заснована на концепції в’язкої пружності.

Нелінійна поведінка ґрунту і відповідно зміна параметрів *G* і *D*, в залежності від зсувної деформації ***γ***, при еквівалентному лінійному моделюванні враховуються шляхом проведення ітерацій до отримання задовільного розв‘язку.

Ітеративні обчислення забезпечують відповідність параметрів *G* і *D* рівням деформацій *γ* у всіх шарах ґрунтової товщі.

Для зсувної деформації, що перевищує , суттєва зміна характеристик ґрунту може бути пов‘язана не тільки із збільшенням ***γ***, а також із наявністю ряду повторювань (циклів) навантаження. Така різновидність реакції ґрунту характеризується гістерезисом «прогресуючого» типу (degraded hysteresis type). Вважається, що величина зміни *G* і *D* при циклічному навантаженні залежить від величини зміни ефективного напруження усестороннього стиску при нерегулярному прикладенні дотичних напружень в часі. Після встановлення закономірності зміни ефективних напружень, необхідно визначити закономірність для встановлення напружено-деформованого стану на кожному етапі процесу навантаження, розвантаження і повторного навантаження. Одним з найбільш розповсюджених підходів, які для цього використовуються, є закон Мезінга (Masing law). Для аналізу реакції ґрунту, напружено-деформований стан якого характеризується великими деформаціями, близькими до границі руйнування, необхідно використовувати чисельний метод з покроковим інтегруванням. В якості аналітичного інструменту в цьому випадку застосовується нелінійне моделювання.Приінтегруванні рівнянь руху з малим кроком по часу можна використовувати одну з нелінійних залежностей (моделей) «напруження-деформація». На кожному кроці обчислень, для визначення властивостей ґрунту в задані моменти часу звертаються до обраної моделі. Таким чином, нелінійна залежність «напруження-деформація» буде представлена серією лінійних наближень з малим кроком в часовій області.

З розглянутих в розділі методів розрахунку реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи нелінійну поведінку ґрунтів враховує еквівалентне лінійне (зміна властивостей не залежить від кількості циклів) і нелінійне (наявність циклів навантаження викликає зміну властивостей) моделювання.

Діючими нормативними документами ДБН В.1.1-12:2014, для всього діапазону зсувних деформацій ґрунту передбачається використання лише лінійної моделі та її модифікацій.

Використання програмних продуктів для еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання потребує додаткових параметрів розрахункових моделей ґрунту у вигляді залежностей *G(γ)* і *D(γ*), які отримуються в результаті динамічних випробувань ґрунтів при проведені польових або лабораторних досліджень. В Україні такі випробування не проводилися. Дослідження зміни *G* і *D* при деформаціях різної величини вимагають складного спеціального обладнання. В основному, такі дослідження проводилися в Японії та США.

Різноманіття ґрунтів та велика кількість результатів закордонних досліджень потребує аналізу і систематизації досвіду лабораторних і польових досліджень зміни *G* і *D* при деформаціях різної величини. З огляду на це, стала актуальною задача розробки методики задання нелінійних властивостей ґрунтових шарів розрахункових моделей відповідними залежностями *G(γ)* і *D(γ*), які повинні максимально точно відображати деформаційні властивості реальних типів ґрунту. Вирішення цієї задачі є необхідним для ефективного практичного застосування методів еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи в умовах реальних будівельних та експлуатаційних майданчиків на території країни.

***В третьому розділі*** розглянуто задачурозробки методики задання деформаційних характеристик шарів розрахункових моделей ґрунтової товщі для еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання її реакції на сейсмічні впливи.. Властивість нелінійності деформаційних характеристик ґрунту виражається через модуль зсуву і коефіцієнт поглинання, величини яких залежать від величини зсувних деформацій.

У розділі представлено результати збору, аналізу і систематизації результатів лабораторних та польових досліджень деформаційних характеристик ґрунтів, одержаних в Японії та США, і викладених в численних роботах. На цій основі створено базу залежностей *G(γ)* і *D(γ*), для різних типів ґрунтів, характерних для будівельних майданчиків на території України, зокрема в Києві, Одесі та в місцях розташування ряду важливих об‘єктів. Створена база даних дозволяє підбирати дані розрахункових моделей при використанні таких програмних продуктів як: EERA, NERA, Proshake, DEEPSOIL та інших.

В розділі проаналізовано результати дослідження факторів, які впливають на форму залежностей *G(γ)* і *D(γ).* За результатами аналізу виділено основні параметри, за якими швидко і максимально точно можна підібрати для кожного шару моделі ґрунтової товщі відповідні залежності з сформованої бази даних. Для глинистих порід: це індекс пластичності *PL* та глибина залягання; для піщаних порід: розмір частинок, їх процентний вміст та глибина залягання. Ці параметри контролюють форму графіка вказаних залежностей.

Створена автором база даних *G(γ)* і *D(γ)* для різних типів ґрунтів, характерних для майданчиків на території України, відкриває можливість застосування методів моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи з врахуванням нелінійної поведінки ґрунтів. Розроблена методика формування розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтової товщі, шляхом введення залежностей *G(γ)* і *D(γ)*, які відображають нелінійні властивості ґрунту, дозволяє (на рівні сучасних знань) максимально наблизити обчислювані частотні характеристики ґрунтової товщі до реальних. Це підвищить обґрунтованість і точність визначення кількісних параметрів сейсмічної небезпеки на досліджуваних будівельних і експлуатаційних майданчиках. Параметри сейсмічної небезпеки необхідні для розробки ефективних заходів із забезпечення сейсмостійкості проектованих і наявних об‘єктів.

***У четвертому розділі*** представлено результати виконаного автором математичного лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного розрахунку реакції на сейсмічні впливи ряду моделей ґрунтових товщ, які відрізняються за потужністю осадових відкладів (*Н*) 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. При обчисленні змінювався вхідний сейсмічний сигнал (зондуюча акселерограма) з різною величиною максимальних пікових прискорень: ** = 0,07g і **= 0,43g, що, приблизно, відповідає інтенсивності сейсмічних струшувань 6 - 7 і 8 - 9 балів, відповідно. Результати розрахунків представлено у вигляді АЧХ ґрунтових моделей, розрахункових акселерограм та спектрів реакції на них одиничних осциляторів.

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, незалежно від інтенсивності сейсмічного впливу. Врахування підсилення сейсмічних впливів в діапазоні низьких частот є важливим для сейсмостійкого проектування висотних і протяжних споруд, оскільки такі споруди характеризуються низькими власним частотами коливань. Оскільки коливання від сильних підкорових землетрусів зони Вранча є низькочастотними, довготривалими і можуть поширюватися на великі відстані без значного загасання, для об‘єктів, розташованих на території України, необхідно враховувати можливість виникнення резонансних явищ на низьких частотах.

В розділі приведено також результати порівняльного аналізу амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) моделей ґрунтових товщ побудованих з використанням лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання. Моделі ґрунтової товщі відповідали реальним будівельним майданчикам. Порівнювалися також, побудовані з допомогою одержаних АЧХ, розрахункові акселерограми та спектри реакції на них одиничних осциляторів.

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. Слід відзначити, що 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 піків резонансних частот в низькочастотну область.

За отриманими результатами досліджень та аналізу світового досвіду використання різних методів моделювання, сформульовано рекомендації щодо доцільності використання лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного методів для моделювання реакції ґрунтової товщі під будівельними майданчиками України на сейсмічні впливи:

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 може використовуватися 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. 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 - нелінійне моделювання.

Оскільки для переважної частини України, згідно карт ЗСР-2004 ДБН В.1.1-12:2014, фонова сейсмічність становить 6 - 7 балів, то, в більшості випадків, доцільним є застосування еквівалентного лінійного моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи.

В розділі представлено також результати перевірки стійкості розв‘язку задачі побудови АЧХ моделей реальних ґрунтових товщ під будівельними майданчиками, при використанні еквівалентного лінійного моделювання та наявності випадкових похибок в параметрах моделі. Встановлено, що при наявності випадкових похибок до 20% забезпечується стійкість розв’язку при розрахунку частотних характеристик методом еквівалентного лінійного моделювання.

***В п’ятому розділі*** представлено результати розрахунків амплітудно-частотних характеристик ґрунтових товщ для майданчиків ряду існуючих і проектованих об'єктів в Києві, Одеській області та на інших територіях. Розрахунок проведено із застосуванням технології математичного еквівалентного лінійного моделювання та програмного продукту Proshake. Вхідні дані для моделювання були задані у вигляді розрахункових горизонтально-шаруватих моделей ґрунтового середовища, які формувалися за розробленою автором методикою із застосуванням фондових матеріалів інженерно-геологічних вишукувань під будівництво та сформованої бази залежностей *G(γ)* і *D(γ),* які характеризують нелінійні властивості ґрунтів. Кожна АЧХ є обвідною сімейства графіків АЧХ, розрахованих для 8 реалізацій зондуючих сигналів, заданих у вигляді акселерограм з різними максимальними піковими прискореннями і різним частотним складом.

Всі представлені в розділі частотні характеристики 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.

За результатами аналізу розрахованих амплітудно-частотних характеристик моделей ґрунтових середовищ під будівельними майданчиками слід відзначити, що підсилення коливань ґрунтами має складний вигляд, залежить від багатьох факторів і може суттєво відрізнятися для різних будівельних майданчиків. Звідки випливає важливий висновок, що при сейсмостійкому проектуванні будинків і споруд необхідно правильно враховувати фільтруючі властивості ґрунтових комплексів з урахуванням можливого суттєвого збільшення коливань на «резонансних» частотах. Частотні характеристики слід розраховувати з урахуванням впливу реологічних властивостей ґрунтових товщ і застосуванням нелінійних методів розрахунку їх частотних характеристик. Розрахункові акселерограми повинні враховувати особливості коливань, які приходять з вогнищ землетрусів, і фільтруючі властивості ґрунтових комплексів майданчика.

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

**ВИСНОВКИ**

Результати досліджень 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 досліджень є наступними:

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.

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 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 глибину залягання; для піщаних - розмір частинок, їх процентний вміст і глибину 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.

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).

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.

6. Розвинуту 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 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 проектованих об‘єктах за рахунок збігу максимальних частот сейсмічних коливань, падаючих на підошву ґрунтової товщі, з максимумами її частотних характеристик і частотами власних коливань будинків та споруд.

За результатами роботи опубліковано 32 наукові публікації, в т.ч. 16 статей надруковані в наукових фахових виданнях, рекомендованих МОН України (одна з них у виданні України, яке включене до міжнародної наукометричної бази Web of Science), 16 тез доповідей. Загальна кількість посилань на публікації автора складає 9, h-індекс 2 згідно бази даних Google Shcolar.

Науковий співробітник

Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна

НАН України,

кандидат фіз.-мат. наук Ю.В. Семенова