

## РЕФЕРАТ

роботи на здобуття щорічної премії

Президента України для молодих вчених:

**«Геофізичне забезпечення сейсмостійкості об'єктів атомної енергетики та інших потенційно небезпечних об'єктів»,**

Претендент: **Семенова Юлія Володимирівна** – к. ф.-м. н., докторант, старший науковий співробітник Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України

**Актуальність досліджень.** Стратегія сейсмічного захисту передбачає впровадження сейсмостійкого проектування і будівництва житла та потенційно небезпечних об'єктів на базі об'єктивних знань про кількісні параметри реально існуючої сейсмічної небезпеки на конкретних будівельних майданчиках. В рішенні РНБО, яке введено в дію Указом Президента України № 585/2011 від 12 травня 2011 р., наголошено на необхідність проведення поглибленої переоцінки стану безпеки енергоблоків АЕС України, включаючи перевірку їх сейсмостійкості. Характер і розподіл руйнувань при сейсмічних впливах в значній мірі визначається реакцією місцевих ґрунтових. 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 сейсмічного впливу 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, 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.

Зростаючі темпи і об'єми будівництва висотних будівель та потенційно небезпечних інженерних споруд вимагають освоєння нових територій, які за експертними оцінками часто характеризуються складними інженерно-геологічними умовами та погіршеними сейсмічними властивостями. 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 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 спектральних характеристик ґрунтів з врахуванням їх нелінійного деформування для забезпечення

сейсмостійкості об'єктів атомної енергетики та інших потенційно небезпечних об'єктів.

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 забезпечення сейсмічного захисту об'єктів атомної енергетики та інших потенційно небезпечних об'єктів.

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 поглибленій переоцінці стану безпеки об'єктів атомної енергетики та інших потенційно небезпечних об'єктів.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вперше запропоновано удосконалену методику визначення спектральних характеристик ґрунтів в основі споруд для забезпечення сейсмічного захисту об'єктів атомної енергетики та інших потенційно небезпечних об'єктів, 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 об'єктів атомної енергетики та інших потенційно небезпечних 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 стійкого розв'язку задачі побудови амплітудно-частотних характеристик методом еквівалентного лінійного моделювання.

5. Вперше в Україні за розробленою методикою було розраховано спектральні характеристики ґрунтів з врахуванням нелінійного деформування в основі об'єктів Ташлицької ГАЕС, компресорної станції «Яготин», Южно-Української АЕС, Кременчуцької ГЕС, Бортницької станції аерації, компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів - Богородчани» та ряду інших об'єктів для забезпечення сейсмостійкості.

**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 сейсмічної безпеки потенційно небезпечних 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 в основі споруд Ташлицької ГАЕС, компресорної станції «Яготин», Южно-Української АЕС, Кременчуцької ГЕС, Бортницької станції аерації, компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів - Богородчани» та ряду інших об'єктів.

## **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.

*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 підшву.

При розрахунку реакції ґрунту на сейсмічні впливи різної інтенсивності відповідальним кроком є вибір ідеалізованої моделі його лінійної або нелінійної поведінки.

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  $\gamma$ . В процесі навантаження виникає дисипація енергії, яка в ґрунтах має гістерезисний характер. Крива  $G/G_{max}(\gamma)$ , 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.

Для зсувної деформації, що перевищує  $10^{-2}$ , суттєва зміна характеристик ґрунту може бути пов'язана не тільки із збільшенням  $\gamma$ , 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.

Використання програмних продуктів для еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання потребує додаткових параметрів розрахункових моделей ґрунту у вигляді залежностей  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ , які отримуються в результаті динамічних випробувань ґрунтів при проведенні 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.

**В третьому розділі** розглянуто задачу розробки 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  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ , для різних типів ґрунтів, характерних для майданчиків об'єктів атомної енергетики та інших потенційно небезпечних 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  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ . 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.

Створена автором база даних  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  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  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ , 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 проєктованих 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 ( $H$ ) і категорією ґрунтів за сейсмічними властивостями (від I-ї до IV-ї) згідно ДБН В.1.1-12:2014, 2014.

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.

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 спектральних характеристик ґрунтів з врахуванням нелінійного деформування в основі споруд Ташлицької ГАЕС, компресорної станції «Яготин», Южно-Української АЕС, Кременчуцької ГЕС, Бортницької станції аерації, компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кремен-чук – Ананів - Богородчани» та ряду



інших об'єктів. Всі представлені в розділі частотні характеристики ґрунтових товщ під будівельними та експлуатаційними майданчиками були використані для генерування розрахункових акселерограм.

Наявність спектральних 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 спектральних характеристик ґрунтів з врахуванням їх нелінійного деформування для забезпечення сейсмостійкості об'єктів атомної енергетики та інших потенційно небезпечних об'єктів. Основні результати досліджень є наступними:

1. Розвинуто методикау визначення частотних характеристик ґрунтів, яка враховує нелінійне деформування 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 ґрунтів в основі споруд об'єктів атомної енергетики та інших потенційно небезпечних 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 алгоритм побудови розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтової товщі з врахуванням нелінійних деформаційних характеристик кожного шару;

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

5. Встановлено граничні значення похибок у параметрах розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтів, при яких забезпечуються одержання стійких розв'язків задачі побудови амплітудно-частотних характеристик методом еквівалентного лінійного моделювання.

### **Впровадження результатів.**

Розвинуту методику визначення спектральних характеристик ґрунтів впроваджено на ПрАТ «Укргідроенерго», НАЕК «Енергоатом», ДП НДІБВ, ДП «Сейсмобуд». За розробленою методикою розраховано спектральні характеристики ґрунтів з врахуванням нелінійного деформування в основі об'єктів Ташлицької ГАЕС, компресорної станції «Яготин», Южно-Української АЕС, Кременчуцької ГЕС, Бортницької станції аерації, компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук – Ананів - Богородчани» та ряду інших об'єктів для забезпечення сейсмостійкості.

Основні положення роботи і результати досліджень опубліковані претендентом в 46 наукових працях (в т.ч. 8 публікацій у виданнях, які включено до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science). Згідно бази даних GoogleScholar загальна кількість посилань – складає 25, h-індекс (за роботою) = 3. За темою роботи претендентом захищено кандидатську дисертацію..

Докторант, старший науковий співробітник

Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна

НАН України,

кандидат фіз.-мат. наук

Ю.В. Семенова