

УДК 550.347.097

О. КЕНДЗЕРА, Ю. СЕМЕНОВА

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, пр. акад. Палладіна, 32, 03680, м. Київ, Україна
kendzera@igph.kiev.ua

ВПЛИВ ОСАДОВОЇ ТОВЩИ НА СЕЙСМІЧНІ КОЛИВАННЯ НА ТЕРИТОРІЇ ТАШЛИЦЬКОЇ ГІДРОАКУМУЛЮВАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

<https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.091>

Мета. Метою роботи є дослідити вплив фільтрувальних властивостей осадової товщі на сейсмічні коливання будівельних або експлуатаційних майданчиків розміщених на території України. **Методика.** Проаналізовано вплив фізико-механічних властивостей осадової товщі на сейсмічний ефект на поверхні в межах території Ташлицької гідроаккумуляційної електростанції (ГАЕС) за можливих сейсмічних впливів з різними максимальними піковими прискореннями, які з імовірністю 99 % не будуть перевищені за найближчі 50 років. Перевірено твердження, згідно з яким зменшення товщини осадового шару завжди покращує сейсмічні умови будівництва. Результати отримано за допомогою моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи з використанням програмного продукту ProShake. Під час моделювання поведінка кожного шару сейсмогеологічної моделі ґрунтової товщі задавалася моделлю Кельвіна–Фойгта (в'язко-пружною). Кожний шар сейсмогеологічної моделі ґрунтової товщі характеризувався такими параметрами, як: товщина шару, густина, швидкості поздовжніх і поперечних хвиль, нелінійними залежностями модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від зсувної деформації. Використання при розрахунках залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від зсувної деформації дають змогу врахувати нелінійну реакцію ґрунтової товщі на сейсмічні впливи. **Наукова новизна.** Показано, що зменшення товщини осадового шару під будівельним майданчиком, не завжди зменшує значення параметрів сейсмічних впливів. Рентабельність з усунення верхнього пухкого осадового шару слід оцінювати у кожному конкретному випадку. Проектувальникам слід враховувати інформацію про фільтрувальні властивості ґрунтової товщі під будівельним майданчиком, вибираючи параметри проєктованих споруд такими, що забезпечують їхню максимальну стійкість за сейсмічних впливів. Зміна параметрів ґрунтових умов на будівельному майданчику може істотно вплинути на сейсмічний ефект на його поверхні. **Практична значущість.** Отримані дані про фільтрувальні властивості ґрунтової товщі на кожній із ділянок досліджуваної території, для якої визначають кількісні характеристики сейсмічної небезпеки, дають змогу одночасно забезпечити стійкість проєктованих об'єктів і істотно зменшити вартість сейсмостійкого будівництва за рахунок уникнення резонансного підсилення осадовою товщею сейсмічних коливань на власних періодах проєктованих споруд.

Ключові слова: підсилення сейсмічних коливань; модель ґрунтової товщі; фільтрувальні властивості; резонансні явища; сейсмостійке будівництво; сейсмічне мікрорайонування.

Вступ

До 70-х років ХХ ст. помилково вважалося, що на більшій частині території України, розташованій на древній Східноєвропейській тектонічній платформі, значні сейсмічні події неможливі, тому більшість споруд будували без урахування заходів сейсмічного захисту [Кендзера О. В., 2015]. Сейсмонебезпечні райони з прогнозованою інтенсивністю сейсмічних струшувань 6–9 балів становлять близько 20 % території України (~120 тис. км²) з населенням понад 10 млн ос. Райони з прогнозованою інтенсивністю 7–9 балів становлять 12 % території країни, в них розташовано майже 80 населених пунктів, у яких проживає 7 млн осіб [Немчинов Ю. І., Хавкін О. К., Мар'єнков М. Г., 2013]. По всій території України відчуваються сильні підкорові землетруси зони Вранча (Румунія), останні з них відбулися у 1940, 1977, 1986 і 1990 рр. Особливістю сильних землетрусів Вранча

є значна глибина вогнищ (70–190 км). Встановлена тенденція до заглиблення вогнищ із збільшенням магнітуди землетрусів. Загалом до 40 % території України може бути охоплено безпосереднім впливом небезпечних сейсмічних подій і до 70 % – спільним впливом землетрусів і підтоплень, зсувів, просадок та інших інженерно-геологічних процесів, які негативно впливають на стійкість споруд [Немчинов Ю. І., Хавкін О. К., Мар'єнков М. Г., 2013; Кендзера О. В., 2015].

Досвід діяльності в галузі сейсмічного захисту таких розвинутих країн, як Японія, США, Канада, Франція, Італія та ін. показує, що основною концепцією сейсмічного захисту повинно стати не прогнозування часу виникнення землетрусів, а впровадження сейсмостійкого проектування і будівництва житла і промислових об'єктів на базі об'єктивних знань про кількісні параметри реальної сейсмічної небезпеки в районах їх розміщення і на конкретних будівельних майданчиках [Кендзера О. В., 2015].

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 фільтрувальні властивості ґрунтів у їх основі. Ґрунтова товща під будівельним майданчиком поводить як фільтр: на деяких частотах вона передає коливання майже без змін, а на інших – підсилює їх, або послаблює. Під час проектування сейсмостійких будівель і споруд важливо не допускати, щоб переважаючі частоти ґрунтової товщі збігалися з власними частотами будівель і споруд [Кендзера О. В., Семенова Ю. В., 2017; Kendzera O. V., Rushchitsky J. J., Semenova Yu. V., 2017].

Питання впливу осадового шару на параметри сейсмічної небезпеки є актуальним уже тривалий час. Встановлено, що поверхнева геологія, яка суттєво впливає на поширення сейсмічних хвиль є одним з головних факторів, який визначає сейсмічний ефект на поверхні ґрунтових комплексів. За інтенсивних сейсмічних впливів поведінка ґрунтів стає нелінійною і проблема оцінки реакції ґрунту суттєво ускладнюється. Реакція ґрунту залежить від літологічного складу, фізичних параметрів, потужності, водонасиченості ґрунтових шарів, а також від інтенсивності землетрусу, частотного складу коливань у його джерелі і на покрівлі консолідованого фундаменту під майданчиком. Теоретичні та експериментальні основи прояву нелінійних реологічних властивостей ґрунтів наведено в фундаментальних роботах [Wang Y. H., Siu W. K., 2006; Hashash Y., 2012, Bolisetti C. et al., 2014; Kaklamanos, J., L. G. Baise, E. M. et al., 2015; Kim, B., and Y. M. A. Hashash, 2013].

Незважаючи на досягнення українських учених в цій галузі [Кендзера О. В., Семенова Ю. В., 2017; Kendzera O. V., Rushchitsky J. J., Semenova Yu. V., 2017; Стародуб Ю. П., Кендзера О. В., 2006; Стародуб Ю. П., 1996, Starodub G., Brych T., 1995], оцінювання напружено-деформованого стану ґрунтів і визначення кількісних параметрів сейсмічної небезпеки сьогодні переважно проводять у межах лінійної (пружної) моделі, оскільки врахування нелінійних властивостей ґрунтів є складним завданням, на виконання якого скеровано сучасний розвиток фундаментальної і прикладної механіки ґрунтів [Kramer S. L., 1996]. Чинні в Україні нормативні документи в галузі сейсмостійкого будівництва недостатньо враховують резонансні властивості ґрунтів. Відомо, що неглибокі корові землетруси характеризуються коротким (декілька секунд) хвилювим пакетом дуже інтенсивних коливань, які швидко загасають зі збільшенням гіпоцентральної відстані [Кендзера О. В., Семенова Ю. В.; 2017]. Такі коливання, в силу своєї малої тривалості, не здатні спровокувати резонансні явища в значних за розміром спорудах, або їхніх конструкціях. Якщо ж розглядати вплив сильних підкорових

землетрусів зони Вранча з глибинами вогнищ у діапазоні 70–180 км, то такі землетруси на території України породжують хвилі довжиною в десятки секунд, здатні розхитати високі і протяжні будівлі і, завдяки значній тривалості коливань, призвести до резонансних підсилень сейсмічних впливів.

Методика

У роботі представлено результати моделювання реакції моделі ґрунтової товщі (складеної осадовими відкладами, або середньо та інтенсивно вивітряними гранітогнеїсами) на території розташування основних споруд ГАЕС на максимально можливі сейсмічні впливи з урахуванням нелінійних явищ. Для розрахунків використовувався програмний продукт ProShake [Schnabel P. B., Lysmer J., Seed H. B., 1972; ProShake..., 1998]. Під час моделювання поведінка кожного шару сейсмогеологічної моделі ґрунтової товщі задавалася моделлю Кельвіна–Фойгта (в'язко-пружною). Кожний шар сейсмогеологічної моделі ґрунтової товщі характеризувався такими параметрами, як: товщина шару, густина, швидкості поздовжніх і поперечних хвиль, нелінійними залежностями модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від зсувної деформації. Використання під час розрахунків залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від зсувної деформації дають змогу врахувати нелінійну реакцію ґрунтової товщі на сейсмічні впливи. Зміну параметрів модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від зсувної деформації у під час моделювання враховують за допомогою проведення ітерацій до отримання задовільного розв'язку [Kramer S. L., 1996]. Ітеративні обчислення забезпечують відповідність параметрів модуля зсуву і коефіцієнта поглинання рівням деформацій у всіх шарах ґрунтової товщі.

Наведено також результати числового експерименту з моделювання реакції ґрунтової товщі на максимально можливі сейсмічні впливи з умовним зняттям у розрахунковій моделі осадових порід. Отримані дані дозволяють оцінити сейсмічну небезпеку на території Ташлицької ГАЕС та детально вивчити вплив локальних ґрунтових умов на кількісні параметри сейсмічних впливів.

Під час проведення робіт з сейсмічного мікрорайонування (СМР) території Ташлицької ГАЕС у її межах умовно виділено п'ять ділянок, які характеризуються різними інженерно-геологічними умовам. Моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи для кожної з цих ділянок, із зняттям осадової товщі та без нього, дало змогу оцінити вплив осадового шару (навіть з невеликою потужністю) на реакцію ґрунтової товщі за можливих сейсмічних впливів з різними максимальними піковими прискореннями (МПП).

На рис. 1 подано схему розташування ділянок на території Ташлицької ГАЕС, виділених за результатами її сейсмічного мікрорайонування (СМР)

комплексом з трьох методів: методу сейсмогеологічних аналогій, методом сейсмічних жорсткостей і методом реєстрації землетрусів, вибухів і короткоперіодних мікросейсм [Сейсмическое..., 1984].

Результати експерименту

На рис. 2. подано обвідні сукупності розрахованих спектрів реакції одиничних осциляторів з власним загасанням 5% від максимального на задані акселерограмами сейсмічні впливи з різними максимальними піковими прискореннями, якими моделюються коливання ґрунту на ділянці I (вододільна рівнина), виділеній за даними СМР у межах території розташування основних споруд Ташлицької ГАЕС у випадках:

а) ґрунтова товща без осадових відкладів (умовне оголення до метаморфічних гірських порід); б) з осадовими відкладами потужністю 17 м.

На рис. 3 подано обвідні сукупності розрахованих спектрів реакції одиничних осциляторів з власним загасанням 5% від максимального на задані акселерограмами сейсмічні впливи з різними максимальними піковими прискореннями, якими моделюються коливання ґрунту на ділянці IV (днище незатопленої частини Ташлицької балки), виділеній у межах території розташування основних споруд Ташлицької ГАЕС у випадках: а) ґрунтова товща без осадових відкладів (умовне оголення до метаморфічних гірських порід); б) з осадовими відкладами товщиною 4 м.



Рис. 1. Схема розташування ділянок на території Ташлицької гідроаккумуляційної станції (ГАЕС), виділених за результатами її сейсмічного мікрорайонування (СМР) комплексом з трьох методів: методу сейсмо-геологічних аналогій, методом сейсмічних жорсткостей і методом реєстрації землетрусів, вибухів і короткоперіодних мікросейсм

Fig. 1. Scheme of sites location on the territory of Tashlyk hydroelectric pumped storage power plant (HEPSPP), identified by the results of its seismic microzoning (SMR) by a complex of three methods: the method of seismic-geological analogies, the method of seismic stiffness and the method of earthquake, explosion and short-period microseism recording

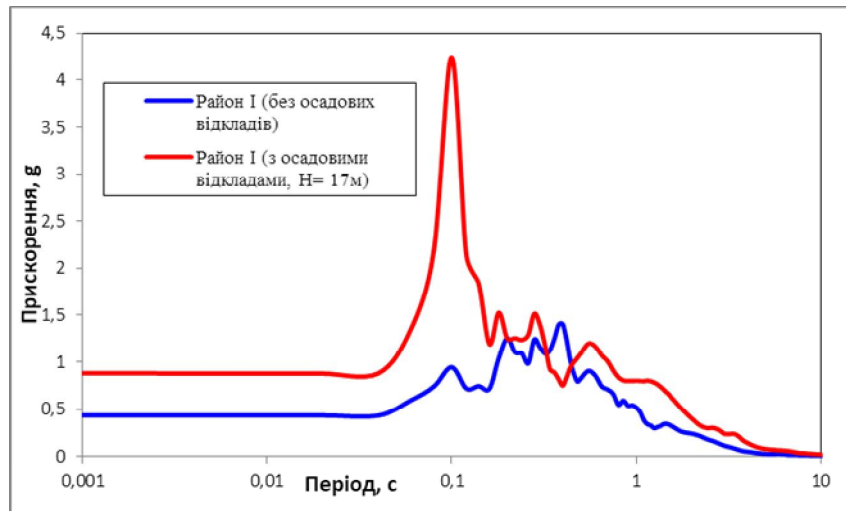


Рис. 2. Обвідні сукупності спектрів реакції одиничних осциляторів (із загасанням 5 %) на задані акселерограмами сейсмічні впливи з різними максимальними піковими прискореннями, якими моделюються коливання ґрунту на ділянці I (вододільна рівнина) у випадках:

а – ґрунтова товща без осадових відкладів (умовне оголення до метаморфічних гірських порід); б) з осадовими відкладами товщиною 17 м. Ділянка виділена в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС за даними її СМР

Fig. 2. Response spectra envelopes of single oscillators (5 % damping) on seismic actions determined by accelerograms with different maximum peak accelerations, which simulate soil oscillations in section I (watershed plain) in the following cases:

a – the soil strata without sedimentary deposits (conditional outcrop in metamorphic mountain rocks); b – with sedimentary deposits 17 m thick. The site is defined within the territory of the main buildings of Tashlyk HEPSPP based on the SMZ results

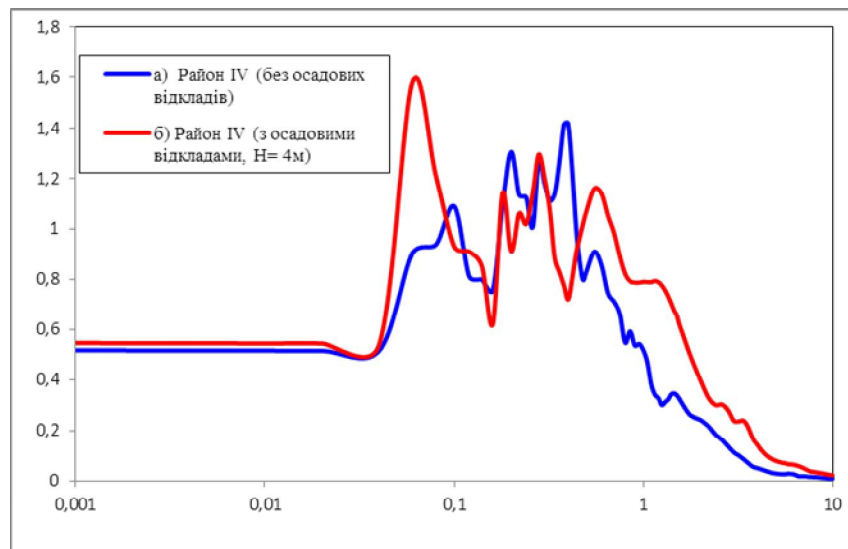


Рис. 3. Обвідні сукупності спектрів реакції одиничних осциляторів (із загасанням 5 %) на задані акселерограмами сейсмічні впливи з різними максимальними піковими прискореннями, якими моделюються коливання ґрунту на ділянці IV (днище незатопленої частини Ташлицької балки) у випадках: а – ґрунтова товща без осадових відкладів (модельне оголення до метаморфічних гірських порід); б – з осадовими відкладами потужністю 4 м

Fig. 3. Response spectra envelopes of single oscillators (5 % damping) on seismic actions determined by accelerograms with different maximum peak accelerations, which simulate soil oscillations in section IV (the bottom of the unflooded part of the Tashlyk beam) in the following cases: a) the soil strata without sedimentary deposits (conditional outcrop in metamorphic mountain rocks); b) with sedimentary deposits 4 m thick

Теоретичні обчислення показали, що такі зміни в розрахунковій моделі, як видалення ґрунтової товщі (зняття осадового шару – ґрунту з низькою жорсткістю) до метаморфічних гірських порід, призводить до зменшення сейсмічного ефекту на поверхні. Зменшення проявляється у всіх розрахованих спектрах реакції в зміні таких параметрів, як максимальна амплітуда та ширина спектра. Зменшення потужності осадового шару призводить до зменшення максимальної амплітуди і ширини спектра сейсмічних коливань на поверхні.

Якщо порівнювати геологічну будову інженерно-геологічних районів I (вододільна рівнина) та IV (дно незатопленої частини Ташлицької балки), виділених у межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС, то головний параметр, який їх відрізняє і впливає на сейсмічний ефект на поверхні, – це потужність осадових відкладів. В інженерно-геологічному районі I вона становить 17 м, а в районі IV – 4 м. З рис. 2 та рис. 3 помітно, що різниця в 13–17 м осадового шару може суттєво змінити спектральний склад та інтенсивність сейсмічних коливань на вільній поверхні.

Аналіз рис. 2 показує, що підсилювальні ґрунти в інженерно-геологічному районі I, з потужністю осадових відкладів 17 м, мають резонуючі властивості на частотах коливань 10 Гц.

З об'єднаних сукупностей спектрів реакції одиничних осциляторів, із власним загасанням 5 % від максимального, на задані акселерограмами сейсмічні впливи з різними максимальними піковими прискореннями також помітно, що максимальні пікові прискорення в сейсмічних коливаннях спостерігаються на частоті 10 Гц ($T = 0,1$ с). Якщо осадовий шар товщиною 17 м у розрахунковій моделі геологічного середовища умовно зняти, то фільтрувальні властивості інженерно-геологічного району № I зміняться: частота переважаючих за амплітудою коливань зміститься в бік високих частот і вийде за межі інженерного частотного діапазону (від 0,01 Гц до 20 Гц), що, своєю чергою, вплине на спектри реакції одиничних осциляторів і призведе до зменшення величини максимальних пікових прискорень у сейсмічних коливаннях з інженерними частотами.

Дослідження сейсмічних властивостей інженерно-геологічного району № IV (днище незатопленої частини Ташлицької балки), виділеного в межах території розташування основних споруд Ташлицької ГАЕС, показало, що товщина осадових відкладів товщиною 4 м має незначний вплив на трансформацію сейсмічних коливань. Це помітно з рис. 3, на якому представлена розрахована для району № IV об'єднана сукупність спектрів реакції одиничних осциляторів (загасання 5 %) на задані акселерограмами сейсмічні впливи з різними максимальними піковими прискореннями. Незначний вплив осадових відкладів малої товщини пояснюється

відсутністю нагромадження в них енергії падаючих, відбитих, заломлених та перевипромінених сейсмічних хвиль, і тим що їхні власні частоти лежать поза інженерним діапазоном.

Сильніші сейсмічні ефекти спостерігаються за наявності значної товщини осадового шару. На рис. 4 подано розраховану об'єднану сукупність спектрів реакції одиничних осциляторів (із загасанням 5 %) на задані акселерограмами сейсмічні впливи з різними максимальними піковими прискореннями, якими моделюються коливання ґрунту на ділянці II (Ташлицька гребля), виділена в межах території розташування основних споруд Ташлицької ГАЕС: а) ґрунтова товща без осадових відкладів (їх умовне зняття до метаморфічних гірських порід); б) з осадовими відкладами товщиною 54,4 м. Район відрізняється від попереднього більшою товщиною осадових відкладів, а також значною товщиною 37,4 м середньо та інтенсивно вивітрених гранітогнейсів. Для порівняння, у моделі ґрунту на інженерно-геологічній ділянці № IV товщина гранітогнейсів становить всього 5,5 м, а в моделі інженерно-геологічного району № IV 19,3 м. Розраховані для їх моделей спектри реакції свідчать, що потужні осадові відклади зміщують спектральний склад прогнозованих коливань в бік низьких частот і одночасно зменшуючи їх потужність.

Значний за товщиною осадовий шар за рахунок своїх реологічних властивостей може знизити значення максимальних пікових прискорень коливань ґрунту на вільній поверхні і збільшити максимальні прискорення у низькочастотній області. Зняття осадового шару, як видно з рис. 4, призведе до істотного збільшення пікового значення прискорень і їх переміщення в діапазон високих частот. Тобто може спостерігатися ефект протилежний до зображеного на рис. 2 і рис. 3. Потужний шар середньо та інтенсивно вивітрених гранітогнейсів (в цьому випадку товщиною 37,3 м) своїми резонансними властивостями перевищує вплив тонкого осадового шару. Отже, під час проектування сейсмостійкого об'єкта, зняття осадового шару, не завжди призведе до зменшення проявів сейсмічних впливів на будівельному майданчику. В кожному конкретному випадку необхідно враховувати як інформацію про очікувані в досліджуваному районі землетруси (їхню максимальну інтенсивність, спектральний склад та тривалість) так і дані про будівельні характеристики проектного об'єкта. Це дасть змогу встановити доцільність (або її відсутність) зняття осадового шару для покращання сейсмічних умов майданчика. Незначна зміна параметрів осадового комплексу може суттєво вплинути на спектральний склад і величину сейсмічних коливань, що, своєю чергою, може збільшити сейсмічну вразливість проектного споруди до реальних землетрусів з близьких потенційно сейсмоактивних зон та зони Вранча, здатної генерувати небезпечні землетруси практично на всій території України.

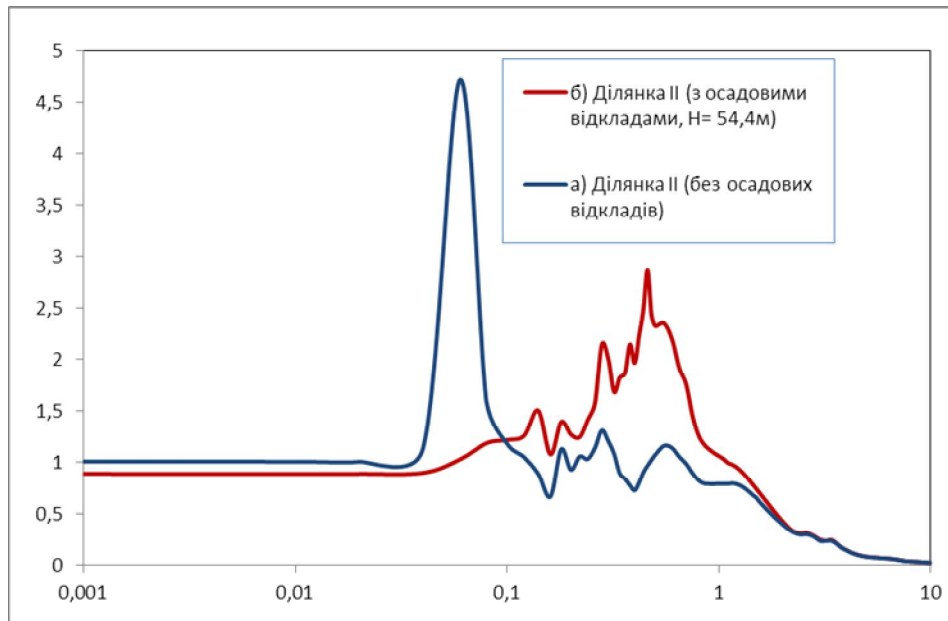


Рис. 4. Обвідні сукупності спектрів реакції одиничних осциляторів (із загасанням 5 %) на задані акселерограмами сейсмічні впливи з різними максимальними піковими прискореннями, якими моделюються коливання ґрунту на ділянці II (Ташлицька гребля) у випадках: а – ґрунтова товща без осадових відкладів (умовне зняття до метаморфічних гірських порід); б – з осадовими відкладами потужністю 54,4 м, середньо та інтенсивно вивітрілими гранітогнейсами потужністю 37,3 м на кристалічному фундаменті (півпросторі)

Fig. 4. Response spectra envelopes of single oscillators (5 % damping) on seismic actions determined by accelerograms with different maximum peak accelerations, which simulate soil oscillations in section II (Tashlyk dam) in cases:

a – the soil strata without sedimentary deposits (conditional outcrop in metamorphic mountain rocks); b – with sedimentary deposits thickness of 54.4 m, medium and intensely heavily granite gneiss with a thickness of 37.3 m on a crystalline foundation (half-space)

Дані про моделі і частотні характеристики ґрунтових комплексів на ділянках, виділених на території майданчика Ташлицької ГАЕС при його сейсмічному мікрорайонуванні, а також встановлені на їхній основі значення кількісних характеристик сейсмічної небезпеки, у вигляді набору трикомпонентних розрахункових акселерограм, відкривають можливість істотного здешевлення сейсмостійкого будівництва за рахунок оптимального вибору конструктивних рішень, які дадуть змогу уникнути збігу частот у максимальних сейсмічних коливаннях, резонансних частот підстилаючої ґрунтової товщі і власних частот проектованої будівлі (споруди).

Для підвищення сейсмічної безпеки будинків і споруд необхідно уникати збігу спектральних характеристик проєктованих (або наявних) об'єктів з спектральними характеристиками ґрунтових товщ під будівельними (експлуатаційними) майданчиками.

Висновки

Під час інтенсивних землетрусів у потужних пухких осадових відкладах під будівельними та

експлуатаційними майданчиками виникають нелінійні ефекти, які підсилюють низькочастотні коливання, небезпечні для висотних і протяжних структур. З огляду на це, особливо важливі об'єкти слід, по можливості, зводити на метаморфічних гірських породах з мінімальним шаром осадових відкладів. Такі комплекси порід під майданчиками практично не підсилюють низькочастотні сейсмічні коливання.

У роботі на прикладі Ташлицької ГАЕС представлено результати дослідження впливу літології та фізичних властивостей осадового шару на реакцію локальних ґрунтових умов за сейсмічних впливів з різними максимальними піковими прискореннями. Перевірено твердження, згідно з яким зменшення потужності осадового шару завжди покращує сейсмічні умови. Результати отримано за допомогою моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи з використанням програмного продукту ProShake.

Показано, що зменшення товщини осадового шару, не обов'язково зменшує прояви сейсмічних впливів на будівельному майданчику. Рентабельність з усунення верхнього пухкого осадового

шару слід оцінювати для кожного будівельного майданчика окремо. Незначна зміна параметрів, які характеризують локальні ґрунтові умови, може істотно змінити параметри сейсмічної небезпеки майданчика.

Дані про фільтрувальні властивості ґрунтової товщі на окремих ділянках території, для якої визначаються кількісні характеристики сейсмічної небезпеки, дають змогу істотно здешевити сейсмостійке будівництво за рахунок уникнення підсилення осадовою товщею сейсмічних коливань на власних періодах проєктованих споруд.

Під час проєктування будинків і споруд слід уникати небезпечних резонансних ефектів, які можуть виникати в разі збігу максимумів частотних характеристики проєктованих (або наявних) об'єктів з частотними характеристиками ґрунтових товщ під будівельними (експлуатаційними) майданчиками та їх окремими ділянками, виділеними в результаті проведення комплексу робіт з сейсмічного мікрорайонування території розміщення важливих, експериментальних та екологічно небезпечних об'єктів.

Список літератури

- Кендзера О. В. Сейсмічна небезпека і захист від землетрусів (практичне впровадження розробок Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України) / О. В. Кендзера // Вісник Національної академії наук України. – 2015. – № 2. – С. 44–57. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/jpdf/vnanu_2015_2_10.pdf.
- Кендзера О. В. Деформаційні характеристики розрахункових моделей ґрунтової товщі / О. В. Кендзера, Ю. В. Семенова // Вісник Київ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка “Геологія”. – 2017. – № 78. – С. 17–29.
- Немчинов Ю. І. Практичні питання динаміки будівель / Ю. І. Немчинов, О. К. Хавкін, М. Г. Мар'єнков та ін. // Будівництво України. – 2013. – № 6. – С. 6–21.
- Сейсмическое микрорайонирование / отв. ред. О. В. Павлов, В. А. Рогожина. – М. : Наука, 1984. – 236 с.
- Стародуб Ю. П. Математичне моделювання динамічних задач сейсміки для вивчення будови земної кори. Пряма задача. Т. 1. – Львів : Наукова бібліотека ім. В. Стефаника НАН України, 1996. – 172 с.
- Стародуб Ю. П. Вивчення коливань інженерних об'єктів. Історичний заповідник “Софія Київська” / Ю. П. Стародуб, О. В. Кендзера, С. П. Сіреджук, Б. Є. Купльовський, Г. Р. Стародуб // Геодинаміка. – 2006. – № 1(5). – С. 56–61.
- Bolisetti C., Whittaker A., Mason H., Almufti I., Willford M. 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
- Hashash Y., 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. 2012, 107 p.
- Kaklamanos, J., L. G. Baise, E. M. Thompson, and L. Dorfmann. Comparison of 1D linear, equivalent-linear, and nonlinear site response models at six KiK-net validation sites, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 69, 207–219.
- Kenzera O. V., Rushchitsky J. J., Semenova Yu. V. Seismicity on the territory of Ukraine and modern methods on seismic hazard parameters determination for building sites. The 2017 China (Dongguan) International Science and Technology Cooperation Week and 1st China (International), CHINA, 8-10 December, 2017.
- Kim, B., and Y. M. A. Hashash. Site response analysis using downhole array recordings during the March 2011 Tohoku-Oki earthquake and the effect of long-duration ground motions, Earthquake Spectra, 2013, 29, pp. 37–54.
- Kramer S. L. Geotechnical Earthquake Engineering. N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996, 672 p.
- ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. User's Manual, EduPro Civil Systems, Washington, USA, 1998, 54 p.
- Schnabel, P. B., Lysmer, J., Seed, H. B. SHAKE: A computer pro-gram for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EERC 72-12. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1972, 102 p.
- Starodub G., Brych T. Investigation by the finite element method of stress-strain state of the Transcarpathian crust. Acta Geophysica Polonica. 1995. Vol. 18, no. 4, pp. 303–312.
- Wang Y. H., Siu W. K. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. II. Effects of structure on mechanical properties. Can. Geotech. J., 2006, 43(6), 601–618.

А. КЕНДЗЕРА, Ю. СЕМЕНОВА

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Просп. ак. Палладина, 32, 03680, г. Киев, Украина, kenzera@igph.kiev.ua

ВЛИЯНИЕ ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩИ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ТАШЛЫКСКОЙ ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Цель. Целью работы является исследование влияния фильтрующих свойств осадочной толщи на сейсмические колебания строительных или эксплуатационных площадок, расположенных на территории Украины. **Методика.** Проанализировано влияние физико-механических свойств осадочной толщи на сейсмический эффект на поверхности в пределах территории Ташлыкской ГАЭС при возможных сейсмических воздействиях с различными максимальными пиковыми ускорениями, которые с вероятностью 99 % не будут превышены ближайшие 50 лет. Проверено утверждение, согласно которому, уменьшение мощности осадочного слоя всегда улучшает сейсмические условия строительства. Результаты получены путем моделирования реакции толщи грунта на сейсмические воздействия с использованием программного продукта ProShake. При моделировании поведение каждого слоя сейсмогеологической модели грунтовой толщи задавалась моделью Кельвина-Фойгта (вязкоупругой). Каждый слой сейсмогеологической модели грунтовой толщи характеризовался такими параметрами, как: толщина слоя, плотность, скорости продольных и поперечных волн, нелинейными зависимостями модуля сдвига и коэффициента поглощения от сдвиговой деформации. Использование при расчетах зависимостей модуля сдвига и коэффициента поглощения от сдвиговой деформации позволяют учесть нелинейную реакцию грунтовой толщи на сейсмические воздействия. **Научная новизна.** Показано, что уменьшение толщины осадочного слоя под строительной площадкой не всегда уменьшает проявления сейсмических воздействий. Рентабельность по устранению верхнего рыхлого осадочного слоя следует оценивать в каждом конкретном случае. Проектировщикам следует учитывать информацию о фильтрующих свойствах грунтовой толщи под строительной площадкой, выбирая параметры проектируемых сооружений такими, которые обеспечивают их максимальную устойчивость при сейсмических воздействиях. Изменение параметров грунтовых условий на строительной площадке может существенно повлиять на сейсмический эффект на его поверхности. **Практическая значимость.** Полученные данные о фильтрующих свойствах грунтовой толщи на каждом из участков исследуемой территории, для которой определяются количественные характеристики сейсмической опасности, позволяют одновременно обеспечить устойчивость проектируемых объектов и существенно уменьшить стоимость сейсмостойкого строительства путем избегания резонансного усиления осадочной толщей сейсмических колебаний на собственных периодах проектируемых сооружений.

Ключевые слова: усиление сейсмических колебаний; модель грунтовой толщи; фильтрующие свойства; резонансные явления; сейсмостойкое строительство; сейсмическое микрорайонирование.

O. KENZERA, Yu. SEMENOVA

Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, 32, Palladina Ave., Kyiv, 03680 Ukraine, kenzera@igph.kiev.ua

THE INFLUENCE OF THE SEDIMENTARY STRATA ON THE SEISMIC OSCILLATION ON THE TERRITORY TASHLYK HYDROELECTRIC PUMPED STORAGE POWER PLANT

Purpose. The aim of the paper is to study the influence of the filtering properties of the sedimentary strata on the seismic vibrations of construction or operational sites located in the territory of Ukraine. **Methodology.** The effect of the physical and mechanical properties of the sedimentary strata to the seismic effect on the free surface of the Tashlyk HEPSPPP territory under possible seismic impacts with various maximum peak accelerations, which with a probability of 99% will not be exceeded for the next 50 years, is analyzed. The assertion was confirmed that the reduction of sediment thickness always improves the seismic conditions of construction. The results are obtained by simulating a soil layer reaction to seismic impacts using the ProShake software. Under simulation, the behavior of each layer of the seismic geological model of the soil strata was specified by the Kelvin-Voigt model (viscoelastic). Each layer of the seismic geological model of the soil thickness was characterized by parameters such as layer thickness, density, primary and shear wave velocities, nonlinear strain-dependent shear modulus, and damping ratio. The use of calculating the strain-dependent shear modulus and damping ratio allow us to take into account the nonlinear reaction of the soil strata to the seismic actions. **Scientific novelty.** It is shown that a decrease in the thickness of the sedimentary layer under the construction site does not always reduce the manifestations of seismic impacts. The profitability for eliminating the upper loose sediment layer should be assessed in each specific case. Designers need to take into account information about the filtering properties of the soil strata beneath the construction site, choosing the parameters of the

designed structures such that they ensure their maximum stability under seismic influences. The change in the parameters of ground conditions under the construction site can significantly affect the seismic effect on its surface. **Practical significance.** The obtained data on the filtering properties of the soil strata in each of the study areas for which the quantitative characteristics of the seismic hazard are determined allow simultaneously to ensure the stability of the projected facilities and significantly reduce the cost of constructing earthquake resistant buildings that would avoid resonant amplification of seismic oscillations by sedimentary strata for fundamental periods on the designed structures.

Key words: increase of seismic oscillations; model of soil layer; filtering properties; resonance phenomena; seismic building; seismic microzoning.

REFERENCES

- Kendzera, A. V., Semenova, Yu. V. (2017). Deformation Characteristics of Computational Model of soil strata. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: *Geology*, 78, 17–29 (in Ukrainian).
- Kendzera, O. V. (2015). Seismic hazard assessment and protection against earthquakes (Practical applications of developments of Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine), Official Gazette of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2, 44–57. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/jpdf/vnanu_2015_2_10.pdf.
- Nemchinov, Y., Havkin, D., Marenkov, M., Dunin, V., Babik, K., Ygupov, K., Kendzera, A., Ygupov, V. (2013). Practical aspects of the dynamics of buildings, *Scientific and production magazine Building Ukraine*, 6, 6–21 (in Ukrainian).
- Pavlov, O. V., Rogozhina, V. A. (1984). *Seismic micro zoning*. Moscow: Nauka. (in Russian).
- Starodub, Ju. P., Kendzera, O. V., Siredzhuk, S. P., Kupljovskiy, B. Je., Starodub, Gh. R. (2006). Study of fluctuations in engineering objects. Historical Reserve “Sophia of Kyiv”. *Geodynamics*, 1(5), 56–61. (in Ukrainian).
- Starodub, Yu. P. (1996). Mathematical modeling of dynamic problems of seismology for the study of the earth's crust structure. Direct task. T. 1. Lviv: V. Stefanyk Scientific Library of the National Academy of Sciences of Ukraine, 172
- 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
- Hashash, Y. (2012). DEEPSOI, 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.
- Kaklamanos, J., Baise, L. G., Thompson, E. M. & Dorfmann. L. (2015). Comparison of 1D linear, equivalent-linear, and nonlinear site response models at six KiK-net validation sites. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 69, 207–219.
- Kendzera, O. V., Rushchitsky, J. J., Semenova, Yu. V., (2017). Seismicity on the territory of Ukraine and modern methods on seismic hazard parameters determination for building sites. The 2017 China (Dongguan) International Science and Technology Cooperation Week and 1st China (International), CHINA, 8-10 December, 2017.
- Kim, B., & Hashash, Y. M. A. (2013). Site response analysis using downhole array recordings during the March 2011 Tohoku-Oki earthquake and the effect of long-duration ground motions. *Earthquake Spectra*, 29, 37–54.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River.
- ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. User's Manual, EduPro Civil Systems, (1998). Washington, USA.
- 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.
- Starodub, G., Brych, T. (1995). Investigation by the finite element method of stress-strain state of the Transcarpathian crust. *Acta Geophysica Polonica*, 18, 4, 303–312.
- 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.

Надійшла 11.03.2018 р.