УДК 627.132

Стефанишин Д. В., д.т.н., проф. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **п.н.с.** (Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ)

ПРО ВРАХУВАННЯ СЕЙСМІЧНОГО ФАКТОРУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗЕМЛЯНОЇ ГРЕБЛІ ВОДОСХОВИЩА-ОХОЛОДЖУВАЧА ХМЕЛЬНИЦЬКОЇ АЕС ТА МОЖЛИВІСТЬ АВАРІЇ НА ГРЕБЛІ ВНАСЛІДОК ГІПОТЕТИЧНИХ СЕЙСМІЧНИХ ПОДІЙ

Обґрунтовано необхідність врахування сейсмічного фактору для забезпечення надійності земляної греблі водосховища-охолоджувача Хмельницької АЕС. Отримана максимальна гранична оцінка ймовірності аварії на греблі внаслідок гіпотетичних сейсмічних подій.

Обосновано необходимость учета сейсмического фактора для обеспечения надежности земляной плотины водохранилища-охладителя Хмельницкой АЭС. Получена максимальная граничная оценка вероятности аварии на плотине вследствие гипотетических сейсмических событий.

The necessity of taking account of the seismic factor to ensure reliability of the earth fill dam of the Khmelnits NPP's reservoir was grounded. The maximum boundary estimation of probability of the dam accident due to hypothetical seismic events was received.

Однією з актуальних задач забезпечення надійності й безпеки об'єктів атомної енергетики є перевірка їх на сейсмостійкість [1]. Катастрофічна аварія на японській АЕС Фукусіма-1, що була викликана хвилею цунамі після землетрусу 11 березня 2011 р. на північному сході Японії [2], підтвердила актуальність проблеми забезпечення сейсмостійкості об'єктів АЕС, в тому числі і сейсмостійкості гідроспоруд, що на АЕС експлуатуються.

Згідно з вітчизняними нормами проектування [3] гідроспоруди АЕС належать до найбільш відповідального за наслідками від можливих аварій на цих спорудах класу СС3. При цьому вимоги до сейсмостійкості гідроспоруд АЕС мають узгоджуватися з вимогами до сейсмостійкості АЕС як потенційно небезпечних ядерних об'єктів.

Основою для формування вимог щодо сейсмостійкості споруд є сейсмічне районування територій, роботи по модернізації якого були розпочаті ще в 90-х роках минулого століття [4]. Результатом спільних зусиль сейсмологів країн СНД стали нові, удосконалені карти сейсмічного районування (карти ОСР) [5]. Такі карти були розроблені і для території України.

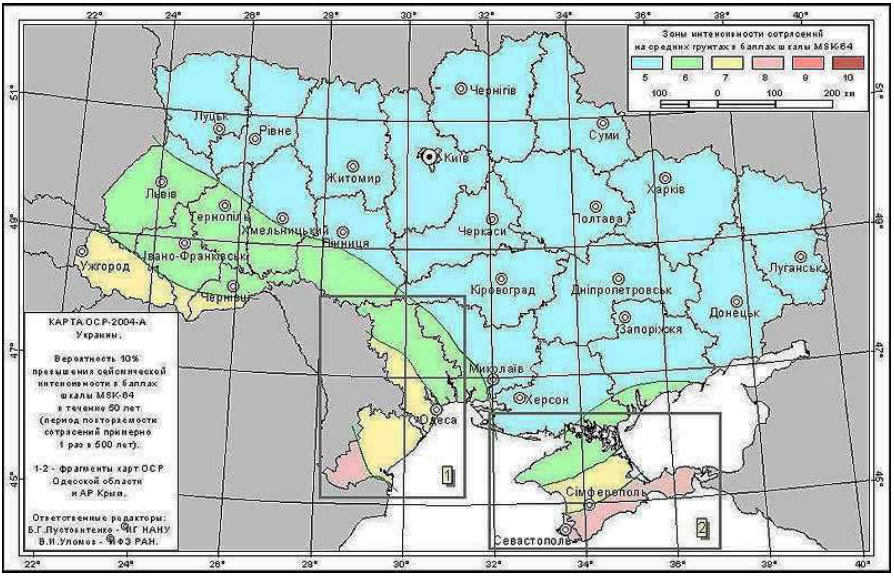

Рис. 1. Карта сейсмічного районування ОСР-2004-А [5]

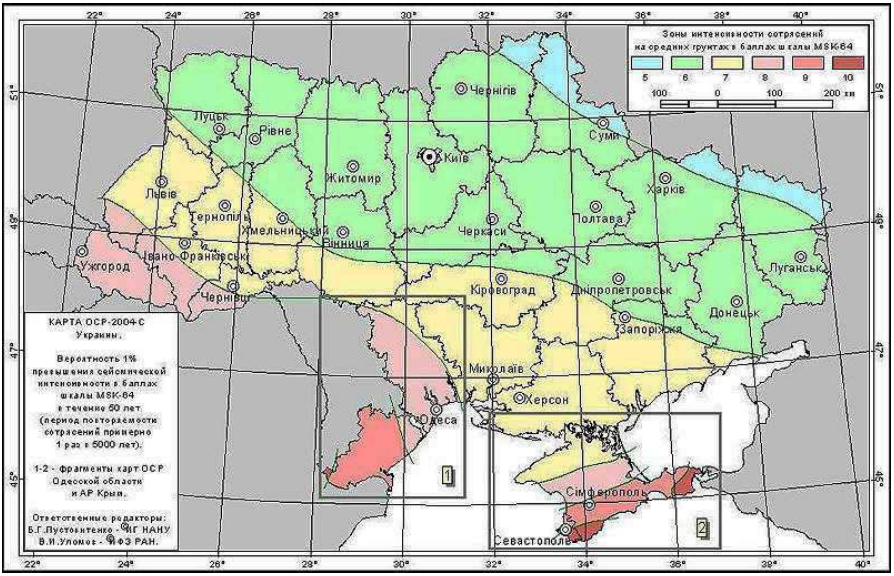

Рис. 2. Карта сейсмічного районування ОСР-2004-С [5]

Нові карти є більш адаптованими до сучасних реальностей і ґрунтуються на концепції сейсмічного ризику, основи якої були закладені в роботах американських інженерів-сейсмологів Р. Уїтмена та С. Корнелла [6].

Згідно з новими картами сейсмічного районування (карти ОСР-2004) територія розміщення гідроспоруд Хмельницької АЕС (ХАЕС) належить до зони, де можливе виникнення землетрусів: з інтенсивністю сейсмічних струшувань 5 балів за шкалою MSK-64 для середніх ґрунтів з періодом повторюваності 1 раз в 500 років (карта ОСР-2004-А, див. рис. 1); з інтенсивністю сейсмічних струшувань 6 балів за шкалою MSK-64 для середніх ґрунтів з періодом повторюваності 1 раз в 5000 років (карта ОСР-2004-С, рис. 2).

З врахуванням локальних ґрунтових умов площадки [7], на якій розміщується земляна гребля водосховища-охолоджувача ХАЕС, змін внаслідок фільтрації, що відбуваються в тілі споруди в процесі експлуатації водосховища [8], при мікросейсмічному районуванні розрахункова сейсмічність може бути підвищена на бал. Тоді, для сейсмічних подій з періодом повторюваності 1 раз в 500 років інтенсивність сейсмічних струшувань може сягати 6 балів, для сейсмічних подій з періодом повторюваності 1 раз в 5000 років – 7 балів.

Відповідно матимемо наступні розрахункові щорічні ймовірності перевищення сейсмічних подій: з інтенсивністю сейсмічних струшувань в 6 балів $2\cdot10^{-3}$, рік$^{-1}$; з інтенсивністю сейсмічних струшувань 7 балів $2\cdot10^{-4}$, рік$^{-1}$.

Як відомо, основною розрахунковою характеристикою, що характеризує рівень сейсмічної небезпеки, є максимальне сейсмічне прискорення $a_{\max}$ в коливаннях частинок ґрунту на поверхні землі [1, 4, 6, 7, 9]. При цьому між сейсмічною інтенсивністю I в балах шкали MSK-64 і $a_{\max}$ встановлюється складна імовірнісна залежність (рис. 3) [9]. З графіків на рис. 3 видно, що одним і тим же значенням прискорення $a_{\max}$ можуть відповідати різні інтегральні ймовірності $P(a_{\max})$ (ймовірності неперевищення) при різній інтенсивності I сейсмічних струшувань в балах, і, відповідно, при різній їх частоті.

В статті здійснюється обґрунтування необхідності врахування сейсмічного фактору для забезпечення надійності земляної греблі водосховища-охолоджувача ХАЕС у зв'язку з особливою її відповідальністю як гідроспоруди, що належить до класу СС3 відповідальності за наслідками, в припущенні можливості сейсмічних струшувань інтенсивністю 7 балів за шкалою MSK-64 при максимальному розрахунковому землетрусі (МРЗ) [1].

Відповідно до чинних норм [10] розрахункове прискорення для землетрусів інтенсивністю 7 балів приймають рівним $0{,}1\cdot g$ (~ 100 см/с^2), де g = 9,8 м/с^2 – прискорення вільного падіння. Забезпеченість (ймовірність перевищення) цього прискорення при землетрусі інтенсивністю 7 балів (див. рис. 1) складає 80%. Забезпеченість цього ж прискорення при землетрусі інтенсивністю 6 балів (див. рис. 2) – 25%.

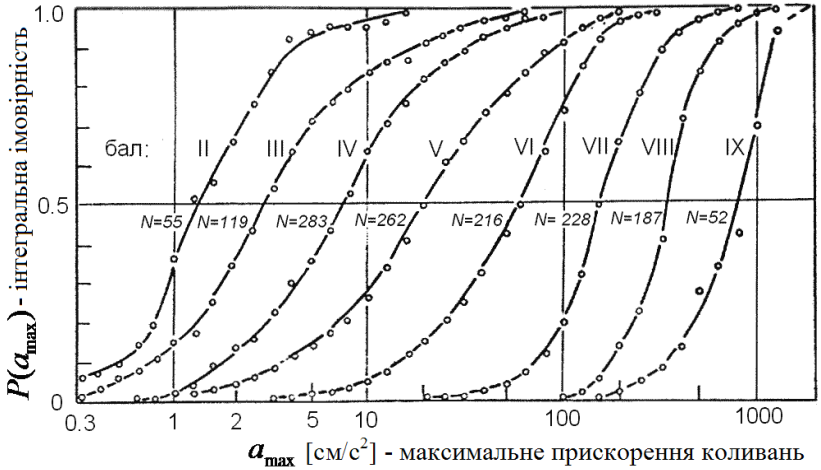

Рис. 3. Характер імовірнісного зв'язку між I в балах шкали MSK-64 і $a_{\max}$; N – кількість сейсмограм землетрусів, використаних для побудови графіків, що характеризують різну сейсмічну інтенсивність в балах [9]

Використаємо формулу повної ймовірності й оцінимо повну ймовірність перевищення розрахункового прискорення в $0{,}1\cdot g$:

$$P(a_{\max} \geq 0{,}1\cdot g) = \sum_{k=6,7} P(a_{\max} \geq 0{,}1g \mid I_k)\cdot P(I_k)\,, \qquad (1)$$

де $P(a_{\max} \geq 0{,}1\cdot g \mid I_k)$ – ймовірність перевищення прискорення $0{,}1\cdot g$ при землетрусі інтенсивністю k балів; $P(I_k)$ – щорічна ймовірність сейсмічної події інтенсивністю сейсмічних струшувань в k балів.

Для землетрусів інтенсивністю $k = 7$ балів ймовірність $P(I_7)$ приймаємо рівною ймовірності перевищення відповідної сейсмічної події з інтенсивністю сейсмічних струшувань 7 балів: $P(I_7)$ = $2\cdot10^{-4}$, рік$^{-1}$. Для землетрусів інтенсивністю $k = 6$ балів, з врахуванням умов формування повної групи подій, $P(I_6)$ = ($2\cdot10^{-3} - 2\cdot10^{-4}$), рік$^{-1}$ = $1{,}8\cdot10^{-3}$, рік$^{-1}$.

В результаті отримаємо повну ймовірність перевищення розрахункового прискорення в 0,1 g з врахуванням сейсмічних подій інтенсивністю сейсмічних струшувань в 6 і 7 балів на площадці розміщення гідроспоруд ХАЕС $P(a_{\max} \geq 0{,}1\cdot g)$ = $6{,}1\cdot10^{-4}$, рік$^{-1}$ (подій на рік).

Повна ймовірність перевищення розрахункового прискорення в $0{,}1\cdot g$ з

врахуванням сейсмічних подій інтенсивністю сейсмічних струшувань в 6 і 7 балів на площадці розміщення гідроспоруд ХАЕС $P(a_{\max} \geq 0{,}1 \cdot g)$ = 6,1·10^{-4}, рік$^{-1}$ виявилася більшою за ймовірність максимального розрахункового паводку 0,01% щорічної ймовірності перевищення (10^{-4}, рік$^{-1}$), що встановлюється згідно з чинними нормами для споруд класу СС3 [3]. Це означає, що сейсмічний фактор при оцінці надійності земляної греблі водосховища-охолоджувача ХАЕС слід враховувати.

Найбільш небезпечна ситуація на земляній греблі водосховища ХАЕС при сейсмічних струшуваннях може мати місце при рівнях води у верхньому б'єфі (РВБ) близьких до НПР = 203,0 м. З запасом ризику в якості критичного рівня води, близького до НПР, вибираємо відмітку РВБ = 202,9 м.

За даними ходу РВБ (рис. 4) на інтервалі чотирьох років, з січня 2006 р. до січня 2010 р., рівні води у верхньому б'єфі не нижче відмітки 202,9 м спостерігалися впродовж 140 днів. Маємо емпіричну ймовірність перевищення розрахункового рівня $\hat{P}$ (РВБ $\geq$ 202,9 м) = 0,09589. З запасом приймемо 0,1.

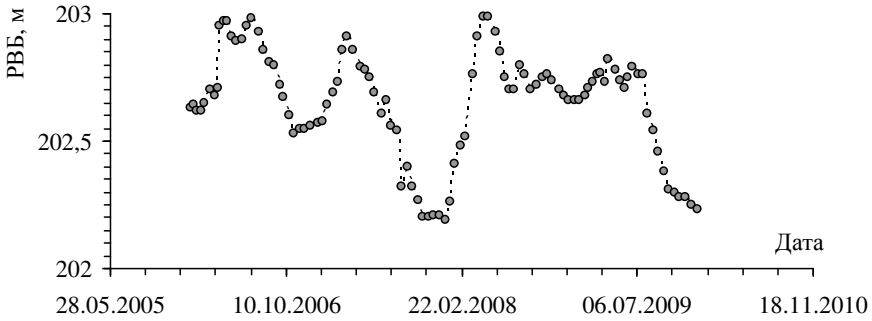

Рис. 4. Хід рівнів верхнього б'єфу (РВБ) водосховища ХАЕС на інтервалі з листопада 2006 р. до січня 2010 р.

Можна показати, що повна ймовірність виникнення небезпечної ситуації (позначимо її A_S) на земляній греблі водосховища ХАЕС при сейсмічних струшуваннях, як добуток ймовірностей $\hat{P}$ (РВБ$\geq$202,9 м) = 0,1 і $P(a_{\max} \geq 0{,}1 \cdot g)$ = 6,1·10^{-4}, рік$^{-1}$, може скласти $P(A_S)$ = 6,1·10^{-5}, рік$^{-1}$. Ця ймовірність є більшою за ймовірність особливого сполучення навантажень при ФПР (паводок ймовірністю перевищення 0,01% та вітрова хвиля забезпеченістю 50%) в 5·10^{-5}, рік$^{-1}$, що також підтверджує необхідність врахування сейсмічного фактору.

Загалом статистика аварій на греблях показує, що земляні греблі є достатньо сейсмостійкими гідроспорудами [11]. Всього внаслідок землетрусів постраждало лише біля 4% таких споруд серед тих, що зазнали аварій. Якщо прийняти до уваги, що згідно з чинними нормами проектування [3] коефіцієнт

сполучення навантажень γ_{lc} при врахуванні сейсмічного фактору (особливе сполучення навантажень) приймається рівним 0,9, то при розрахунках за методом граничних станів встановлюється 90% гарантія, що споруда, яка запроектована згідно норм, не зруйнується. З запасом ризику можна прийняти, що живучість земляної греблі ХАЕС при МРЗ складе не менше 90%. Відповідно, з запасом, умовну ймовірність руйнування (позначимо подію символом B) земляної греблі водосховища Хмельницької АЕС при аварійній ситуації A_S, викликаної сейсмічними струшуваннями, можна оцінити величиною

$$P(B) = 1 - \gamma_{lc}, \tag{2}$$

де γ_{lc} = 0,9. Маємо $P(B)$ = 0,1.

В результаті отримаємо повну ймовірність виникнення аварії внаслідок гіпотетичних сейсмічних струшувань на площадці розміщення гідроспоруд Хмельницької АЕС, як добуток ймовірностей $P(B)$ = 0,1 і $P(A_S)$ = $6{,}1 \cdot 10^{-5}$, рік$^{-1}$, яка, з запасом ризику, не має перевищити $6{,}1 \cdot 10^{-6}$, рік$^{-1}$.

Обґрунтовано необхідність врахування сейсмічного фактору для забезпечення надійності земляної греблі водосховища-охолоджувача ХАЕС. Максимальна гранична оцінка ймовірності аварії на греблі внаслідок гіпотетичних сейсмічних подій при цьому не повинна перевищити $6{,}1 \cdot 10^{-6}$, рік$^{-1}$.

1. Бугаенко С. Е. Прочность и надежность конструкций АЭС при экстремальных воздействиях / С. Е. Бугаенко, С. Л. Буторин, Г. С. Шульман, С. Г. Шульман. – М. : Энергоатомиздат, 2005. **2.** http://en.wikipedia.org/wiki/Fukushima_I_nuclear_incident. **3.** ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення / ДБН В.2.4-3:2010. – К. : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. **4.** Уломов В. И. О методологии оценки сейсмической опасности и создания карт общего сейсмического районирования территории стран-участниц СНГ / В. И. Уломов // Прогноз землетрясений и глубинная геодинамика. Доклады международного симпозиума 17-21 ноября 1997, Алматы: Институт сейсмологии Миннауки АН Республики Казахстан. – С. 348-359. **5.** http://seismos-u.ifz.ru/zoning.htm. **6.** Сейсмический риск и инженерные решения / пер. с англ.; под ред. Ц. Ломнитца, Э. Розенблюта. – М. : Недра, 1981. **7.** Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию / отв. ред. О. В. Павлов. – М. : Наука, 1988. **8.** Олінійчук В. В. Математичне моделювання фільтрації в тілі земляної греблі за даними п’єзометричних спостережень / В. В. Олінійчук, Д. В. Стефанишин // Problems of decision making under uncertainties (PDMU-2011). Abstracts of XVIII Int. Conf. Yalta, Ukraine, September 19-23. – Київ, 2011. **9.** http://wdc.org.ua/uk/node/178. **10.** ДБН В.1.1-12:2006. Будівництво у сейсмічних районах України / ДБН В.1.1-12:2006. – К. : Мінбуд України, 2006. **11.** Аварии и повреждения больших плотин / Н. С. Розанов, А. И. Царев, Л. П. Михайлов и др.; под ред. А. А. Борового. – М. : Энергоатомиздат, 1986.

Рецензент: д.т.н., проф. Хлапук М. М. (НУВГП)