

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет будівництва та архітектури

МАТВІЄНКО АНАСТАСІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА



УДК 627.824:550.34

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ СЕЙСМОСТІЙКОСТІ
ГРЕБЕЛЬ ІЗ ҐРУНТОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ХВИЛЬОВОЇ ТЕОРІЇ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі гідротехнічного будівництва Харківського національного університету будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Вайнберг Олександр Ісаакович,
Харківський національний університет будівництва та архітектури, завідувач кафедри гідротехнічного будівництва.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Мар'єнков Микола Григорович,
Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Мінрегіону України (м. Київ), завідувач відділу автоматизації досліджень та сейсмостійкості будівель і споруд;

кандидат технічних наук, доцент
Шаповалов Олександр Микитович,
Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова,
доцент кафедри будівельних конструкцій.

Захист відбудеться «11» квітня 2016 р. о 15³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.056.04 Харківського національного університету будівництва та архітектури за адресою: 61002, м. Харків, вул. Сумська, 40.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету будівництва та архітектури за адресою: 61002, м. Харків, вул. Сумська, 40.

Автореферат розісланий « 4 » березня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к. т. н., доцент



Т.О. Костюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Значна частина території України (Закарпаття, Прикарпаття, Причорномор'я) характеризується високою сейсмічністю. В даний час в сейсмічно активних районах будується Дністровська ГАЕС, проектується Канівська ГАЕС, каскад гідровузлів на верхньому Дністрі, каскад невеликих гідровузлів в Закарпатті. Забезпечити сейсмостійкість гідротехнічних споруд, які зводяться в сейсмічно небезпечних районах, є найважливішим завданням, яке доводиться вирішувати при проектуванні гідровузлів, так як руйнування цих споруд при землетрусі може привести до катастрофічних наслідків і загибелі людей.

Грунтові греблі в даний час є одним з основних типів підпірних споруд, що зводяться в районах з високою сейсмічністю. Особливості конструкцій і методи зведення таких гребель, пружнопластичні та в'язкі властивості ґрунтів споруди та основи викликають значні математичні труднощі при визначенні напружено-деформованого стану, міцності та стійкості цих споруд. Зазначені обставини ще більш ускладнюють вирішення завдання при сейсмічних впливах.

Аналіз існуючих теорій сейсмостійкості показав, що найбільш достовірною оцінка надійності та безпеки споруд і, зокрема, гребель із ґрунтових матеріалів при землетрусах може бути отримана при вирішенні динамічних задач в рамках хвильової теорії сейсмостійкості. Рішення кожного з таких завдань є досить трудомістким дослідженням, яке повинно виконуватися на остаточних етапах проектування відповідальних споруд. На попередніх етапах проектування споруд доцільно використовувати порівняно прості, достовірні інженерні методики, які повинні враховувати основні положення хвильової теорії сейсмостійкості. Однак до теперішнього часу в технічній літературі відсутні відомості про подібні методики. Тому розробка інженерної методики розрахунку гребель із ґрунтових матеріалів при землетрусах на основі хвильової теорії сейсмостійкості є актуальним завданням.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційного дослідження відповідає держбюджетній науково-дослідній роботі «Удосконалення способів розрахунку конструктивних елементів гідротехнічних споруд» (державний реєстраційний номер 0115U005723) та загальнодержавній програмі «Енергетична стратегія України на період до 2030 р.» (затверджено Кабінетом Міністрів України, розпорядження №1071-р від 24.07.2013 р). У рамках цієї програми ПАТ «Укргідропроєкт» виконує роботу «Відповідність споруд ГЕС ПАТ «Укргідроенерго» вимогам сучасних норм проектування, у тому числі з урахуванням сейсмічних дій».

Метою роботи є вдосконалення методики розв'язання задач з визначення напружено-деформованого стану гребель із ґрунтових матеріалів при землетрусах відповідно до хвильової теорії сейсмостійкості.

Задачі дослідження:

– розробити методику визначення за відомими ординатами вихідних акселерограм ординат розрахункових сейсмограм, які необхідно використовувати

в якості вихідних даних при виконанні динамічних розрахунків споруд в рамках хвильової теорії сейсмостійкості;

- отримати диференційне рівняння динамічної рівноваги для зсувного клина, який моделює греблю із ґрунтових матеріалів при вирішенні динамічних завдань;

- в рамках хвильової теорії сейсмостійкості розробити методику розрахунку сейсмічних прискорень в ґрунтових греблях на основі методу кінцевих різниць;

- провести верифікацію розробленої методики на основі порівняння розрахункових даних і даних натурних досліджень;

- розробити комп'ютерну програму для виконання розрахунків сейсмічних прискорень в тілі та основі ґрунтової греблі в розрахункові моменти часу.

Об'єкт дослідження – греблі з ґрунтових матеріалів.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан, міцність і стійкість укосів гребель із ґрунтових матеріалів при сейсмічних впливах.

Методи дослідження. У роботі використовувалися методи механіки твердого деформованого тіла, динаміки споруд для отримання параметрів розрахункової моделі ґрунтової греблі при сейсмічних впливах, а також метод кінцевих різниць при виконанні чисельного розв'язання динамічних задач для системи «гребля - основа». Крім того, для встановлення достовірності запропонованих підходів використовувався метод порівняння даних, отриманих для розрахункової моделі греблі, й даних натурних досліджень.

Наукова новизна досліджень:

- вперше розроблено методику визначення за відомими ординатами вихідних акселерограм ординат розрахункових сейсмограм, які необхідно використовувати в якості вихідних даних при виконанні динамічних розрахунків споруд в рамках хвильової теорії сейсмостійкості;

- вперше отримано диференційне рівняння динамічної рівноваги для зсувного клина, який моделює греблю із ґрунтових матеріалів при вирішенні динамічних завдань;

- вперше в рамках хвильової теорії сейсмостійкості розроблена методика розрахунку сейсмічних прискорень в ґрунтових греблях на основі методу кінцевих різниць;

- вперше розроблена комп'ютерна програма для виконання розрахунків сейсмічних прискорень в тілі та основі ґрунтової греблі в розрахункові моменти часу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у визначенні сейсмічних прискорень, проведенні аналізу напружено-деформованого стану, міцності та стійкості укосів гребель із ґрунтових матеріалів, що проектується в даний час в ПАТ «Укргідропроєкт» і в ТОВ «Гідротехпроєкт» (лівобережної кам'яно-земляної греблі Дністровської ГЕС-1, огорожувальної дамби верхньої водойми Дністровської ГАЕС та ін.).

Впровадження результатів досліджень здійснювалося в таких організаціях: ПАТ «Укргідропроєкт», ТОВ «Гідротехпроєкт».

Особистий внесок здобувача. Результати наукових досліджень, представлених у роботі, отримані автором самостійно та виносяться на захист вперше. Автором розроблена методика, що дозволяє вирішувати динамічні задачі напружено-деформованого стану гребель із ґрунтових матеріалів у хвильовій постановці, а також рекомендації щодо виконання таких розрахунків. У всіх роботах, опублікованих у співавторстві, автору в рівній мірі належить постановка задач та формулювання основних положень, що визначають наукову новизну досліджень. Особисто здобувачем проведені чисельні розрахунки сейсмостійкості гребель із ґрунтових матеріалів в ліцензованих програмах.

Апробація результатів дисертації. Робота отримала апробацію як на міжвузівських, так і на міжнародних науково-технічних і науково-практичних конференціях. Основні результати дисертаційної роботи повідомлені: на науково-технічних конференціях у Харківському національному університеті будівництва та архітектури в 2011-2014 рр.; на міжнародній науково-практичній конференції «Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві», ХНУБА, м. Харків (Україна), 27-28 квітня, 2011 р.; Міжнародна науково-технічна конференція - 2011, ПАТ «Укргідропроєкт», м. Харків (Україна), 26-29 квітня, 2011 р.; V Міжнародна наукова конференція «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд», ХНУБА, м. Харків (Україна), 18-19 жовтня, 2011 р.; Сьома науково-технічна конференція «Гідроенергетика. Нові розробки та технології» АТ «ВНДІГ ім. Б.Є.Веденєєва», м. Санкт-Петербург, Росія, 25-27 жовтня, 2012 р.; Шоста міжнародна конференція «Світові тенденції та перспективи розвитку гідроенергетики України», НУВГП, м. Рівне (Україна), 14-15 березня, 2013 р.; Міжнародна науково-технічна конференція - 2013, ПАТ «Укргідропроєкт», м. Харків (Україна), 20-24 травня, 2013 р.; VI Міжнародна наукова конференція «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд», ХНУБА, м. Харків (Україна), 15-17 жовтня, 2013 р., VII Міжнародна наукова конференція «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд», ХНУБА, м. Харків (Україна), 20-21 жовтня, 2015 р.

У повному обсязі дисертація доповідалась й отримала позитивну оцінку на розширеному засіданні кафедри гідротехнічного будівництва у ХНУБА (м. Харків, 2015 р.).

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи представлені в 18 працях, з них 6 статей у журналах, включених до переліку видань МОН України, 1 стаття в зарубіжному виданні, 3 тези доповідей.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 189 найменувань, 4 додатків. Повний обсяг дисертації становить 235 сторінок, у тому числі основного тексту 156 сторінок, 52 рисунка, 8 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, поставлена мета дослідження та визначено основні завдання, відзначена новизна, практичне значення

дисертаційної роботи, вказано на необхідність оцінки напружено-деформованого стану гребель із ґрунтових матеріалів при сейсмічних впливах в хвильовій постановці. Наведено відомості про апробацію та публікації результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** представлено літературний огляд у контексті дослідження сейсмостійкості гребель із ґрунтових матеріалів і розкрито сучасний стан розвитку даної проблеми. Показана необхідність подальшого вдосконалення методів аналізу сейсмостійкості гребель із ґрунтових матеріалів. Проаналізовано особливості роботи та взаємодії гребель із ґрунтових матеріалів з основою при землетрусах. Наведено приклади найбільш небезпечних деформацій і схем руйнування гребель із ґрунтових матеріалів при сейсмічних впливах. Розглянуто вплив конструктивних особливостей на сейсмостійкість гребель із ґрунтових матеріалів.

Питанням, пов'язаним з дослідженнями сейсмостійкості гідротехнічних споруд і, зокрема, гребель із ґрунтових матеріалів, в останні роки займався ряд вчених колишнього СРСР: А.Н. Бірбраєр, І.І. Гольденблат, О.Л. Гольдін, Л.І. Дятловицький, Ю.К. Зарецький, І.М. Іващенко, Б.Д. Кауфман, М.Д. Красніков, І.О. Константинов, В.М. Ломбардо, В.М. Лятхер, Ш.Г. Напетварідзе, Л.М. Рассказов, С.Г. Шульман та ін.

Серед зарубіжних вчених значний внесок у розвиток досліджень сейсмостійкості гідротехнічних споруд внесли такі вчені, як М.А. Biot, R. Clough, W.D.L. Finn, G.W. Housner, F.I. Makdisi, G.R. Martin, A.J.C. Mineiro, N.M. Newmark, S. Okamoto, J. Penzien, S.K. Sarma, H.B. Seed та ін.

Слід зазначити, що підходи, використані в роботах вищезазначених фахівців, різні й в основному базуються на динамічній теорії сейсмостійкості.

Аналіз виконаних досліджень показав, що найбільш достовірний опис роботи гребель із ґрунтових матеріалів при землетрусах може бути отриманий на основі найбільш сучасної хвильової теорії сейсмостійкості. Необхідно відзначити, що вперше ідея рішення задач про напружено-деформований стан гідротехнічних споруд при землетрусах на основі хвильової теорії сейсмостійкості була висунута на початку 60-х років ХХ століття Л.І. Дятловицьким. Стосовно до гребель із ґрунтових матеріалів ця ідея була розвинена в роботах Ю.К. Зарецького та В.М. Ломбардо.

Крім того, у першому розділі значну увагу приділено питанням оцінки стійкості укосів і міцності ґрунтових гребель з урахуванням сейсмічних впливів. Ці питання відображені в працях К. Терцагі, Р.Р. Чугаєва, Г. Крея, О.Л. Можевітінова, Н. Ньюмарка, В.М. Ломбардо та ін. Показано, що при оцінці міцності ґрунтових гребель і стійкості їх укосів найбільш достовірні результати можуть бути отримані методом редуції сил.

На основі огляду літератури і проведеного аналізу стану питання сформульовані завдання досліджень.

У **другому розділі** розглянуто особливості визначення вихідних даних для виконання розрахунків сейсмостійкості гребель із ґрунтових матеріалів у рамках хвильової теорії.

Найважливішими вихідними даними, що визначають характер поширення сейсмічних хвиль в греблі й її основі, є дані про фізико-механічні характеристики ґрунтів. Ці характеристики повинні описувати деформаційні та міцнісні властивості ґрунтів при статичних та динамічних впливах. Проаналізовано сучасні моделі ґрунтів, які використовуються в розрахунках напружено-деформованого стану гребель із ґрунтових матеріалів при сейсмічних впливах. У число цих моделей входять пружна, пружнопластична, в'язкопружнопластична моделі. Показано, що при розробці інженерного методу динамічних розрахунків напружено-деформованого стану гребель із ґрунтових матеріалів у рамках хвильової теорії сейсмостійкості доцільно використовувати найбільш просту пружну модель ґрунтів тіла споруди та основи.

При завданні розрахункової сейсмічної дії використовуються трьохкомпонентні акселерограми, кожна з яких являє собою запис змінюючихся в часі прискорень поверхні землі при землетрусі для певного напрямку. У разі великих, відповідальних споруд на остаточних етапах проектування такі акселерограми отримують на основі спеціальних сейсмологічних досліджень. Для невеликих споруд на остаточних етапах проектування та для відповідальних споруд на попередніх етапах проектування в якості розрахункових приймаються синтезовані акселерограми відповідно до рекомендацій норм проектування.

Відзначимо, що при виконанні розрахунків напружено-деформованого стану гребель із ґрунтових матеріалів при землетрусах відповідно до хвильової теорії сейсмостійкості для завдання сейсмічних впливів необхідні розрахункові сейсмограми, кожна з яких являє собою запис змінюючихся в часі переміщень поверхні землі при землетрусі для певного напрямку. Розрахункові сейсмограми повинні відповідати розрахунковим акселерограмам. Таким чином, при виконанні розрахунків відповідно до хвильової теорії сейсмостійкості одним із важливих завдань є визначення ординат розрахункової сейсмограми за відомими ординатами розрахункової акселерограми. Однак до теперішнього часу відсутні загальноприйняті підходи до визначення ординат розрахункових сейсмограм за відомими ординатами вихідних акселерограм.

Взагалі ординати розрахункової сейсмограми можуть бути отримані подвійним інтегруванням вихідної акселерограми. Нами запропонована методика більш точного обчислення ординат розрахункових сейсмограм за відомими ординатами характерних для району будівництва споруд акселерограм.

При розробці цієї методики враховувалися такі обставини.

Зазвичай ординати акселерограм записуються з певним досить малим рівномірним кроком Δt (нерідко значення Δt знаходиться в діапазоні від 0.005 с до 0.05 с). Число ординат акселерограм відомо й становить n . Таким чином, в будь-який момент часу від початку землетрусу $t_j = j \cdot \Delta t$ ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) вважається відомим значення сейсмічного прискорення a_j . До початку землетрусу й після його закінчення сейсмічні прискорення поверхні ґрунту вважаються рівними нулю.

Моменти часу t_j можуть розглядатися як вузли регулярної часової сітки з номерами j . Це дозволяє для визначення ординат розрахункової сейсмограми в будь-якому вузлі j скористатися методом кінцевих різниць.

Розглядаючи прискорення a_j як кінцево-різницеви́й аналог другої похідної від переміщень u за часом t , можна записати вираз для визначення значення сейсмічного переміщення u_{j+1} в будь-якому вузлі сітки $j + 1$ за відомими значеннями переміщень u_j та u_{j-1} :

$$u_{j+1} = 2 \cdot u_j - u_{j-1} + a_j \cdot \Delta t^2. \quad (1)$$

На рис. 1, б показана отримана за формулою (1) сейсмограма, яка відповідає розрахунковій акселерограмі для майданчика розміщення основних споруд Дністровської ГАЕС (рис. 1, а).

Зрозуміло, що вид показаної на рис. 1, б сейсмограми і значення її ординат не відповідають зсувам поверхні землі при землетрусі. Це пов'язано з недостатньою точністю ординат вихідної акселерограми і, в деякій мірі, з неточностями, що виникають при виконанні обчислень згідно з прийнятим методом. Цю сейсмограму назвемо сейсмограмою в першому наближенні. Відзначимо, що при чисельному диференціюванні знайденої сейсмограми в першому наближенні можуть бути отримані значення прискорень, в точності рівні ординатам вихідної акселерограми.

Для отримання розумних значень розрахункових ординат сейсмограми доцільно скористатися таким прийомом.

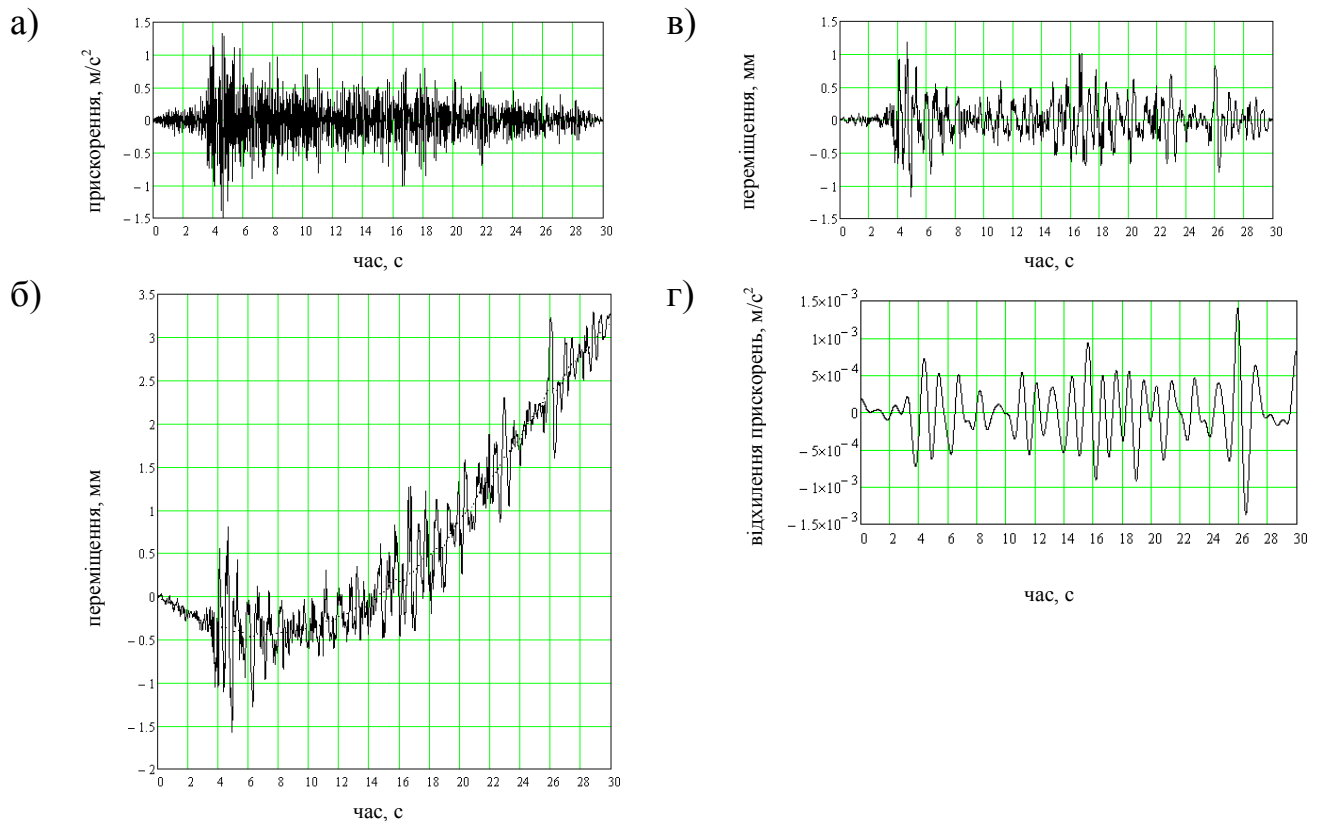


Рис. 1. До розрахунків за визначенням ординат розрахункової сейсмограми а) вихідна акселерограма; б) сейсмограма в першому наближенні; в) остаточна розрахункова сейсмограма; г) відхилення ординат акселерограми, отриманні шляхом диференціювання остаточної розрахункової сейсмограми, від ординат вихідної акселерограми.

Введемо функцію, що згладжує, $u1(t)$ з Гаусовим ядром. У цьому випадку вираз для визначення ординат цієї функції $u1_j$ в вузлах j може бути записаний у вигляді:

$$u1_j = \frac{\sum_{k=1}^n K\left(\frac{t_j - t_k}{b}\right) \cdot u_k}{\sum_{k=1}^n K\left(\frac{t_j - t_k}{b}\right)}, \quad (2)$$

де b – параметр згладжування, значення якого встановлюється в кілька разів більшим кроку сітки; як показав чисельний експеримент, для реальних сейсмограм значення цього параметра слід прийняти рівним $b = (0.5 - 1.0)$ с;

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot 0.37}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot 0.37^2}\right). \quad (3)$$

Значення ординат остаточної розрахункової сейсмограми ur_j можуть бути отримані за формулою:

$$ur_j = u_j - u1_j + (u1_0 - u_0) \cdot \exp\left(-\frac{t_j^2}{2 \cdot 0.37^2 \cdot b^2}\right) + (u1_0 - u_0) \cdot \exp\left[-\frac{(t_n - t_j)^2}{2 \cdot 0.37^2 \cdot b^2}\right]. \quad (4)$$

Останні дві складові у виразі (4) дозволяють отримати нульові значення ординат остаточної розрахункової сейсмограми.

Знайдена відповідно до запропонованої нами методики розрахункова сейсмограма показана на рис. 1, в. Вид сейсмограми відповідає реальним переміщенням поверхні землі при землетрусі.

При оцінці точності чисельного інтегрування може використовуватися такий критерій: значення прискорень, що визначаються чисельним диференціюванням отриманої сейсмограми, не повинні значно відрізнитися від значень прискорень вихідної акселерограми.

На рис. 1, г показані відхилення ординат акселерограми, що отримані шляхом диференціювання остаточної розрахункової сейсмограми, від ординат вихідної акселерограми. Ці відхилення незначні й не перевищують $0,0015$ м/с².

Маючи ординати остаточної розрахункової сейсмограми, при необхідності чисельним диференціюванням можна отримати ординати велосиграми v_i , що характеризує швидкість зміщення поверхні землі при землетрусах.

Викладена методика дозволяє визначати ординати сейсмограми, необхідні при виконанні розрахунків напружено-деформованого стану гідротехнічних споруд на дію сейсмічних навантажень відповідно до хвильової теорії сейсмостійкості. Запропонований нами кінцево-різницевий підхід забезпечує достатню точність визначення ординат розрахункової сейсмограми.

У **третьому розділі** викладена розроблена нами методика визначення сейсмічних прискорень в греблях із ґрунтових матеріалів. Запропонована методика заснована на використанні рішення одновимірної динамічної задачі для системи «гребля з ґрунтових матеріалів - основа» в рамках хвильової теорії сейсмостійкості. Рішення динамічних задач для гребель з ґрунтових матеріалів у рамках хвильової теорії є досить трудомістким навіть з використанням сучасної обчислювальної техніки. Розроблена інженерна методика розрахунків може бути

використана при виконанні попередніх розрахунків високих відповідальних гребель із ґрунтових матеріалів і остаточних розрахунків менш відповідальних споруд.

Методика розрахунку, що пропонується, заснована на таких передумовах.

1. Враховуються горизонтальні сейсмічні впливи, задані у вигляді розрахункової сейсмограми для поверхні основи в районі розміщення греблі. Ці впливи повинні бути визначені для періоду часу до зведення споруди.

2. Розглядається плоска одномірна динамічна задача для моделюючого греблю з ґрунтових матеріалів пружного зсувного стрижня, розташованого на однорідній пружній основі. Використовуються осереднені динамічні характеристики ґрунтів тіла греблі (динамічний модуль зсуву G і швидкість розповсюдження поперечних хвиль V_s) і ґрунтів основи (динамічний модуль зсуву G_o і швидкість розповсюдження поперечних хвиль V_{os}).

3. Зважаючи на незначність сейсмічного гідродинамічного тиску для гребель із ґрунтових матеріалів, впливом взаємодії греблі з водою водосховища нехтуємо.

4. Враховується випромінювання сейсмічних хвиль в основу на контактні греблі та основи.

В рамках плоскої задачі розглядається однорідний пружний зсувний консольний стрижень змінної ширини, що має висоту H (рис. 2). Такий стрижень (клин) моделює греблю з ґрунтових матеріалів.

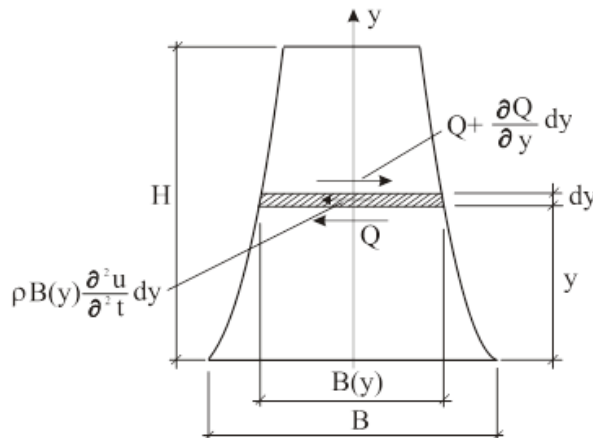


Рис. 2. Консольний зсувний стрижень

Із умови рівноваги елементарного фрагмента висотою dy (рис. 2) отримано диференціальне рівняння динамічної рівноваги для розглянутого пружного зсувного стрижня:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V_s^2 \cdot \left(\frac{1}{B} \cdot \frac{dB}{dy} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad (5)$$

де $u = u(y, t)$ – горизонтальні переміщення будь-якої точки зсувного клина з координатою y в момент часу t ; $B = B(y)$ – змінна за y ширина поперечного перерізу зсувного клина.

Вважається, що розповсюдження пружних хвиль в межах основи описується загальновідомим хвильовим рівнянням:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V_{so}^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (6)$$

Сумісне інтегрування диференціальних рівнянь (5), (6) необхідно виконувати при відповідних початкових і граничних умовах.

Стосовно до гребель із ґрунтових матеріалів для всієї розрахункової області в якості початкової умови доцільно прийняти:

$$u(y, t = 0) = 0. \quad (7)$$

Гранична умова на гребні греблі при $y = H$ (де H висота греблі) може бути прийнята з урахуванням того, що поперечна сила Q ($y = H, t$) і відповідні їй дотичні напруження τ ($y = H, t$) і деформації зсуву γ ($y = H, t$) на гребні греблі дорівнюють нулю, тобто:

$$\gamma(y = H, t) = \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=H} = 0. \quad (8)$$

При формулюванні граничної умови на підшві греблі необхідно враховувати, що внаслідок взаємодії греблі з основою горизонтальні переміщення підшви греблі u_0 відрізняються від переміщень, що відповідають даній сейсмограмі u_s . Тому по контакту греблі й основи виникають дотичні напруження. Гранична умова на підшві греблі може бути записана з умови рівності переміщень u_d, u_o і дотичних напружень τ_d, τ_o , записаних для спільних точок тіла греблі та основи:

$$u_d = u_o, \quad \tau_d = \tau_o. \quad (9)$$

Крім того, підшва греблі може розглядатися як невідбивальний контур для різниці переміщень $u_r = u_0 - u_s$, що відзначалося багатьма дослідниками. Умова на відбивальному контурі з зовнішньої нормаллю n може бути записана у вигляді:

$$\frac{\partial u_r}{\partial n} = \frac{1}{V_{s,0}} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial t} \quad \text{чи} \quad \frac{\partial}{\partial n}(u_0 - u_s) = \frac{1}{V_{s,0}} \cdot \frac{\partial}{\partial t}(u_0 - u_s). \quad (10)$$

Умови (9), (10) дозволяють обмежитися інтегруванням тільки рівняння (5).

Інтегрування рівняння (5) для реальних поперечних профілів греблі та довільного сейсмічного впливу може бути здійснено тільки чисельним методом. Доцільно скористатися методом кінцевих різниць.

Розроблено явна тришарова кінцево-різницева схема за часом для чисельного рішення рівняння динамічної рівноваги стосовно до розрахунків гребель із ґрунтових матеріалів.

Намітимо в межах висоти греблі H вузли просторової одновимірної регулярної сітки i ($i = 0, 1, 2, \dots, nd$) з кроком Δy (nd – число кроків просторової сітки). Розрахунковий період від початкового моменту часу $t = 0$ до кінцевого моменту часу $t = t_k$ представимо у вигляді часової одновимірної регулярної сітки t ($t = 0 \cdot \Delta t, 1 \cdot \Delta t, 2 \cdot \Delta t, \dots, nt \cdot \Delta t$) з кроком Δt (nt – число кроків часової сітки). Таким чином, розглядається просторово-часова сітка з вузлами i та t . Просторова сітка показана на рис. 3.

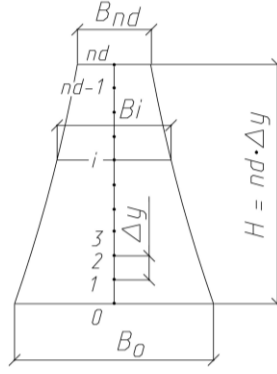


Рис. 3. Просторова сітка з вузлами i для розглядаємої області

Для кожного з вузлів i просторової сітки для будь-якого моменту часу t складені кінцево-різницеві аналоги рівняння (5). Для будь-якого внутрішнього вузла i ($i = 1, 2, \dots, nd-1$) такий аналог має вигляд:

$$u_{i,t+\Delta t} = -u_{i,t-\Delta t} + 2 \cdot \left(1 - V_s^2 \frac{\Delta t^2}{\Delta y^2}\right) \cdot u_{i,t} + V_s^2 \frac{\Delta t^2}{\Delta y^2} \cdot \left[1 + \frac{\Delta y}{2} \cdot \left(\frac{1}{B} \cdot \frac{dB}{dy}\right)_i\right] \cdot u_{i+\Delta y,t} + V_s^2 \frac{\Delta t^2}{\Delta y^2} \cdot \left[1 - \frac{\Delta y}{2} \cdot \left(\frac{1}{B} \cdot \frac{dB}{dy}\right)_i\right] \cdot u_{i-\Delta y,t} \quad (11)$$

Кінцево-різницевий аналог рівняння (5) для вузла на гребені греблі $i = nd$ з урахуванням (11) може бути записаний таким чином:

$$u_{nd,t+\Delta t} = -u_{nd,t-\Delta t} + 2 \cdot \left(1 - V_s^2 \frac{\Delta t^2}{\Delta y^2}\right) \cdot u_{nd,t} + 2 \cdot V_s^2 \frac{\Delta t^2}{\Delta y^2} \cdot u_{nd-\Delta y,t} \quad (12)$$

З урахуванням впливу дотичних напружень на цьому контакті й випромінювання хвиль в основу отримано кінцево-різницевий аналог рівняння динамічної рівноваги (5) для вузла на контакті підшви греблі з основою $i = 0$:

$$u_{0,t+\Delta t} = -\frac{G_d \cdot dy_o - G_o \cdot dy}{G_d \cdot dy_o + G_o \cdot dy} \cdot u_{0,t-\Delta t} + \frac{2 \cdot G_d \cdot dy_o}{G_d \cdot dy_o + G_o \cdot dy} \cdot u_{1,t} + \frac{2 \cdot G_o \cdot dy}{G_d \cdot dy_o + G_o \cdot dy} \cdot (u_{s,t+\Delta t} - u_{s,t-\Delta t}) \quad (13)$$

При необхідності можуть бути обчислені значення переміщень в основі греблі для вузлів $i < 0 - 1$ за формулою:

$$u_{i,t} = u_{i-1,t+\Delta t} + u_{i-1,t-\Delta t} - u_{i-2,t} \quad (14)$$

Таким чином, у всі розрахункові моменти часу t за формулами (11) – (13) можуть бути знайдені значення переміщень u у всіх розрахункових вузлах i в межах тіла греблі й за формулою (14) – значення переміщень u у всіх розрахункових вузлах i в межах основи. Знаючи значення u , неважко визначити значення прискорень a в цих вузлах. При цьому доцільно скористатися чисельним диференціюванням функції переміщень u за часом t . У центрованих кінцевих різницях для будь-якого вузла i в будь-який момент часу t можна записати:

$$a_{i,t} = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right)_{i,t} = \frac{1}{\Delta t^2} \cdot (u_{i,t+\Delta t} - 2 \cdot u_{i,t} + u_{i,t-\Delta t}) \quad (15)$$

В результаті виконання розрахунків у будь-який момент часу t може бути отримана еюра сейсмічних прискорень a за висотою греблі та в основі. Такі еюри прискорень необхідні для виконання розрахунків напруженого стану, міцності й стійкості укосів греблі з ґрунтових матеріалів при сейсмічних впливах.

Одним із важливих питань реалізації запропонованої кінцево-різницевої схеми є вибір умови, що забезпечує стійкість рахунку. В якості необхідної умови забезпечення стійкості рахунку доцільно прийняти умову Куранта, яка може бути записана у вигляді:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta y}{V_s}, \quad (16)$$

де Δy – мінімальний просторовий крок різницевої сітки; V_s – максимальна швидкість розповсюдження хвиль.

Як показав чисельний експеримент, умова Куранта (16) є не тільки необхідною, але й достатньою для забезпечення стійкості рахунку при вирішенні динамічних задач для гребель із ґрунтових матеріалів на основі рівняння (5) методом кінцевих різниць з використанням тришарової різницевої схеми за часом.

Відповідно до розробленої методики складено алгоритм вирішення динамічної задачі, який дозволяє визначати значення сейсмічних переміщень і прискорень в греблях з ґрунтових матеріалів з урахуванням впливу основи й випромінювання в неї сейсмічних хвиль.

На основі цього алгоритму складена комп'ютерна програма «Визначення сейсмічних прискорень в греблі з ґрунтових матеріалів». Ця програма дозволяє отримати значення ординат розрахункових еюр прискорень за висотою греблі для моментів часу, що відповідають найбільш небезпечним еюрам прискорень при прямій і зворотній сейсмічній дії. Дані про ці еюри прискорень можуть бути представлені як у табличній формі, так і у вигляді графіків. Розроблено інструкцію користувача, в якій наведено короткі відомості про методику розрахунку, вказівки з підготовки вихідних даних, приклад розрахунку. В даний час ця програма успішно експлуатується в ПАТ «Укргідропроєкт» і ТОВ «Гідротехпроєкт».

У **четвертому розділі** для кам'яно-земляної греблі Дністровської ГЕС-1 виконана верифікація (перевірка відповідності) розрахункових даних, отриманих відповідно до запропонованої нами методики, й даних натурних спостережень, отриманих при проведенні експериментальних вибухів в нижньому б'єфі.

За завданням ПАТ «Укргідропроєкт» підприємством «Регіональний центр геофізичних досліджень» в рамках теми «Оцінка впливу буро-вибухових робіт на ґрунті та бетонні споруди Дністровської ГЕС-1» були виконані сейсмологічні дослідження з використанням експериментальних вибухів. Ці вибухи проводилися 18 жовтня 2013 р. в кар'єрі, розташованому на відстані від основних споруд ГЕС приблизно в 500 м нижче за течією на лівому березі р. Дністер.

У роботі досліджувалися коливання лівобережної кам'яно-земляної греблі Дністровської ГЕС-1 висотою 59,0 м на пікеті ПК8 + 40, конструкція якої показана на рис. 4.

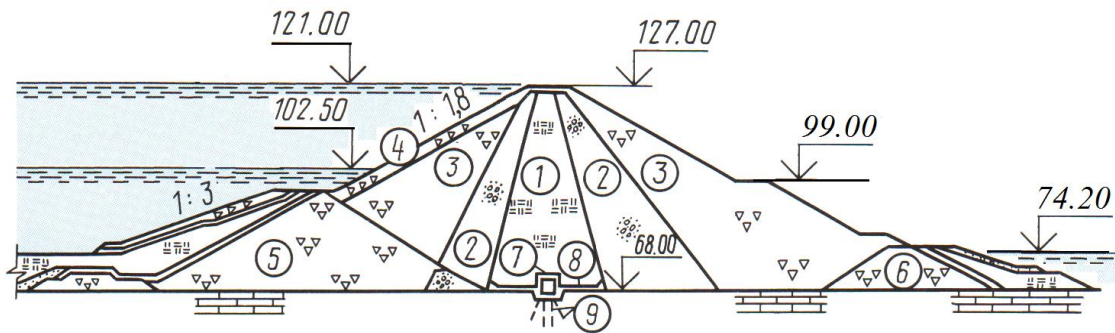


Рис. 4. Конструкція лівобережної греблі Дністровської ГЕС-1
 1 – ядро греблі; 2 – перехідні зони; 3 – упорні призми; 4 – захисний шар із гірської маси; 5 – верховий банкет; 6 – низовий банкет; 7 – цементаційна потерна; 8 – залізобетонна плита; 9 – цементаційна завеса

Для реєстрації коливань споруд використовувалися сейсмічні датчики (сейсмографи). На ПК 8 + 40 лівобережної кам'яно-земляний греблі розташовані 3 пункти реєстрації сейсмічних спостережень (ПР1, ПР2, ПР3). На гребені греблі знаходиться пункт реєстрації ПР1, на бермі низового укосу розташований пункт реєстрації ПР2 і в основі греблі в потерні розміщено пункт реєстрації ПР3.

У результаті обробки отриманих записів коливань греблі в місцях розташування сейсмічних датчиків (пунктах реєстрації) були визначені ординати вимірних акселерограм для кожного пункту реєстрації ПР1, ПР2, ПР3. При цьому в кожному із цих пунктів визначалися три складові коливань: для вертикального напрямку Z , горизонтального напрямку північ-південь NS і горизонтального напрямку схід-захід EW . Дані для зазначених пунктів реєстрації містять 1024 ординати вимірних акселерограм по кожному з трьох напрямків (EW, NS, Z). Часовий інтервал спостережень 0,01 с.

Зазначимо, що найбільші за абсолютною величиною прискорення (екстремальні прискорення) мають місце в період спостережень від першої секунди (початок приходу сейсмічної хвилі) до третьої секунди. Далі відбувається поступове згасання коливань протягом наступних двох секунд.

Виконано аналіз даних про коливання греблі Дністровської ГЕС-1 при проведенні експериментальних вибухів. Показано, що отриманий при цьому характер коливань споруди відповідає характеру коливань гребель із ґрунтових матеріалів при сейсмічних впливах.

Для виконання порівняння результатів розрахунків з даними спостережень використані перетворені експериментальні акселерограми для напрямку, перпендикулярного осі греблі. Фрагменти перетворених акселерограм для розглянутих пунктів спостереження показані на рис. 5 крапчастими лініями. Ці фрагменти відповідають ділянкам акселерограм із найбільшими амплітудами спостережених прискорень.

На цьому ж рисунку суцільними лініями показані фрагменти розрахункових акселерограм, отриманих відповідно до розробленої методики для тих же пунктів спостереження.

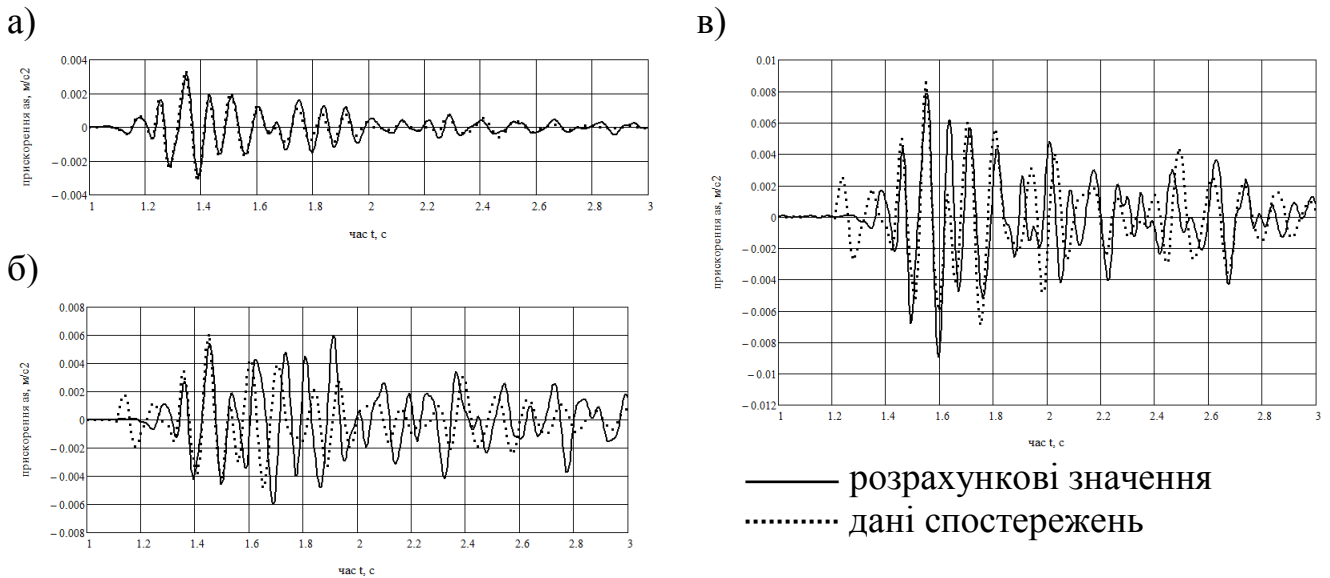


Рис. 5. Фрагменти розрахункових і спостережених акселерограм кам'яно-земляної греблі Дністровської ГЕС-1: а – для пункту реєстрації ПР3 (підшва греблі); б – для пункту реєстрації ПР2 (берма на укосі греблі); в – для пункту реєстрації ПР1 (гребінь греблі)

Як видно з рис. 5, отримані в результаті розрахунків і спостереження найбільші значення екстремальних прискорень мають місце в зоні гребня греблі, а найменші – в зоні підшви споруди. Найбільші значення екстремальних прискорень в зоні берми греблі знаходяться між відповідними значеннями на гребені й на підшві греблі. Такий характер розподілу екстремальних прискорень є типовим для гребель із ґрунтових матеріалів при землетрусах.

З порівняння даних, представлених на рис. 5, видно, що характер коливань греблі за результатами розрахунків незначно відрізняється від характеру коливань споруди за даними натурних спостережень.

У табл. 1 наведені дані про значення розрахункових і спостережених екстремальних прискорень в пунктах реєстрації ПР1, ПР2, ПР3.

Порівняння результатів розрахунків з даними натурних спостережень показало, що максимальна різниця екстремальних прискорень, отриманих розрахунковим шляхом і при проведенні натурних спостережень, не перевищує 10,11% для гребеня греблі і 6,56% для підшви греблі.

Таблиця 1

**Розрахункові та спостережені значення екстремальних прискорень
в пунктах реєстрації**

Пункт реєстрації	Відмітка ПР	Розрахункові значення, мкм/с ²	Спостережені значення, мкм/с ²	Відхилення, %
ПР3	+68,00	3150	3372	6,56
ПР2	+99,00	5931	6141	3,42
ПР1	+127,00	7885	8772	10,11

У п'ятому розділі наведені приклади, виконаних нами розрахунків сейсмостійкості гребель із ґрунтових матеріалів, що проектуються в даний час в ПАТ «Укргідропроєкт» і ТОВ «Гідротехпроєкт». Розрахунки виконувалися у відділі розрахункового обґрунтування споруд ТОВ «Гідротехпроєкт» на основі запропонованої нами методики розрахунків сейсмостійкості гребель із ґрунтових матеріалів. Така методика розрахунків включає в себе перелік і методи виконання розрахунків, регламентованих діючими в Україні нормами проектування, методику визначення основних навантажень і впливів на греблі з ґрунтових матеріалів, а також методику розрахунків напружено-деформованого стану греблі, загальної міцності та стійкості укосів греблі методом редуції сил.

При виконанні розрахунків сейсмічні інерційні навантаження визначалися відповідно до хвильової теорії сейсмостійкості. Сейсмічні прискорення визначалися з використанням розробленої нами комп'ютерної програми SGD «Визначення сейсмічних прискорень в греблі з ґрунтових матеріалів».

В даний час ТОВ «Гідротехпроєкт» виконує проєктні роботи з реконструкції споруд Дністровської ГЕС-1. В рамках цих робіт були проведені дослідження, пов'язані з оцінкою надійності та безпеки кам'яно-земляної греблі, що входить до складу напірного фронту цього гідровузла, й, зокрема, аналіз її сейсмостійкості.

Виконано розрахунки сейсмостійкості лівобережної кам'яно-земляної греблі Дністровської ГЕС-1.

В якості сейсмічного впливу використовувалася розрахункова акселерограма для горизонтального напрямку, яка відповідає землетрусу рівня МРЗ (рис. 6, а). Максимальна амплітуда горизонтального прискорення становить $0,1 \cdot g$, що відповідає інтенсивності 7 балів за шкалою сейсмічної інтенсивності ДСТУ Б.В.1.1-28.

В результаті виконання розрахунків за розробленою комп'ютерною програмою «Визначення сейсмічних прискорень в греблі з ґрунтових матеріалів» для розрахункового інтервалу часу рівного 56,047 с з кроком $\Delta t = 0,00684$ с отримані значення горизонтальних переміщень u і сейсмічних прискорень a у всіх вузлах просторової сітки i в усі розрахункові моменти часу t .

На рис. 6, в і 6, д показані графіки зміни в часі сейсмічних прискорень підосви та гребеня греблі при землетрусі. Порівняння цих графіків з вихідною акселерограмою (рис. 6, а) показує, що внаслідок взаємодії греблі з основою прискорення її підосви менше, а її гребеня значно більше прискорень, відповідних вихідній акселерограмі.

На рис. 6, г і 6, є показані графіки зміни в часі горизонтальних переміщень підосви та гребеня греблі при землетрусі.

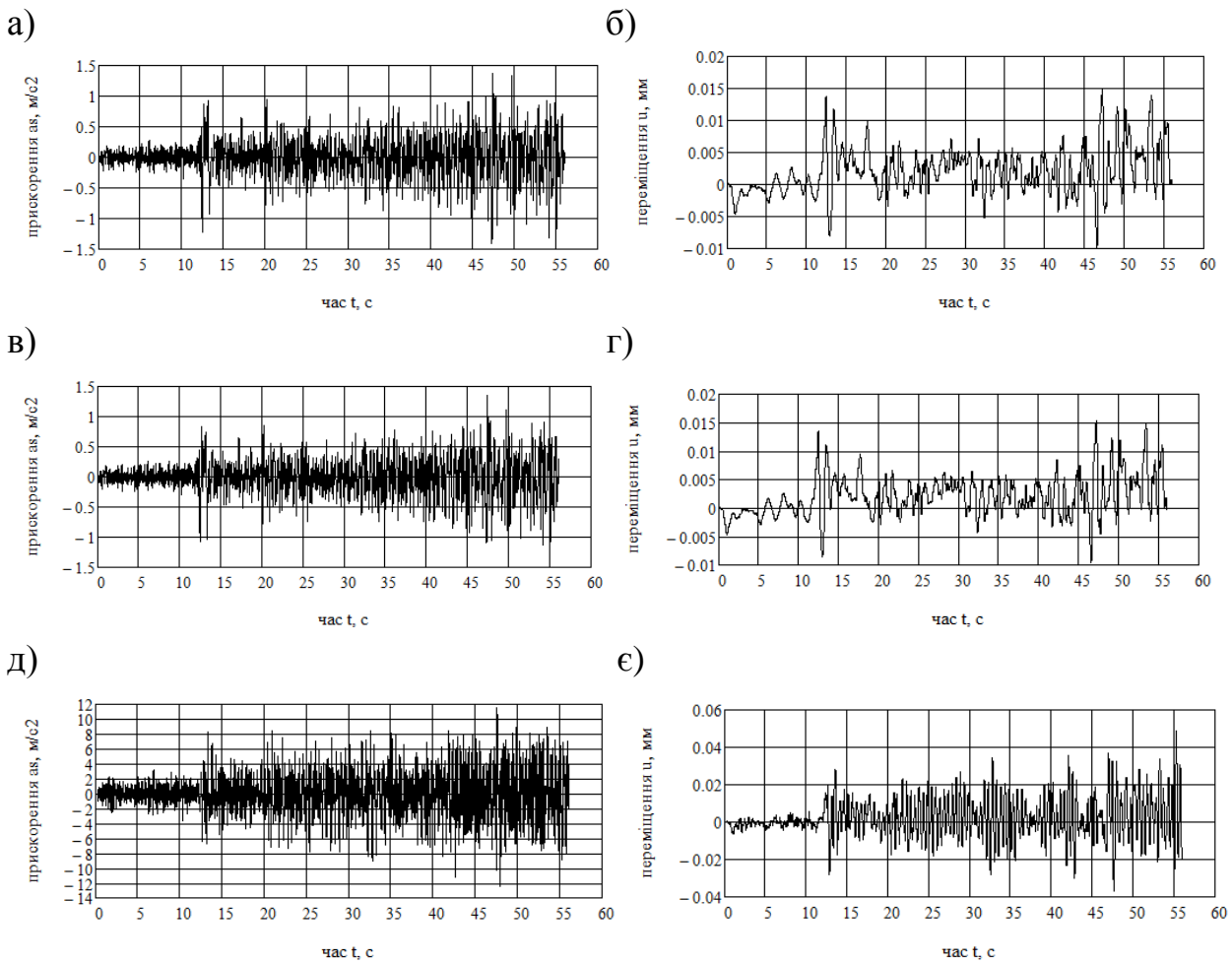


Рис. 6. Сейсмічний вплив: а) розрахункова акселерограма; б) розрахункова сейсмограма; в) прискорення підшви греблі; г) переміщення підшви греблі; д) прискорення гребня греблі; е) переміщення гребня греблі

Найбільш небезпечна, з точки зору стійкості укосів греблі, еюра сейсмічних прискорень показана на рис. 7. Ця еюра прискорень використовувалась надалі для розрахунків сейсмостійкості греблі.

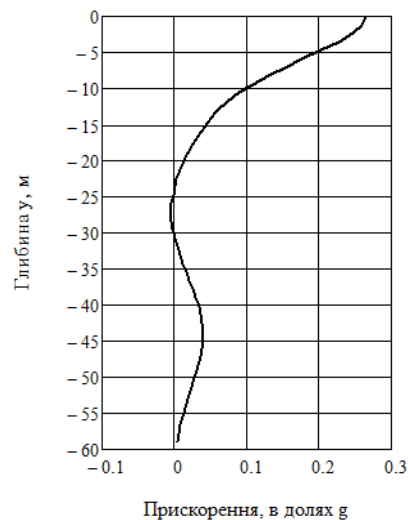


Рис. 7. Найбільш небезпечна еюра сейсмічних прискорень лівобережної кам'яно-земляної греблі Дністровської ГЕС-1.

Отриманий напружено-деформований стан греблі є типовим для розглянутих умов її роботи. Розрахунки, виконані методом редукції сил, показали, що стійкість укосів і міцність тіла лівобережної греблі Дністровської ГЕС-1 забезпечена, так як у всіх розрахункових випадках розрахункові значення коефіцієнтів стійкості вище нормативного значення.

В даний час ТОВ «Гідротехпроект» розробляє робочу документацію для конструкцій земляних споруд верхньої водойми Дністровської ГАЕС. В рамках цих робіт були проведені дослідження, пов'язані з оцінкою надійності та безпеки земляної дамби верхньої водойми, зокрема, аналіз її сейсмостійкості.

Розглянуто найвищий переріз дамби на пікеті ПК 9 +55 висотою 20,3 м. Дамба працює в умовах щоденного спрацювання та наповнення водойми.

Для урахування сейсмічних впливів використовувалася отримана в результаті сейсмологічних досліджень розрахункова акселерограма для МРЗ інтенсивністю 7 балів за шкалою сейсмічної інтенсивності (рис. 8, а).

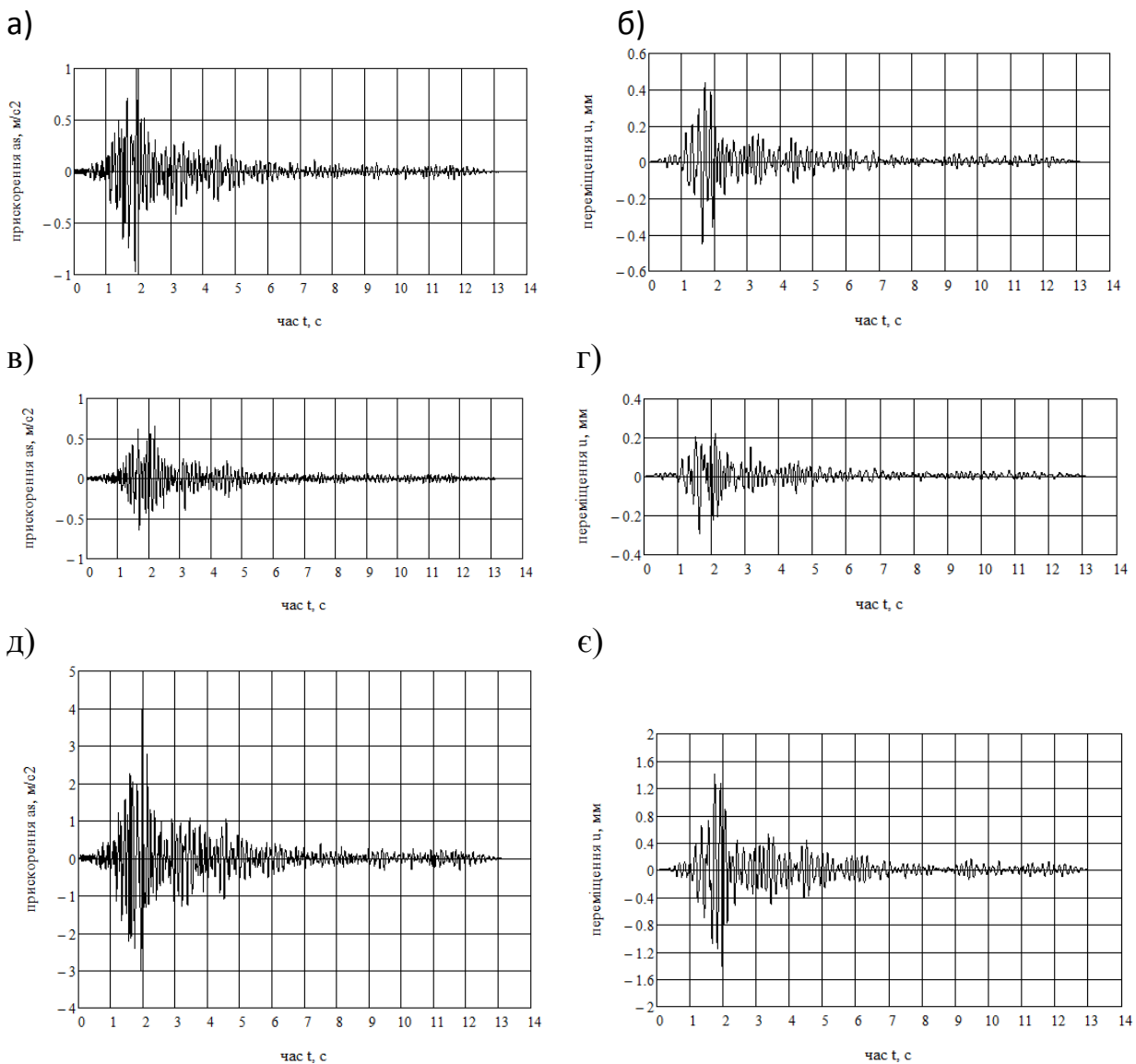


Рис. 8. Сейсмічний вплив: а) розрахункова акселерограма; б) розрахункова сейсмограма; в) прискорення підосви дамби; г) переміщення підосви дамби; д) прискорення гребня дамби; е) переміщення гребня дамби

В результаті виконання розрахунків за розробленою комп'ютерною програмою «Визначення сейсмічних прискорень в греблі з ґрунтових матеріалів» для розрахункового інтервалу часу рівного 13,1 с з кроком $\Delta t = 0,005$ с отримані значення горизонтальних переміщень u і сейсмічних прискорень a у всіх вузлах просторової сітки i в усі розрахункові моменти часу t .

На рис. 8, в і 8, д показані графіки зміни в часі сейсмічних прискорень (акселерограми) підошви та гребеня дамби при землетрусі. Графіки зміни в часі горизонтальних переміщень (сейсмограми) підошви та гребеня дамби при землетрусі наведено на рис. 8, г і 8, є.

Найбільш небезпечна, з точки зору стійкості укосів дамби верхньої водойми на ПК9+55, еюра сейсмічних прискорень показана на рис. 9, яка використовувалась надалі для розрахунків сейсмостійкості дамби.

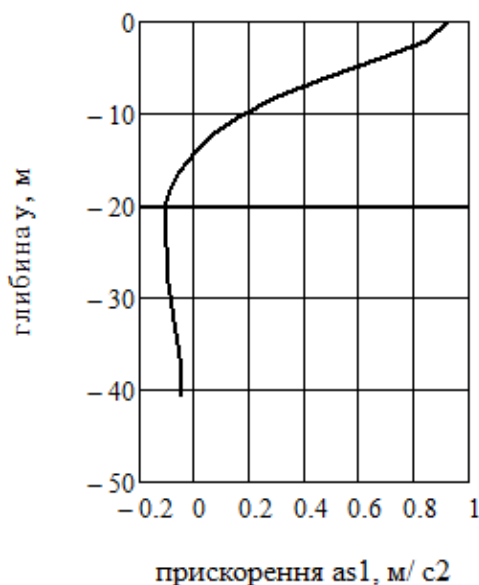


Рис. 9. Найбільш небезпечна еюра сейсмічних прискорень дамби верхньої водойми Дністровської ГАЕС

Проведені розрахунки показали, що міцність дамби верхньої водойми Дністровської ГАЕС і стійкість її укосів при сейсмічній дії рівня МРЗ забезпечена. Напружено-деформований стан дамби є типовим для розглянутих умов її роботи.

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій розроблена нова методика розрахунків сейсмостійкості гребель із ґрунтових матеріалів, яка заснована на хвильовій теорії сейсмостійкості. Проведене дослідження дозволило зробити такі висновки.

1. На основі аналізу існуючих підходів до оцінки сейсмостійкості гребель із ґрунтових матеріалів показано, що найбільш достовірні результати розрахунків, що описують роботу гребель при землетрусах, можуть бути отримані на основі хвильової теорії сейсмостійкості.

2. Обґрунтовано перелік необхідних вихідних даних, які повинні використовуватися при розрахунках сейсмостійкості гребель із ґрунтових матеріалів у рамках хвильової теорії сейсмостійкості.

3. Запропоновано методику визначення за відомими ординатами вихідних акселерограм ординат розрахункових сейсмограм, які необхідно використовувати в якості вихідних даних при виконанні динамічних розрахунків споруд в рамках хвильової теорії.

4. Отримано рівняння динамічної рівноваги для зсувного клина, який моделює греблю з ґрунтових матеріалів при вирішенні динамічних задач в рамках хвильової теорії сейсмостійкості.

5. Розроблено методику чисельного рішення динамічної задачі для зсувного клина методом кінцевих різниць з використанням явної тришарової (за часом) кінцево-різницевої схеми стосовно до системи «гребля - основа» з урахуванням поширення сейсмічних хвиль, як в межах споруди, так і в основі. Обґрунтований критерій, що забезпечує стійкість рахунку при виконанні розрахунків.

6. Складена комп'ютерна програма «Визначення сейсмічних прискорень в греблі з ґрунтових матеріалів», що дозволяє отримати значення ординат розрахункових епюр прискорень за висотою греблі для моментів часу, відповідних найбільш небезпечним епюрам прискорень при прямій і зворотній сейсмічній дії.

7. Для перевірки точності запропонованої методики рішення динамічної задачі була виконана верифікація (перевірка відповідності) розрахункових даних, отриманих відповідно до запропонованої методики, й даних натурних спостережень для кам'яно-земляної греблі Дністровської ГЕС-1, отриманих при проведенні експериментальних вибухів. Виконане порівняння показало, що максимальна різниця екстремальних прискорень, отриманих розрахунковим шляхом і при проведенні натурних спостережень, не перевищує 10,11% для гребеня греблі і 6,56% для підшви греблі. Це свідчить про достатню точність запропонованого чисельного підходу до вирішення розглянутих динамічних задач.

8. Наведені приклади розрахунків сейсмостійкості гребель із ґрунтових матеріалів, що ілюструють особливості застосування розробленого методу визначення сейсмічних прискорень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Матвиенко А.А. Дифференциальное уравнение динамического равновесия для решения задач о напряженно-деформированном состоянии плотин из грунтовых материалов при сейсмических воздействиях: [Текст] / А.И. Вайнберг, А.А. Матвиенко // Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2011. – Вип. 64. – С. 68-74. (*Особистий внесок: складено диференційне рівняння динамічної рівноваги для клина, що зсувається, моделюючого греблю із ґрунтових матеріалів*).

2. Матвиенко А.А. Методика определения ординат расчетных сейсмограмм при выполнении расчетов сейсмостойкости гидротехнических сооружений: [Текст] / А.И. Вайнберг, А.А. Матвиенко // Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2011. – Вип. 65. – С. 197-202. (*Особистий внесок: розроблено методику визначення ординат розрахункових сейсмограм*).

3. Матвиенко А.А. Основные направления оценки сейсмостойкости плотин из грунтовых материалов: [Текст] / А.А. Матвиенко // Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2012. – Вип. 68. – С. 111-117.

4. Матвиенко А.А. Методика определения сейсмических ускорений в теле и нескальном основании плотин из грунтовых материалов на основе волновой теории сейсмостойкости: [Текст] / А.А. Матвиенко // Вісник НУВГП: зб. наук. праць. Технічні науки. – Рівне: НУВГП, 2013. – Вип. 2 (62). – С. 276-284.

5. Матвиенко А.А. Учет излучения сейсмических волн в основание при расчете сейсмостойкости плотин из грунтовых материалов по волновой теории: [Текст] / А.А. Матвиенко // Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2013. – Вип. 74. – С. 130-134.

6. Матвиенко А.А. Сравнение расчетных и наблюдаемых сейсмических ускорений в каменно-земляной плотине Днестровской ГЭС-1 при проведении экспериментальных взрывов: [Текст] / А.А. Матвиенко // Вісник НУВГП: зб. наук. праць. Технічні науки. – Рівне: НУВГП, 2014. – Вип. 4 (68). – С. 142-149.

Публікації у закордонних виданнях:

7. Матвиенко А.А. Инженерная методика расчета сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов: [Текст] / А.И. Вайнберг, А.А. Матвиенко // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». – СПб: Известия ВНИИГ, 2014. – Т. 272. – С. 14-21. (*Особистий внесок: розроблено методику визначення сейсмічних прискорень в греблях із ґрунтових матеріалів*)

Матеріали апробаційного характеру:

8. Матвиенко А.А. Методика расчета сейсмостойкости плотин из грунтовых материалов на основе волновой теории: [Текст] / А.А. Матвиенко // Расширенные аннотации докладов Международной научно-технической конференции, 2011. – Харьков: «ПАО Укргидропроект», 2011. – С. 52-53.

9. Матвиенко А.А. Дифференциальное уравнение динамического равновесия для решения задач о напряженно-деформированном состоянии плотин из грунтовых материалов при сейсмических воздействиях: [Текст] / А.И. Вайнберг, А.А. Матвиенко // Программа Международной научно-практической конференции «Эффективные организационно-технологические решения и энергосберегающие технологии в строительстве», ХНУСА, г. Харьков (Украина), 27-28 апреля, 2011. – Харьков: ХНУСА, 2011. – С. 10.

10. Матвиенко А.А. Методика определения ординат расчетных сейсмограмм при выполнении расчетов сейсмостойкости гидротехнических сооружений: [Текст] / А.А. Матвиенко // Программа V Международной научной конференции

«Ресурс и безопасность эксплуатации конструкций, зданий и сооружений», ХНУСА, г. Харьков (Украина), октябрь, 2011 – Харьков: ХНУСА, 2011. – С. 16.

11. Матвиенко А.А. Основные направления оценки сейсмостойкости плотин из грунтовых материалов: [Текст] / А.И. Вайнберг, А.А. Матвиенко // Программа 67-ой научно-технической конференции Харьковского национального университета строительства и архитектуры, посвященной 150-летию со дня рождения Бекетова А.Н. – Харьков: ХНУСА, 2012. – С. 14.

12. Матвиенко А.А. Инженерный метод определения сейсмических ускорений в плотине из грунтовых материалов в волновой постановке: [Текст] / А.И. Вайнберг, А.А. Матвиенко // Тезисы докладов Седьмой научно-технической конференции. «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии», 2012. – СПб: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2012. – С. 128-129.

13. Матвиенко А.А. Учет влияния излучения сейсмических волн в основание при расчете сейсмостойкости плотин из грунтовых материалов по волновой теории: [Текст] / А.И. Вайнберг, А.А. Матвиенко // Программа 68-ой научно-технической конференции Харьковского национального университета строительства и архитектуры. – Харьков: ХНУСА, 2013. – С. 15.

14. Матвиенко А.А. Инженерный метод определения сейсмических ускорений в плотине из грунтовых материалов в волновой постановке: [Текст] / А.И. Вайнберг, А.А. Матвиенко // Программа 6-ой научно-практической конференции гидроэнергетиков «Мировые тенденции и перспективы развития гидроэнергетики Украины», г. Ровно, 14-15 марта 2013 г. – Ровно: НУВХП, 2013. – С. 13.

15. Матвиенко А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости ограждающей дамбы верхнего водоема Днестровской ГАЭС при выполнении расчетов сейсмостойкости в волновой постановке: [Текст] / А.А. Матвиенко // Программа Международной научно-технической конференции, 2013. – Харьков: «ПАО Укргидропроект», 2013. – С. 14.

16. Матвиенко А.А. Анализ современных методов расчета сейсмостойкости плотин из грунтовых материалов: [Текст] / А.А. Матвиенко // Программа VI Международной научной конференции «Ресурс и безопасность эксплуатации конструкций, зданий и сооружений», ХНУСА, г. Харьков (Украина), 15-17 октября 2013 г. – Харьков: ХНУСА, 2013. – С. 17.

17. Матвиенко А.А. Влияние вида расчетной акселерограммы на сейсмические ускорения в высоких плотинах из грунтовых материалов: [Текст] / А.И. Вайнберг, А.А. Матвиенко // Программа 69-ой научно-технической конференции Харьковского национального университета строительства и архитектуры. – Харьков: ХНУСА, 2014. – С. 14.

18. Матвиенко А.А. Исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости откосов каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1 при выполнении расчетов сейсмостойкости в волновой постановке: [Текст] / А.А. Матвиенко // Тезисы докладами VII Міжнародної наукової конференції «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд», 2015. – Харків: ХНУБА, 2015. – С. 77-78.

АНОТАЦІЯ

Матвієнко А.О. Удосконалення методики розрахунку сейсмостійкості гребель із ґрунтових матеріалів на основі хвильової теорії. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. Харківський національний університет будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України, Харків, 2015.

У дисертаційній роботі запропоновано нову методику визначення сейсмічних прискорень в греблях із ґрунтових матеріалів у хвильовій постановці. Розроблено алгоритм чисельного рішення поставленого завдання з використанням трьохшарової кінцево-різницевої схеми. Виконано зіставлення експериментальних даних з результатами розрахунків за розробленою методикою, яке підтверджує достатню точність запропонованого чисельного методу. На підставі розробленої методики створена комп'ютерна програма, яка дозволяє враховувати розповсюдження сейсмічних хвиль як в межах споруди, так і її основи. Результатом роботи програми є отримання значень сейсмічних прискорень, що змінюються за висотою греблі, як у вигляді епюр, так і в табличній формі. З використанням результатів визначення за створеною програмою сейсмічних прискорень виконані ряд розрахунків сейсмостійкості ґрунтових гребель, що проектуються на сучасний момент в ПАТ «Укргідропроєкт» і ТОВ «Гідротехпроєкт». Проаналізовані отримані результати напружено-деформованого стану, міцності й стійкості укосів гребель із ґрунтових матеріалів при землетрусах.

Ключові слова: греблі з ґрунтових матеріалів, сейсмічна дія, хвильова теорія сейсмостійкості, акселерограма, сейсмограма, епюри сейсмічних прискорень.

АННОТАЦИЯ

Матвиенко А.А. Совершенствование методики расчета сейсмостойкости плотин из грунтовых материалов на основе волновой теории. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2015.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическое значение полученных результатов. Приведены данные по внедрению результатов работы.

В первом разделе диссертационной работы описано современное состояние методов и подходов к оценке сейсмостойкости плотин из грунтовых материалов. Проанализированы основные тенденции развития теории сейсмостойкости этих сооружений. Рассмотрены подходы к определению сейсмических ускорений в

плотинах из грунтовых материалов и методы расчетов устойчивости их откосов. Приведены примеры наиболее опасных деформаций грунтовых плотин и схемы их разрушения при землетрясениях. Показано, наиболее достоверная информация о сейсмостойкости плотин из грунтовых материалов может быть получена в рамках волновой теории.

Во втором разделе обоснован перечень необходимых исходных данных, которые должны использоваться при расчетах сейсмостойкости плотин из грунтовых материалов. Разработана методика корректного определения ординат расчетных сейсмограмм по известным ординатам исходных акселерограмм, что необходимо для выполнения расчетов в соответствии с волновой теорией сейсмостойкости.

В третьем разделе выведено дифференциальное уравнение, позволяющее решать динамическую задачу для сдвигового клина, моделирующего плотину из грунтовых материалов при землетрясениях. Разработана методика численного решения этой динамической задачи методом конечных разностей с использованием явной трехслойной (по времени) конечно-разностной схемы применительно к системе «плотина – основание». Учтено влияние взаимодействия сооружения и его основания, а также излучение сейсмических волн в основание. Обоснован критерий, обеспечивающий устойчивость счета при выполнении расчетов. Составлена компьютерная программа «Определение сейсмических ускорений в плотине из грунтовых материалов», позволяющая получить значения ординат расчетных эпюр ускорений по высоте плотины для моментов времени, соответствующих наиболее опасным эпюрам ускорений при прямом и обратном сейсмическом воздействии.

В четвертом разделе выполнено сопоставление расчетных данных, полученных в соответствии с предложенной методикой, и данных натуральных наблюдений за колебаниями каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1 при проведении экспериментальных взрывов. Сопоставление подтвердило достаточную точность предлагаемого численного подхода к решению динамических задач по определению сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалах при землетрясениях.

В пятом разделе приведены результаты расчетов сейсмостойкости ряда грунтовых плотин, проектируемых в настоящее время в ПАО «Укргидропроект» и ООО «Гидротехпроект». Необходимые для выполнения этих расчетов данные о сейсмических ускорениях в плотинах из грунтовых материалов были получены с использованием разработанной нами компьютерной программы. Проанализированы полученные результаты расчетов напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости откосов рассмотренных плотин при сейсмических воздействиях.

В диссертационной работе приведены выводы по результатам исследований.

В приложениях представлены текст компьютерной программы расчета сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов, данные натуральных исследований колебаний каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1, результаты расчетов напряженно-деформированного состояния плотин из

грунтовых материалов при сейсмических воздействиях по предложенному методу.

Ключевые слова: плотины из грунтовых материалов, сейсмическое воздействие, волновая теория сейсмостойкости, акселерограмма, сейсмограмма, эпюры сейсмических ускорений.

ABSTRACT

Matviienko A.A. Improving of the method of calculation seismic resistance of the earth dam based on the wave theory. – Manuscript.

The dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.23.01 – building structures, buildings and constructions. Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Kharkiv, 2015.

The dissertation work proposes new methodology of determination of seismic acceleration in earth dams in wave setting. Algorithm of numerical solution of assigned problem using the three-ply mesh scheme was developed. Comparison of experimental data and results of calculation according to the developed methodology confirms adequate accuracy of the proposed numerical method. On the basis of developed methodology the software program was designed that allows taking into account propagation of seismic waves both within the structure and the foundation. The result of the software program operation is obtaining of seismic acceleration values that change along the dam height, both in view of distribution diagram and table form Applying the results of determination of seismic acceleration provided by the developed software program a range of seismic stability calculations of earth dams being currently designed by the Ukrhydroproject PJSC and Hydrotechproject Limited. Obtained results of stress-strain state, strength and stability of earth dams slopes in case of earthquake has been analyzed.

Keywords: dams of earth materials, earthquake impact, wave theory of seismic resistance, accelerogram, seismogram, diagrams of seismic accelerations.