

УДК 627.82: 550.34

Матвиенко А. А., ст. инженер (ООО «ГИДРОТЕХПРОЕКТ», г. Харьков)

## **СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И НАБЛЮДЕННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ УСКОРЕНИЙ В КАМЕННО-ЗЕМЛЯНОЙ ПЛОТИНЕ ДНЕСТРОВСКОЙ ГЭС-1 ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВЗРЫВОВ**

Для каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1 представлена верификация расчетных данных, полученных в соответствии с предложенной методикой определения сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов, и данных натуральных наблюдений, полученных при проведении экспериментальных взрывов.

**Ключевые слова:** плотины из грунтовых материалов, сейсмические ускорения, экспериментальные взрывы, волновая теория сейсмостойкости, акселерограмма.

**Введение.** К гидротехническим сооружениям, в том числе и к плотинам из грунтовых материалов, возводимым в сейсмически опасных районах, предъявляются требования, обеспечивающие их устойчивость и прочность при землетрясениях [1–3].

Для оценки сейсмостойкости плотины из грунтовых материалов выполняются расчеты устойчивости ее откосов с учетом инерционных сейсмических нагрузок. Такие нагрузки пропорциональны сейсмическим ускорениям, развивающимся в теле сооружения при землетрясении. Поэтому важнейшей задачей является определение распределения сейсмических ускорений по высоте плотины.

В работах [4, 5] предложена новая методика решения задач по определению сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов на основе наиболее достоверной волновой теорией сейсмостойкости.

В настоящей работе для каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1 выполнена верификация (проверка соответствия) расчетных данных, полученных в соответствии с предложенной методикой определения сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов, и данных натуральных наблюдений, полученных при проведении экспериментальных взрывов.

**Краткое описание разработанной методики определения сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов.** Изло-

женная в работах [4, 5] методика основана на численном интегрировании полученных динамических уравнений равновесия для плотины в виде упругого сдвигового клина, расположенного на деформируемом основании. При выполнении численного интегрирования уравнений динамического равновесия применяется явная трехслойная по времени конечно-разностная схема.

В качестве исходных данных используются осредненные динамические характеристики грунтов тела плотины (динамический модуль сдвига  $G$  и скорость распространения поперечных волн  $V_s$ ) и грунтов основания (динамический модуль сдвига  $G_o$  и скорость распространения поперечных волн  $V_{so}$ ). Сейсмическое воздействие задается в виде сейсмограммы в районе размещения плотины до ее возведения. Методика определения ординат расчетных сейсмограмм по обычно известным ординатам акселерограмм приведена в работе [6].

В результате решения указанной задачи во всех расчетных узлах  $i$  по высоте плотины во все расчетные моменты времени  $t$  могут быть определены значения перемещений  $u$ . В каждом расчетном узле по высоте плотины  $i$  перемещение  $u$  может рассматриваться как функция времени  $t$ , т.е.  $u = u(t)$ . Тогда сейсмические ускорения  $a$  в узле  $i$  могут быть получены численным дифференцированием функции перемещений в центрированных разностях.

Отметим, что разработанная методика позволяет учесть трансформация исходной сейсмограммы землетрясения вследствие наличия плотины и, излучение сейсмических волн в основание.

На основе разработанной методики 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. Эта программа широко используется в отделе расчетного обоснования сооружений ООО «ГИДРОТЕХПРО-ЕКТ» при выполнении расчетов по обоснованию сейсмостойкости проектируемых плотин из грунтовых материалов.

**Краткое описание конструкции каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1.** В настоящей работе исследуются колебания каменно-земляной плотины, которая входит в состав Днестровской ГЭС-1. Наибольшую высоту (59 м) имеет левобережная плотина гидроузла в русловой части на ПК8+40 (рис. 1).

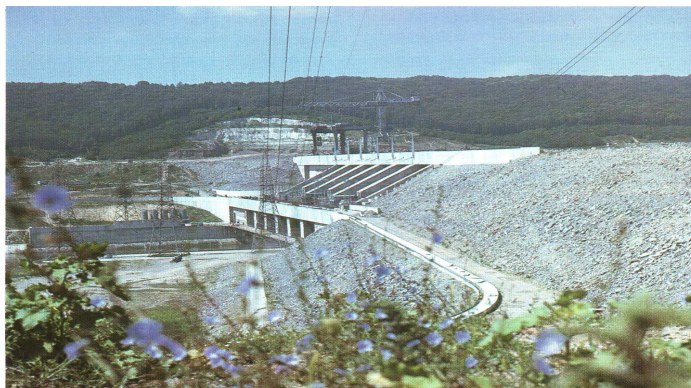


Рис. 1. Днестровская ГЭС-1. Вид со стороны левобережной плотины

Левобережная плотина Днестровской ГЭС-1 имеет типичную для каменно-земляных плотин конструкцию. Плотина состоит из центрального ядра из суглинка и боковых призм из горной массы. Между ядром и боковыми призмами предусмотрены переходные зоны из песчано-гравийного грунта. В основании плотины залегают породы самого различного состава и генезиса – от рыхлых делювиальных отложений до крепких, очень трещиноватых, коренных, полускальных и скальных пород. Конструкция левобережной каменно-земляной плотины для самого высокого поперечного сечения показана на рис. 2.

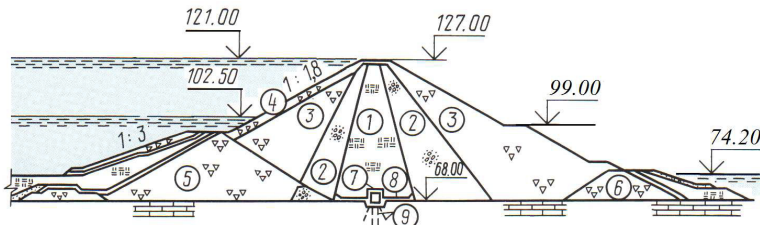


Рис. 2. Конструкция левобережной каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1:

- 1 – ядро плотины; 2 – переходные зоны; 3 – упорные призмы; 4 – защитный слой из горной массы; 5 – верховой банкет; 6 – низовой банкет;
- 7 – цементационная потерна; 8 – железобетонная плита; 9 – цементационная завеса

**Экспериментальные исследования колебаний плотины Днестровской ГЭС-1 при проведении экспериментальных взрывов.** Предприятием «Региональный центр геофизических исследований» в рам-

ках темы «Оценка влияния буро-взрывных работ на грунтовые и бетонные сооружения Днестровской ГЭС-1» были выполнены сейсмологические исследования с использованием экспериментальных взрывов. Эти взрывы проводились 18 октября 2013 г в карьере, расположенном на расстоянии от основных сооружений ГЭС примерно в 500 м ниже по течению на левом берегу р. Днестр.

Для регистрации колебаний сооружений использовалась контрольно-измерительная аппаратура (сейсмографы). На ПК8+40 левобережной каменно-земляной плотине расположено 3 пункта регистрации сейсмических наблюдений (ПР1, ПР2, ПР3). На гребне плотины (отметка +127,000 м) находится пункт регистрации ПР1, на берме низового откоса (отметка +99,000 м) расположен пункт регистрации ПР2 и в основании плотины в потерне (отметка +68,000 м) размещен пункт регистрации ПР3.

После проведения регистрации сейсмических воздействий от экспериментальных взрывов получены записи колебаний плотины. Были определены ординаты измеренных акселерограмм для каждого пункта регистрации. При этом в каждом из этих пунктов определялись три составляющие колебаний: для вертикального направления  $Z$ , горизонтального направления север-юг  $NS$  и горизонтального направления восток-запад  $EW$ .

Данные для указанных пунктов регистрации содержат 1024 ординаты измеренных акселерограмм по каждому из трех направлений ( $EW$ ,  $NS$ ,  $Z$ ). Временной интервал наблюдений 0,01 с.

Отметим, что наибольшие по абсолютной величине ускорения (экстремальные ускорения) имеют место в период наблюдений от первой секунды (начало прихода сейсмической волны) до третьей секунды. Далее происходит постепенное затухание колебаний в течение последующих двух секунд.

Анализ полученных акселерограмм позволил сделать вывод о том, что характер колебаний плотины Днестровской ГЭС-1 при экспериментальных взрывах соответствует характеру колебаний плотин из грунтовых материалов при сейсмических воздействиях.

Отметим еще одно обстоятельство. Наибольшую опасность для прочности и устойчивости откосов плотин из грунтовых материалов представляют горизонтальные сейсмические воздействия, перпендикулярные продольной оси плотины. Применительно именно к горизонтальному направлению сейсмических воздействий предложена приведенная выше методика расчетов. Поэтому, для выполнения сравнения результатов расчетов с данными наблюдений необходимо получить

преобразованные экспериментальные акселерограммы для направления, перпендикулярного оси плотины.

Фрагменты преобразованных акселерограмм для рассматриваемых пунктов наблюдения показаны на рис. 3 штрихпунктирными линиями. Эти фрагменты соответствуют участкам акселерограмм с наибольшими амплитудами наблюдаемых ускорений.

**Сравнение расчетных и экспериментальных данных.** Для оценки достоверности изложенной в работах [4, 5] методики расчетов по определению сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов было выполнено сравнение результатов расчета с данными натурных наблюдений за колебаниями каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1 при проведении экспериментальных взрывов.

Расчеты выполнялись для исходной акселерограммы землетрясения для основания сооружения. Ординаты исходной акселерограммы были получены таким образом, чтобы различие между получаемыми значениями расчетных ускорений подошвы плотины минимально отличались от наблюдаемых значений этих ускорений. При этом использовалась программа «Определение сейсмических ускорений в плотине из грунтовых материалов».

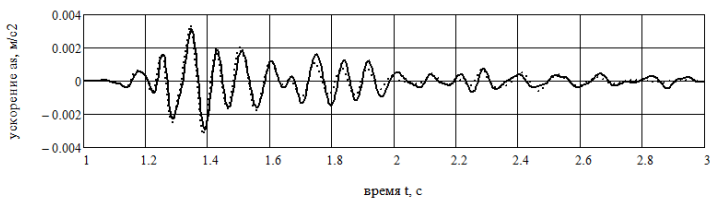
В результате выполнения расчетов с использованием разработанной программы «Определение сейсмических ускорений в плотине из грунтовых материалов» получены расчетные ускорения в местах размещения пунктов регистрации ПР1, ПР2, ПР3. Фрагменты акселерограмм, соответствующих этим ускорениям, показаны на рис. 3 сплошными линиями.

Как видно из рис. 3, полученные в результате расчетов и наблюдаемые наибольшие значения экстремальных ускорений имеют место в зоне гребня плотины, а наименьшие – в зоне подошвы сооружения. Наибольшие значения экстремальных ускорений в зоне бермы плотины находятся между соответствующими значениями на гребне и на подошве плотины. Такой характер распределения экстремальных ускорений является типичным для плотин из грунтовых материалов.

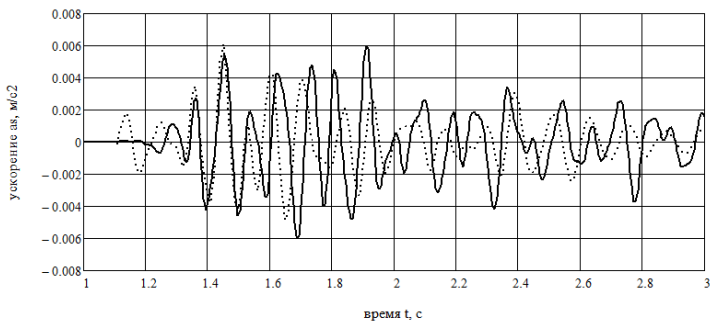
Из сравнения данных, представленных на рис. 3, видно, что характер колебаний плотины по результатам расчетов незначительно отличается от характера колебаний сооружения по данным натурных наблюдений.

В таблице приведены данные о значениях расчетных и наблюдаемых экстремальных ускорениях в пунктах регистрации ПР1, ПР2, ПР3.

а)



б)



в)

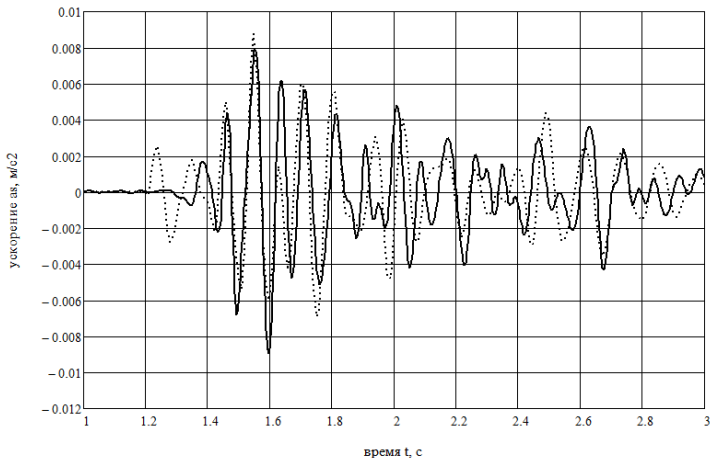


Рис. 3. Фрагменты расчетных и наблюдаемых акселерограмм каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1:  
а – для пункта регистрации ПР3 (подошва плотины);  
б – для пункта регистрации ПР2 (берма на откосе плотины);  
в – для пункта регистрации ПР1 (гребень плотины)

Таблиця  
 Расчетные и наблюдаемые значения экстремальных ускорений  
 в пунктах регистрации

Пункт регистра- ции	Расчетные значения, мкм/с <sup>2</sup>	Наблюдаемые значения, мкм/с <sup>2</sup>	Отклонение, %
ПР3	3150	3372	6,56
ПР2	5931	6141	3,42
ПР1	7885	8772	10,11

Как видно, из этой таблицы максимальное отличие расчетных и наблюдаемых ускорений не превышает 10,11% для гребня плотины и 6,56 % для подошвы плотины.

**Выводы.** Выполнена верификация (проверка соответствия) расчетных данных, полученных в соответствии с предложенной нами методикой, и данных натуральных наблюдений, полученных при проведении экспериментальных взрывов. Сравнение результатов расчетов с данными натуральных наблюдений показало, что максимальное отличие экстремальных ускорений, полученных расчетным путем и при проведении натуральных наблюдений, не превышает 10,11% для гребня плотины и 6,56 % для подошвы плотины.

1. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення / Мінрегіонбуд України. – К. : ДП Укрархбудінформ, 2010. – 37 с.
2. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України / Мінбуд України. – К. : ДП Укрархбудінформ, 2014. – 118 с.
3. ДБН В.2.4-20:2014. Греблі з ґрунтових матеріалів. Основні положення / Мінбуд України. – К. : ДП Укрархбудінформ, 2014. – 124 с.
4. Матвиенко А. А. Методика определения сейсмических ускорений в теле и нескальном основании плотин из грунтовых материалов на основе волновой теории сейсмостойкости / А. А. Матвиенко // Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Технічні науки. – Випуск 2 (62). – Рівне : НУВГП, 2013. – С. 276–284.
5. Вайнберг А. И. Инженерная методика расчета сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов / Вайнберг А. И., Матвиенко А. А. // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – СПб. : ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2014. – Т. 272. – С. 14–21.
6. Вайнберг А. И. Методика определения ординат расчетных сейсмограмм при выполнении расчетов сейсмостойкости гидротехнических сооружений / Вайнберг А. И., Матвиенко А. А. // Научный вестник строительства. – Вып. 65. – Харьков : ХГТУСА, ХОТВ АБУ, 2011. – С. 197–202.

Рецензент: д.т.н., профессор Вайнберг А. Й. (Харьковский национальный университет строительства и архитектуры)

**Matvienko A. A., Senior Engineer (LLC "GIDROTEHПРОЕКТ", Kharkov)**

**COMPARISON OF THE CALCULATED AND OBSERVED SEISMIC ACCELERATION IN A STONE-EARTHEN DAM DNIESTER HPP-1 DURING EXPERIMENTAL EXPLOSIONS**

The article presents the verification calculated data obtained in accordance with the proposed method of determining the seismic accelerations in earth dam and field data obtained during the experimental explosions for rock fill dam of the Dniester HPP-1.

*Keywords:* dams of earth materials, seismic accelerations, experimental explosions, wave theory of earthquake resistance, accelerogram.

---

**Матвієнко А. А., ст. інж. (ТОВ «ГІДРОТЕХПРОЕКТ», м. Харків)**

**ПОРІВНЯННЯ РОЗРАХУНКОВИХ І СПОСТЕРЕЖЕНИХ СЕЙСМІЧНИХ ПРИСКОРЕНЬ У КАМ'ЯНО-ЗЕМЛЯНИХ ГРЕБЕЛЬ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГЕС-1 ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИБУХІВ**

Для кам'яно-земляної греблі Дністровської ГЕС-1 представлена верифікація розрахункових даних, отриманих відповідно до запропонованої методики визначення сейсмічних прискорень в греблях із ґрунтових матеріалів, і даних натурних спостережень, отриманих при проведенні експериментальних вибухів

*Ключові слова:* греблі з ґрунтових матеріалів, сейсмічні прискорення, експериментальні вибухи, хвильова теорія сейсмостійкості, акселерограма.

---