

УДК 627.82.550.34

Сравнение расчетных и наблюдаемых сейсмических ускорений в каменно-земляной плотине Днестровской ГЭС-1 при проведении экспериментальных взрывов

Инж. А. А. Матвиенко¹⁾¹⁾ООО «ГИДРОТЕХПРОЕКТ» (Харьков, Республика Украина)© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. В рамках волновой теории сейсмостойкости разработана методика по определению сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов. При этом учитываются влияние основания и излучение в него сейсмических волн. Методика основана на численном решении динамической задачи методом конечных разностей. На основе разработанной методики составлена компьютерная программа SGD «Определение сейсмических ускорений в плотине из грунтовых материалов», которая позволяет найти значения ординат расчетных эпюр ускорений по высоте плотины для всех моментов времени. В результате можно получить наиболее опасные эпюры ускорений при прямом и обратном сейсмических воздействиях. Приведена верификация (проверка соответствия) расчетных и наблюдаемых сейсмических ускорений для каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1. Наблюдаемые сейсмические ускорения получены при проведении экспериментальных взрывов, расчетные сейсмические ускорения – в соответствии с предложенной методикой определения сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов. Сравнительный анализ результатов расчетов с данными натурных наблюдений показал, что максимальное отличие экстремальных ускорений, полученных расчетным путем и при проведении натурных наблюдений, не превышает 10,11 % для гребня плотины и 6,56 % для ее подошвы. Результаты исследований позволяют рекомендовать разработанную программу для выполнения инженерных расчетов сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов. Применение программы даст возможность определять сейсмические ускорения в плотинах из грунтовых материалов с достаточной степенью достоверности.

Ключевые слова: плотины, грунтовые материалы, сейсмические ускорения, экспериментальные взрывы, волновая теория сейсмостойкости, акселерограмма

Для цитирования: Матвиенко, А. А. Сравнение расчетных и наблюдаемых сейсмических ускорений в каменно-земляной плотине Днестровской ГЭС-1 при проведении экспериментальных взрывов / А. А. Матвиенко // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 2. С. 139–143

Comparison of Calculated and Observed Seismic Accelerations in Composite-Type Rock-Fill Dam of the Dnestrovskaya Hydro-Electric Power Plant during Experimental Explosions

A. A. Matvienko¹⁾¹⁾LLC “GIDROTEKHPROEKT” (Kharkov, Republic of Ukraine)

Abstract. A methodology for determination of seismic accelerations in earth dams has been developed within the framework of seismic resistance wave theory. In this case we take into account an influence of the dam foundation and seismic wave emission into it. The methodology is based on numerical solution of the dynamic problem while using a finite difference method. A software program SGD “Determination of seismic acceleration in the earth dam” has been prepared on the basis of the developed methodology. The program allows to evaluate ordinates of calculation orthographic representations for acceleration throughout the dam height for all time moments. Thus, it is possible to obtain the most dangerous acceleration orthographic representations at direct and reverse seismic actions. The papers presents verification (compliance test) of calculated and observed seismic accelerations for the rock-fill dam of the Dnestrovskaya Hydro-Electric Power Plant No 1. The observed

Адрес для переписки

Матвиенко А. А.
ООО «ГИДРОТЕХПРОЕКТ»
ул. Ромена Роллана, 12,
61058, г. Харьков, Республика Украина
Тел.: +380 57 717-57-41
matvienko_nastya89@mail.ru

Address for correspondence

Matvienko A. A.
LLC “GIDROTEKHPROEKT”
12 Romen Rollan str.,
61058, Kharkov, Republic of Ukraine
Tel.: +380 57 717-57-41
matvienko_nastya89@mail.ru

seismic accelerations have been obtained during experimental explosions. The calculated seismic accelerations have been obtained in accordance with the proposed methodology for determination of seismic accelerations in the earth dams. A comparative analysis of calculation results with the data of field observations has demonstrated that a maximum difference between extreme accelerations obtained by calculation, and during field observations, do not exceed 10.11 % for the dam crest, and 6.56 % for its bottom. The obtained results permit to recommend the developed program for engineering calculations of seismic accelerations in the earth dams. The program application will make it possible to determine seismic acceleration in the earth dam with sufficient reliability.

Keywords: dams, earth materials, seismic accelerations, experimental explosions, wave theory of seismic resistance, accelerometer

Forcitation: Matvienko A. A. (2016) Comparison of Calculated and Observed Seismic Accelerations in Composite-Type Rock-Fill Dam of the Dnestrovskaya Hydro-Electric Power Plant during Experimental Explosions. *Science & Technique*. 15 (2), 139–143 (in Russian)

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 [4, 5] предложена новая методика решения задач по определению сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов на основе наиболее достоверной волновой теории сейсмостойкости. В настоящей статье для каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1 выполнена верификация (проверка соответствия) расчетных данных, полученных с помощью предложенной методики определения сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов, и данных натурных наблюдений при проведении экспериментальных взрывов.

Описание методики

Изложенная в [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 основа-

ния (динамический модуль сдвига G_0 и скорость распространения поперечных волн v_{s0}). 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 [6].

В результате решения указанной задачи во всех расчетных узлах i по высоте плотины в 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 трансформации исходной сейсмограммы землетрясения вследствие наличия плотины и излучение сейсмических волн в основание. На основе данной методики составлена компьютерная программа SGD «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 сейсмических воздействиях. Эта программа широко используется в отделе расчетного обоснования сооружений ООО «Гидротехпроект» при выполнении расчетов по обоснованию сейсмостойкости проектируемых плотин из грунтовых материалов.

Конструкция каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1

В настоящей работе исследовали 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).

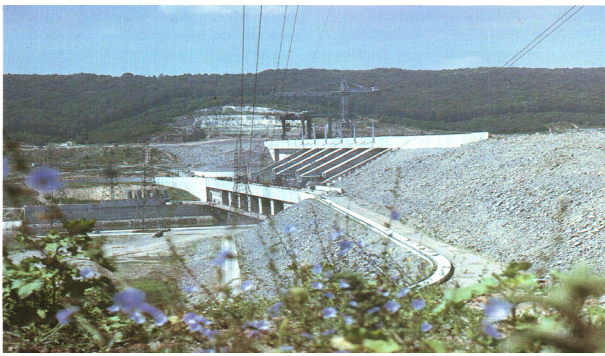


Рис. 1. Днестровская ГЭС-1.

Вид со стороны левого бережной плотины

Fig. 1. Dnestrovskaya Hydro-Electric Power Plant No 1.
View from the side of left-bank dam

Левобережная плотина Днестровской ГЭС-1 имеет типичную для каменно-земляных плотин конструкцию. Она 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.

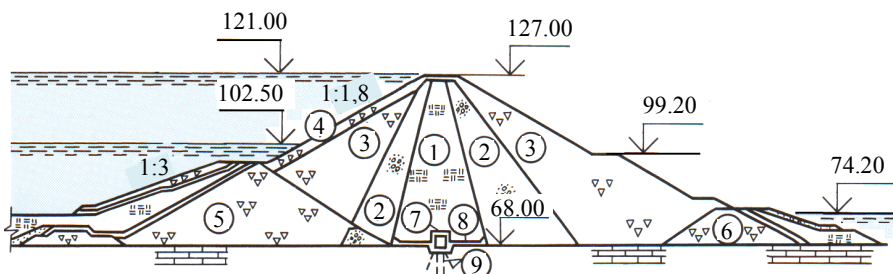


Рис. 2. Конструкция левобережной каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1:

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

Fig. 2. Design of left-bank rock-fill dam – Dnestrovskaya Hydro-Electric Power Plant No 1:
1 – dam core; 2 – transitional zones; 3 – dam toes; 4 – rock protective layer; 5 – upper toe; 6 – downstream toe; 7 – cement postern; 8 – reinforced concrete plate; 9 – cement-grout curtain

Исследования колебаний плотины Днестровской ГЭС-1

Предприятием «Региональный центр геофизических исследований» в рамках темы «Оценка влияния буровзрывных работ на грунтовые и бетонные сооружения Днестровской ГЭС-1» выполнены сейсмологические исследования с использованием экспериментальных взрывов.

Эти взрывы проводились 18 октября 2013 г. в карьере, расположенном на расстоянии от основных сооружений ГЭС примерно 500 м ниже по течению на левом берегу р. Днестр.

Для регистрации колебаний сооружений использовали контрольно-измерительную аппаратуру (сейсмографы). На ПК8+40 левобережной каменно-земляной плотины расположены три пункта регистрации сейсмических наблюдений (ПР1, ПР2, ПР3). На гребне плотины (отметка +127.000 м) находится ПР1, на берме низового откоса (+99.000 м) расположен пункт регистрации ПР2 и в основании плотины в потерне (+68.000 м) – ПР3.

После проведения регистрации сейсмических воздействий от экспериментальных взрывов получены записи колебаний плотины. Определены ординаты измеренных акселерограмм для каждого пункта регистрации. При этом в каждом из этих пунктов определяли три составляющие колебаний: для вертикального направления Z; горизонтальных направлений север – юг NS и 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.

Наибольшие по абсолютной величине ускорения (экстремальные) имеют место в период наблюдений от первой (начало прихода сейсмической волны) до третьей секунды. Далее происходит постепенное затухание колебаний в течение последующих двух секунд. Анализ полученных акселерограмм позволил сделать вывод, 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 [4, 5] методики расчетов по определению сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов выполнено сравнение результатов расчета с данными натурных наблюдений за колебаниями каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1 при проведении экспери-

ментальных взрывов. Расчеты производились для исходной акселерограммы землетрясения для основания сооружения. Ординаты исходной акселерограммы выполнены таким образом, чтобы различие между получаемыми значения расчетных ускорений подошвы плотины минимально отличались от наблюдаемых значений этих ускорений. При этом использовалась программа SGD «Определение сейсмических ускорений в плотине из грунтовых материалов». В результате выполнения расчетов с использованием данной программы получены расчетные ускорения в местах размещения пунктов регистрации ПР1, ПР2, ПР3. Фрагменты акселерограмм, соответствующих этим ускорениям, показаны на рис. 3 сплошными линиями.

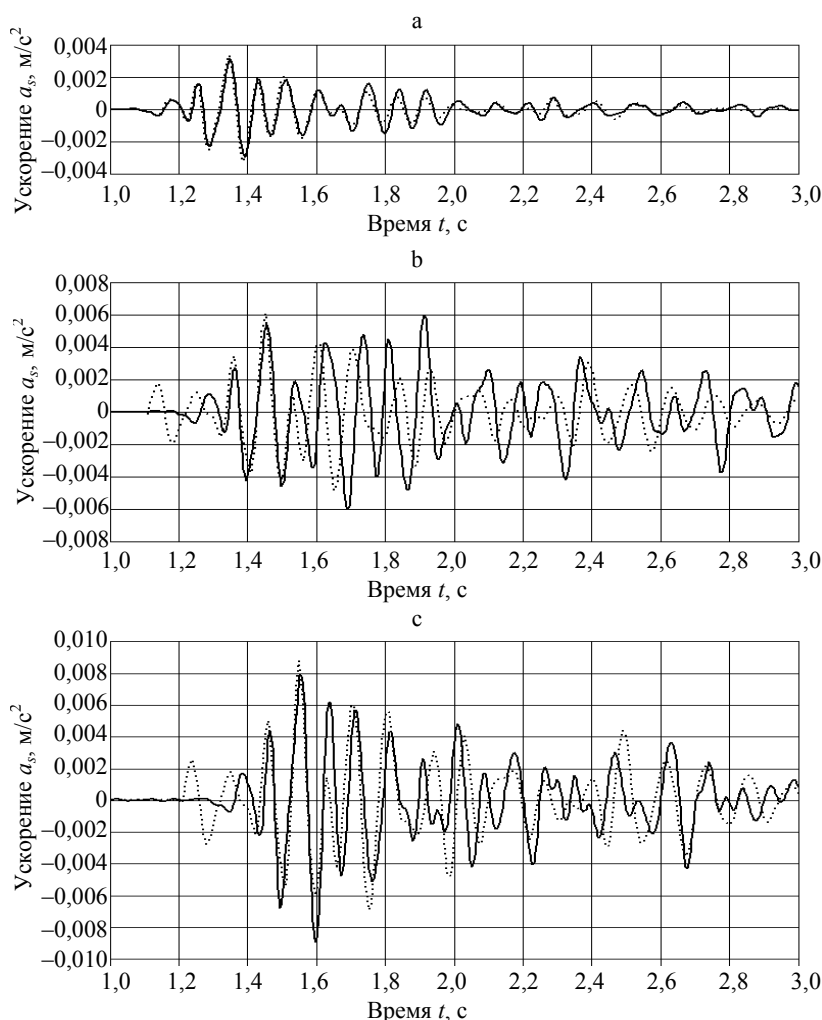


Рис. 3. Фрагменты расчетных и наблюдаемых акселерограмм каменно-земляной плотины Днестровской ГЭС-1 для пункта регистрации: а – ПР3 (подошва плотины); б – ПР2 (берма на откосе плотины); с – ПР1 (гребень плотины)

Fig. 3. Fragments of calculated and observed accelerograms of rock-fill dam – Dnestrovskaya Hydro-Electric Power Plant No 1 for registration point: а – ПР3 (dam bottom); б – ПР2 (berm at dam slope); с – ПР1 (dam crest)

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 ее гребне и подошве. 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.

Данные о значениях расчетных и наблюдаемых экстремальных ускорениях в пунктах регистрации ПР1, ПР2, ПР3 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные и наблюдаемые значения экстремальных ускорений в пунктах регистрации
Calculated and observed values of extreme accelerations in registration points

Пункт регистрации	Расчетное значение, мкм/с ²	Наблюдаемое значение, мкм/с ²	Отклонение, %
ПР3	3150	3372	6,56
ПР2	5931	6141	3,42
ПР1	7885	8772	10,11

Как видно из табл. 1, максимальное отличие расчетных и наблюдаемых ускорений не превышает 10,11 % для гребня плотины и 6,56 % для ее подошвы.

ВЫВОДЫ

1. Выполнена верификация (проверка соответствия) расчетных данных, полученных с помощью предложенной методики, и данных натурных наблюдений при проведении экспериментальных взрывов.

2. Сравнение результатов расчетов с данными натурных наблюдений показало, что максимальное отличие экстремальных ускорений, полученных расчетным путем и при проведении натурных наблюдений, не превышает 10,11 % для гребня плотины и 6,56 % для ее подошвы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гідротехнічні споруди. Основні положення: ДБН В.2.4-3:2010. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 37 с.
2. Будівництво у сейсмічних районах України: ДБН В.1.1-12:2014. Київ: Мінбуд України, 2014. 118 с.
3. Греблі з ґрунтових матеріалів. Основні положення: ДБН В.2.4-20:2014. Київ: Мінбуд України, 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 // Вестник Национального университета водного хозяйства и природопользования. Технические науки. 2013. Вып. 2 (62). С. 276–284.
5. Вайнберг, А. И. Инженерная методика расчета сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов / А. И. Вайнберг, А. А. Матвиенко // Известия ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева. 2014. Т. 272. С. 14–21.
6. Вайнберг, А. И. Методика определения ординат расчетных сейсмограмм при выполнении расчетов сейсмостойкости гидротехнических сооружений / А. И. Вайнберг, А. А. Матвиенко // Научный вестник строительства. 2011. Вып. 65. С. 197–202.

Поступила 03.09.2015

Подписана в печать 11.11.2015

Опубликована онлайн 30.03.2016

REFERENCES

1. DBN V.2.4-3: 2010. (2010) Hydraulic Structures. Fundamental Principles. Kiev, Minregionbud Ukraine. 37 (in Ukrainian).
2. DBN V.1.1-12: 2014. (2014) Building in Seismic Regions of Ukraine. Kiev, Minbud Ukraine. 118 (in Ukrainian).
3. DBN V.2.4-20: 2014. (2014) Earth Dams. Fundamental Principles. Kiev, Minbud Ukraine. 124 (in Ukrainian).
4. Matvienko A. A. (2013) Methodology for Determination of Seismic Accelerations in the Body and Non-Rock Foundation of Earth Dam on the Basis of Wave Theory of Seismic Resistance *Vestnik Natsionalnogo Universiteta Vodnogo Khozyaystva i Prirodopolzovaniya. Sbornik Nauchnykh Trudov. Tekhnicheskie Nauki* [Bulletin of National University for Water and Nature Management. Technical Sciences], 62 (2), 276–284 (in Russian).
5. Vaynberg A. I., Matvienko A. A. (2014) Engineering Calculation Methodology for Seismic Accelerations in Earth Dams. *Vserossiyskiy Nauchno-Issledovatel'skiy Institut Gidrotehniki imeni B. E. Vedeneeva* [Proceedings of All-Russian Scientific Research Hydrotechnical Institute named after B. E. Vedenev (VNIIG)], 272, 14–21 (in Russian).
6. Vaynberg A. I., Matvienko A. A. (2011) Methodology for Determination of Calculated Seismogram Ordinates While Calculating Seismic Stability of Hydraulic Structures. *Naukovyy Visnyk Budivnytstva* [Scientific Bulletin of Construction], (65), 197–202 (in Russian).

Received: 03.09.2015

Accepted: 11.11.2015

Published online: 30.03.2016