

УДК 627.82. 550.34

Матвиенко А. А., инженер ПАО «Укргідропроєкт», аспирант
(Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков)

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ УСКОРЕНИЙ В ТЕЛЕ И НЕСКАЛЬНОМ ОСНОВАНИИ ПЛОТИН ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОЙ ТЕОРИИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

В статье представлена существующая методика определения сейсмических ускорений в теле и нескальном основании плотин из грунтовых материалов на основе волновой теории сейсмостойкости. На основе данной методики была создана компьютерная программа.

Ключевые слова: плотины из грунтовых материалов, сейсмическое воздействие, волновая теория сейсмостойкости, акселерограмма.

Анализ существующих методов расчета существующих методов расчета сейсмостойкости сооружений. Существующие методики расчетов сейсмостойкости сооружений различаются как в части закладываемой в основу расчетов теории о работе сооружения при землетрясении, о его взаимодействии с основанием, так и в части используемых исходных данных, характеризующих параметры ожидаемого землетрясения. Оценка характеристик и устойчивости грунтовых плотин во время землетрясений требует динамического анализа для определения ускорений, динамических напряжений и деформаций, вызванными сейсмическими силами в плотине.

Наиболее достоверная информация о напряженно-деформированном состоянии плотин из грунтовых материалов при сейсмических воздействиях может быть получена в рамках волновой теории. При этом следует рассматривать систему “плотина из грунтовых материалов – основание – водохранилище”.

В качестве характеристики расчетных землетрясений обычно используются либо трехкомпонентные акселерограммы, либо соответствующие сейсмограммы.

Изложенный подход, под названием “прямой динамический метод”, регламентируется действующими нормами проектирования для расчетов сейсмостойкости гидротехнических сооружений I и II клас-

сов на окончательных этапах проектирования. Для сооружений III и IV классов на окончательных этапах проектирования, а также для сооружений I и II классов на предварительных этапах проектирования допускается использование линейно-спектрального метода, который позволяет определить эпюры сейсмических ускорений по высоте [1-3].

Выполнение этих расчетов при решении пространственных и даже плоских задач является весьма сложным и трудоемким процессом.

Настоящая работа посвящена разработке инженерного метода расчета по определению сейсмических ускорений в теле и нескальном основании плотин в рамках волновой теории.

Основные положения предлагаемого метода расчета сейсмостойкости плотин из грунтовых материалов. Предлагаемый метод расчета сейсмостойкости плотин из грунтовых материалов основан на следующих предпосылках, которые обычно используются при выполнении таких расчетов.

1. Рассматривается плоская упругая динамическая задача.
2. Сейсмическое воздействие задается в виде акселерограммы или сейсмограммы для района размещения плотины до ее возведения. Сейсмограмма может быть получена интегрированием дважды акселерограммы. Такое интегрирование может быть осуществлено численным методом. Была разработана методика получения ординат сейсмограммы по известным ординатам акселерограммы [4].
3. Плотина из грунтовых материалов рассматривается как упругий неоднородный сдвиговой клин, расположенный на упругом основании.
4. Влиянием взаимодействия плотины с водой водохранилища пренебрегается.
5. Излучение сейсмических волн в основании учитывается на контакте плотины и основания.

На основе этих предпосылок получено дифференциальное уравнение динамического равновесия для решения задач о напряженно-деформированном состоянии плотин из грунтовых материалов [5].

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

где u – перемещения любой точки стержня;

V_s – скорость распространения поперечных волн;

B – ширина поперечного сечения сдвигового клина;

G – динамический модуль сдвига.

Интегрирование уравнения (1) необходимо выполнять при соответ-

ствующих начальных и граничных условиях.

Применительно к плотинам из грунтовых материалов в качестве начальных условий целесообразно принять

$$u(y, t = 0) = 0. \quad (2)$$

Граничное условие на гребне плотины может быть принято с учетом того, что касательные напряжения и, следовательно, деформации сдвига на гребне равны нулю, т.е. следующим образом

$$Q(y = H, t) = \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=H} = 0, \quad (3)$$

где Q – поперечная сила; H – высота плотины.

Горизонтальные перемещения границы основания (и, следовательно, подошвы плотины), вызванные сейсмическими воздействиями, после возведения плотины в общем случае отличаются от заданной сейсмограммы. Это связано с взаимодействием плотины с основанием, что должно быть учтено при формулировании граничного условия на нижней границе моделирующего плотину сдвигового клина.

Влияние основания на сейсмические колебания сооружения имеют несколько аспектов. Во-первых, через основание передается сейсмическое воздействие на сооружение. Во-вторых, плотина, в свою очередь, оказывает влияние на движение грунта основания. В-третьих, при землетрясении сейсмические волны отражаются от сооружения и рассеиваются в основании, унося при этом определенное количество энергии, т.е. в точках контакта плотины и основания необходимо учесть излучение сейсмических волн в основание. Поэтому на контакте плотины с основанием рассматривается следующее граничное условие, учитывающее излучение сейсмических волн в основание [6].

Конечно-разностное решение задачи сейсмостойкости плотины из грунтовых материалов. Интегрирование уравнения (1) выполняется методом конечных разностей с использованием трехслойной разностной схемы по времени.

Наметим в пределах высоты плотины H узлы пространственной одномерной регулярной сетки i ($i = 0, 1, 2, \dots, nd$) с шагом Δy (nd – число шагов пространственной сетки).

Расчетный период от начального момента времени $t = 0$ до конечного момента времени $t = t_k$ представим в виде временной одномерной регулярной сетки t ($t = 0 \cdot \Delta t, 1 \cdot \Delta t, 2 \cdot \Delta t, \dots, n_t \cdot \Delta t$) с шагом Δt (n_t – число шагов временной сетки). Таким образом, рассматривается пространственно-временная сетка с узлами i и t .

Для каждого из узлов i пространственной сетки для любого момента времени t составлены конечно-разностные аналоги уравнения (1):

для любого внутреннего узла i

$$u_{i,t+\Delta t} = -u_{i,t-\Delta t} + \left[1 + \frac{\Delta y}{2} \cdot \left(\frac{1}{B} \cdot \frac{dB}{dy} \right)_i \right] \cdot u_{i+\Delta y,t} + \left[1 - \frac{\Delta y}{2} \cdot \left(\frac{1}{B} \cdot \frac{dB}{dy} \right)_i \right] \cdot u_{i-\Delta y,t} \quad (4)$$

для узла на гребне плотины $i = nd$

$$u_{nd,t+\Delta t} = -u_{nd,t-\Delta t} + 2 \cdot u_{nd-\Delta y,t} \quad (5)$$

для узла на подошве плотины $i = 0$

$$u_{0,t+\Delta t} = -\frac{G_d \cdot dy_o - G_{od} \cdot dy}{G_d \cdot dy_o + G_{od} \cdot dy} \cdot u_{o,t-\Delta t} + \frac{2 \cdot G_d \cdot dy_o}{G_d \cdot dy_o + G_{od} \cdot dy} \cdot u_{1,t} + \frac{2 \cdot G_{od} \cdot dy}{G_d \cdot dy_o + G_{od} \cdot dy} \cdot (u_{s,t+\Delta t} - u_{s,t-\Delta t}) \quad (6)$$

Используя выражения (4) – (6), могут быть получены значения перемещений всех узлов плотины в любой момент времени.

Для узлов в пределах основания для любого момента времени t составлены конечно-разностные аналоги уравнения (1):

для узла ниже подошвы плотины $i = nd+1$

$$u_{nd-1,t} = 0.5 \cdot (u_{s,t+\Delta t} - u_{s,t-\Delta t}) - u_{nd,t-\Delta t} \quad (7)$$

для любого узла $i > nd+1$

$$u_{i,t} = u_{i-1,t+\Delta t} + u_{i-1,t-\Delta t} - u_{i-2,t} \quad (8)$$

Граничное условие на контакте плотины с основанием должно быть записано следующим образом [6]:

$$u_t = u_{t-\Delta t} \quad (9)$$

В результате решения задачи по предложенному методу в любой момент времени могут быть получены эпюры сейсмических ускорений в теле плотины и ее основании. Эти эпюры сейсмических ускорений в дальнейшем используются для оценки устойчивости откосов плотины.

В рамках программного комплекса MathCAD в ПАО “Укргідропроект” была разработана компьютерная программа, реализующая предложенную методику определения сейсмических ускорений в плотине из грунтовых материалов, расположенной на нескальном основании, по волновой теории.

Для выполнения расчетов необходимы следующие исходные данные:

1. Высота плотины H , м.
2. Значения ширины профиля плотины в горизонтальных сечениях, проходящих через 0.1 высоты плотины B , м.
3. Осредненные значения плотностей грунтов тела ρ , кг/м³, и основания плотины ρ_o , кг/м³.
4. Осредненные значения скоростей распространения поперечных волн в грунте тела V_{ds} , м/с, и основания плотины V_{os} , м/с.
5. Число ординат расчетной акселерограммы n_s .
6. Шаг по времени расчетной акселерограммы Δt_s , с.

С использованием разработанной программы были выполнены необходимые для оценки сейсмостойкости расчеты по определению сейсмических ускорений в ряде проектируемых в настоящее время в ПАО «Укргідропроект» плотин из грунтовых материалов, расположенных в сейсмически опасных районах.

Пример расчета. Результаты расчетов по определению сейсмических ускорений в теле дамбы верхнего водоема Днестровской ГАЭС и ее основании служат примером. Сечение дамбы показано на рисунке 1.

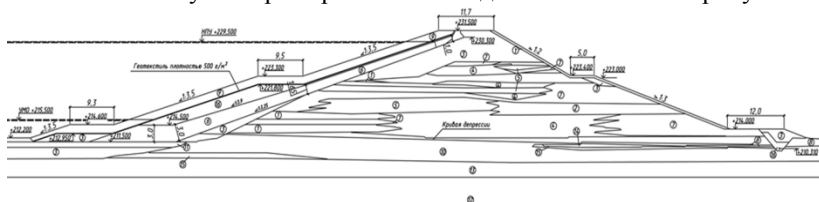


Рис. 1. Поперечное сечение дамбы верхнего водоема Днестровской ГАЭС

В качестве сейсмического воздействия использовалась расчетная акселерограмма для МРЗ в данной области. В соответствии с этой акселерограммой максимальная амплитуда горизонтального ускорения для МРЗ составляет 0,1-g, что соответствует средней интенсивности 7 баллов по шкале MSK-64.

Результаты расчетов по определению сейсмических ускорений в теле дамбы верхнего водоема Днестровской ГАЭС представлены на рисунках 2 – 4.

Следует отметить, что из всей совокупности эпюр сейсмических ускорений, получаемых в результате расчетов, необходимо рассматривать наименее благоприятные с точки зрения устойчивости откосов плотины. Для оценки местной устойчивости откосов плотины вблизи гребня целесообразно рассматривать эпюры сейсмического ускорения,

имеющие максимальные ординаты на отметке гребня плотины. Для выполнения расчетов общей устойчивости откосов плотины следует рассматривать эпюры ускорений, имеющие максимальную площадь.

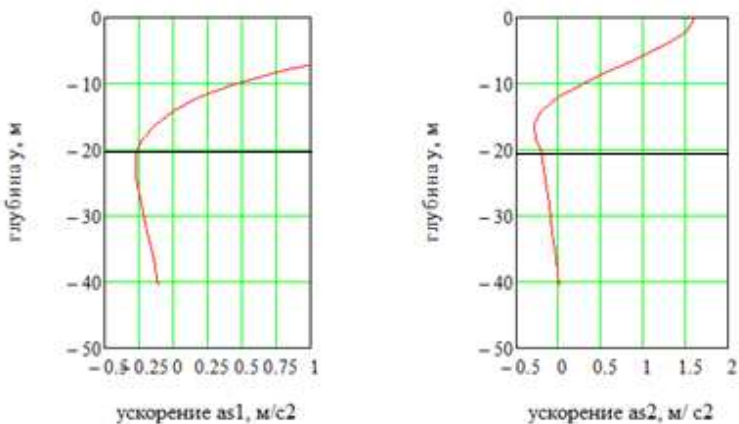


Рис. 2. Эпюры расчетных ускорений для момента времени, соответствующего максимальному ускорению гребня плотины при прямом (слева) и обратном сейсме (справа)

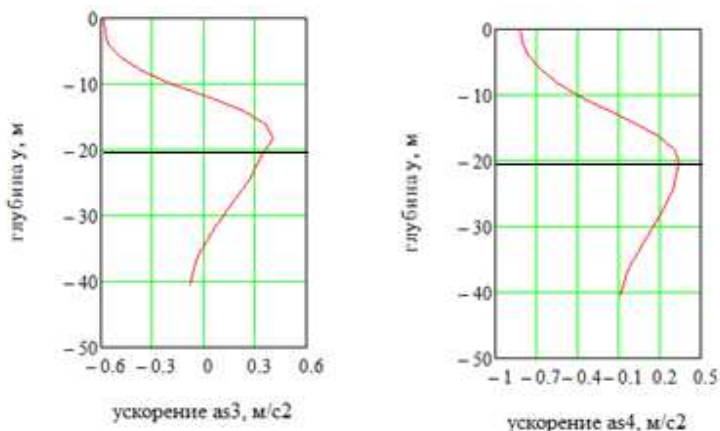


Рис. 3. Эпюры расчетных ускорений для момента времени, соответствующего максимальному ускорению подошвы плотины при прямом (слева) и обратном сейсме (справа)

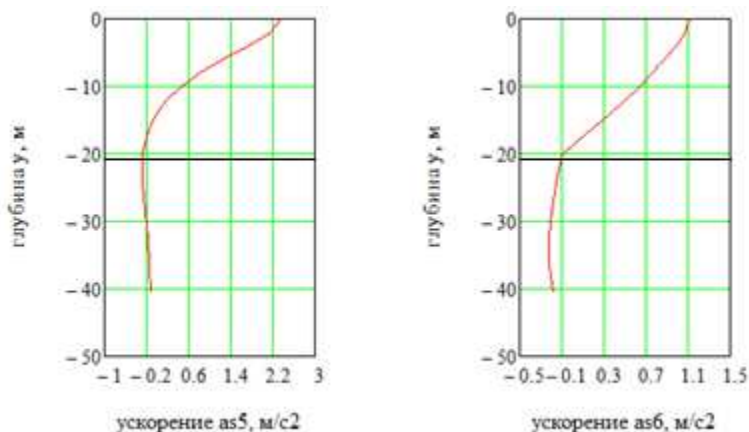


Рис. 4. Епюри расчетных ускорений для момента времени, соответствующего максимальной площади эпюры ускорений при прямом (слева) и обратном сейсме (справа)

Выводы. Разработана методика определения сейсмических ускорений в плотинах из грунтовых материалов на нескальном основании. В рамках программного комплекса MathCAD разработана компьютерная программа, позволяющая получить значения ординат расчетных эпюр ускорений по высоте плотины для моментов времени, соответствующих наиболее опасным эпюрам ускорений при прямом и обратном сейсме. Полученные эпюры сейсмических ускорений в дальнейшем используются для расчетов напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости откосов дамбы.

1. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення / Мінрегіонбуд України. – К. : ДП Укрархбудінформ, 2010. – 37 с. 2. ДБН В.1.1-12:2006. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво в сейсмічних районах України / Мінбуд України. – К. : ДП Укрархбудінформ, 2006. – 84 с. 3. СНиП 2.06.05-84*. Плотини из грунтовых материалов. / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 68 с. 4. Вайнберг А. И., Матвиенко А. А. Методика определения ординат расчетных сейсмограмм при выполнении расчетов сейсмостойкости гидротехнических сооружений // Науковий вісник будівництва. Вип. 65. – Харків : ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2011. 5. Вайнберг А. И., Матвиенко А. А. Дифференциальное уравнение динамического равновесия для решения задач о напряженно-деформированном состоянии плотин из грунтовых материалов при сейсмических воздействиях // Науковий вісник будівництва. – Вип. 64. – Харків : ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2011. – С. 68–74. 6. Сеймов В. М., Островерх Б. Н.,

Ермоленко А. И. Динамика и сейсмостойкость гидротехнических сооружений. – К. : Наук. думка, 1983. – 320 с.

Рецензент: д.т.н., професор Рябенко О. А. (НУВГП)

Matvienko A. A., Engineer PJSC "Ukrhydroprojekt", Post-graduate Student (Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv)

METHOD OF DETERMINING SEISMIC ACCELERATION IN THE BODY AND NOROCK BASE OF EARTH DAM BASED ON THE WAVE THEORY OF EARTHQUAKE RESISTANCE

The article describes a method for determining the existing seismic accelerations in body and norock base of earth dam based on the wave theory of earthquake resistance. On the basis of this method was made a computer program.

Key words: dams of earth materials, earthquake impact, wave theory of earthquake resistance, accelerogram.

Матвієнко А. А., інженер ПАТ «Укргідропроект», аспірант (Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків)

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ СЕЙСМІЧНОГО ПРИСКОРЕННЯ В ТІЛІ І НЕСКЕЛЬНІЙ ОСНОВІ ГРЕБЛІ З ГРУНТОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ХВИЛЬОВОЇ ТЕОРІЇ СЕЙСМОСТІЙКОСТІ

У статті представлена існуюча методика визначення сейсмічних прискорень в тілі і нескельній основі гребель із ґрунтових матеріалів на основі хвильової теорії сейсмостійкості. На основі даної методики була створена комп'ютерна програма.

Ключові слова: греблі з ґрунтових матеріалів, сейсмічна дія, хвильова теорія сейсмостійкості, акселерограма.
