

Г. С. СЕЛЕЗНЕВ, Р. С. ШУСЕР

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛОТИН ИЗ МЕСТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работе проводятся результаты экспериментального изучения динамических свойств трех плотин из местных материалов, расположенных на территории Грузинской ССР.

Накопление фактического материала о поведении гидротехнических сооружений во время землетрясений, а также их динамических характеристик в процессе эксплуатации является одним из важных направлений в области исследований сейсмостойкости сооружений. В частности, приобретает актуальное значение изучение динамических свойств плотин из местных материалов, возводимых в сейсмоактивных районах [1]. В связи с этим группой сотрудников Института сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Таджикской ССР в составе Г. С. Селезнева, Р. С. Шусера и Г. П. Герасимова под руководством Ш. Г. Напетваридзе проведены исследования динамических свойств плотин, расположенных в Грузинской ССР.

Исследования были проведены в связи с необходимостью экспериментального изучения сейсмостойкости проектируемой каменно-набросной плотины Нурекской ГЭС, которая должна быть возведена в Таджикской ССР в условиях VIII-балльной сейсмичности района строительства.

Важным параметром моделирования является динамическая жесткость сооружения, так как от ее величины существенно зависит характер поведения сооружения при сейсмическом воздействии. Однако на сегодня вопрос определения динамической жесткости плотин из местных материалов решается приближенно, так как весьма ограничен экспериментально полученный материал в практике эксплуатации подобного рода плотин.

Экспериментальным исследованиям были подвергнуты следующие плотины: Сиони, Храм-I и Храм-II, построенные в Грузинской ССР. При этом ставились следующие задачи: 1) определение периода собственных колебаний плотин из местных материалов различных конструкций и уточнение формул, принятых в практике проектирования для вычисления периода; 2) установление в измеряемых пределах зависимости изменения интенсивности колебания плотин по высоте; 3) выявление характера колебаний гребня плотин в поперечном направлении; 4) определение логарифмического декремента затухания колебаний плотин; 5) определение характера колебания гребня упругого суглинистого ядра.

Ниже приводим описание исследованных плотин.

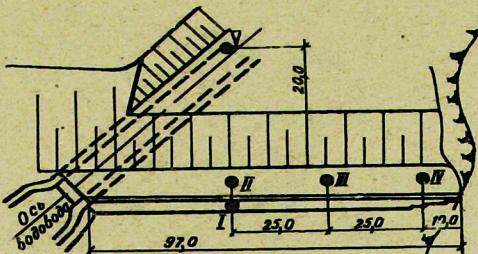
Плотина Храм-II выполнена в виде земляной насыпи с вертикальным железобетонным экраном (фиг. 1 и 2). Высота плотины 8 м, длина по гребню 97 м и заложение низового откоса — 1 : 2. Материалом насыпи являются аллювиальные отложения, полученные из полезной выемки. Железобетонный экран выполнен в виде подпорной стенки толщиной от 0,75 до 2,20 м и заглублен на 6,1 м до коренной породы. Материалами экрана являются бетон марки «150» и ар-

матура Ст. 3. Основанием плотины являются трещиноватые граниты большой мощности. Во время исследований водохранилище не было заполнено.

Плотина Храм-І каменно-набросная с металлическим экраном (фиг. 3 и 4). Высота плотины 31 м, длина по гребню 115 м, ширина 5,7 м. По верховому откосу с заложением 1:1,35 устроен экран из металлических листов толщиной 8 мм, который покоятся на подготовке из железобетонных плит толщиной 50 см.

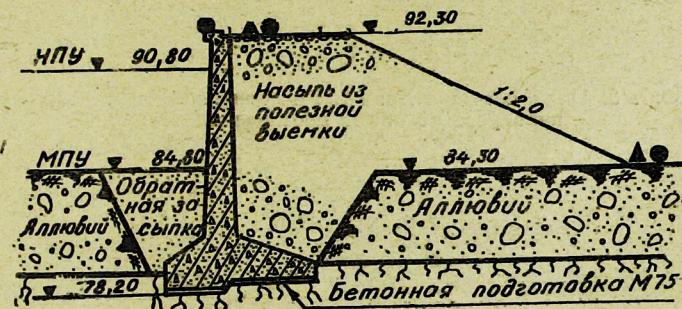
Заложение низового откоса 1:1,4. Плотина расположена в узком скалистом каньоне. Основанием плотины являются андезито-базальты, а борта каньона сложены из базальтов, аллювиальные и деллювиальные отложения мощностью до 2,5 в процессе строительства были сняты. Во время эксперимента уровень воды в водохранилище был на отметке 1498 м.

Плотина Сиони галечно-гравелистая, насыпная, с центральным суглинистым ядром (фиг. 5 и 6). Высота плотины 77 м (по проекту), длина по гребню 740 м. Основная часть плотины длиной 440 м, расположенная у правого борта и перекрывающая глубокий каньон, возведена на высоту 73 м. В этой части плотины ширина по гребню составляет 15 м, толщина ядра изменяется от 5 до 35 м. Крутизна низового откоса изменяется от 1:2,5 до 1:3,5 к подошве плотины; верхового — от 1:2,75 до 1:4. Кроме того, верховой от-



Фиг. 1. План плотины Храм-ІІ. Расположение измерительных приборов:

- — сейсмограф ВЭГИК горизонтальный поперек гребня;
- I, II, III, IV, V — номера точек расположения приборов.



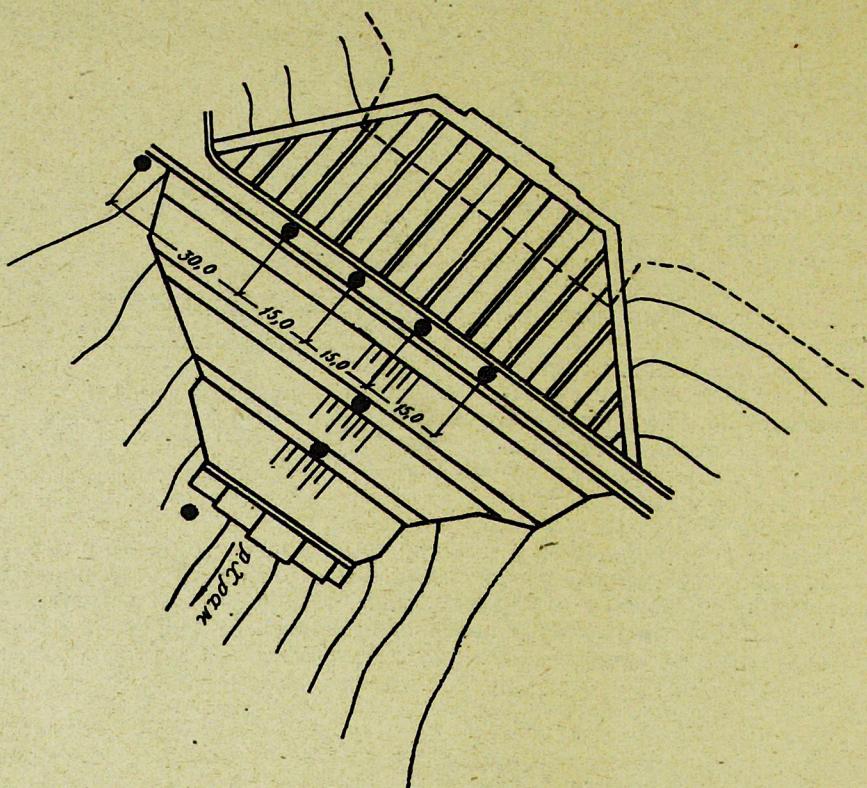
Фиг. 2. Разрез плотины Храм-ІІ. Расположение измерительных приборов:

- — сейсмограф ВЭГИК горизонтальный поперек гребня;
- ▲ — сейсмограф ВЭГИК горизонтальный вдоль гребня.

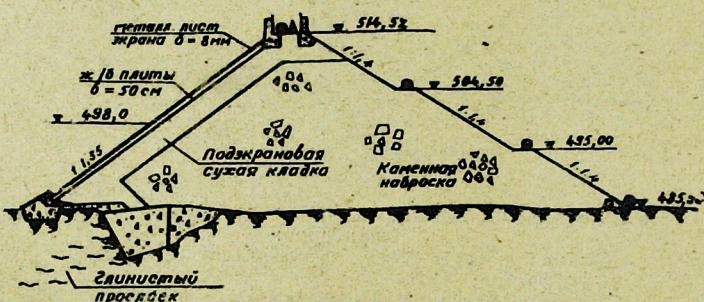
кос имеет одежду в виде слоя монолитного бетона толщиной порядка 1 м. Основанием плотины являются конгломераты с прослойками песча-

ников и глин. Плотина находилась в процессе строительства, водохранилище не было заполнено.

В качестве источников колебаний были использованы природные и искусственные микросейсмы (прохождение груженых автомашин, рабо-

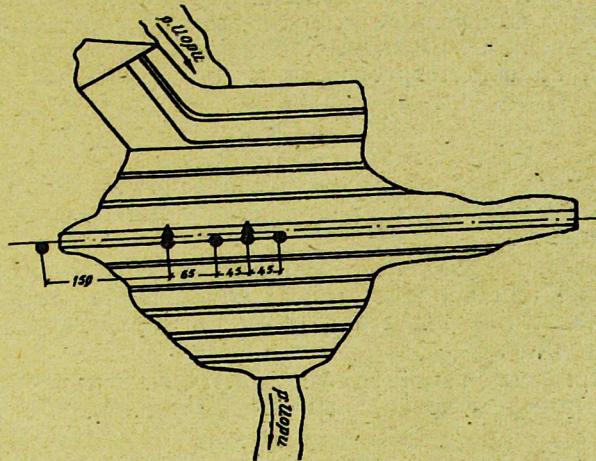


Фиг. 3. План плотины Храм-І. Расположение измерительных приборов. Условные обозначения те же.



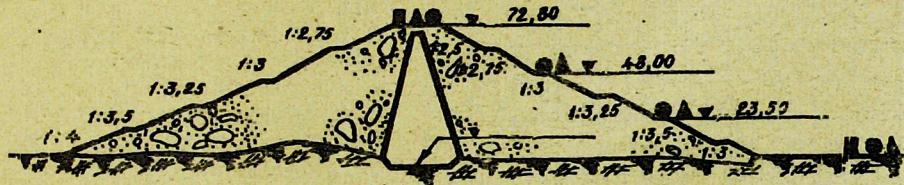
Фиг. 4. Разрез плотины Храм-І. Расположение измерительных приборов. Условные обозначения те же.

та тракторов, а также удары падающих камней с гребня плотины на бермы). Учитывая, что при этом возникали относительно слабые колебания, была выбрана соответствующая аппаратура, а именно: сейсмографы ВЭГИК с гальванометрами со следующими постоянными: $T_1=2$ сек.; $T_2=0,068$ сек.; $D_1=0,6$; $D_2=3,8$; $\sigma^2=0,3$. Регистрация колебаний велась осциллографом со скоростью развертки около 40 мм/сек. Таким образом, аппаратура позволяла записывать колебания с постоянным увеличением примерно в 14 000 раз на диапазоне периодов от



Фиг. 5. План плотины Сиони. Расположение измерительных приборов:
 ● — сейсмограф ВЭГИК горизонтальный поперек оси на низовой призме;
 ▲ — сейсмограф ВЭГИК горизонтальный поперек оси на суглинистом ядре.

0,03 до 0,4 сек. Одновременно регистрировать колебания в 5 точках. С помощью аппаратуры, размещенной в различных точках сооружения в плане и по высоте, был получен ряд сейсмограмм, на которых записывались поперечные, продольные и вертикальные составляющие колебания тела плотины с одновременной записью колебаний грунта основания. Расположение приборов показано на фиг. 1—6.



Фиг. 6. Разрез плотины Сиони. Расположение измерительных приборов:
 ● — сейсмограф ВЭГИК горизонтальный поперек гребня;
 ▲ — сейсмограф ВЭГИК горизонтальный вдоль гребня;
 ■ — сейсмограф ВЭГИК вертикальный.

Обработка сейсмограмм проводилась по следующей методике:

1. В случае, если запись представляла собой регистрацию более или менее установившегося процесса (это можно было заметить по характе-

ру записи), для обработки выбирались отрезки сейсмограммы длиной в 10 см в начале каждого 0,5 м сейсмограммы и на этом участке производился сплошной промер амплитуд и соответствующих им периодов колебаний для каждого канала в отдельности. Затем результаты обобщались на всю сейсмограмму.

2. В случае, если запись представляла собой регистрацию неустановившегося процесса колебаний исследуемой точки объекта, сейсмограмма подвергалась сплошному промеру от начала до конца.

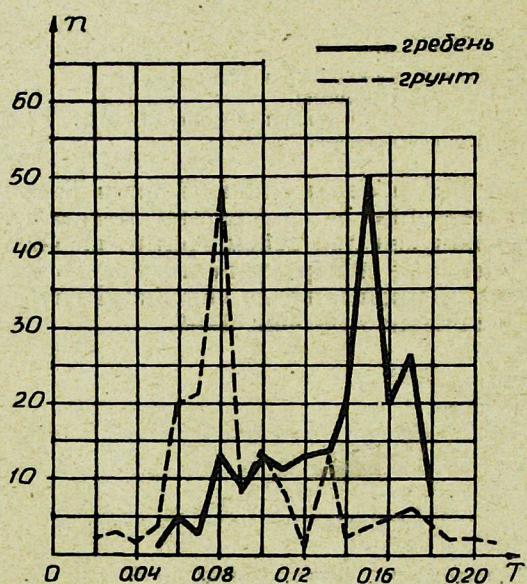
В обоих случаях по результатам измерений проводилась статистическая обработка с целью определения периода собственных колебаний сооружения, который, по-видимому, близок к периоду, наиболее часто встречающемуся на сейсмограмме, для чего строилась следующая зависимость:

$$n = f(T),$$

где n —число одинаковых периодов T , встречающихся в течение всего интервала времени измерений колебаний сооружения в различных точках.

Эта зависимость, названная нами графиком спектров колебаний сооружения, даже при воздействии на сооружение только микросейм, имеет вид с ярко выраженным пиками на определенных для данного сооружения периодах.

На фиг. 7 приведен такой график поперечных колебаний для плотины Храм-II, на котором четко выражены два периода $T_1=0,14$ сек. и $T_2=0,09$ сек.



Фиг. 7. График $n=f(T)$ для поперечных колебаний.

сведены в табл. 1. Для всех исследованных плотин удалось подсчитать логарифмические декременты затухания колебаний, которые приведены в этой же таблице.

При колебаниях плотины в продольном направлении (фиг. 8), наиболее выражен только один период $T=0,15$ сек. Причем в этом случае картина колебаний должна быть ясной, так как явно выраженный пик может быть объяснен наличием чисто сдвиговых колебаний плотины в этом направлении, в то время как в поперечном направлении к ним добавляются, в какой-то степени, изгибные колебания тела плотины.

Как видно из приведенных графиков, преобладающий период колебаний грунта в обоих направлениях примерно одинаков ($T=0,08$ сек.) и почти отсутствуют на нем периоды порядка $0,14 \div 0,15$ сек.

Аналогичным путем были определены периоды собственных колебаний плотин Храм-I и Сиона. Результаты измерений

Экспериментально определенные периоды свободных колебаний плотин сравнивались с периодами, подсчитанными по формуле, предложенной в работе [2] для земляных плотин

$$T_1 = 0,7 \frac{B}{B - B_o} H \sqrt{\frac{\gamma}{G}}, \quad (2)$$

где T_1 — период основных свободных колебаний плотины в сек.;
 B — ширина плотины по основанию в м;
 B_o — ширина плотины по гребню в м;

Таблица 1
Параметры колебаний плотин

Наимено- вание плотины	Тон	Поперечные колебания			Продольные колебания	
		$T_{\text{теор.}}$	$T_{\text{эксп.}}$	λ	$T_{\text{эксп.}}$	λ
Храм-I	I	0,34*	0,22	0,39	0,19***	0,32
	II	0,15*	0,11		0,13	
Храм-II	I	0,13	0,14	0,32	0,15	0,37
	II	0,06	0,09			
Сиони	I	0,46	—	0,48**	—	—
	II	0,21	0,21		0,15	0,37
	III	0,06	0,09			

* Периоды подсчитаны для эквивалентной по размерам земляной плотины

** Вверху указан декремент затухания для наружных призм, внизу — для суглинистого противофильтрационного ядра.

*** На графике спектров было обнаружено два равноценных периода, поэтому трудно отдать предпочтение какому-либо из них.

γ — объемный вес материала тела плотины в t/m^3 ;

G — модуль упругости материала тела плотины на сдвиг в t/m^2 .

Периоды последующих двух тонов свободных колебаний соответственно равны

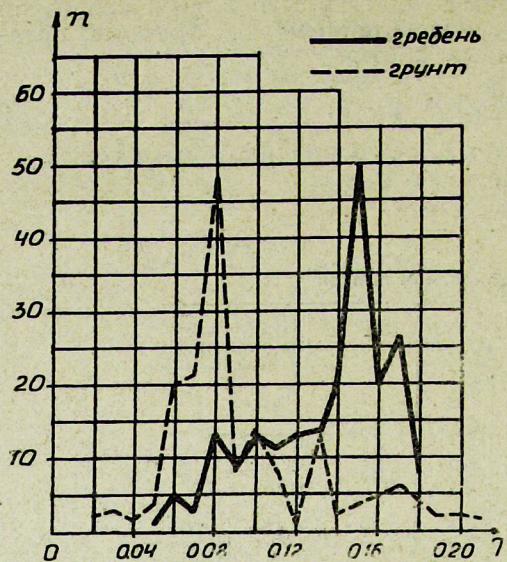
$$T_2 = 0,455 T_1 \quad (3)$$

$$T_3 = 0,28 T_2. \quad (4)$$

При назначении величины модуля сдвига для земляных плотин мы пользовались ориентировочным значением его $G = 10000 t/m^2$, рекомендуемого в той же работе [2]. Однако величина модуля сдвига для высокой плотины, при достаточном уплотнении ее тела, будет значительно выше.

Принимая экспериментально определенный период $T_2 = 0,21$ сек. за II тон свободных колебаний плотины Сиони, мы подсчитали из выражений (2—3) модуль упругости материала тела плотины, который оказался равным $32000 t/m^2$. При этом период I тона собственных колебаний был определен из (3) $T_1 = 0,46$ сек.

Как было выяснено при анализе сейсмограмм, высокочастотные микросейсмы вызывали колебания тела плотины преимущественно высоких тонов, поэтому на записях совершенно отсутствовал период основного тона.



Фиг. 8. График $\pi=f(T)$ для продольных колебаний.

При таких значениях модуля сдвига экспериментально определенные периоды свободных колебаний земляных плотин близки по своим значениям к теоретическим. Некоторые расхождения в их значениях следует отнести за счет приближенных значений модуля упругости материала тела плотин и за счет допускаемой неточности самих формул, которые не учитывают изменения модуля упругости и затухания по высоте плотины.

Располагая аппаратуру в разных точках по высоте (на бермах) и в плане (по гребню), мы стремились установить закономерность изменения ин-

тенсивности колебаний по высоте и вдоль гребня плотины.

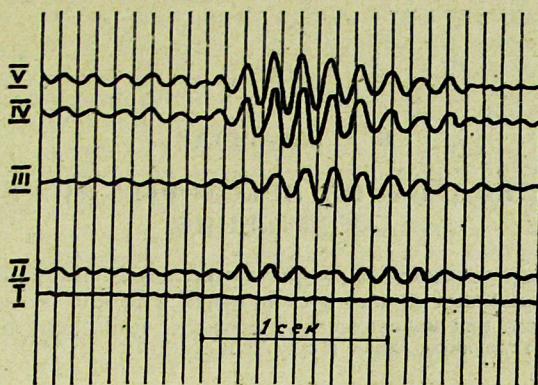
Записи колебаний каменно-набросной плотины Храм-I показывают, что при малых колебаниях такого рода плотины обладают в какой-то степени упругими свойствами, причем динамическая жесткость их, как видно из таблицы, выше динамической жесткости земляных плотин такой же высоты. Кроме того, для этой плотины при малых возбуждениях было установлено, что интенсивность колебаний плотины почти не зависит от высоты и мало изменяется вдоль гребня.

Для земляных плотин Сиони и Храм-II характерно увеличение интенсивности колебаний по высоте и вдоль гребня плотины от бортов к середине, причем амплитуды колебаний гребня в несколько раз больше амплитуд грунта в основании плотины. Это хорошо видно на фиг. 9, где воспроизведется запись смещений различных точек плотины Храм-II при колебаниях ее, вызванных прохождением груженой автомашины по дороге вдоль левого борта. Расположение записываемых точек приведено на фиг. 1. Однако увеличение амплитуд в разных случаях было непостоянным и колебалось в значительных пределах, что не дало возможности в настоящей работе дать численные значения этого увеличения.

Полученные значения логарифмических декрементов затухания хорошо согласуются с данными других авторов. Как видно из таблицы, декремент затухания суглинистого ядра плотины меньше, чем наружных призм. Это говорит о том, что ядро обладает более выраженными упругими свойствами, чем гравелисто-галечниковые наружные призмы.

В заключение следует подчеркнуть, что при слабых возбуждениях земляные и каменно-набросные плотины реагируют как упругие осцил-

ляторы, однако, реакция таких сооружений на сильные движения грунта будет, видимо, неупругой, особенно для каменно-набросных плотин.



Фиг. 9. Осциллограмма поперечных колебаний плотины Храм-II. Обозначения см. на фиг. I.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Hailand. Geophysical Investigation Conceering the Seismic Resistance of Earth Dams, American Institute of Mining and Metallurgical Engineer, Technical Publication, N 1054, 1939.
2. Ш. Г. Напетваридзе. Сейсмостойкость гидротехнических сооружений, М., 1959.

Институт сейсмостойкого строительства и сейсмологии
АН Таджикской ССР.