

С. Л. ВОРОЖЦОВ, Т. Г. САГДИЕВ, Г. С. СЕЛЕЗНЕВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ
ПЛОТИНЫ НУРЕКСКОЙ ГЭС НА МОДЕЛЯХ

Анализ фактического материала о поведении плотин из местных материалов во время землетрясений, ввиду его крайней ограниченности, позволил в основном качественно установить классификацию сейсмических деформаций. Таковыми являются: осадки тела плотины; горизонтальные сдвиги; расслоение в местах контакта разнородных материалов: появление трещин как продольных (преимущественно), так и поперечных по отношению к гребню плотины; послойное обрушение материала на откосах, сложенных из сыпучих тел (галечник, камень и пр.), и потеря устойчивости откосов, сложенных из связных материалов, по некоторым криволинейным поверхностям обрушения; разжижение тела плотины, возведенной из мелкозернистых песков или намывтой из тонкодисперсных грунтов. Для некоторых из этих деформаций—осадки, раскрытие и глубина проникновения трещин—удалось получить приближенные эмпирические зависимости от интенсивности колебания грунта во время землетрясения [10], применение которых, однако, в каждом конкретном случае требует дополнительной проверки.

На основе результатов проведенного анализа фактических данных была предпринята предварительная качественная и количественная оценка возможных сейсмических деформаций на будущей плотине Нурекской ГЭС. Эта оценка показала, что наиболее вероятными будут следующие виды деформаций: осадка, горизонтальные перемещения, расслоение разнородных материалов, появление послойного сползания материалов на откосах и трещинообразование в ядре. Понятно, что количественная оценка указанных деформаций посила весьма приближенный характер и она, прежде всего, нужна была для предварительного установления порядка величин, которые должны были ожидаться в экспериментах.

Для установления динамических параметров плотины Нурекской ГЭС, а именно: периода и декремента собственных колебаний, амплитуды раскачивания пребня и изменения коэффициента динамичности по высоте плотины, практически отсутствовали какие-либо экспериментальные данные или аналитические методы. Расчетные формулы для определения периодов собственных колебаний и некоторые рекомендации относительно распределения сейсмических сил по высоте невысоких плотин

(не более 30 м) [5] применительно к Нурекской плотине высотой 300 м, естественно, вызывали некоторое сомнение. Поэтому были предприняты эпизодические натурные наблюдения на ряде плотин из местных материалов с целью изучения их динамических параметров при различных источниках возбуждения: микросейсмы, взрывы и землетрясения. Изучению были подвергнуты следующие плотины: в Таджикистане—Головная (31,5 м) и Кайраккумская (35,8 м), в Грузии—Храмские 1 (8 м) и II (31 м), Сионская (73 м) [5]. В дальнейшем для этих целей дополнительно были использованы данные литературных источников [15, 17, 18] по плотинам Карачуновская (25,5 м), Dru Canyon (20 м) и Bouquet (62,5 м).

Полученные результаты натурных исследований позволили приближенно установить величины периодов собственных колебаний (три первых тона) и оценить логарифмический декремент затухания для плотин Нурекской ГЭС. Было найдено, что значения этих величин будут лежать в пределах: для периода, скажем, первого тона—0,9–1,2 сек и логарифмического декремента—0,4–0,65. Кроме того, было установлено, что амплитуды (или, что то же, интенсивности) колебания гребня плотины могут в два раза превышать таковые основания. Благодаря этому было подсчитано, что, например, при 9-балльном землетрясении максимальные амплитуды колебания гребня плотины по первому тону могут достигать до ± 50 мм. Это весьма существенная величина, если вспомнить, что двойная амплитуда в этом случае равна 10 см.

Все вышеизложенные предварительные данные были совершенно необходимы, с одной стороны, для возможности правильной постановки экспериментальных исследований на моделях—выбор параметров моделирования, подбор и тарировка измерительной аппаратуры и т. д., и, с другой стороны, для сравнения их с результатами предпринятых теоретических исследований сейсмостойкости плотин из местных материалов с учетом спектрального воздействия сейсмических сил, что давало возможность дополнительной расчетной проверки сейсмостойкости плотины Нурекской ГЭС.

В основу экспериментальных исследований моделей плотины была положена методика моделирования, разработанная в соответствии с теорией расширенного подобия [4]. При этом были рассмотрены несколько вариантов моделирования, из которых наиболее приемлемым явился вариант, исходящий из тождественности полей гравитации в натуре и модели. Это условие, являющееся одним из основных требований при постановке опытов на достаточно крупных моделях, приводит к равенству ускорений в натуре и модели, или, иначе говоря, к равенству единице множителя подобия для ускорений:

$$\frac{\alpha \gamma}{\gamma^2} = 1, \quad (1)$$

$$\gamma = \alpha \sqrt{\frac{\delta \gamma}{\beta}}, \quad (2)$$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ и η — множители подобия соответственно для линейных размеров, напряжений, деформаций, плотностей и времен.

С учетом зависимостей (1) и (2) для характеризующих рассматриваемые механические процессы величин получены следующие условия моделирования:

а) геометрическое подобие	— линейные размеры	$l' = \alpha l;$
б) подобие свойств материалов	— напряжения	$\sigma' = \alpha \sigma;$
	— относительные деформации	$\varepsilon' = \varepsilon;$
	— модули упругости	$E' = \alpha E;$
	— коэф. Пуассона	$\mu' = \mu;$
	— плотности	$\rho' = \rho;$
	— углы внутреннего трения	$\varphi' = \varphi;$
	— сцепление или зацепление	$c' = \alpha c;$
	— пористости	$n' = n;$
	— коэф. фильтрации	$k' = \sqrt{\alpha} k;$
в) подобие динамических процессов	— ускорения	$w' = w;$
	— скорости	$v' = \sqrt{\alpha} v;$
	— смещения	$u' = \alpha u;$
	— время	$t' = \sqrt{\alpha} t;$
	— периоды	$T' = \sqrt{\alpha} T.$

Здесь необходимо отметить следующие обстоятельства.

В соответствии со смягченными условиями теории расширенного подобия допускалось отличие множителя подобия для линейных размеров структурных частиц сыпучего α_1 от общего множителя подобия для линейных размеров α , что в нашем случае составляло $\alpha_1 \leq 10\alpha$. Данное допущение также не вносит существенных искажений в результаты исследований, так как известно, что при этом должны оставаться без изменения соотношения для плотности, пористости и коэффициента фильтрации. Что же касается угла зацепления, выражаемого через c то за счет его изменения в зависимости от крупности частиц сыпучего, согласно работе [7], ошибки в результатах ожидаются не более $\pm 10\%$.

Для экспериментального изучения сейсмостойкости плотины Нурекской ГЭС в конкретных условиях наиболее целесообразно было принять модели следующих масштабов: лабораторные модели—1/300 и 1/200, полевая модель—1/50 натуральных размеров, основные геометрические показатели которых приведены в табл. 1.

На рис. 1 и 2 показаны одна из лабораторных моделей плотины масштаба 1/300 на сейсмической платформе и крупномасштабная полевая модель масштаба 1/50. Конструктивная схема плотины Нурекской ГЭС приведена на рис. 3.

Подбор материалов для моделей осуществлялся на основе вышеприведенных соотношений при заданных механических свойствах материалов элементов тела плотины Нурекской ГЭС [1]. Абсолютные значения от-

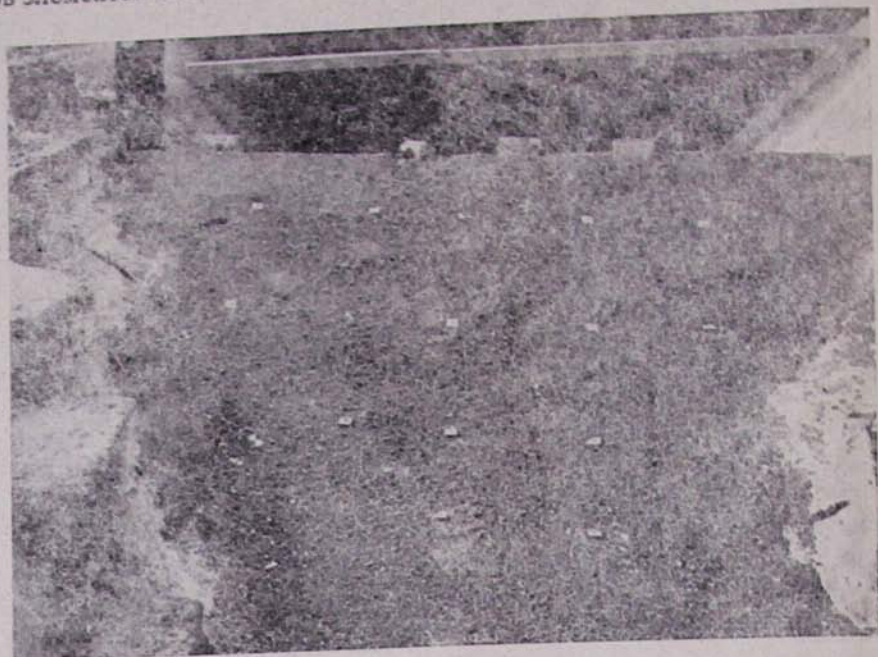


Рис. 1. Лабораторная модель плотины масштаба 1/300 в лотке сеймоплатформы. На гребне плотины — сейсмометрические приборы, на низовом откосе — поверхностные марки

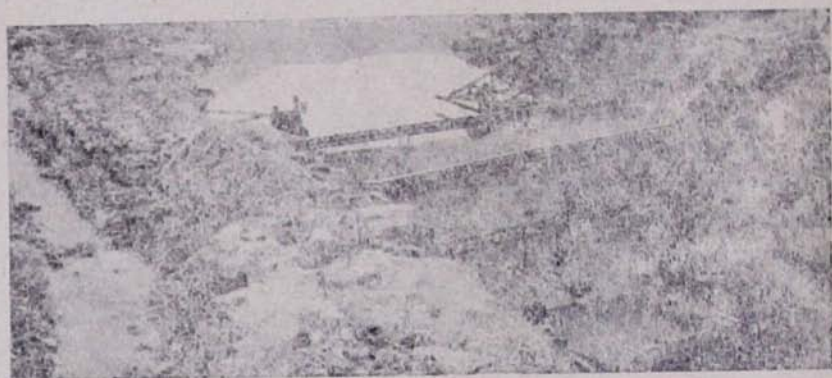


Рис. 2. Полевая модель плотины масштаба 1/50 с заполненным водохранилищем

клонений основных свойств подобранных материалов по сравнению с требуемыми, согласно условиям моделирования, как это видно из табл. 2, вполне приемлемы и не превышают заданной точности постановки экспериментов. Надо отметить, что по сцеплению суглинистого материала

ядра имели место значительные расхождения, превышающие требуемые границы. Тем не менее, учитывая, что ядро плотины занимает не более четверти объема плотины и расчетные линии обрушения откосов не проходят через ядро, упомянутое расхождение в величинах сцепления не должно заметно сказаться на общем поведении плотины.

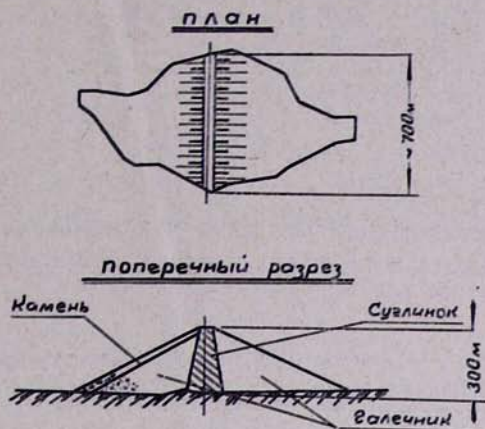


Рис. 3. Конструктивная схема плотины Нурекской ГЭС. Указаны общие размеры и материалы ее элементов

В качестве исходных данных для моделирования сейсмического воздействия были приняты зависимости смещения, скорости и ускорения от силы землетрясения и его частотного спектра, опубликованные в работах [3, 2], а также были использованы сведения из ряда литературных источников, в том числе [13, 16], касающиеся землетрясений в районе г. Нурека Таджикистана. Таким образом, было решено исходить из следующих условий, характеризующих натуральные землетрясения:

Таблица 1
Основные геометрические показатели моделей плотины Нурекской ГЭС

Показатели	Масштабы (размеры в см)		
	1/300	1/200	1/50
Высота в центральной части	100	150	628
Длина по гребню	230	345	1380

1) преобладающие периоды скальных грунтов в районе возведения Нурекской плотины для землетрясений силой от 7 до 10 баллов должны лежать в пределах $0,25 \div 0,5$ сек;

2) продолжительность наиболее интенсивной части сейсмического процесса принимается в пределах $15 \div 20$ сек, учитывая, что в отдельных случаях продолжительность процесса непрерывных ощутимых колебаний грунта во время землетрясений может доходить до 60 сек;

3) величины кинематических элементов колебания грунта количественно определяются, например при периоде 0,5 сек, нижеследующими данными.

Интенсивность, баллы	Смещение, мм	Скорость, мм/сек	Ускорение, мм/сек ²
6	3	20	490
7	6	39	981
8	13	77	1962
9	25	156	3924
10	50	312	7848

4) спектры приведенных сейсмических ускорений для каждой интенсивности должны лежать в заданных пределах, установленных в работе [2].

Таблица 2
Величины отклонения (в %) свойств материалов, подобранных для моделей плотины Нурекской ГЭС

Наименование величин	Масштабы 1/300 и 1/200			Масштаб 1/50		
	Крош- ка	Суг- линок	Ще- бень	Га- леч- ник	Суг- линок	Ще- бень
Объемный вес	-30	+1	-22	-13	+1	-16
Угол внутреннего трения	+5	+30	+16	+16	+30	+13
Модуль упругости	+43	+102	—	-3	-48	—
Коэф. Пуассона	—	—	—	-27	—	—
Скорость продоль- ных волн	—	—	—	-23	—	—
Скорость попереч- ных волн	—	—	—	-29	—	—

На основе этих данных и в соответствии с установленными условиями моделирования (при равенстве ускорений в натуре и модели) были найдены параметры колебания сейсмической платформы и характеристики сеймовзрывного воздействия. Указанные данные, с учетом условий работы сеймоплатформы и специфики взрывов, приведены в табл. 3, которая построена в соответствии с пунктом 3.

Обработка результатов записей и их анализ показал, что в опытах на сеймоплатформе соблюдались требования табл. 3; причем продолжительность колебаний сеймоплатформы в большинстве случаев доходила до 15÷20 сек, что во много раз превышало требуемые пределы. Аналогичная картина наблюдалась и при проведении взрывов. Здесь необходимо отметить, что по продолжительности взрывы обеспечивали только нижнюю границу требуемого диапазона, т. е. суммарный процесс колебаний грунта длился не более 1,5 сек. На рис. 4 приведены данные по

моделированию сейсмического воздействия на сеймоплатформе и при помощи сейсмозрывного воздействия.

В лабораторных условиях было испытано 5 разновидностей моделей плотины: однородная плотина без пригрузки откосов; аналогичная плотина с пригрузкой верхового откоса; плотина с центральным ядром без пригрузки; аналогичная плотина с пригрузкой верхового откоса, а также плотина с пригрузкой обоих откосов. При этом опыты были поставлены с различными материалами упорных призм (песок, гранитная крошка и галечник), при различных углах заложения верхового откоса (величина угла укрупнения доходила до 10°), с пустым и заполненным водохранилищем при различном уровне стояния воды. Интенсивности колебаний изменялись от 6 до 9 баллов. Всего было проведено около 100 опытов.

Таблица 3

Характеристика сейсмического воздействия на модели плотины
Нурекской ГЭС

Наименование характеристик	Сейсмоплатформа ($1/_{300}$ и $1/_{200}$)				Взрывы ($1/_{50}$)			
	Б а л л ы							
	6	7	8	9	7	8	9	10
Преобладающие периоды (сек)	0,025÷0,068				0,035÷0,075			
Продолжительность колебаний (сек)	1÷5				1,4÷202			
Кинематические элементы:								
смещение (мм)	0,013	0,025	0,050	0,101	0,13	0,26	0,51	1,02
скорость (мм/сек)	1,23	2,46	4,91	9,82	5,56	11,05	22,30	44,06

В полевых условиях была испытана одна крупномасштабная модель, возведенная в подобном натуре каньоне. Всего было проведено 17 опытов при фронтальном и боковом воздействии взрывов на модель плотины; опыты проходили в основном при заполненном водохранилище. Были использованы подземные взрывы обычных взрывчатых веществ. По два взрыва было произведено при пустом водохранилище и непосредственно в воде водохранилища. Интенсивности смоделированного сейсмозрывного воздействия изменялись от 5 до 10 баллов¹. Опыты на полевой модели

¹ Здесь следует отметить, что, по соображениям сравнительно малой продолжительности (нижний предел) колебания грунта во время взрывов, приняты для структурных частей $\alpha_1 \neq \alpha$, а также из-за наличия отклонения в подборе суглинистого материала ядра модели по сцеплению, интенсивности сейсмозрывного воздействия были приняты на один балл ниже, чем они наблюдались в опытах. Поэтому на рис. 4,6 имеет место несоответствие между баллами условных обозначений и нанесенных на графике.

проходили в зимнее время, когда температура воздуха не понижалась ниже 0°C и не превышала $+20^{\circ}\text{C}$.

В процессе опытов как в лабораторных, так и в полевых условиях проводились инструментальные и визуальные наблюдения за поведением моделей плотины. В качестве примера ниже приводится описание выбора точек наблюдения, регистрируемых величин, использованных приспособлений и аппаратуры для полевой модели плотины.

Для наблюдения за сейсмическими деформациями (осадки, смещения и сползание материалов) размещались по гребню и на откосах 42 поверхностные марки, 5 телескопических глубинных марок в плоскости центрального сечения плотины, 7 глубинных точечных марок на уровне середины плотины по высоте в том же сечении. Для размещения перечисленных приспособлений была выбрана опорная геодезическая сетка, имеющая также 10 створных знаков. Измерения производились нивелиром НВ—1 с точностью нивелирования III класса ± 1 мм. Трещины замечались обычной металлической линейкой и рулеткой.

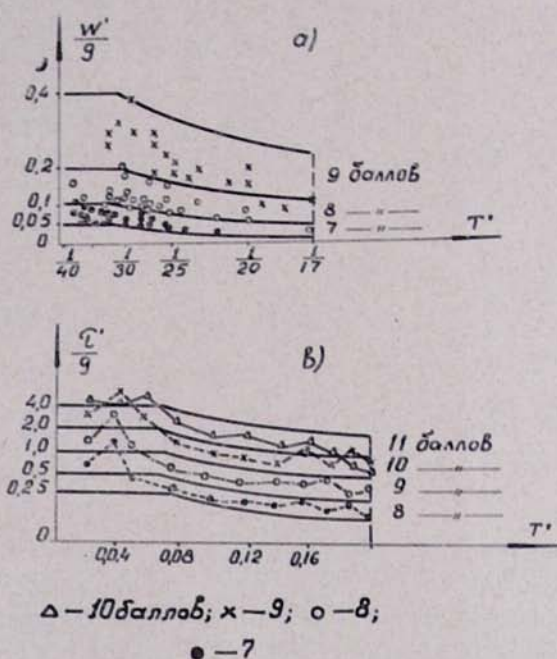


Рис. 4. Моделирование сейсмического воздействия: а—на сеймоплатформе; б—при помощи взрывов

Для регистрации динамических параметров было намечено 13 точек: 3—вдоль гребня, по 2—на обоих откосах и в теле ядра по высоте в плоскости центрального сечения, и 4 точки на грунте—соответственно по одному у подошвы, на бортах и в районе середины водохранилища. В каждой точке была организована запись смещения, скорости и ускорения по трем компонентам: x —поперек гребня, y —вдоль гребня и z —по вертикали. Регистрация показаний приборов—СПМ-16, К-001, ВЭГИК и

РАХ—велась на осциллографах типа Н—700, ПОБ—12 и ОС—24—51 с точностью измерений от $\pm 5\%$ до $\pm 15\%$.

Для наблюдения за кривой депрессии в ядре плотины, что было необходимо из-за многократного заполнения и опорожнения водохранилища, использовались трубчатые металлические пьезометры, а температурный режим в теле плотины и окружающей среде фиксировался закладными термометрами и барогигротермометрами.

Для измерения сейсмического давления воды на грань верхового откоса и давления в порах поверхностного слоя призмы были выбраны 5 горизонтов и на уровне каждого горизонта в плоскости центрального сечения закладывались мембранные датчики давления: по одному на поверхности и на уровне трех промежуточных горизонтов—внутри тела призмы и пригрузки. Всего было установлено 11 приборов. Волнообразование на поверхности водохранилища от сейсмических воздействий измерялось в трех створах, отстоящих друг от друга на 2,5 м и первого створа от пребня плотины на 1,6 м, датчиками уровня двух типоразмеров. Регистрация показаний всех приборов осуществлялась при помощи осциллографов типа МПО-2 и Н-102. Эти исследования проводились Грузинским НИИ энергетики МЭИЭ СССР.

Для наблюдения за поровым и грунтовым давлением в ядре плотины и в одной точке призмы на трех горизонтах, отстоящих друг от друга на 1 м, а нижнего горизонта от основания на 2 м, устанавливались 10 струнных динамометров, показания которых до и после взрывов регистрировались при помощи переносной центральной станции ЦС-5 № 8. Эти исследования проводились НИС Гидропроекта МЭИЭ СССР.

Для ведения записей поведения плотины во время натуральных землетрясений, которых за время испытаний произошло около 7 силой до 3—4 баллов, использовались сейсмографы ВЭГИК и вибродатчики К-001 со ждущей разверткой. Приборы устанавливались в трех точках центрального сечения—гребень, середина откоса и основание. Регистрация показаний приборов велась на осциллографах типа Н-700, ПОБ-12 и др. Эти исследования проводились Институтом физики Земли АН СССР.

Размещение описанной выше контрольно-измерительной аппаратуры на полевой модели плотины приведено на рис. 5.

Визуальному наблюдению в процессе опытов подлежали: общее поведение откосов, характер сползания материалов, расслоение гребневой зоны в местах контакта разнородных материалов, волнообразование на поверхности водохранилища и процесс фильтрации воды через тело плотины.

Накопленный экспериментальный материал на данном этапе удалось обработать только в объеме, необходимом для получения практических рекомендаций относительно сейсмостойкости плотины Нурекской ГЭС. Поэтому полученные результаты количественного анализа могут быть непосредственно применены для плотин, подобных исследованному типу как по конструктивным особенностям, так и по свойствам материалов.

В приводимых ниже результатах исследований не затрагиваются вопросы, которые изучались указанными выше организациями-соучастниками в опытах на полевой модели плотины.

Таким образом, на основе обработки и анализа экспериментального материала с учетом эмпирических данных получены следующие зависимости и рекомендации по оценке сейсмостойкости плотины Нурекской ГЭС.

Сейсмические деформации. Осадки тела плотины описываются зависимостью вида:

$$\Delta(z) = 0,8 K_c z^2 H^{-1}, \quad (3)$$

где K_c — нормативный коэф. сейсмичности;
 z — ордината рассматриваемой точки, м;
 H — максимальная высота плотины, м.

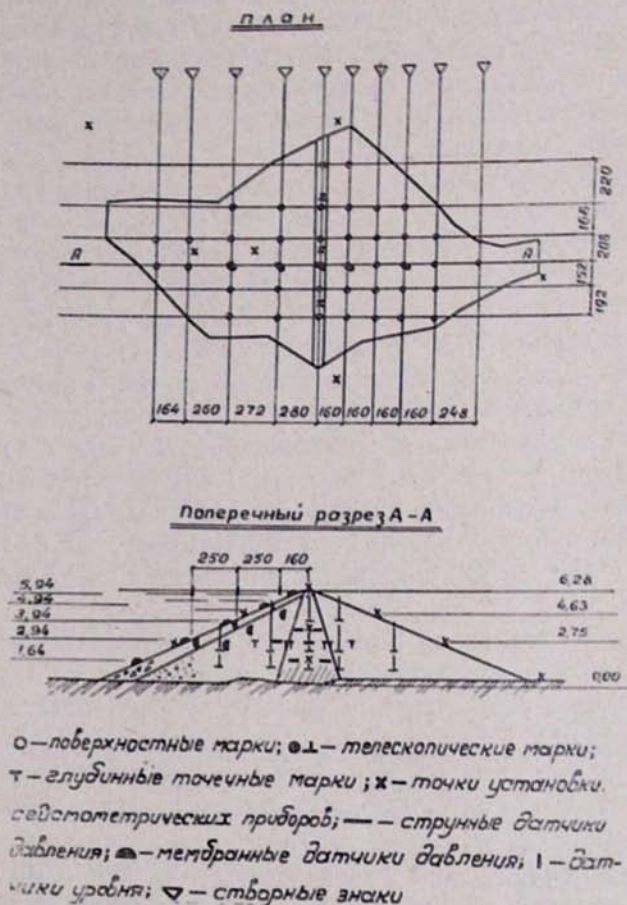


Рис. 5. Размещение контрольно-измерительной аппаратуры на полевой модели плотины

Эмпирический коэффициент 0,8 принят с учетом ошибки, допускаемой данной зависимостью в большую сторону при определении осадок.

Зависимость (3) одинаково применима как к ядру, так и к призмам плотины, возведенной из различных материалов. Из этого следует, что осадки ядра и призм по высоте в пределах оцененной точности, составляющей $\pm 30\%$, будут одинаковыми. Максимальная осадка гребня плотины, например, при 9-балльном землетрясении согласно (3) составит не более 2,5 м т. е. около 1% от высоты плотины.

Горизонтальные составляющие смещений материалов вниз по нижнему откосу определяются следующей зависимостью

$$u(z)_n = K_c H \left[0,04 + 0,13 \sin \frac{\pi(z - 0,26H)}{0,7H} \right], \quad (4)$$

а по верхнему откосу — соотношением

$$u(z)_в = 0,6u(z)_н, \quad (5)$$

где размерности величин прежние.

В выражении (4) также учтена допускаемая им ошибка в большую сторону, так как именно эти величины нас и интересуют. Графическое изображение смещений согласно (4) показывает, что наибольшие горизонтальные перемещения претерпевают частицы в средней зоне откоса. К гребню и подошве плотины они уменьшаются по закону синуса. Соотношение (5) отражает то обстоятельство, что в исследованном варианте плотины Нурекской ГЭС была предусмотрена припрузка верхнего откоса крупным рваным камнем. Припрузка в моделях имитировалась щебнем соответствующих размеров, в связи с чем, собственно, отмечаются меньшие смещения верхнего откоса.

Горизонтальные смещения тела ядра по высоте плотины приближенно выражаются зависимостью:

$$u(z)_я = 0,013 K_c z. \quad (6)$$

Следовательно максимальная величина остаточного горизонтального смещения гребня вдоль русла в ту или другую сторону при 9-балльном землетрясении может составить около 0,4 м, т. е. не более 0,15% от высоты плотины. Здесь надо отметить, что зависимость (6) дает (с учетом учтенной ошибкой $\pm 35\%$) достоверные значения перемещений только для гребня плотины. Приближенность ее заключается в том, что изменение перемещений ядра по высоте по закону прямой получено не из непосредственных инструментальных замеров, а принято из косвенных показаний в процессе проведения опытов.

Установить экспериментальные зависимости образования и развития трещин в моделях плотины не удалось, хотя трещины появлялись как в лабораторных, так и в полевых опытах. В связи с этим была предпринята попытка использования эмпирических формул по фактическому материалу для проверки полученных данных по трещинообразованию на моделях. Эти формулы следующие:

а) ширина раскрытия трещин

$$s = 0,01H(0,67 - 0,016K_c^{-1} \pm 0,0017H); \quad (7)$$

б) глубина проникновения трещин

$$h = 0,01H(84 - 3,2K_c^{-1}) \pm 0,075H,$$

(8)

где размерность высоты плотины в метрах.

Из сравнения экспериментальных данных по ширине раскрытия трещин в ядре модели с данными по зависимости (7) было установлено, что в образовании трещин в высоких плотинах, по всей вероятности, участвует не полная высота профиля, а только верхние зоны плотины, так как учет полного профиля для плотины Нурекской ГЭС приводит к неправдоподобным величинам трещин— $s=153$ см и $l=156$ м при 9 баллах. В соответствии с допускаемым предположением было найдено, что высота так называемой активной зоны для Нурекской плотины будет порядка 25–30 м. При этом величины раскрытия трещин и глубина их проникновения в тело плотины хорошо согласуются с экспериментальными данными. Например, при 9-балльном землетрясении на натурной плотине могут ожидать трещины в пределах: ширина—5–20 см, глубина—5–15 м, длина продольных трещин—до 75 м.

Визуальные данные. Как отмечалось выше, экспериментальные исследования моделей плотины проводились при интенсивностях сейсмического воздействия от 5 до 10 баллов. Причем в качестве показателей интенсивности колебания грунта по ускорению были приняты данные, в четыре раза превышающие нормативные. Опыты на малых моделях масштабов 1/300 и 1/200 были поставлены: с укрупнением верхового откоса против проектного угла заложения до 10° ; в резонансной зоне по двум первым периодам собственных колебаний моделей с продолжительностью испытаний, значительно превышающей время опасного, наиболее интенсивного воздействия натуральных землетрясений. Но, несмотря на это, ни на одной из моделей не наблюдалось обрушения откосов. Имело место только некоторое поверхностное сползание материалов на откосах преимущественно с центральной гребневой зоны к середине откоса. К подошве эти перемещения постепенно затухали. Пригруженный верховой откос в этом смысле оказался в более благоприятных условиях, нежели непригруженный низовой откос. Поэтому рекомендовано на поверхности низового откоса уложить слой толщиной не менее 3 м из более крупного материала, выбираемого из галечно-гравелистой смеси при возведении упорной призмы.

Во время испытаний моделей более выражено наблюдается расслоение гребневой зоны. Этот процесс начинает появляться с 7-балльной интенсивности колебаний, при этом имеет место разбрасывание камней верха призмы, в результате чего оголяются вертикальные плоскости ядра, проседает материал фильтров и даже местами отходит от ядра, напоминая появление трещин. С этой точки зрения выполнение пригрузки гребневой зоны на обоих откосах из более крупных камней целесообразнее. Для уменьшения эффекта расслоения рекомендовало уширить гребень плотины с 20 до 30 м, а гребень ядра с 6,5 до 10 м.

Трещинообразование в материале ядра может происходить начиная с интенсивностей 8–9 баллов. При этом в центральной части гребня

ядра будут преобладать продольные трещины, а ближе к местам примыкания его с бортами—поперечные. Последние, как правило, имеют меньшую ширину и глубину проникновения, но некоторые из них простираются на всю ширину ядра. В целях предотвращения появления трещин рекомендовано «армировать» гребневую зону высотой порядка 15–20 м.

На поверхности воды имитированного водохранилища в моделях всех масштабов во время опытов не наблюдалось образования волн, опасных с точки зрения их перелива через гребень плотины. Процесс фильтрации воды через тело плотины не нарушался, т. е. не наблюдались изменения объема фильтрующейся воды и ее помутнение.

В научно-техническом отчете по данной работе, переданном заказчику—Саогидропроекту, сделаны также ряд рекомендаций относительно толщины фильтров, размеров низового банкета, толщины пригрузки верхового откоса и конфигурации каньона под ядро.

Динамические параметры. Предварительно необходимо отметить некоторые результаты теоретических исследований динамических свойств плотин из местных материалов. Эти исследования были проведены для расчетной схемы плотины, представляющей симметричный и однородный клин, расположенный в недеформируемом каньоне различных очертаний—прямоугольный, трапециевидный и треугольный. Задача решалась для упругой стадии работы материалов, без учета присоединенной массы воды водохранилища и при мгновенном распространении сейсмических волн. Рассматривались колебания плотины в трех основных направлениях—поперек и вдоль гребня, и вертикальное.

Результаты исследований показали, что на величины периодов собственных колебаний незначительно влияют такие факторы, как форма каньона и усечение клина. Напротив, большое влияние оказывает соотношение длины плотины по гребню (протяженность) к ее высоте. Этот фактор необходимо учитывать при определении периодов, когда указанное соотношение становится меньше 6, а когда оно более 6, плотина должна рассматриваться, как бесконечно протяженная [11].

На основе полученных зависимостей было также установлено, что разница в величинах периодов по формам колебаний в плотинах из местных материалов не столь велика, как, скажем, в зданиях и сооружениях. Например, для плотины Нурекской ГЭС были найдены следующие значения для первых шести периодов поперечных колебаний:

Формы колебаний ($m-n$)	1—1	1—2	1—3	2—1	2—2	2—3
Периоды колебаний (сек)	1,16	0,77	0,55	0,53	0,50	0,44

Из этого следует, что при определении воздействий сейсмических сил на плотины из местных материалов существенное значение имеет наложение высших форм колебаний. Поэтому при расчетах на сейсмостойкость такого типа плотин необходимо учитывать по крайней мере 4 формы собственных колебаний.

Обработка экспериментального материала показала, что на периоды собственных колебаний моделей плотины сравнительно мало влияют такие факторы, как наличие воды в водохранилище, изменение угла наклона верхового откоса в пределах до 10° и пригрузка откосов более крупным материалом толщиной 0,1 Н. Отклонения в этих случаях составляли 14,3–23%. Вместе с этим было замечено, что периоды колебаний заметно изменяются в зависимости от интенсивности воздействия и этот процесс протекает подобно во всех моделях трех масштабов. В результате была установлена следующая общая зависимость для поперечных колебаний плотин, в которой учтена допускаемая ошибка в большую сторону +24%:

$$T_x = (0,037 + 0,19 K_z) \sqrt{H}, \quad (9)$$

где обозначения величин и их размерности прежние, как и в формуле (3).

На основе (9) получаются следующие значения периодов:

Баллы	6	7	8	9
Периоды (сек)	0,69	0,73	0,82	0,97

Зависимость $T = T(J)$, где J — баллы землетрясения, можно объяснить влиянием неупругой части работы плотины.

Таким образом, плотина Нурекской ГЭС по первым четырем формам поперечных колебаний (по направлению, в котором в настоящее время принято проверять сейсмическую устойчивость откосов) должна иметь значения периодов в следующих пределах:

Форма колебаний	1—1	1—2	1—3	2—1
Периоды (сек)	0,97÷1,16	0,77÷0,82	0,55÷0,73	0,53÷0,60

В качестве показателя затухания колебаний плотины по всем учитываемым формам рекомендовано принимать величину 0,16, что соответствует логарифмическому декременту 0,5. Максимальная амплитуда колебаний гребня плотины при 9-балльном землетрясении остается в оцененных пределах величин: 25–50 мм.

Сейсмические нагрузки. На основании эпюр фактического распределения сейсмических ускорений по высоте моделей особенно детальные данные были получены на полевой модели плотины при 7, 8, 9 и 10-балльных воздействиях. При этом была поставлена задача проверки существующих методов определения сейсмических сил на сооружения. Дело в том, что в системах со многими степенями свободы большое значение приобретает правильный учет высших форм колебаний. Как было показано выше, для плотин из местных материалов, последние должны играть существенную роль. Процесс колебания системы по различным формам происходит во времени и вопрос суммирования сил по этим формам остается пока нерешенным. В связи с этим рядом авторов

предложены различные методики приближенного учета высших форм колебаний и определения результирующих сейсмических сил. Было проверено пять таких предложений и результаты сравнения показали, что наиболее приемлемым для плотин из местных материалов на данном этапе является метод, основанный на вероятностном подходе к определению суммирования инерционных сейсмических нагрузок по высоте сооружения [6]. При этом принимаются не максимальные, а среднеквадратичные значения ускорений. Предложено следующее выражение:

$$\ddot{u}(z)_{cp} = \sqrt{w_{cp}^2 \left[1 - \sum_1^m \gamma_{ln}(z) \right] + \sum_1^m \left[\tau_{n, cp} \gamma_{ln}(z) \right]^2}, \quad (10)$$

где $\ddot{u}(z)_{cp}$ — среднеквадратичная величина ускорения точки по высоте сооружения;

w_{cp} — среднеквадратичная величина ускорения грунта;

$\tau_{n, cp}$ — среднеквадратичный спектр приведенных сейсмических ускорений;

$\gamma_{ln}(z) = \gamma_{mn}$ — коэффициент формы собственных колебаний, равный

$$\gamma_{mn} = \frac{8J_0(a_n z/H)}{m\pi a_n J_1(a_n)} \sin \frac{m\pi(Hy/L - qz/2)}{H - q},$$

$J_0(a_n)$ и $J_1(a_n)$ — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка;

a_n — корень этой функции:

$$q = \frac{L - L_1}{L};$$

L и L_1 — длина плотины по гребню и основанию.

Учет сейсмических сил согласно (10) при расчетах моделей и натурной плотины показал, что принимая даже неоправдающую себя в данном случае схему круглоцилиндрических поверхностей обрушения, можно получить достаточно удовлетворительную картину сейсмической устойчивости откосов. Фактически же модели имели несравненно больший запас прочности, что также в известной мере относится к натурной плотине Нурекской ГЭС.

Таким образом, вопросы аналитического способа проверки сейсмической устойчивости плотин из местных материалов и, главным образом, из каменной наброски, требуют дальнейших исследований для разработки надежных методов расчета.

Выводы. На основе изложенных выше результатов исследований в пределах обработанного объема экспериментального материала можно сделать следующие общие выводы.

1. Количественная оценка сейсмостойкости плотины Нурекской ГЭС на данном этапе может считаться вполне обоснованной в пределах расчетной сейсмичности—9 баллов. В этих условиях плотина в целом показала себя сейсмически устойчивой, а отдельные ее элементы, подверженные некоторым нежелательным последствиям сейсмического воз-

действия, должны быть усилены в соответствии со сделанными рекомендациями.

2. Положение дел в области сейсмостойкости гидротехнических сооружений, особенно если учесть весьма возросшие темпы строительства высоких плотин в сейсмических районах страны, настоятельно требует организации постоянной инженерно-сейсмометрической службы (ИСС) на уникальных плотинах, намечаемых к строительству в ближайшем будущем. Перед ИСС должны быть поставлены две основные задачи [9]:

а) постоянный контроль за поведением эксплуатируемой плотины гидроузла с целью прогнозирования опасного развития процессов в ней в результате сейсмического воздействия, что позволит своевременно разработать и применить защитные мероприятия;

б) накопление необходимого фактического материала с целью дальнейшего развития теории сейсмостойкости гидросооружений, а также проверки и усовершенствования методов моделирования.

На основе наших исследований предпринимается первая попытка создания ИСС на плотине Нурекской ГЭС.

3. Разработанная и проверенная на практике методика экспериментального исследования сейсмостойкости плотин из местных материалов на моделях [8] в настоящее время представляется наиболее приемлемой для постановки опытов как в лабораторных (на сейсмоплатформе), так и в полевых условиях (на сеймовзрывное воздействие).

Институт сейсмостойкого
строительства и сейсмологии
АН Таджикской ССР

ЛИТЕРАТУРА

1. Валов А. П., Назаренко Г. М. Вопросы подбора материалов большой модели плотины Нурекской ГЭС для изучения ее сейсмостойкости. «Инженерная сейсмология», № 3, Душанбе, изд. «Дониш», 1966.
2. Медведев С. В. Инженерная сейсмология. М., Госстройиздат, 1962.
3. Медведев С. С. Количественные данные о движении грунта при сильных землетрясениях. Бюлл. Совета по сейсмологии, № 14, М., изд. АН СССР, 1963.
4. Назаров А. Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. Ереван, изд. АН Арм. ССР, 1965.
5. Напетваридзе Ш. Г. Сейсмостойкость гидротехнических сооружений. М., Госстройиздат, 1959.
6. Напетваридзе Ш. Г. Вопросы усовершенствования существующей методики определения сейсмической нагрузки. «Сейсмостойкость сооружений», Тбилиси, изд. «Мецниереба», 1965.
7. Рассказов Л. Н. Сопротивление крупнообломочных грунтов сдвигу при расчете гидротехнических сооружений на устойчивость. Автореф. канд. диссертации. М., ВООГЕО, 1966.
8. Сагдиев Т. Г., Селезнев Г. С. К методике экспериментального исследования сейсмостойкости каменно-набросной плотины Нурекской ГЭС на моделях с помощью сеймовзрывного воздействия. «Инженерная сейсмология», № 1—2, Душанбе—Ленинакан, изд. АН Тадж. ССР, 1964.
9. Сагдиев Т. Г., Шусер Р. С., Селезнев Г. С. Методические вопросы поста-

- новки инженерно-сейсмологических наблюдений на плотинах из местных материалов. «Инженерная сейсмология», № 3—4, Душанбе, изд. «Дониш», 1966.
10. Селезнев С. Г. Классификация сейсмических деформаций плотин из местных материалов. «Инженерная сейсмология», № 3—4, Душанбе, изд. «Дониш», 1966.
11. Селезнев С. Г. Определение сейсмической нагрузки для плотин из местных материалов. ДАН Тадж. ССР, № 4, Душанбе, 1966.
12. Селезнев Г. С., Шусер Р. С. Экспериментальные исследования динамических свойств плотин из местных материалов. «Инженерная сейсмология», № 1—2, Душанбе—Ленинкан, изд. АН Тадж. ССР, 1964.
13. Скорик Л. А. Определение относительной сейсмичности некоторых районов бассейна р. Вахш. Тр. ТИССС, т. XI, Душанбе, изд. АН Тадж. ССР, 1962.
14. Строительные нормы и правила. Строительство в сейсмических районах (СНиП П-А, 12—62), М., 1963.
15. Тищенко В. Г., Лямзина Г. А. Колебания каменно-земляных плотин при сейсмическом воздействии. Тр. ИФЗ АН СССР, № 17 (184), М., изд. АН СССР, 1960.
16. Шагинян С. А. Приведенные сейсмические ускорения при землетрясениях. Бюлл. Совета по сейсмологии, № 14, М., изд. АН СССР, 1963.
17. Keightley W. O. Vibration tests of Structures. California Inst. of Technology. Pasadena, 1963.
18. Keightley W. O. A dynamic investigation of Bouquet Canyon dam. California Inst. of Technology. Pasadena, 1964.