

ПРОВЕРКА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЧИР-ЮРТСКОЙ ПЛОТИНЫ, ВЫДЕРЖАВШЕЙ Сильное ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ

Чир-Юртская каменно-земляная плотина (рис. 1) с упорными призмами из гравелисто-галечниковых грунтов (1), широким центральным ядром из суглинка (2), верхней перемычкой из тех же гравелисто-галечниковых грунтов (4) и низовой перемычкой из камня (5) расположена на р. Сулак в Дагестанской АССР в районе сейсмичностью 5 баллов. Она имеет высоту 37,5 м (при напоре 33 м), ширину гребня 5,5 м и длину по гребню 430 м. В верхней части плотина имеет более крутые, а в нижней—более пологие откосы с уклонами верхового откоса 1:2,5 и низового 1:2,0—на глубинах до 10 м; верхового 1:3,0 и низового 1:2,25—на глубинах от 10 до 20 м; верхового 1:3,5 и низового 1:2,5—на глубинах больше 20 м ниже отметки гребня.

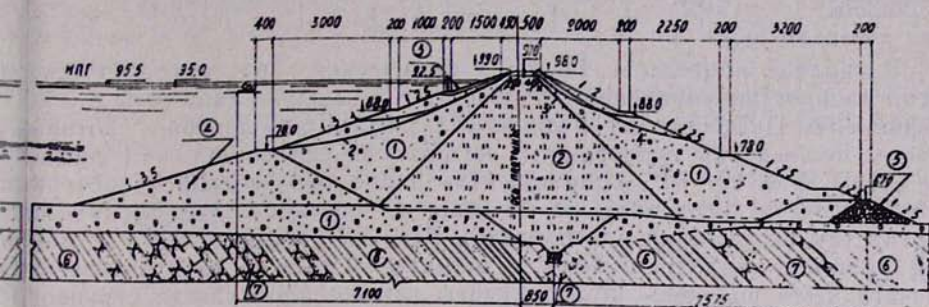


Рис. 1. Поверхности сдвига откосов

Такой профиль не отвечает современным представлениям о сейсмостойкости гидросооружений из грунтовых материалов, верхняя часть которых при землетрясениях подвергается наиболее интенсивным сейсмическим нагрузкам и должна иметь более пологие откосы или возводиться из более качественных материалов с достаточным уплотнением для повышения их упругих динамических и прочностных свойств. Основание плотины сложено чередующимися пластами плотных глин (6), песчаников (7), глин с прослоями песчаников (8) и др., которые в пределах поймы покрыты аллювиальными гравелисто-галечниковыми отложениями мощностью 6—10 м (рис. 1), ядро сооружения при помощи зуба из того же материала сопряжено с глинистыми породами основания. Плотина возводилась методом послойной отсыпки с последующей укаткой грунтов. По проекту объемная масса суглинков в зубе назначалась равной $1,70 \text{ т/м}^3$, в ядре плотины— $1,60—1,65 \text{ т/м}^3$ и гравелисто-галечниковых грунтов— $2,10 \text{ т/м}^3$. Результаты геотехнического контроля во время строительства подтвердили [2], что фактическая плотность грунтов соответствовала проектной, а массами превышала ее (рис. 1).

Расчеты сейсмостойкости плотины на воздействие землетрясения интенсивностью 7 баллов ($K_c=0,025$) с проверкой на воздействие землетрясения силой 8 баллов ($K_c=0,05$) производились на основе статической теории при постоянных ускорениях по высоте сооружения. В этих расчетах принимались следующие значения объемной массы и прочностных свойств грунтов (табл. 1).

Прочностные характеристики грунтов

Грунты сооружения и основания	Объемная масса т/м^3		Коэффициент фильтрации $K_f, \text{см/с}$	Скорости упругих волн м/с		Модуль упругос- ти $E, \text{т/м}^2$	Коэффициент Пуассона μ	Сопротивле- ние сдвигу	
	$\gamma_{\text{ск}}$	$\gamma_{\text{нас}}$		продольных V_p	поперечных V_s			c_0	$C, \text{т/м}^2$
Суглинок зуба и яд- ра плотины	1,65	2,00	$1,2 \cdot 10^{-4}$	790	250	35400	0,415	18	2,5
Гравелисто-галечни- ковые грунты вер- ховой призмы	2,15	2,40	$2,3 \cdot 10^{-2}$	625	300	58400	0,35	35	—
Гравелисто-галечни- ковые грунты ни- зовой призмы	2,15	2,40	$2,3 \cdot 10^{-2}$	560	300	54000	0,30	35	—
Средние для всего сооружения	2,0	2,0	—	640	300	51200	0,26	—	—

В таблице приведены также динамические характеристики (ско-
рости распространения упругих волн V_p, V_s , модули упругости E и ко-
эффициенты Пуассона μ) материалов разных зон плотины, которые
использовались при проверочных расчетах ее сейсмостойкости согласо-
но СНиП-II-A. 12—69*. При проектировании производилась проверка
устойчивости откосов плотины на сдвиг по круглоцилиндрическим по-
верхностям скольжения при отметках ВБ—75 м; 95,5 м (НПУ) и быст-
рой сработке водохранилища с отметки 95,5 до 75 м. В результате
расчета были получены коэффициенты запаса устойчивости верхового
откоса 1,50—при основном и 1,19—при особом (с учетом сейсмичности)
сочетаниях нагрузок, а низового откоса—соответственно 1,25 и 1,05.
Строительство плотины было начато в 1954 г. и закончено в 1961 г.
Наблюдения за ее осадками и смещениями были начаты в III кварта-
ле 1961 г. после наполнения водохранилища до уровня на 6,5 м ниже
НПУ. К началу 1965 г. осадка гребня составила 70—80 см; а к момен-
ту землетрясения она стабилизировалась, достигнув 1,0—1,1 м. Непос-
редственно перед землетрясением водохранилище проектным объемом
100 млн. м^3 оказалось на 90% заполненным наносами, слой которых
у плотины имел толщину 22—23 м, а слой воды в этом месте состав-
лял 7,0 м.

14 мая 1970 г. плотина перенесла сильное Дагестанское землетря-
сение с эпицентром вблизи аула Кумторкала в 30—35 км к юго-западу
от г. Махачкала. При этом наблюдались [3] сильный форшок 14/V
1970 г. в 9 час. 20 мин. 22 сек. с $M=6,1$ и $H=18$ км; основной толчок
14/V 1970 г. в 18 час. 12 мин. 24 сек. с $M=6,5$ —6,6, очагом глубиной
 $H=12$ км и протяженностью $L=30$ км, а также длительная серия аф-
тершоков с очагами, как вблизи аула Кумторкала, так и в районе
Чиркейской ГЭС, некоторые из которых достигали $M=5,5$.

При основном толчке интенсивность сотрясений в юго-западной
части эпицентральной зоны достигала 8—9 баллов, а площадь сотря-
сений силою 8 баллов составляла около 1000 км^2 . Вблизи Чир-Юрт-
ской плотины, находившейся на расстоянии до 30 км от эпицентральной
зоны, землетрясение ощущалось как 7—8-балльное. Землетрясение
вызвало разрушение многих зданий (в пос. Зубутль, Старый и Новый
Черкей), а также обвалы и оползни больших масс осадочных пород

(объемом от 10 млн. м³ в районе Ахатлы до 1 млн. м³ в районе Дылым).

Во время форшока и основного толчка ощутимые деформации и повреждения получила Чир-Юртская плотина. По всей длине плотины на поверхности гребня (по его середине, а также у бровки верхового и низового откосов) образовались крупные продольные трещины, причем ширина некоторых из них достигала 40—45 см. На глубине 2—3 м они резко уменьшались по ширине и исчезали в суглинках ядра. На первом метре в ядре крупные трещины распадались на серию мелких, которые далее обнаруживались в виде мелких следов скольжения. Парапет наклонился под углом 10—15° и был смещен примерно на 1 м в сторону ВБ, что соответствует суммарной величине раскрытия трещин на гребне плотины.

Вблизи береговых примыканий наблюдались поперечные трещины в парапете, бетонных покрытиях откосов и сопряжения гребня с береговым устоем. У восточного примыкания плотины произошел разрыв бетонного покрытия, причем восточный край разрыва оказался поднятым и надвинутым на западный край на 10—15 см. Образование поперечных трещин очевидно объясняется взаимными смещениями плотины и берегового устоя. Откосы плотины не имели видимых нарушений.

Как показали полевые и лабораторные исследования [2], под воздействием землетрясения в верхней части ядра плотины наблюдалось разуплотнение грунта (табл. 2).

В целом, землетрясение 14 мая 1970 г. с $M=6,6$ не вызвало остановки Чир-Юртской ГЭС и не нарушило нормальной эксплуатации сооружений и оборудования гидроузла.

Таблица 2

Изменения объемной массы после землетрясения

Глубина от верха ядра, м	Объемная масса скелета суглинка в ядре, т/м ³							
	в период строительства				после землетрясения			
	число определений	средний	максимальный	минимальный	число определений	средний	максимальный	минимальный
0—1	33	1,63	1,68	1,60	5	1,37	1,44	1,27
1—2	35	1,63	1,70	1,60	15	1,57	1,65	1,49
2—3	43	1,62	1,68	1,60	14	1,55	1,60	1,40
3—4	39	1,61	1,66	1,60	—	—	—	—

Благоприятную роль, очевидно, сыграло то обстоятельство, что к моменту землетрясения водохранилище оказалось на 90% глубины заполненным наносами и уровень воды в нем составлял всего 7 м. После землетрясения был произведен ремонт плотины, который заключался в снятии верхнего разрыхленного грунта до глубины около 2,6 м (т. е. до отметки, ниже которой объемная масса суглинка в ядре была не менее 1,55 т/м³), в уплотнении обнаженной поверхности ядра тяжелыми трамбовками, после чего плотина была досыпана до проектных отметок и установлен новый парапет.

Позднее в ВНИИГе были выполнены поверочные расчеты сейсмостойкости плотины по принятой в новых нормах [4] динамической линейно-спектральной теории на воздействие землетрясений интенсивностью 7 баллов ($K_c=0,025$) и 8 баллов ($K_c=0,05$) при расчетных характеристиках материалов, приведенных в табл. 1.

Определение проекции на направление j сейсмической нагрузки S_{ik} , действующей на элемент Q_k , отнесенной к точке K сооружения, при i -той форме его колебаний производилось по формуле

$$S_{ikj} = K_c m Q_k m^0 \beta_i \eta_{ikj}. \quad (1)$$

Входящие в нее коэффициенты принимались равными: $m^0=1,3$ —для грунтовых гидросооружений I класса; $m^0=0,7$ —для сооружений этого вида всех классов; β_i —по графику рис. 2 СНиП [4] или по формуле $\beta_i=1/T_i$, но не менее 0,8 и не более 3,0. Кроме того, принималось ограничение $\beta_i^2 = m^0 \beta_i \geq 0,8$.

Локальные коэффициенты форм собственных колебаний η_{ikj} находились из расчета частот и форм собственных колебаний плотины по методам сдвигового клина (МСК—одномерная задача) и конечных элементов (МКЭ—двухмерная задача).

Расчетные значения проекций на направление j сейсмических нагрузок S_{kj} (или ускорений S_{kj}^*) в точке k сооружения определялись по формуле

$$S_{kj} = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_{ikj}^2}. \quad (2)$$

В табл. 3 приведены периоды собственных колебаний плотины, вычисленные по МСК и МКЭ при осредненных для всего сечения значениях массовой плотности грунтов и скоростей распространения в них упругих волн.

Таблица 3

Периоды колебаний, вычисленные разными методами

Метод расчета	Периоды T (с) k -тых форм собственных колебаний									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	11 21	12 22	13 23	14 24	15 25	16 26	17 27	18 28	19 29	20 30
МСК	0,323	0,140	0,090	0,066	—	—	—	—	—	—
МКЭ	0,402	0,268	0,226	0,209	0,193	0,182	0,171	0,156	0,150	0,141
	0,139	0,133	0,132	0,129	0,123	0,117	0,115	0,111	0,109	0,106
	0,103	0,101	0,098	0,095	0,094	0,092	0,091	0,089	0,087	0,086

Из таблицы видно, что плотина обладает высокочастотным спектром, поэтому только для первого тона ее собственных колебаний коэффициент динамичности $\beta_1 = \frac{1}{0,402} \approx 2,5 < 3,0$, а для остальных тонов

$\beta_i > 3,0$; расчет по двухмерной схеме МКЭ приводит к получению более длинных периодов и более плотного спектра в сравнении с расчетом по одномерной схеме МСК;

периоды собственных колебаний плотины, вычисленные по МКЭ при двух указанных в табл. 1 вариантах упругих динамических характеристик материалов, практически не различались между собой.

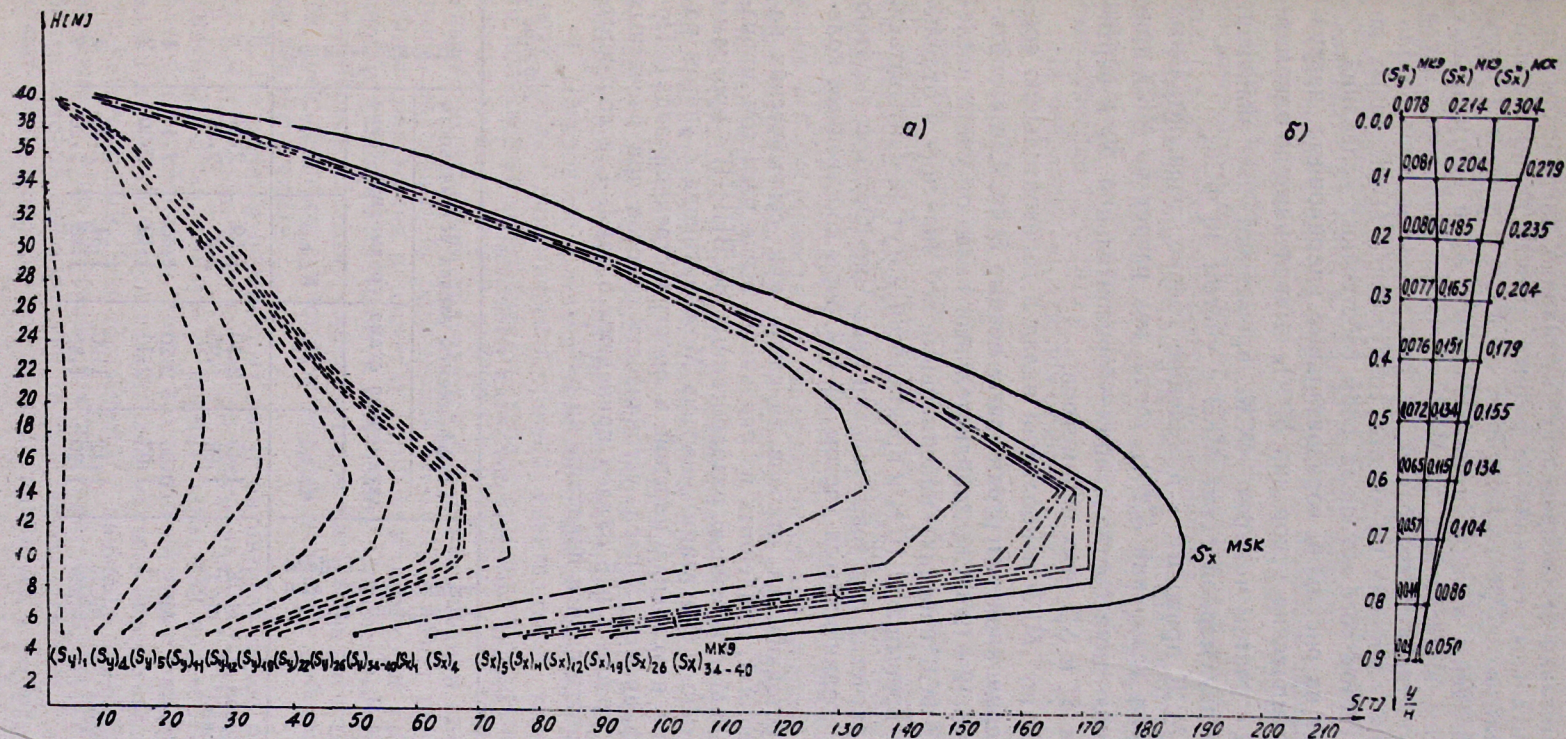


Рис. 2. Распределение усилий в разных сечениях:
 а) суммарных инерционных нагрузок в горизонтальных сечениях;
 б) горизонтальных сейсмических ускорений по высоте сооружения

На рис. 2 показано а) распределение суммарных инерционных нагрузок в горизонтальных сечениях на разных уровнях по высоте плотины—горизонтальных $S_x^{мск}$ вычисленных по МСК с учетом 4 форм собственных колебаний, а также горизонтальных S_x и вертикальных S_y составляющих, вычисленных по МКЭ с учетом различного числа (до 40) форм собственных колебаний; б) распределение горизонтальных сейсмических ускорений по высоте сооружения, вычисленных по МСК и МКЭ с учетом того же числа форм собственных колебаний.

Как следует из рисунков, горизонтальные инерционные нагрузки $S_x^{мск}$ (или сейсмические ускорения $S_x^{*мск}$), вычисленные по одномерной схеме МСК с учетом четырех ФСК, превышают их значения, вычисленные по двумерной схеме МКЭ с учетом 40 ФСК;

расчет по МСК приводит к получению только горизонтальных нагрузок $S_x^{мск}$ (или ускорений $S_x^{*мск}$), тогда как расчет по МКЭ приводит к получению двух составляющих—горизонтальной S_x и вертикальной S_y (или S_x^* и S_y^*) этих параметров;

при расчете по МКЭ наибольший вклад в горизонтальную составляющую инерционной нагрузки дают первые 5 ФСК, а в вертикальную—первые 12—19 ФСК, дополнительный вклад от учета последующих (до 40) ФСК невелик—максимальные его значения в отдельных сечениях не превышают 10 % и практически могут не учитываться.

Поэтому в расчетах грунтовых плотин типа Чир-Юртской высотой до 40 м можно ограничиваться учетом 10—12 форм собственных колебаний.

Проверка устойчивости откосов на сдвиг при сейсмических нагрузках (ускорениях), найденных из указанных выше расчетов, производилась на ЭЦВМ с помощью разработанных во ВНИИГе программ по методу наклонных сил взаимодействия Можевитинова с учетом работы сооружения в условиях плоской и пространственной задач. Полученные коэффициенты запаса устойчивости откосов при расчетных землетрясениях силою 7 и 8 баллов приведены в табл. 4, а соответствующие поверхности сдвига показаны на рис. 1.

Таблица 4

Значения коэффициентов запаса устойчивости

Сейсмичность района, баллы	Откосы	Метод определе- ния инерционных нагрузок	Коэффициенты запаса устойчивости				№ поверхности	
			двухмерная схема		трехмерная схема			
			$K_{сейсм}$	$K_{стат}$	$K_{сейсм}$	$K_{стат}$		
7 баллов	Верховой	МСК	1,45	2,20	1,59	2,44	1	
		МСК	1,68	1,96	2,0	2,36		
	Верховой	МСК	0,96	2,20	1,05	2,44		2
		МКЭ	1,03	2,11	1,12	2,30		
8 баллов	Низовой	МСК	1,12	1,96	1,34	2,35	3	
		МКЭ	1,20	1,89	1,43	2,26	4	

Из анализа результатов поверочных расчетов сейсмостойкости плотины можно сделать следующие выводы:

При расчетах устойчивости откосов с использованием инерционных нагрузок, найденных по одномерной схеме МСК, коэффициенты запаса оказываются на 7—8% меньше, чем при расчетах с использованием инерционных нагрузок, найденных по двухмерной схеме МКЭ;

Расчет пространственной устойчивости откосов плотины приводит к получению более высоких (на 10—20%) коэффициентов запаса по сравнению с расчетом в рамках плоской задачи;

Верховой откос при сейсмичности 7 баллов и низовой во всех случаях (при сейсмичности 7 и 8 баллов) имеют коэффициенты запаса, близкие к нормативным или превышающие их, а верховой откос при сейсмичности 8 баллов имеет коэффициенты запаса меньше нормативных, т. е. является сейсмически неустойчивым.

Таким образом, результаты расчета сейсмостойкости Чир-Юртской плотины по принятой в новых нормах [4] динамической линейно-спектральной теории ближе соответствуют данным о ее поведении при землетрясении 17/V 1970 г.

На основании вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Чир-Юртская каменно-земляная плотина, оценка сейсмостойкости которой производилась по статической теории на воздействие расчетного землетрясения силою 7 баллов с проверкой на 8 баллов при Дагестанском землетрясении 14/V 1970 г., подверглась воздействию сейсмических толчков, по силе близких к расчетным, и получила довольно значительные деформации и повреждения.

2. Из этого следует, что принятая в прежних нормах статическая теория сейсмостойкости не отражает реальных условий работы грунтовых гидросооружений при землетрясениях и не дает надежной оценки их сейсмостойкости.

3. Принятый в проекте и реализованный при строительстве профиль, характеризующийся увеличением крутизны откосов от основания к гребню, является не вполне сейсмостойким, так как не учитывает, что именно верхняя, пригребневая часть гидросооружений подвержена наиболее интенсивным сейсмическим нагрузкам при землетрясениях.

4. Поверочные расчеты сейсмостойкости плотины по принятой в новых нормах динамической линейно-спектральной теории показали, что получаемые коэффициенты запаса устойчивости откосов зависят от используемых методов расчета и расчетных схем сооружения. Наименьшие их значения получаются при использовании инерционных нагрузок, найденных по одномерной схеме МСК. Учет пространственной работы сооружения в расчетах устойчивости откосов при других одинаковых условиях приводит к получению более высоких коэффициентов запаса. Поэтому выбор методов расчета и расчетных схем должен производиться с учетом реальных условий работы сооружений при землетрясениях.

5. По данным поверочных расчетов низовой откос при сейсмичности 7 и 8 баллов, а верховой при сейсмичности 7 баллов имеют коэффициенты запаса, близкие к нормативным или превышающие их, т. е. являются устойчивыми, тогда как верховой откос при сейсмичности 8 баллов имеет коэффициенты запаса меньше нормативных, т. е. является неустойчивым. Это согласуется с данными о деформациях и повреждениях Чир-Юртской плотины при землетрясении 14/V 1970 г., вблизи которой сейсмические толчки ощущались как 7—8-балльные, и служит свидетельством того, что принятый в нормах [4] линейно-

спектральный метод расчета лучше, чем статистический, учитывает условия работы грунтовых гидросооружений при землетрясениях.

ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева

ЛИТЕРАТУРА

1. Гвелишани Л. Г., Магомедов З. А., Шмальцель Н. П. Каскад Чир-Юртекских ГЭС им. В. И. Ленина в Дагестанской АССР. «Гидротехническое строительство», № 5, 1970.
2. Босовский Л. М., Овсепян Г. О. Влияние землетрясения на сооружения каскада Чир-Юртекских ГЭС «Гидротехническое строительство», № 1, 1972.
3. Штейнберг В. В., Зонина З. А., Плетнев К. Г., Алексин П. А. Параметры колебаний грунта при Дагестанских землетрясениях 1970 г. Тр. ИФЗ АН СССР. «Вопросы инженерной сейсмологии», вып. 15. «Влияние грунтов на интенсивность сейсмических колебаний». М., «Наука», 1973.
4. СНиП II-A. 12-69* «Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования». М., Стройиздат, 1977.
5. СНиП II-53—73. «Плотины из грунтовых материалов. Нормы проектирования». М., Стройиздат, 1974.
6. Красников Н. Д., Троицкий А. П., Хорьков В. И. Определение инерционных нагрузок на гидросооружения из грунтовых материалов. «Известия ВНИИГ», т. 131, Л., «Энергия», 1979.
7. Красников Н. Д., Хорьков В. И. Проверка сейсмической устойчивости откосов грунтовых гидросооружений. «Известия ВНИИГ», т. 131, Л., «Энергия», 1979.
8. Хорьков В. И. Методика расчета сейсмической устойчивости откосов гидросооружений из грунтовых материалов при учете их работы в условиях плоской и пространственной задач, Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, т. 135.