ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО БОЛЬШИХ ПЛОТИН

XIII

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО БОЛЬШИХ ПЛОТИН

Н.С. РОЗАНОВ, А.И. ЦАРЕВ,
Л.П. МИХАЙЛОВ, И.Б. СОКОЛОВ

АВАРИИ И ПОВРЕЖДЕНИЯ БОЛЬШИХ ПЛОТИН

Под редакцией А. А. Б о р о в о г о

МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1986

ББК 33.2
П 79
УДК 627.82.059.22

Проектирование и строительство больших плотин. Аварии
П 79 и повреждения больших плотин/ Н.С. Розанов, А.И. Царев, Л.П. Михайлов и др.; Под ред. А.А. Борового. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 128 с.: ил.

Анализируются и обобщаются доклады и сообщения во вопросу "Аварии и повреждения плотин", обсуждавшемуся на XIII Международном Конгрессе по большим плотинам (СИГБ) в Нью-Дели. Рассматриваются основные причины и формы разрушений и повреждений плотин, опыт их восстановления и ремонта, обеспечение безопасности эксплуатации.

Рассчитана на инженеров-гидротехников, занимающихся исследованиями, проектированием, строительством и эксплуатацией гидротехнических сооружений, а также может быть полезна студентам гидротехнических специальностей вузов.

3302000000-291
П---------- 97 86 ББК 33.2
051 (01)-86

©Энергоатомиздат, 1986

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одной из наиболее важных и ответственных задач развития народного хозяйства СССР является удовлетворение все возрастающих потребностей в электроэнергии промышленности и сельского хозяйства в соответствии с долгосрочной программой развития энергетики нашей страны. В решении этой задачи немалую роль играет не только интенсивное строительство новых крупных гидроузлов, но и обеспечение надежной работы эксплуатируемых гидроэлектростанций.

Обеспечение безаварийной работы гидроузлов уже давно беспокоит всю мировую гидротехническую общественность. Не без основания считают недопустимым такое положение, при котором около 15% всех в мире плотин вызывают сомнение в отношении их надежности, и что аварии — мелкие и серьезные — происходят ежегодно почти на 5% существующих плотин. Некоторые из аварий, имевших место за последние годы в США, Индии и в других странах, носили катастрофический характер. Они нанесли многомиллионный ущерб, вызвали большое число человеческих жертв. Уместно отметить, однако, что в СССР подобных катастрофических аварий не было. Однако менее значительные повреждения иногда имели место и у нас.

Учитывая это. Международная комиссия по большим плотинам (СИГБ) на XIII Конгрессе, проходившем в конце 1979 г. В Нью-Дели, в качестве одного из центральных поставила на рассмотрение вопрос №49: "Аварии и разрушения плотин". По этому вопросу было представлено 47 докладов из многих стран мира. В них описывались аварии, происходившие на плотинах различных типов.

Очень важно, что докладчики не ограничивались констатацией происходивших аварий и повреждений плотин, но приводили многие ценные соображения, формулировали рекомендации, выполнение которых должно помочь в разработке мероприятий, повышающих безопасность гидротехнических сооружений, продлить на многие годы их безопасную эксплуатацию. Эти положения нашли отражение в настоящей книге, которая публикуется по рекомендации Советского национального комитета (СНК) СИГБ.

В подготовке материалов рукописи принимали участие Н.Г. Кулагина и С. Г. Сатановский, за что авторы выражают им свою благодарность.

Все замечания и пожелания по книге просьба направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

В современном гидротехническом строительстве наблюдается в последние десятилетия устойчивая тенденция возведения плотин большой высоты и длины, создающих водохранилища, объем воды в которых достигает сотен миллиардов кубических метров. Естественно, что с увеличением размеров плотин возрастают и нагрузки, действующие на эти плотины, на берега и дно чаши водохранилища, а следовательно, растет и вероятность их значительных повреждений, которые могут привести к катастрофическим последствиям. Разрушение больших плотин способно нанести не только громадный материальный ущерб, но и привести к многочисленным человеческим жертвам.

В истории гидротехники зарегистрированы многочисленные случаи разрушения и повреждения плотин, некоторые из которых имели катастрофический характер. Так, в 1923 г. в Италии произошло разрушение многоарочной плотины Глено, имевшей высоту 75 м. В результате прорыва через нее 5 млн. $м^3$ воды погибло около 500 чел., хозяйственный ущерб выразился суммой в 150 млн. лир. В 1927 г. В США разрушилась криволинейная в плане гравитационная плотина Сент Френсис высотой 63 м, что вызвало гибель свыше 400 чел. и убытки, превышающие 10 млн. долларов.

Несмотря на значительные достижения техники строительства, совершенствование его технологии, улучшение качества применяемых строительных материалов, а также повышение общего уровня знаний и технических решений, происходят аварии плотин, в том числе катастрофические, и в нынешнее время. Характерно, например, крушение в 1959 г. 66-метровой французской арочной плотины Мальпассе, вызвавшее образование волны прорыва и разрушение большей части города Фрежюс, при котором число жертв превысило 500 чел.

Еще более разрушительной оказалась катастрофа, происшедшая в 1963 г. на гидроузле Вайонт (Италия). Она была вызвана обвалом с берега в водохранилище 250 млн. $м^3$ скальных пород: внезапный перелив 40 млн. $м^3$ воды через гребень плотины высотой 265,5 м вызвал образование в нижнем бьефе волны прорыва высотой 20 м. В результате было полностью разрушено 4 населенных пункта, погибло свыше 3 тыс. чел

В 1976 г. в США произошло разрушение грунтовой плотины Тчтон высотой 93 м, принесшее ущерб, оцениваемый суммой до 1 млрд. долларов. Лишь благодаря своевременному оповещению населения, находившегося в опасной зоне, человеческие жертвы оказались относительно небольшими.

Катастрофические разрушения имели место в 1977 г. в Бразилии на каменно-земляных плотинах Эвклидос дель Хунха высотой 56 м и Арнанда

Саллес ди Оливейро высотой 35 м. Серьезные аварии произошли в этом же году на крупнейшей грунтовой плотине Тарбелла (Пакистан), на плотине Изу (Япония) высотой 30 м. В результате катастрофы на последней плотине разрушено свыше 3000 домов, погибли 21 чел.

Одной из самых разрушительных была происшедшая в 1979 г. авария индийской плотины Мачху-II при неожиданном переливе через ее гребень воды слоем свыше 3 м. В результате этой катастрофы было полностью разрушено 68 деревень, смыто 12700 домов, погибли тысячи жителей.

В нашей стране также имели место аварии и повреждения плотин (Широковской, Сегозерской, Ортотокойской, Мармарикской и др.). Но эти аварии (как указывается в [Д-36]) имели ограниченный характер; они не принесли столь значительного ущерба и не вызвали человеческих жертв.

Вопросы обеспечения длительной безопасной работы строящихся и эксплуатируемых гидросооружений, в том числе больших плотин, чрезвычайно актуальны. Очевидно, что для успешного решения этой важной задачи необходимо эффективно использовать весь мировой опыт гидротехнического строительства, как положительный, так и отрицательный. Поэтому с самого начала своей деятельности Международная комиссия по большим плотинам (СИГБ) уделяла пристальное внимание вопросам, связанным с безопасной эксплуатацией и с изучением причин повреждения плотин, а также с организацией эффективных наблюдений за состоянием гидросооружений. Эти проблемы неоднократно обсуждались на регулярно проводившихся международнах конгрессах СИГБ[1], а также в многочисленных технических комитетах.

Так, уже на I Конгрессе СИГБ (Стокгольм, 1933 г.) в числе прочих обсуждались многочисленные доклады по вопросам: "Разрушение бетона при старении гравитационных плотин" (вопрос 1а), а также "Влияние внутренней температуры на разрушение гравитационных плотин" (вопрос 16). На IX Конгрессе (Стамбул, 1967 г.) был рассмотрен вопрос 34: "Состояние плотин и его ухудшение со временем".

Исключительно большое внимание уделяла СИГБ натурным исследованиям больших плотин и их оснований, позволяющим своевременно обнаруживать признаки ухудшения состояния гидротехнических сооружений и предупреждать их аварии. Так, например, на III Конгрессе (1948 г.) рассматривался вопрос 9: "Методы и приборы для измерения напряжений и деформаций в плотинах". В 1958 г. на VI Конгрессе — вопрос 21: "Измерение напряжений и деформаций в плотинах, их основаниях и в береговых устоях, сопоставление данных этих измерений с результатами расчета и модельных исследований". На VIII Конгрессе в 1964 г. был поставлен вопрос 29: "Результаты натурных исследований больших плотин всех типов и их интерпретация". Вопрос 38, обсуждавшийся на X Конгрессе

[1] Перечень вопросов, рассмотренных на I—XIII Конгрессах Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ), приводится в книге Н.С. Розанов, Д.Д. Сапегин, М.Б. Гинзбург "Предварительные исследования для начальных стадий проектирования и строительства плотин" под редакцией А.А. Борового, М., Энергоиздат, 1981, с. 137—139.

(1970 г.), был посвящен теме "Наблюдения за плотинами и водохранилищами в период эксплуатации". Наконец, на XII Конгрессе в 1976 г. рассмотрен вопрос 45: "Исследования фильтрации и дренажа плотин и их оснований".

На XIII Конгрессе (Нью-Дели, 1979 г.) широко обсуждался вопрос 49: "Аварии и повреждения больших плотин", по которому было представлено 47 докладов из 25 стран всех континентов. Кроме того, этому же вопросу были посвящены разделы пяти обобщающих докладов, присланных национальными комитетами СИГБ, а также сообщения, освещающие отдельные частные вопросы гидротехнического строительства в разных странах. Интересные мнения высказывались и в выступлениях участников конгресса на проводившейся дискуссии[1].

Генеральный докладчик по вопросу 49 Р. Б. Янсен [ГД-49, США] отметил, что проблема безопасности существующих плотин все больше интересует инженеров-гидротехников мира. Он сообщил, что в присланных на конгресс докладах освещаются следующие основные вопросы: повреждения бетона или каменной кладки; основные проблемы, связанные с созданием каменнонабросных плотин; поведение оснований, пропуск расходов воды; наблюдения за состоянием плотин.

В свете этих проблем Р.Б. Янсен излагает и анализирует наиболее существенные материалы, содержащиеся в этих докладах.

Следует, однако, отметить, что содержание докладов по 49-му вопросу охватывает более широкий круг проблем, чем это кажется из названия. В большинстве докладов обсуждались, в основном, проблемы, возникающие в связи с износом, старением и повреждением по разным причинам сооружений, а также вопросы контроля и наблюдений за их поведением. Ремонтно-восстановительным и профилактическим работам посвящены 16 докладов В докладах, содержащих описания повреждений плотин, также сообщается о произведенных на них ремонтных работах. В нескольких докладах рассматриваются методы оценки устойчивости плотин и вопросы обязательного государственного контроля за безопасностью плотин.

В отдельных докладах и сообщениях уделяется внимание научным исследованиям, необходимым для обеспечения длительной безопасной работы гидротехнических сооружений. Показано, что при проектировании их в настоящее время используются различные, в основном прогрессивные, методы расчетов, а также результаты регулярных обследований, данные натурных наблюдений на строящихся и эксплуатируемых сооружениях.

Отмечается, что около 20% эксплуатируемых плотин имеют возраст свыше 50 лет. Они проектировались на основе элементарных расчетов,

[1] Перечень докладов, сообщений и выступлений на XIII Конгрессе СИГБ по вопросу№ 49 приведен в приложениях 1, 2. В этих приложениях, а также в тексте книги ссылки даютсяся в следующем виде: ГД-49 — генеральный доклад по вопросу № 49; Д-47 — доклад № 47 по вопросу № 49; ОД-4 — обобщающий доклад НК СИГБ № 4 на XIII Конгрессе СИГБ; С-12 — сообщение № 12 на XIII Конгрессе; В-2 (фамилия выступающего) — выступление по вопросу № 49, ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках.

не учитывающих многие существенные факторы. Наблюдения показывают, что состояние многих из этих плотин постепенно ухудшается.

Однако, материалы Конгресса не дают достаточно полной информации о действительной частоте, характере и причинах аварий плотин, происходивших в истории мирового плотиностроения.

Техническим Комитетом СИГБ "Разрушение и аварии больших плотин", возглавляемым Т. Нильсеном[1], начиная с 1964 г. выполнялась большая систематическая работа по сбору сведений о значительных авариях и повреждениях больших плотин, имевших место во многих странах мира. Комитет провел подробный анализ и обобщение всех зарегистрированных аварийных случаев и представил доклад "Аварии больших плотин" [16], одобренный на заседании Исполнительного комитета СИГБ и в окончательной редакции изданный в 1978 г. Этот доклад и приложения к нему существенно дополняют материалы, рассмотренные XIII Конгрессом, и совместно с ними дают достаточно полное представление о современном состоянии рассматриваемого важного вопроса.

В настоящей книге, наряду с материалами Конгресса, приводятся и некоторые сведения, почерпнутые из упомянутого доклада Технического комитета СИГБ, в частности, описания наиболее характерных и поучительных примеров разрушений и повреждений больших плотин. В книге используются также отдельные сведения о повреждениях плотин, опубликованные в печати в последние годы.

В соответствии с изложенным содержание книги разделено на 7 глав. В первой главе приводятся основные сведения о количестве и характере происходивших аварий и повреждений плотин, а также об основных причинах, приводящих к их возникновению.

Вторая глава посвящена рассмотрению аварий бетонных и каменных плотин и их оснований, вызываемых воздействием на них влаги и температуры, дефектами оснований, нарушением работы дренажа и другими причинами. Обращается внимание на то, что ряд повреждений был вызван недостатками проектирования и строительства гидроузлов. Вопросы устранения, а также недопущения повреждений плотин, освещаются в третьей главе. Здесь описываются основные применявшиеся при ликвидации аварий методы капитального и профилактического ремонта бетонных плотин, оценивается их эффективность.

В четвертой и пятой главах рассматриваются характерные аварии плотин из грунтовых материалов и методы их ремонта. Приводятся описания доложенных на Конгрессе случаев разрушения таких плотин, образованием трещин в их элементах, возникновения провальных воронок.

Шестая глава посвящена описаниям и анализу результатов натурных исследований, выполнявшихся на плотинах различного типа. Приведенные данные имеют большое значение для рационального проектирования и безаварийной эксплуатации плотин, для совершенствования методов оценки их безопасности.

В седьмой главе трактуются вопросы организации контроля за состоянием плотин.

В заключении приводятся некоторые выводы, обоснованные материалами обсуждения на Конгрессе рассмотренного важного вопроса.

[1] В работе этого комитета участвовал член СНК СИГБ А.А. Сорокин.

Глава 1

СТАТИСТИКА АВАРИЙ ПЛОТИН И ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Аварии плотин имеют, как известно, самый различный характер. Это обусловливается недостаточным учетом разнообразия климатических, топографических, геологических, гидрогеологических условий в створах плотин, а также возможностью их неблагоприятных сочетаний. Сказываются и различия конструкций плотин, свойств материалов, использованных при их возведении, применяемой технологии строительства. Так, например, бетон плотин, построенных 30—50 лет тому назад, по многим основным свойствам существенно отличается от бетона современных плотин. Нельзя встретить две полностью идентичные плотины, еще меньше вероятность разрушения плотин близкой конструкции по одной и той же, к тому же единственной, причине. Все это не позволило к настоящему времени накопить данные, необходимые для достоверной статистической оценки вероятности аварий больших плотин, однако работы в этом направлении продолжают проводиться в ряде стран. По этой же причине пока не сформулированы критерии надежности плотин, гарантирующие при минимальных затратах безотказную их работу в течение заданного периода времени, например за 50—100 лет.

Сведения о количестве плотин, построенных на земном шаре, крайне противоречивы. Так, на IX Конгрессе СИГБ в докладе Е. Грюнера (Швейцария) указывается, что общее количество функционирующих в 1977 г. плотин различных размеров, разрушения которых могло бы вызвать значительный ущерб, достигало примерно 150 тыс. В работе М. Карлье [11] (Франция) утверждается, что суммарное число плотин высотой больше 15 м — эксплуатируемых, строящихся и намеченных к строительству — составляет 30000. Ежегодно вступают в строй еще 300—400 таких плотин. Однако в Мировом Регистре плотин (МРП) на 31 декабря 1962 г. числилось всего 9248 больших плотин[1]. В это число входят плотины: арочного типа 581 (6,3%), контрфорсного 387 (4,2%), гравитационные 2376 (25,6%), земляные 5214 (56,4%), каменнонабросные 307 (3,3%), а также неопределенного типа 389 (4,2 %). К 1980 г. число зарегистрированных плотин возросло до 13500.

[1] Напомним, что в МРП регистрируются, в основном, плотины, высота которых превышает 15 м, а также плотины высотой более 10 м, имеющие длину по гребню свыше 500 м или если объем водохранилища, создаваемого плотиной, больше 250 тыс. м^3. В виде исключения в МРП вносятся и плотины оригинальной конструкции, а также возведенные на основаниях особого, сложного строения.

В докладе Технического Комитета СИГБ по авариям и разрушениям плотин- [15] приводятся основные данные об авариях, происходивших в период с 1830 по 1966 г. В этот период в 43 странах мира произошли 534 аварии на 466 плотинах, в том числе: на плотинах высотой свыше 15 м, построенных в период с 1900 по 1965 гг., 290 аварий (из них 200 — катастрофические и 90 — серьезные повреждения); на малых плотинах высотой 5—15 м 98 аварий; на старых плотинах, построенных в прошлом столетии, 78; на строящихся плотинах, а также в специфических случаях 68 аварий.

В табл. 1 помещены сведения об общем количестве зарегистрированных аварий больших плотин в разные годы и об изменении числа поврежденных плотин со временем. Из приведенных данных следует, что в прошлом столетии разрушения больших плотин происходили в среднем один раз в два года, повреждения — раз в полтора года. В XX в. число аварий плотин заметно выросло. К 1930 г. происходило в среднем 7 разрушений и крупных повреждений в год. В период 1940—1949 гг. количество тяжелых аварий довольно резко снижается, несмотря на то, что в это время происходили войны в Европе и Азии. Возможно, что это связано с широким применением в строительстве 20—30 гг. литых бетонов, обладавших пониженной прочностью и морозостойкостью, а также с отсутствием в тот период совершенной строительной техники, необходимой при массовом строительстве больших плотин.

Затем число аварий снова растет, и к 1966 г. происходило больше 4 разрушительных аварий и около 11 значительных повреждений в год. Соответственно растет и ущерб, вызываемый этими авариями.

Таблица 1. Изменения количества и характера аварий во времени

Период	Количество аварий						$\frac{Р}{П}$, %
	Р		П		Всего		
	за период	за год	за период	за год	за период	за год	
До 1830 г.	1	—	—	—	1	—	—
1830—1899 гг.	37	0,5	19	0,3	56	0,8	2
1900—1909 гг.	15	1,5	8	0,8	23	2,3	1,9
1910—1919 гг.	25	2,5	21	2,1	46	4,6	1,2
1920—1929 гг.	33	3,3	37	3,7	70	7,0	0,9
1930—1939 гг.	15	1,5	39	3,9	54	5,4	0,4
1940—1949 гг.	11	1,1	34	3,4	45	4,5	0,3
1950—1959 гг.	30	3,0	40	4,0	70	7,0	0,7
1960—1966 гг.	25	4,2	64	10,6	89	14,8	0,4
Нет сведений	10		2		12		5,0
Итого:	202	1,5	264	2,0	466		1,3
% к общему числу плотин	2,4		3,2		5,6		

Примечание. Характер аварий: Р — разрушения, П — повреждения.

Нужно признать, что точность приведенных данных вызывает большие сомнения. Далеко не во всех странах с одинаковой тщательностью регистрировались повреждения, иногда же они и сознательно скрывались по различным причинам. По имеющимся сведениям [13], только в США в последние десятилетия происходили 2—3 аварии катастрофического характера в год.

Отмечается также, что свыше 20 тыс. плотин США, по современным представлениям, не имеют, достаточного запаса надежности и требуют усиления. По-видимому, такое же положение имеет место и во многих других странах.

Следует вместе с тем учитывать, что общее число плотин в мире интенсивно возрастает и что в процентном отношении число аварий год от года заметно сокращается. Так, в прошлом столетии по данным международной статистики крупные аварии и повреждения происходили примерно на 12,5% всех эксплуатировавшихся тогда плотин. Теперь же (при заметном росте высоты плотин) аварийные ситуации возникают лишь на 0,8% их общего числа. Однако ущерб, вызываемый происходящими авариями, все еще недопустимо велик. Можно при этом отметить, что число человеческих жертв при катастрофических авариях со временем заметно уменьшается. Этому способствуют возросшие возможности оповещения населения о приближающейся опасности.

Во многих странах созданы специальные службы оповещения, которые действуют в критических ситуациях; разрабатываются автоматические системы предупреждения.

2. ХАРАКТЕРНЫЕ ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПЛОТИН

В генеральном докладе отмечается, что наибольшую угрозу для нормального существования плотин создают неблагоприятные природные условия — паводки, оползни, сейсмические воздействия и др., а также изменения свойств оснований и строительных материалов. Кроме того, со временем в грунте плотин и в основании может возникать высокое поровое давление или же образуются сосредоточенные пути фильтрации. К сожалению, в большинстве случаев эти изменения происходят медленно и их начало трудно обнаружить во время осмотров, необходимы инструментальные измерения.

Эксперт П. Комбель (Франция) в своем выступлении на Конгрессе [В-2] рассмотрел 131 случай разрушения плотин высотой более 15 м, т.е. около 1,5% общего числа плотин, зарегистрированных к тому времени в МРП. Им сделан анализ 127 случаев, так как по четырем плотинам причины разрушений остались невыясненными.

По приведенным данным примерно половина (62%) всех разрушений плотин происходила до начала их эксплуатации. Так, 19 каменнонабросных плотин разрушились еще в строительный период, в основном, вследствие перелива паводковых вод через недостроенные сооружения. Указывается, что этот тип плотин весьма уязвим при подобном воздействии. В процессе первого наполнения водохранилища разрушились 43 пол.-ностью построенные плотины разных типов. Делается вывод о необходи-

мости проявления крайней осторожности при первом нагружении плотин, которое должно проводиться под неослабным контролем. Следует предусматривать устройство в гидроузлах донных водосбросов, чтобы иметь возможность прекратить наполнение в необходимых случаях и быстро спустить уровень воды в водохранилище до безопасного.

Надо заметить, что в нашей стране практикуется наполнение водохранилища еще в ходе строительства плотины очередями. Это позволяет раньше начинать эксплуатацию ГЭС и получать электроэнергию при недостроенном сооружении. Таким образом, затраты начинают окупаться уже в строительный период. Кроме того, постепенно нагружая и частично разгружая основание и чашу водохранилища, можно подготовить его к восприятию полной нагрузки. Вследствие этого серьезных повреждений плотин при их нагружении не наблюдалось. За рубежом такой порядок наполнения водохранилища (до сдачи заказчику полностью законченного сооружения) не практикуется.

В 42 случаях (в том числе 12 бетонных и 30 грунтовых плотин) разрушения произошли при эксплуатации из-за недостаточной пропускной способности водосливов. Эксперт отмечает, что большая часть разрушений плотин по этой причине имела место на сооружениях, построенных еще в прошлом веке. Из построенных за последние 20 лет была разрушена лишь одна бетонная плотина и 12 каменнонабросных. На этом основании эксперт дает рекомендацию быть очень осторожным при назначении размеров водопропускных отверстий, строить водосливы с некоторым запасом против установленных расчетами, учитывать особенности и возможные осложнения условий их эксплуатации.

Из рассмотренных 23 случаев разрушений, происшедших не в связи с паводками, 5 имели место на плотинах устаревших конструкций (плотины из габионов, деревянные или из металлических конструкций), а остальные (18) —, на плотинах из грунтовых материалов, причем 11 аварий произошло вследствие плохой эксплуатации, 3 аварии — на плотинах, разрушившихся во время первого наполнения водохранилища, — из-за дефектов проекта. Лишь в четырех случаях было трудно (или не невозможно) предотвратить разрушение. Остальным авариям предшествовали явные признаки, которые можно было бы заблаговременно учесть и принять соответствующие меры.

То обстоятельство, что за последние 20 лет разрушилось 36 больших плотин (по 2 плотины в год, что очень много), расценивается И. Комбелем как отсутствие необходимой согласованности в деятельности проектировщиков, строителей, заказчиков и эксплуатационников. Он считает, что лишь в очень редких случаях уровень наших знаний и наши возможности могут оказаться недостаточными для предупреждения катастрофы. Автор предлагает уделять больше внимания регулярному наблюдению за состоянием плотин в ходе их строительства, при наполнении водохранилища и длительной эксплуатации.

В [Д-36] И.Б. Соколова, Н.С. Розанова, А.А. Храпкова, В.И. Севастьянова и В.С. Серкова (СССР) указывается, что известные разрушения и повреждения плотин вызывались действием различных объективных и субъективных факторов. В числе первых — при-

родные стихийные явления — ураганы, катастрофические ливни, горные обвалы, землетрясения и другие. К субъективным причинам относятся: ошибки в проектировании, нарушение технических правил на строительстве, неправильная эксплуатация сооружений и т.п. Многие аварии зарубежных плотин являлись следствием экономии средств, что проявилось в проведении недостаточного объема предварительных изысканий и исследований, низком качестве применявшихся строительных материалов, необоснованном сокращении размеров сооружений.

Главными и непосредственными причинами повреждений и разрушений плотин оказываются:

переливы воды через плотину при больших паводках и недостаточных размерах водопропускных сооружений;

неблагоприятные воздействия фильтрационных потоков, при которых происходят суффозионные процессы в теле плотин и в их основаниях;

старение материалов сооружений и оснований, вызывающее неблагоприятные изменения их физических свойств, потерю прочности и несущей способности, уменьшение водонепроницаемости и т.п.

Одной из причин, способствующих возникновению аварий, является, несомненно, и то, что во многих странах наиболее благоприятные для воззедения плотин створы в основном уже использованы. Дальнейшее гидротехническое строительство в этих странах приходится вести в створах, считавшихся ранее неблагоприятными. При этом часто стремятся возводить в них более эффективные высокие плотины, создающие большие водохранилища. Однако вероятность аварий таких плотин все же невелика, так как современные технические средства позволяют успешно выполнять их строительство.

В докладе отмечается, что в СССР наряду с общими для всех стран имеются причины повреждения плотин, обусловленные специфическими для нашей страны природными условиями (например, суровым климатом). Однако более обоснованные требования к проектированию, строительству и эксплуатации ответственных гидротехнических сооружений, сформулированные в действующих нормативных документах, практически обеспечили в СССР отсутствие серьезных повреждений больших плотин в результате перелива воды через гребень. Это объясняется, в частности, и достаточно надежным обоснованием пропускной способности водосбросов.

Основная часть повреждений на отечественных плотинах вызывалась отступлениями от проектов и нарушениями технологических правил при выполнении строительных работ, нарушениями правил эксплуатации и т.д. Показательно, что сейсмические воздействия даже высокой интенсивности (7—8 баллов) не вызывали в СССР серьезных повреждений плотин. Лишь в отдельных случаях (например, на Чирюртской ГЭС) отмечалось образование на гребне грунтовых плотин продольных сейсмических трещин, распространявшихся в тело ядра на глубину 2-2,5 м. Такие трещины легко устраняются обычными методами.

Повреждения грунтовых плотин вызывались чаще всего неблагоприятным режимом фильтрации в сооружениях и примыканиях. Характерными являются и отмеченные на нескольких грунтовых плотинах продоль-

ные и поперечные трещины, вызывавшиеся неравномерной осадкой разных частей сооружения (Червакская плотина и др.). На многих плотинах наблюдаются повреждения дренажей, водоупорных элементов и другие дефекты локального характера.

Для бетонных плотин характерны повреждения, вызываемые фильтрационными и температурными воздействиями. Так, в Широковской, Ондской и других плотинах, бетон которых имел недостаточно высокое качество, произошли процессы, которые привели к поверхностным разрушениям, выщелачиванию бетона, изменению его механических характеристик, снижению прочности и водонепроницаемости. Для устранения этих повреждений потребовалось проведение значительных ремонтнь.х работ.

Колебания температуры наружного воздуха и изменения температуры при твердении и остывании бетона иногда вызывали появление в блоках плотин большого количества трещин, раскрытие контактного шва (плотины Братской, Усть-Илимской ГЭС).

В докладе кратко излагаются принципы оценки прочности и устойчивости плотин и их оснований по предельным состояниям, как это предписывается действующими в СССР строительными нормами [6—9]. Указывается, что при применении этого метода с помощью системы расчетных коэффициентов (сочетания нагрузок, условий работы, надежности, безопасности по материалу и др.) можно более точно учесть влияние разнообразных факторов на состояние и поведение сооружений, проектировать их более надежными и экономичными, чем при использовании единого коэффициента запаса.

В зарубежной практике этот прогрессивный подход пока что не нашел распространения.

Значительная часть доклада посвящена проводящимся в СССР исследованиям, позволяющим оценивать долговременную прочность, устойчивость и деформируемость как самих сооружений, так и их оснований. Особенностью этих исследований является комплексность и разносторонность, что позволяет с большей достоверностью прогнозировать предстоящую работу этих сооружений в характерных для них природных условиях и при различных воздействиях.

Исследовательские работы выполняются в различных направлениях. Широко проводятся экспериментальные исследования свойств материалов сооружений и оснований, что позволило к настоящему времени накопить много данных для статистического анализа. Далеко продвинулись исследования в области физического моделирования статической и динамической работы гидротехнических сооружений; совершенствуются методы расчетного прогнозирования поведения сооружений в различных условиях. В широких масштабах проводятся также натурные исследования поведения плотин и других сооружений в процессе их строительства и эксплуатации. Кроме того, для рационального проектирования и строительства гидроузлов выполняются гидравлические, фильтрационные и многие другие исследования [1].

[1] Более подробно содержание доклада опубликовано в [4].

В [Д-47] Г. Гомеса Лаа, М.А. Франко, Х Л.Р. Эрнандеса (Испания) приводятся интересные данные по 52 испанским плотинам, на которых имели место серьезные повреждения или крупные аварии во время строительства, при первом наполнении водохранилища и в процессе эксплуатации. В числе рассмотренных плотин 28 гравитационных высотой от 16 до 103 м, 8 каменнонабросных (16—40 м), 5 земляных (7—17 м), 5 арочных (84—150 м), 4 контрфорсных (13—135 м), 2 арочно-гравитационные высотой 115 и 140 м. Из них были выведены из строя и впоследствии не восстанавливались 6 плотин: 3 гравитационные (высотой 20, 54 и 69 м), 1 контрфорсная (34 м), 1 арочная (84 м) и 1 земляная (17 м). Серьезного ремонта и временного прекращения эксплуатации потребовали 5 плотин. На остальных плотинах были выполнены ремонтные работы без прекращения эксплуатации.

В большинстве случаев повреждения плотин возникают как следствие не одной, а одновременно нескольких причин. В докладе рассматриваются следующие основные причины повреждений плотин и характерные виды их разрушений.

Перелив через гребень плотин. Отмечены 4 характерных случая повреждения по этой причине бетонных плотин и 3 случая — плотин из грунтовых материалов. Перелив через гребень гравитационных плотин Агуэда высотой 38 м, Хандула (88 м), Мария Кристина (59 м) и Сан-Тереза (59 м) не вызвал серьезных повреждений, не считая местного размыва русла. Однако каменнонабросные плотины получили значительные повреждения еще во время их строительства. Так, плотина Жерте (17 м) после затопления оказалась настолько разрушенной, что от ее достройки впоследствии отказались. На двух других набросных плотинах — Пьедрас (40 м) и Одиель (35 м) пришлось восстанавливать значительную часть наброски и капитально ремонтировать экраны.

Во всех рассмотренных случаях повреждения плотин произошли из-за неправильного назначения расчетных расходов и, как следствие, недостаточных размеров водопропускных сооружений в гидроузле.

Разрушения водосбросного тракта — водослива, лотка, водобойных колодцев. Плотин с такого рода повреждениями в Испании немало. К наиболее пострадавшим относятся: контрфорсная плотина Алькантара II (высота 135 м), в которой из-за низкого качества бетона образовались многочисленные кавитационные повреждения центрального и боковых водосливов и водобойного колодца. Аналогичные повреждения произошли и на гравитационных плотинах Мария Кристина (26 м), Ринобайо (99 м), Вадо (70 м) и других. В нижнем бьефе этих плотин наблюдались также и большие размывы.

Разрушения или повреждения затворов. Три случая аварий гравитационных плотин по этой причине представляются наиболее характерными. Так, на плотине Сан-Мартин из-за плохого качества сварки разрушился затвор размером 17х10 м, эксплуатировавшийся 18 лет, произошли размывы. На упоминавшейся уже плотине Сан-Тереза вышла из строя автоматическая система регулирования подъема пяти плоских затворов 16х3,5 м, что вызвало затопление земель в нижнем бьефе и подмыв основания плотины. Наконец, на перемычке плотины Торехон Тахо

(высота 62 м) во время строительства разрушился затвор водоспуска, в результате чего произошел подмыв правобережного устоя плотины, погибли 30 чел.

Повреждения водовыпусков и напорных водоводов. На двух испанских плотинах Альдеавилья (140 м) и Арасена (60 м) вследствие плохой анкеровки в скале и отсутствия дренажа произошли значительные смещения водосбросов, вызвавшие временное прекращение их эксплуатации. У плотин Сан-Эстебан (115 м) из-за перегрузки скалы на отдельных участках отводного туннеля водослива произошли оползни пород, которые привели к выводу всего водослива из строя. В результате ошибок в проекте, в котором не предусматривалось устройство водобойного колодца, в отводящем канале у плотины Вадо (70 м) произошли значительные размывы глины на его откосах. Потребовалась полная реконструкция водослива. Характерная авария произошла на земляной плотине Пердигуера (11 м), у которой разрушился водовод, проложенный в ее теле, образовался оползень всей низовой призмы. Потребовалось надежно дренировать конечный участок водовода и выполнить крепление откоса. Последний пример указывает на опасность устройства напорных водоводов непосредственно в грунте без достаточно развитого дренажа.

Избыточная фильтрация и связанная с ней суффозия. По этой причине получили повреждения 34 плотины (65% из рассмотренных в докладе), причем 6 плотин (2 земляные, 2 гравитационные, 1 арочная и 1 контрфорсная) полностью вышли из строя. В их числе земляные плотины Бембесар (14 м) и Эль Каррисал (17 м), построенные в 1972 и 1976 гг. Они имели неудачную конструкцию, в них не было предусмотрено устройство дренажей. Разрушение плотин произошло на следующий год после постройки в результате обрушения низовых откосов. Столь же неудачно была запроектирована гравитационная плотина Лос Малинос (16 м), построенная в 1960 г. на основании из выветрелого гранита. Качество строительных работ было впоследствии признано неудовлетворительным. Вскоре после окончания строительства была обнаружена интенсивная фильтрация в основании и через бетонный массив. Сначала вышел из строя водослив, вслед за ним произошло разрушение и всей плотины. От ее восстановления впоследствии отказались.

Наиболее известной из испанских плотин, разрушившихся в прошлом столетии (1892 г.), является гравитационная плотина Пуэнте высотой 39 м. Катастрофа произошла вследствие интенсивной суффозии в аллювиальном основании, вызвавшей образование под плотиной сквозного отверстия площадью сечения 600 м^2.

Неудовлетворительное качество проекта и выполнения строительных работ привели к возникновению в контрфорсах плотины Вега ди Тера (34 м) крупных трещин среза, в результате чего была прекращена эксплуатация сооружения. Вышла из строя арочная плотина Монтежак (84 м), возведенная на основании из закарстованных известняков. У правобережного примыкания образовалась значительная по размерам карстовая воронка, через которую произошло самопроизвольное опорожнение водохранилища.

В о з д е й с т в и е н и з к и х т е м п е р а т у р . Характерные признаки опасного промораживания бетона были обнаружены на пяти гравитационных плотинах, возведенных в высокогорных районах Испании. Это плотины Арлансон (высота 47 м), Куерда дель Посо (40 м), Мансильа (80 м), Эль Тобар (38 м) и Вильамека (39 м).

Повреждения плотины Арлансон вызваны значительными колебаниями температуры: от +35 до —15 °С и промораживанием бетона. На поведении плотины сказались дефекты проекта, в котором не предусматривалось, в частности, устройство деформационных швов. При температурных воздействиях на низовой грани произошло расслоение бетона, образовались вертикальные трещины, по которым происходила интенсивная фильтрация.

Примерно такие же повреждения от воздействия отрицательной температуры были установлены и на других перечисленных выше плотинах. Для восстановления всех этих плотин устраивался дренаж из галерей, выполнялись цементация поврежденных участков бетона, инъекция силиконовыми или другими материалами.

Особо следует отметить повреждение вследствие воздействия низких отрицательных температур земляной плотины Бенамариас (14 м). На ней через год после ввода в эксплуатацию обнаружились оползание низового откоса, а также сосредоточенная фильтрация в горизонтальном слое. Причиной этого оказалось допущенное промораживание этого слоя во время строительства в холодное время года. Сказалось также и то, что по Проекту плотина имела чрезмерно крутые откосы и в ней не было предусмотрено устройство дренажа.

О б р а з о в а н и е т р е щ и н . В качестве примеров этого типа повреждений в докладе было рассмотрено 6 бетонных плотин, 2 каменнонабросные с ядром и 3 каменнонабросные с экранами.

Температурные трещины в бетоне наблюдались в большем или меньшем количестве практически на всех рассмотренных плотинах. Известно, что они не приводят к катастрофическим повреждениям сооружения, однако создают его ослабление, способствуют усилению фильтрации, часто сопровождаемой суффозией, выщелачиванием. Иногда, например в арочных плотинах, они вносят изменения в характер их статической работы. Поэтому трещинообразования стремятся не допускать или ограничивать размеры трещин, применяя искусственное охлаждение, а в редких случаях и армирование, которое, однако, в массивных сооружениях малоэффективно.

Силовые трещины, вызванные непредвиденными перегрузками и другими причинами, а в некоторых случаях военными действиями, ликвидировались различными способами: с применением анкеров, цементации, заменой поврежденных частей сооружения новым бетоном и др. Такие мероприятия выполнялись на плотинах Алькантара II, Атасар, Ордунте и др.

Не меньшую опасность представляют и трещины в грунтовых плотинах, особенно в их водонепроницаемых элементах. Отмечается, например, возникновение трещин в гравийно-илистом ядре каменнонабросной плотины Арбон (32 м), после чего в нем появилась сосредоточенная фильтра-

ция. Потребовалось нагнетание в ядро глинистого раствора. В бутиловом экране плотины Мирафлорос (40 м) из каменной наброски при первом подъеме уровня воды в водохранилище образовались многочисленные трещины. Для ликвидации протечек на напорной грани был уложен новый грунтовый экран. В плотине Тайбильа (39 м), в результате растрескивания глинистого ядра, образовались каверны, произошли значительные размывы низовой грани. Наконец, на каменнонабросной плотине Пьедрас (40 м), которая при паводке во время строительства была затоплена водой, произошло растрескивание бетонного экрана. Для его восстановления производилась инъекция цементным раствором и искусственными смолами.

Недопустимые осадки плотин. Всего отмечено 5 случаев, когда значительные осадки вызвали серьезные повреждения земляных и каменнонабросных плотин. Они произошли на упоминавшихся выше плотинах Арбон, Бенамариас и Пердигуера, а также на плотине Вальделауфен (7 м). О повреждениях первых плотин выше уже говорилось, плотина же Вальделауфен была повреждена фильтрационным потоком, возникшим при ее осадках. При этом был разрушен низовой клин плотины, восстановленный и дренированный при ремонте. Отмечается также случай обрушения котлована водобойного колодца плотины Кастрело при его разработке во время строительства..

Результаты ошибок в проекте. По этой причине получили повреждения 8 плотин (15%), причем 4 из них разрушились, а на двух пришлось прекратить эксплуатацию. Судьба еще двух плотин ко времени прохождения Конгресса не была решена — их восстановление связано с выполнением дорогостоящих ремонтных работ. Характер повреждений этой группы плотин приводится в описаниях аварий, происходивших по другим рассмотренным выше причинам.

Ошибки при строительстве. Эта причина признана существенной в 22 случаях (42%), на большинстве из которых мы останавливались раньше. В их числе 6 имели место на плотинах, восстанавливать которые не стали, так как признали это трудновыполнимым. Отмечено, что в трех строящихся плотинах имело место плохое твердение бетона, что было вызвано попаданием в бетонную смесь грязи или некачественного заполнителя.

В докладе справедливо указывается, что повреждения плотин вызывались не одной какой-либо причиной, а являлись результатом их неблагоприятных сочетаний.

В заключительной части доклада формулируются рекомендации, которых необходимо придерживаться при проектировании и строительстве больших плотин. Следует отметить, что нормальное поведение плотины в течение длительного времени, иногда многих десятков лет, еще не дает гарантии ее нормального функционирования в дальнейшем. Поэтому регулярные наблюдения за состоянием плотин и необходимые ремонты их должны выполняться в течение всего периода эксплуатации.

Меры по устранению повреждений должны приниматься своевременно, так как развитие неустраненных повреждений может со временем привести к полному разрушению плотины.

В материалах Комитета по разрушениям и авариям плотин [16] приводятся результаты выполненного анализа основных причин повреждений, происходивших в мире за 150 лет. Содержание доклада Комитета частично отражено в зарубежных [10—17] и отечественных [1—5] публикациях по этому вопросу. Они были дополнены описанием некоторых аварий, происходивших в более поздние годы.

В докладе [16] выделяются следующие четыре характерные группы причин аварий плотин:

I. Недостаточная прочность или устойчивость сооружений, оснований и берегов на сдвиг, а также большие деформации — осадки, смещения, пучения, необратимые деформации.

II. Длительное воздействие поверхностного и фильтрационного потоков, вызывающих механическую суффозию, эрозию материалов сооружений и оснований; внутреннее давление воды (поровое, фильтрационное противодавление), поверхностное давление воды, в том числе волновое; химическая суффозия, действие агрессивных вод, старение материала сооружений, ухудшение его свойств со временем, выветривание пород, засорение дренажей.

III. Нарушения нормального функционирования сооружений гидроузлов, например из-за задержки пропуска расходов при отказах затворов, неправильном маневрировании ими, при засорении водопропускных отверстий плавающими телами, донными наносами, при превышениях уровня воды (переливы через гребень плотины).

IV. Экстраординаоные воздействия типа землетрясений, взрыва, различных природных катастроф, ураганов и тому подобных явлений, а также при перегрузках, вызванных авариями гидроузлов, расположенных выше по течению.

Отмечается также, что многие аварии являются следствием серьезных ошибок, допущенных в проектировании и строительстве гидроузлов, а также в процессе их эксплуатации. К числу основных ошибок могут быть отнесены:

недостаточная глубина предварительных изысканий (геологических, гидрологических и др.);

неправильный выбор створа, типа конструкции сооружения и т.п.;

неудачный выбор вида строительных материалов, неполнота исследований их свойств;

недостаточный объем исследований и расчетов плотин при их проектировании;

применение несовершенной технологии строительства и неудовлетворительных механизмов;

неправильная эксплуатация гидроузла;

недостатки надзора и контроля за состоянием сооружений и другие субъективные факторы.

Комитетом была предложена следующая классификация характера аварий плотин по их последствиям.

Р а з р у ш е н и е Р-1 — значительное разрушение катастрофического характера, в результате которого пришлось отказаться от восстановления сооружения (Комитетом зарегистрировано 84 случая).

Р а з р у ш е н и е Р-2 — разрушение, позволяющее в дальнейшем восстановить и эксплуатировать плотину (118 случаев).

П о в р е ж д е н и е П-1— авария плотины, которая в течение некоторого времени находилась в эксплуатации и не разрушилась благодаря своевременно принятым мерам, например опорожнению водохранилища (154 случая).

П о в р е ж д е н и е П-2 — авария при первом наполнении водохранилища, не сопровождавшаяся разрушением плотины благодаря сработке водохранилища и другим своевременно принятым мерам (70 случаев).

П о в р е ж д е н и е П-3 — повреждение плотины во время ее возведения, не помешавшее заполнению водохранилища после принятых специальных мер при завершении строительства (40 случаев).

Р а з л и ч н ы е а в а р и и о с о б о г о т и п а Р и П, происходившие либо во время строительства плотин, либо потребовавшие для восстановления выполнения больших объемов работ; сюда же отнесены аварии, вызываемые катастрофическими природными явлениями: сейсмом, оползнями, взрывами, селями, разрушением естественных завалов и т.п. (52 случая).

Результаты анализа сведений об авариях плотин, происходивших по различным причинам, приводятся в табл. 2—10. Надо, однако, заметить, что данные, полученные из 43 стран, оказались недостаточно полными. Поэтому число примеров, которым приходится ограничиваться при анализе, значительно меньше, чем общее число зарегистрированных аварий. Тем не менее имеющиеся данные достаточно ясно свидетельствуют о том, что необходимо обратить внимание на ряд существенных моментов в современном гидротехническом строительстве. Отметим также, что сведении о числе повреждений плотин, по-видимому, менее точны, чем о раз-

Т а б л и ц а 2. Зависимость числа аварий от конструкции плотин и от их высоты

$H_{пл}$, м	Количество аварий						
	А	КФ	Гр	З	Кн	Н	Итого
5—15	—	—	21	59	4	9	93
15—30	5	8	22	168	11	4	218
30—50	9	6	14	73	7	1	110
50—100	6	2	7	17	5	—	37
100	1	—	2	—	—	—	3
Нет сведений	—	—	—	5	—	—	5
Итого	21	16	66	322	27	14	466

П р и м е ч а н и е . Здесь и далее по тексту приняты сокращения: А — арочная, Кф — контрфорсная, Гр — гравитационная, З — земляная, Кн — каменнонабросная, Н — неопределенного типа.

Таблица 3. Зависимость характера аварий от высоты плотин

$H_{пл}$, м	Количество аварий		
	Р	П	Итого
5–15	64	29	93
15–30	97	121	218
30–50	35	75	110
50–100	5	32	37
⩾ 100	–	3	3
Нет сведений	1	4	5
Итого	202	264	466

рушениях, так как по многим данным к их регистрации владельцы относились с меньшим вниманием, стремились устранить их собственными силами, не доводя факт повреждения до огласки.

В табл. 4–6 приводятся интересные данные о количестве аварий разного класса (Р и П), происходивших на плотинах из бетона и грунтовых материалов. Указываются места возникновения и главные причины этих повреждений, а также и характер основания, на которых они возведены.

Следует заметить, что на многих плотинах (95 случаев) аварии, даже разрушительные (Р-1), повторялись (табл. 7, 8) — от двух до шести раз. Отмечаются случаи, в которых плотины, вышедшие вследствие аварии из строя и заново построенные, снова разрушались, иногда по совсем другим причинам.

Интересны и сведения, приведенные в табл. 9 и 10, о зависимости числа аварий плотин различного типа и высоты от емкости водохранилища. Подавляющая часть аварий имела место на плотинах с объемом водохранилища меньше 1 км^3.

Анализ данных, приведенных в табл. 2–10, позволяет сделать некоторые обобщающие выводы. Совершенно бесспорно, например, что преобладающая часть аварий (77 %) происходила на плотинах из грунтовых материалов.

Таблица 4. Распределение аварий в зависимости от типа плотин, причин и места их повреждения

Наименование	Бетонные плотины		Грунтовые плотины		Плотины всех типов		
	Р	П	Р	П	Р	П	Всего
Группа аварий:							
I	9	17	18	62	27	79	106
II	9	16	24	59	33	75	108
III	4	4	18	13	22	17	39
IV	1	2	4	7	5	9	14
Итого	23	39	64	141	87	180	267
Место повреждения:							
основание	13	15	16	51	29	66	95
тело плотины	7	17	30	71	37	87	125
водослив	3	4	15	9	18	13	31
другие	–	3	3	10	3	13	16
Итого	23	39	64	141	87	179	267

Таблица 5. Зависимость числа аварий от типа основания и конструкции плотин

Тип основания	Характер аварии	Количество аварий плотин								
		бетонных				грунтовых			Н	Итого
		А	Кф	Гр	Всего	З	Кн	Всего		
Нескальные	Р	—	3	8	11	39	6	45	3	59
	П	—	1	—	1	82	1	83	—	84
Скальные	Р	7	4	21	32	35	6	41	8	81
	П	11	5	14	30	65	8	73	—	103
Нет сведений	Р	—	—	11	11	48	1	49	2	62
	П	3	3	12	18	53	5	58	1	77
Итого	Р+П	21	16	66	103	322	27	349	14	466
в том числе	Р	7	7	40	54	122	13	135	13	202
	П	14	9	26	49	200	14	214	1	264
Процент к общему числу существующих плотин данной конструкции	Р+П	4,4	5,1	3,1	3,2	6,7	10,9	6,6	3,8	5,6
	Р	1,5	2,2	1,9	1,7	2,5	5,3	2,6	3,5	2,4
	П	2,9	2,9	1,2	1,5	4,0	5,6	4,0	0,3	3,2

Таблица 6. Распределение аварий плотин в зависимости от типа повреждения и причин, вызвавших аварию

Группа аварий	Причина повреждений	Тип основания						Итого
		грунтовое			скальное			
		Р	П	Всего	Р	П	Всего	
I	Сдвиг	—	2	2	—	1	1	3
	Потеря прочности	6	11	17	3	10	13	30
	Деформации	1	6	7	4	14	18	25
II	Фильтрация	1	5	6	1	10	11	17
	Внутреннее давление	6	10	16	6	8	14	30
	Поверхностная эрозия	1	7	8	2	1	3	11
	Выветривание, химическое воздействие	—	2	2	1	1	2	4
	Неудовлетворительный дренаж	—	1	1	—	—	—	1
III	Превышение расчетных расходов потока	4	—	4	5	1	6	10
	Другие факторы	—	4	4	1	1	2	8
IV	Экстраординарные воздействия	3	3	6	—	3	3	9
	Итого	22	51	73	23	50	73	146

Таблица 7. Зависимость повторяемости аварий от типа плотин

Повторяемость плотин	Бетонные		Грунтовые			Н	Всего
	А	Кф	Гр	З	Кн		
2	2	—	10	52	2	1	67
3	—	—	4	10	1	1	16
4	—	—	—	5	—	1	6
5	—	—	—	3	—	1	4
6	—	—	—	2	—	—	2
Итого	2	0	14	72	3	4	95

Таблица 8. **Зависимость повторяемости аварий от их характера**

Повторяемость аварий	Характер аварии					Всего
	Р-1	Р-2	П-1	П-2	П-3	
2	8	16	31	9	3	67
3	2	4	10	—	—	16
4	—	1	5	—	—	6
5	—	1	3	—	—	4
6	—		2	—	—	2
Итого	10	22	51	9	3	95

Таблица 9. **Зависимость числа аварий от типа плотин и емкости водохранилища**

Емкость водохранилища, млн. м^3	Количество аварий						
	А	Кф	Гр	З	Кн	Н	Итого
Пустое	6	5	19	107	6	10	153
1—10	7	6	16	80	5	1	115
10—100	6	4	19	83	13	3	128
100—1000	2	1	9	37	3	—	52
1000—10000	—	—	3	14	—	—	17
Более 10000	—	—	—	1	—	—	1
Итого	21	16	66	322	27	14	466

Главными причинами аварии являются потеря прочности, устойчивости, большие осадки (группа I), а также воздействие фильтрующей воды, суффозия, кольмотаж и т.п. (группа II). На их долю приходится 80% зарегистрированных аварий больших плотин. При этом преобладающая часть разрушений Р и повреждений П происходила в теле плотин (47 %) и в их основаниях (35%).

Характерно, что большая часть этих аварий имела место на относительно низких плотинах высотой до 30 м, причем, как это видно из табл. 3 и 9, с увеличением высоты плотин соотношение Р/П уменьшается; разру-

Таблица 10. Зависимость числа аварий от емкости водохранилища и высоты плотины

Емкость водохранилища, млн. м³	Количество аварий плотин высотой, м						
	5–15	15–30	30–50	50–100	>100	Нет сведений	Итого
Пустое	55	78	15	2	–	3	153
1–10	21	63	27	3	–	1	115
10–100	10	64	35	18	–	1	128
100–1000	7	12	24	8	1	–	52
1000–10000	–	1	9	5	2	–	17
Более 10000	–	–	–	1	–	–	1
Итого	93	218	110	37	3	5	466

шений плотин высотой более 100 м в мире еще не происходило. Можно полагать, что высокие плотины строились более тщательно, с лучшим проектным обоснованием и более высоким качеством строительных работ.

Приведенные в табл. 5 данные о повреждениях плотин различного типа говорят в пользу бетонных плотин, на которых разрушающие аварии Р зарегистрированы в 54 случаях, а повреждения П в 49 случаях, в то время как на грунтовых плотинах аварии Р происходили в 135 случаях, а повреждения П — в 214. По отношению к общему количеству плотин этих видов, существовавших ко времени регистрации Комитетом, бетонных плотин пострадало 3,5 %, а грунтовых 6,9 % при среднем проценте — 5,5 %. Интересны аналогичные показатели по плотинам различных конструкций, также приведенные в табл. 5. Наименьший процент разрушения Р у арочных плотин (1,5%), затем следуют гравитационные плотины (1,9%), далее — контрфорсные (2,2%) и земляные (2,5%). Наиболее уязвимыми оказались каменнонабросные плотины, среди которых больше 5% имели катастрофические разрушения, а 5,6 % претерпели серьезные повреждения. Отдельных данных по намывным плотинам в докладе нет.

Показательна и зависимость количества аварий от типа основания плотин. Данные табл. 5 показывают, что процент аварий плотин, возведенных на скальном основании (56 % общего числа), существенно — на 8 % — больше, чем на нескальном. Обычно же считалось, что слабые основания создают больший риск возникновения повреждений возведенных на них гидротехнических сооружений. Возможно, что при нескальных основаниях методы предварительных изысканий позволяют с большей точностью устанавливать, а следовательно, и учитывать при проектировании основные их свойства и особенности строения.

Следует также отметить, что в приведенных данных не отражается качество сооружений, тесно связанное со временем возведения. Ясно, что в разные годы строительство осуществлялось при различном уровне знаний, разных методах проектирования, степени механизации строительных работ и т.д. Поэтому аварии на плотинах одного типа, но построенных в

разное время, строго говоря, нельзя объединять в один статистический ряд.

В 1979 г. Комитет СИГБ завершил следующий этап своей работы и выпустил доклад [17], в котором были рассмотрены уже 1022 аварии, происходившие на 900 плотинах (в том числе на 228 бетонных). Приведенные данные о причинах аварий подтверждают, в основном, заключения первого доклада [16] — изменились количественные показатели. Так, например, основное число аварий Р и П — 45% связано с повреждениями тела плотин, 21 % — с повреждениями их оснований, 19% аварий вызвано различными непредвиденными воздействиями. Характерно, что около 13% аварий происходило в процессе строительства плотин, 2% — в период эксплуатации.

По приведенным в докладе данным[1] наибольшее число аварий наблюдалось в США, где при общем числе зарегистрированных больших плотин 6433, были повреждены 549 (8,5%). В Италии повреждения различного характера были зарегистрированы на 82 плотинах (25%) при общем числе зарегистрированных в стране плотин — 402. Порядка 16% плотин были повреждены в Австралии, 11 % — во Франции, 4,5% в Испании. По 33 странам мира количество поврежденных плотин составляет примерно 7 % общего числа плотин, зарегистрированных в этих странах. По СССР было отмечено 13 аварийных случаев.

Глава 2

ХАРАКТЕРНЫЕ АВАРИИ БЕТОННЫХ ПЛОТИН И ПЛОТИН ИЗ КАМЕННОЙ КЛАДКИ

В представленных 11 докладах об авариях на бетонных и каменных плотинах подробного описания и анализа разрушений (Р-1) практически не было, хотя за годы, предшествовавшие Конгрессу, аварии происходили неоднократно. Лишь в одном докладе с достаточной подробностью описаны разрушения плотин из каменной кладки. Но в большинстве стран этот тип плотин не считается перспективным, и приведенные в докладе материалы представляют для большинства гидротехников ограниченный интерес.

Большая часть докладов посвящена описаниям менее значительных аварий — повреждений, происходивших по ряду причин: вследствие неудовлетворительной работы основания, неправильного проектирования и строительства водосбросных сооружений, неблагоприятных воздействий температуры, трещинообразования, усадки, набухания и пр., а также в результате ошибок при эксплуатации плотин.

Оценивалось также влияние на состояние сооружений солнечной радиации и промораживания бетона.

В отдельных докладах рассматривались вопросы фильтрации воды через бетон, суффозионные процессы, затруднения, возникающие при засорении или выходе из строя дренажей и др.

[1] Обработаны Э.С. Калустяном.

Дополнительные сведения о некоторых характерных случаях аварий на бетонных плотинах, не обсуждавшихся на Конгрессе, приводятся в приложении к материалам Конгресса. Освещение этих вопросов имеет, несомненно, большое значение для последующего рационального гидротехнического строительства.

4. ПОВРЕЖДЕНИЯ БЕТОННЫХ ПЛОТИН, СВЯЗАННЫЕ С ОСОБЕННОСТЯМИ СТРОЕНИЯ ОСНОВАНИЙ

Состояние и долговечность плотин в значительной мере определяется качеством оснований, на которых они возводятся. Тем более это относится к плотинам из бетона и каменной кладки, у которых почти 30% разрушений происходит в процессе строительства и эксплуатации из-за неблагоприятного поведения оснований. На работе этих плотин существенно сказывается тип оснований, их однородность, наличие и характер трещин, физические и химические свойства пород и т.д. Большое значение имеет и форма створа, в который вписана плотина, наличие на контакте резких выступов, переломов, разломов и т.п.

Образование трещин в плотине Отфаж в результате проявления неоднородности пород основания рассматривается в [Д-37] рабочей группы Французского национального комитета СИГБ (ФНК).

Арочная плотина Отфаж (Франция) высотой 54 м, сооружение ее закончено в 1958 г. Арка, наклоненная в сторону нижнего бьефа, опирается на тонкий цоколь (рис. 1). Скальная порода правого берега и нижней части левого берега — кристаллин хорошего качества, но на левом берегу выше отметки 195 м он переслоен слюдой и отделен от монолита слоем керсантита. В основании устроена глубокая цементационная завеса. Плотина оснащена контрольно-измерительной аппаратурой.

После первого заполнения водохранилища на левобережном участке цоколя со стороны нижнего бьефа появились трещины (см. рис. 1), в дальнейшем их число увеличилось. Затем появились трещины в правобережной части цоколя и в теле плотины. Однако после опорожнения водохранилища трещин на верховой грани обнаружено не было.

Подробные расчеты плотины, проведенные затем методом конечных элементов, установили возможные деформации от давления воды и температурных воздействий в различных предположениях о деформационных свойствах скалы. Результаты расчетов оказались довольно близкими к данным натурных наблюдений.

Анализ показал, что основной причиной повреждений плотины явилась неоднородность основания, его необратимые смещения, связанные с ползучестью скалы, особенно значительные в верхней части левого берега (16 мм за период с 1958 по 1961 г.). С течением времени деформации уменьшились, вероятно, в будущем, после окончания осадки основания, прекратится и раскрытие трещин.

В [Д- 24] ФНК приведены два примера, касающиеся раскрытия трещин в основании плотин.

Под одной из арок многоарочной плотины Ла Жиротт высотой 45 м с 1951 г. наблюдалась повышенная фильтрация. Проведенная цементация основания привела только к ее временному уменьшению. Выяснилось,

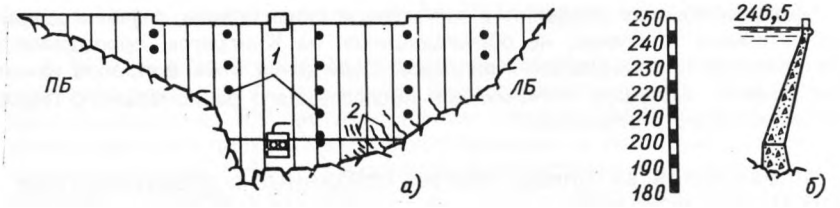


Рис. 1. Плотина Отфаж:

а — вид с нижнего бьефа; *б* — поперечное сечение; *1* — реперы; *2* — трещины

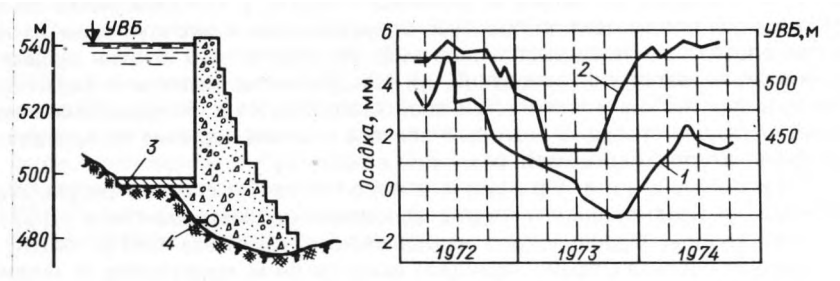


Рис. 2. Плотина Бор:

1 — разность осадок сооружения и скалы; *2* — уровни водохранилища; *3* — понур, *4* — проволока

что причиной такой фильтрации является раскрытие на 6—7 мм трещины в скальном основании под напорной гранью. Для устранения фильтрации на поверхность дна перед плотиной уложили короткий бетонный понур, а шов между ней и понуром уплотнили пластичной смолой, способной выдерживать неравномерные осадки.

На плотине Бор наблюдения при помощи закладных приборов и геодезическими методами показали, что вертикальные деформации скального основания под отдельными секциями плотины при изменениях уровня воды не следуют за деформациями самой плотины, кроме того, смещения подошвы верховой грани приблизительно вдвое меньше смещений, наблюдавшихся в подошве у низовой грани. Вместе с тем, под некоторыми секциями было обнаружено значительное противодавление. Наблюдения привели к мысли, что причиной указанных явлений является раскрытие трещин в основании. Уложенный перед верховой гранью короткий понур резко снизил противодавление (рис. 2).

В [Д-3] В. Легге и К. Гроббелаара (ЮАР) рассматривались вопросы, связанные с интенсивной фильтрацией, примерно 5 л/с, и суффозионными процессами в основании арочной плотины Рооде Эльсберг. Эта плотина высотой 72 м была построена в 1968 г. на р. Сенддрифт. В ее основании залегают перемежающиеся слои местами выветрившихся песчаников свиты Столовых гор различной прочности и водопроницае-

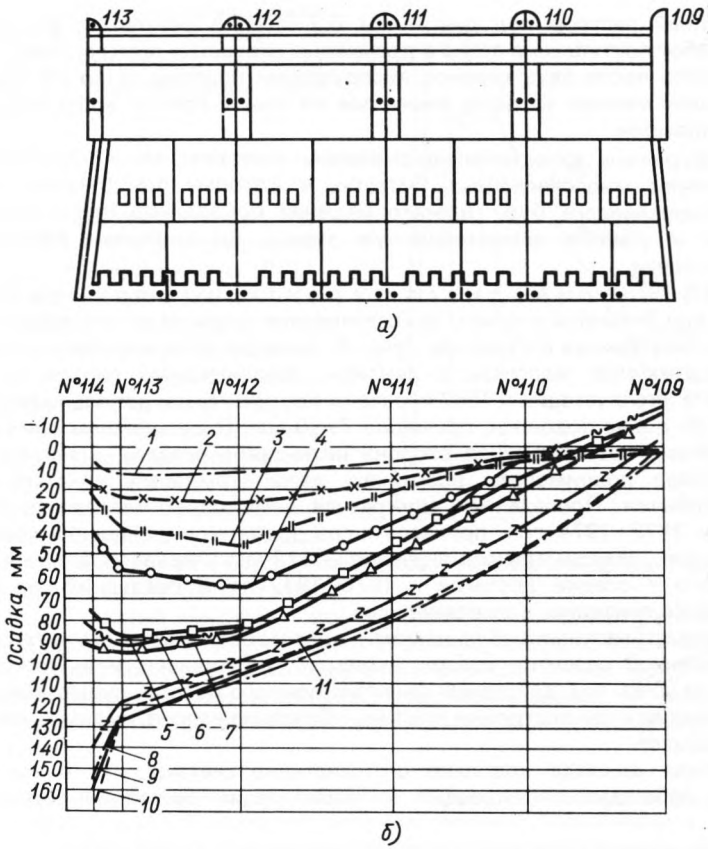


Рис. 3. Плотина Ракова:

а — план плотины; *б* — осадки реперов № 109—113, измеренные на верховой стороне плотины в соответствующие годы *(1—11)*

мости. В 1974 г. было обнаружено, что в дренаже и на дне русла в нижнем бьефе образовались отложения песка. Дальнейшие исследования показали, что в основании происходит интенсивная фильтрация по четырем системам трещин, которая привела к образованию под плотиной полостей, частично заполненных песком, гравием, а также глиной и отдельными крупными обломками песчаника.

Анализ состояния плотины показал, что цементация основания при высоком уровне водохранилища нецелесообразна. Поэтому ремонтные работы первой очереди производились при сниженном уровне воды. При их проведении в основании устраивался сначала обратный фильтр, который задерживал вынос песка. Затем в трещины и полости закачивался

цементный раствор под давлением 0,2 МПа. В результате выполнения этих работ поступление песка в дренажные отверстия прекратилось.

Однако после двух сезонов эксплуатации плотины было установлено, что вынос мелких частиц в дрены все же идет и приток воды постепенно увеличивается.

Пробуренные дополнительно скважины показали, что в основании еще существуют многочисленные пустоты, в которые при бурении иногда даже проваливался бур. Принято решение продолжить цементационные работы и усилить цементационную завесу. Выполняемые работы еще не закончены.

В [Д-19] приводится характерный пример влияния на осадки бетонной плотины выщелачивания солей из ее основания (СРР).

Плотина Ракова в Румынии (рис. 3) высотой 20 м возведена на основании, сложенном мергелем с линзами, заполненными гипсом и солью. В начале эксплуатации в 1967 г. осадки плотины были довольно равномерными по длине подошвы, примерно 7—10 мм. В дальнейшем они нарастали, причем правобережная сторона интенсивно оседала, а левобережная постепенно поднималась, возможно, даже отрывалась какое-то время от основания. Проведенная двукратная цементация мергеля (в 1971 — 1972 и 1973—1974 гг.) принесла лишь временное улучшение состояния основания. Максимального значения — 170 мм у правого берега и 12 мм у левого — осадки достигли в 1976—1977 гг. В последний год осадки несколько снизились и выравнялись.

Систематическими наблюдениями и исследованиями было установлено, что причиной развития осадок является растворение и вынос солей и гипса из линз под действием фильтрационного потока, существовавшего в основании и до постройки плотины. Создание напора, видимо, ускорило этот процесс.

Авторы доклада довольно оптимистично считают, что в настоящее время наблюдается тенденция к стабилизации состояния сооружения.

5. НЕБЛАГОПРИЯТНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, УСАДКИ И НАБУХАНИЯ БЕТОНА

Как известно, колебания температуры воздуха, разогрев и остывание бетона при его твердении, воздействие мороза и инсоляция часто вызывают образование в плотинах трещин, иногда опасных для их работы, а также существенно сказываются и на напряженно-деформированном состоянии сооружений. Известны примеры, когда при действии сочетания внешних нагрузок и сезонных колебаний температуры воздуха и воды происходили повреждения, требующие проведения безотлагательного ремонта.

Последствия воздействия температуры на бетонные плотины рассматриваются на многочисленных примерах. Так, в [Д-43] (Италия) приводится описание трещин, возникших в результате изменений температуры и деформаций усадки в трех бетонных плотинах, принадлежащих миланской компании "Азиенда Электрика Муничипале". Некоторые из этих трещин со временем "самозалечивались" — плотно заполнялись материалами, выщелачивающимися из бетона при фильтрации воды.

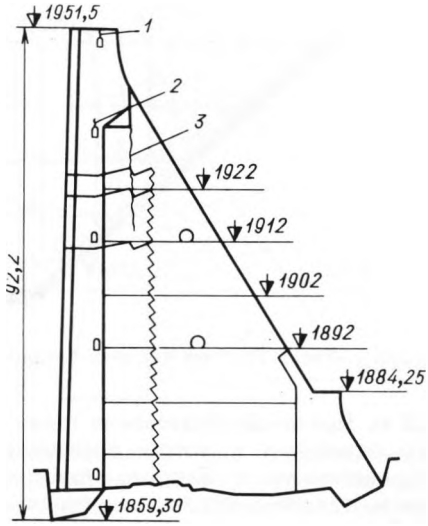


Рис. 4. Плотина Сан-Джакомо. Трещины в самом высоком контрфорсе:

1 — трещина у гребня; *2* — волосная трещина; *3* — крутопадающая волосная трещина

Контрфорсная плотина Сан-Джакомо высотой 92 м (рис. 4) построена в 1941 — 1951 гг. из бетона на известняковом заполнителе с расходом портландцемента 150 кг/м³ и добавкой молотого известняка. В местах, где заполнители оказались недостаточно прочными, при промерзании бетона произошло расслоение его на глубину до 20 см; больше всего пострадали наружные поверхности. Основная же масса бетона, как показывают ежегодные ультразвуковые измерения, находится в удовлетворительном состоянии.

В сводах галерей некоторых контрфорсов, находящихся у гребня под проезжей частью, появились трещины с раскрытием до 2 мм, уменьшавшиеся до долей миллиметра непосредственно около устьев трещин. С годами такие трещины образовались во всех контрфорсах. В некоторых проемах, расположенных ниже, наблюдались волосные трещины с раскрытием 0,1 мм.

Вертикальные трещины в сводах смотровых галереи неоднократно встречались и на построенных в СССР массивных бетонных плотинах (Усть-Илимской, Саяно-Шушенской и др.). Обычно они возникали, если галереи размещались одна над другой в средней части первых столбов плотин. В некоторых случаях они пересекали столб насквозь — от галереи к галерее, разделяя его на две части. Конструктивное армирование, осуществлявшееся для предотвращения распространения таких трещин, как правило, не давало положительного эффекта и не прекращало развитие трещины.

Анализ показывает, что возникновение таких трещин связано с поперечными температурными деформациями в остывающих столбах, при которых наибольшее растяжение имеет место в центральной части столбов. При расположении галерей в середине столба местные напряжения в криволинейном своде суммируются с температурными, что и вызывает образование трещин. Смещение галереи в сторону одной из граней столба позволяет снизить эти суммарные напряжения и уменьшить вероятность возникновения сквозных вертикальных трещин.

В стенках контрфорсов были обнаружены волосные трещины, идущие от выступа, находящегося на 16 м ниже гребня, вниз на расстояние около 20 м. Щелемеры, установленные на одной характерной трещине, показали, что ее раскрытие со временем не изменяется. Результаты бурения скважин выявили, что эти трещины распространяются на глубину от 0,2 до

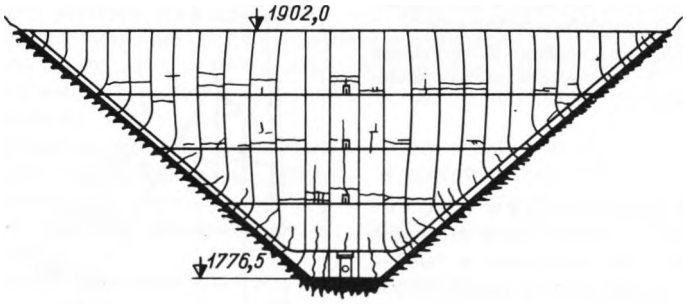


Рис. 5. Плотина Канкано. Трещины на низовой грани

1,6 м. Причиной образования таких трещин является усадка бетона при его остывании и потери влажности в период строительства плотины. Проведенными в Бергамо исследованиями на модели контрфорса из пемзы показано, что эти трещины не опасны для сооружения.

В ряде случаев наблюдалось также раскрытие горизонтальных швое между строительными блоками, несмотря на то, что для лучшего их сцепления на поверхность нижнего блока перед бетонированием укладывался слой жирного раствора с полузатопленной галькой. Испытания кернов показали, что в 57 % случаев сцепление между слоями отсутствует[1] .

Для выяснения влияния швов на прочность плотины были проведены исследования двух бетонных моделей: одной — монолитной и другой — с блочными швами, изготовленной с соблюдением той же, что и у прототипа, очередностью бетонирования. Исследования не установили разницы в напряженном состоянии моделей при обычных нагрузках (при НПУ) и различия в коэффициентах перегрузки (2,3) при начале трещинообразования.

Арочно-гравитационная плотина Канкано высотой 126 м (рис. 5) выполнена из бетона на пуццолановом цементе (расход 250 кг/м^3) с известняковым заполнителем и пуццолановыми добавками. Первые трещины в плотине были обнаружены еще в конце строительства.

На низовой грани плотины образовались трещины двух типов.

Горизонтальные трещины, совпадающие со слоями бетонирования. В основном эти трещины сухие или со следами цементного раствора, который инъектировался для цементации блочных швов. Щелемеры, установленные на этих трещинах, зарегистрировали деформации, тесно связанные с солнечным облучением поверхности плотины. Исследования на математической модели показали, что трещины образовались в результате разности температур на обеих гранях плотины, которая мог-

[1] Опыт строительства плотин в СССР — Токтогульской, Курпсайской и других ГЭС — убедительно показал неэффективность такого промежуточного слон из цементного раствора.

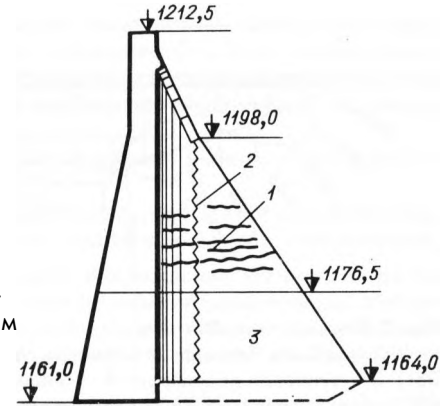


Рис. 6. Плотина Вальгросина. Горизонтальные трещины на боковой поверхности контрфорса:

1 — трещины; *2* — шов; *3* — отсыпка камня

ла привести к растягивающим напряжениям примерно 2 МПа. Возможно также и влияние термической усадки бетона.

Трещины, параллельные вертикальным швам с раскрытием 0,5 мм, образовались у подошвы плотины; расположены они нормально к основанию. Выше они продолжаются в вертикальном направлении с раскрытием около 0,1 мм. Трещины непрерывно удлиняются со скоростью 1—2 м/год. Было проведено бурение скважин с изъятием кернов в плоскости трещин. Испытания показали, что керны с горизонтальными трещинами были расщеплены до середины, керны же с вертикальными трещинами оказались сплошными (т.е. произошло самозалечивание). Прочность кернов с трещинами была на 30% ниже прочности монолитных.

Контрфорсная плотина Вальгросина высотой 51 м (рис. 6), построена в 1958—1959 гг. В процессе ее эксплуатации в контрфорсах плотины были обнаружены многочисленные трещины. Количество их и раскрытие со временем увеличивалось, хотя одновременно наблюдался и процесс самозалечивания наиболее мелких из них. По направлению почти всюду они совпадают со швами бетонирования. Полагают, что главная причина трещинообразования — разность температур граней и внутренней зоны контрфорсов.

Некоторое количество трещин наблюдалось и в галереях, где они, видимо, образовались в результате имевших место перерывов в бетонировании плотины.

З плотине Фонтана на р. Теннесси [Д-1] (США) наблюдалось характерное температурное трещинообразование. Эта бетонная гравитационная плотина (рис..7) высотой 146 м, длиной по гребню 721 м, на скальном основании была построена в 1942—1945 гг. Основная часть плотины возведена в глубоком каньоне. Ее низовая грань обращена на юг, что оказалось очень существенным для напряженного состояния плотины. На левом берегу на высоких отметках основную плотину продолжают три криволинейные глухие секции и далее — прямолинейные секции водосброса и левобережного устоя с осью, повернутой к продольной оси основной плотины на 35,5°.

В 1972 г., почти после 30 лет эксплуатации в криволинейной глухой части плотины и частично в примыкающих с обеих сторон секциях ее прямолинейных частей, были обнаружены трещины, проходившие через дренажную галерею приблизительно под углом 45° с падением от низо-

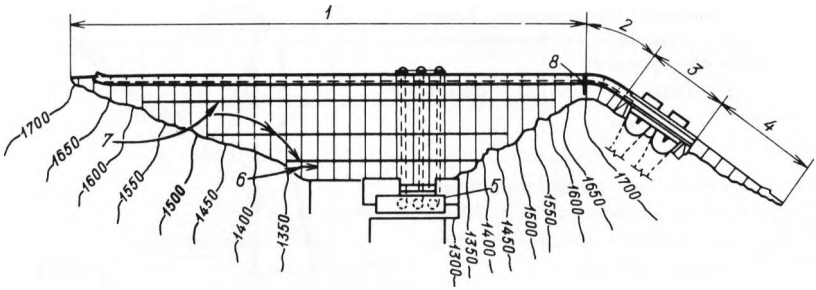


Рис. 7. План плотины Фонтана:

1 — основная плотина; *2* — секции, поврежденные трещинами (блоки 33, 34 и 35) ; *3* — основной водосброс; *4* — секции левобережного примыкания; *5* — здание ГЭС; *6* — поперечные деформационные швы; *7* — продольные деформационные швы; *8* — разгрузочный шов

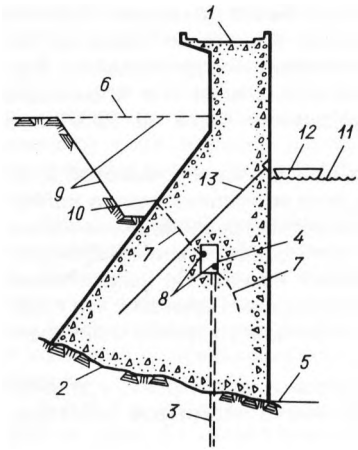


Рис. 8. Типовой разрез блоков плотины Фонтана с трещинами:

1 — гребень плотины; 2 — скальное основание; *3* — дренаж; *4* — дренажная галерея; *5* — переменная отметка подошвы плотины; *6* — отметка верха насыпи; *7* — трещина; *8* — щелемеры в дренажной галерее; *9* — выемка грунта для обнаружения трещины; *10* — щелемеры на низовой грани; *11* — уровень воды во время бурения скважин для закладки анкерных пучков; *12* — баржа с буровым станком; *13* — анкерные тяги, предварительно натянутые

вой к верховой грани (рис. 8). Максимальное раскрытие трещин составляло 6 мм, а смещение верхней части секции над трещиной по отношению к нижней части достигало 5 мм.

Анализ показаний многочисленных контрольно-измерительных приборов, заложенных в плотину при возведении и дополнительно установленных после обнаружения трещин, а также результатов испытаний кернов бетона и данных больших лабораторных и расчетно-теоретических работ, привел к выводу, что причиной появления трещин были большие сжимающие напряжения, действующие вдоль оси плотины. После возникновения трещин эти напряжения все еще достигали в наружном слое бетона толщиной 3 м 6,9 МПа, но уменьшались с глубиной до 3,5 МПа. Продольные усилия даже при таких низких напряжениях достаточны для образования трещин в криволинейных секциях.

К причинам увеличения продольных напряжений авторы доклада относят сильный нагрев низовой грани, обращенной к югу; постепенный нагрев внутренних зон секций, искусственно охлаждавшихся в процессе укладки бетона циркулировавшей по трубам водой. Это было особенно заметно в верхней части плотины.

Значительная часть доклада посвящена описанию выполненных ремонтных работ.

В [Д-6] П. Лентинена (Финляндия) сообщается о результатах обследования повреждений бетонных гидротехнических сооружений.

Наиболее часто встречающимся видом повреждения бетона является его отслаивание на глубину до 10 см в зоне колебания уровня воды. Максимальные разрушения бетона обычно происходят вблизи строительных швов и около различных выступающих элементов. Во многих случаях они приводят к оголению арматуры.

Финская ассоциация по бетону издала еще в 1976 г. инструкцию по проектированию и строительству гидротехнических сооружений, согласно которой на участках граней плотин, где происходят колебания уровня воды, рекомендуется использование бетонной смеси с воздухововлекающими добавками. Бетон должен быть водонепроницаемым, марки К35 (с пределом прочности 35 МПа). Защитный слой бетона должен быть толщиной 60 мм. В зоне колебаний уровня воды в сооружениях следует избегать устройства горизонтальных строительных швов, а также острых граней и не проектировать закладных частей.

Влияние температурного "Навала" на деформацию бетонных плотин наблюдалось на Широковской плотине [Д-36] (СССР), построенной в 1941—1945 гг. Проведенные в 1968 г. исследования выявили значительные смещения железобетонной стенки-устоя, сопрягающей бетонную плотину с каменнонаброской. Установлено, что во время понижения температуры воздуха стенка отклонялась в наружную сторону, поддерживаемая ею каменная наброска, постепенно осыпаясь, следовала за стенкой. При последующем повышении температуры каменная осыпь мешала полному возврату стенки в исходное положение. Сезонные колебания температуры в течение ряда лет привели к тому, что остаточные прогибы стенки достигли 24—34 мм. Измерения показали, что при повышении температуры воздуха сжимающие напряжения в бетоне возросли до 10 МПа, а растяжение в арматуре достигло 250 МПа. Стенку усилили, ее верх закрепили тросами, что вдвое снизило напряжения и обеспечило нормальную эксплуатацию сооружения.

Во многих докладах, представленных на конгресс, отмечалось, что в работе бетонных плотин играет весьма существенную роль набухание бетона, которое может по-разному проявляться в различных частях сооружения. Раньше этому важному вопросу достаточно внимания не уделялось и даже не предполагали, что это явление может вредно отражаться на работе плотин.

В [Д-23] Французского национального комитета СИГБ (ФНК) указывается, что проблемы, связанные с набуханием бетона, встали сейчас с особенной остротой.

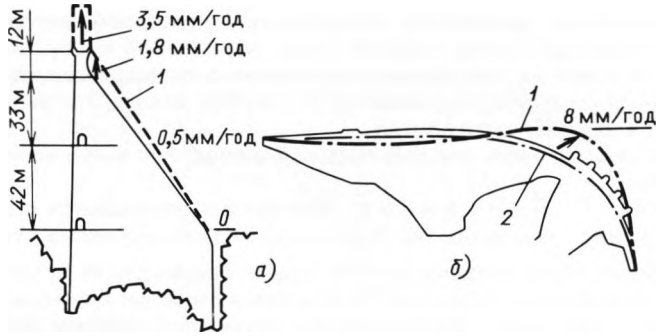


Рис. 9. Плотина Шамбон. Схема деформаций:

а — разрез; *б* — план; *1* — амплитуды изменений деформаций, мм/год; *2* — ось плотины

Типичным примером является французская плотина Шамбон, построенная в 1929—1935 гг. [Д-25]. Эта гравитационная плотина высотой 136 м, прямолинейная на большей части своей длины, заканчивается на левом берегу криволинейным участком, в котором размещен паводковый водосброс.

Разбухание бетона здесь наблюдается немногим более 10 лет, оно проявлялось, с одной стороны, в раскрытии широкой трещины на низовой грани водосброса, с другой — в искривлении гребня в криволинейной части и подъеме сооружения со скоростью, достигавшей 3,5 мм/год (рис. 9).

Деформации плотины измерялись геодезическими методами и с помощью отвесов. Было установлено, что разбухание происходило неравномерно по высоте сооружения:

на уровне 12 м ниже гребня скорость перемещения достигала 1,8 мм/год, т.е. была в два раза меньше смещения гребня;

на уровне промежуточной галереи (45 м ниже гребня) изменения перемещения равнялись лишь 0,5 мм/год;

на уровне нижней галереи (87 м ниже гребня) они были равны нулю.

Исследования проводились в сотрудничестве с Центральной лабораторией мостов и покрытий и с университетом Тулузы. Их цель — выяснить механизм разбухания бетона, причины различного его проявления на разных отметках плотины. Было выдвинуто три гипотезы:

увеличение объема бетона в ходе процесса, похожего на щелочную реакцию в заполнителях, — эта реакция происходит за счет его собственной щелочи, а не содержащейся в цементе;

расширение с выделением солей из пирита;

набухание монтмориллонита, содержащегося в заполнителе бетона.

Характерны также примеры проявления процесса набухания бетона в теле французских плотин Бимон и Кастельно [Д-24].

П л о т и н а Б и м о н — арочная, двоякой кривизны, имеет высоту 87,5 м. Основание плотины сложено пачками известняков, разделенных

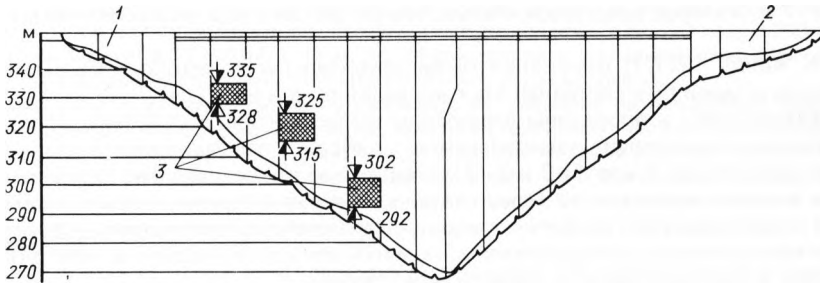


Рис. 10. Плотина Бимон. Вид с нижнего бьефа:

1 — правобережное примыкание; *2* — левобережное примыкание; *3* — зоны, забетонированные в период с 15.08 по 15.09

вертикальными трещинами, направленными к нижнему бьефу. В 1960 г. во второй секции плотины были обнаружены ненормальные явления: появились трещины на ее напорной грани, произошел подъем гребня и поворот секции к верхнему бьефу. В соседних секциях эти явления не отмечались. Цементация швов не дала положительного результата. Для наблюдения за трещинами на них были установлены струнные щелемеры. Кроме того, для исследования качества бетона пробурили вертикальную скважину, а в основании секции прошли разведывательную штольню. Позже была установлена многочисленная контрольно-измерительная аппаратура. Уровень воды в водохранилище был понижен на 9 м.

В связи с тем что трещиноватость бетона во второй секции из года в год увеличивалась, а гребень продолжал подниматься выше уровня гребня соседних секций и смещаться при этом в верхний бьеф, исследования были продолжены исходя из двух гипотез, предложенных различными группами экспертов:

г е о л о г и ч е с к а я г и п о т е з а — считающая, что наклоны секции вызываются деформациями вертикальных слоев породы в правобережной части основания под действием гидростатического давления;

г и п о т е з а н а б у х а н и я б е т о н а — предполагающая, что наклон происходит вследствие медленного накопления в бетоне плотины воды, проникающей через образовавшиеся трещины и вызывающей продолжение процесса гидратации цемента в бетоне.

В 1969 г. были проведены большие исследовательские работы: разведочное бурение (232 м), лабораторные испытания кернов, проходка трех горизонтальных скважин через вторую секцию в трещиноватой зоне. При этом выяснилось, что во всех блоках, забетонированных с 15 августа по 15 сентября, имеются трещины, связанные с набуханием бетона (рис. 10).

В конце 1975 г. был подведен итог всех проведенных исследований. С одной стороны, была отвергнута геологическая гипотеза, так как в основании плотины не было обнаружено заметных деформаций, с другой стороны, подтвердился факт набухания бетона секции 2 на участке высо-

той 7 м, которое предположительно может длиться еще около пятнадцати лет.

К концу 1977 г. изыскания были закончены и с помощью математической модели был составлен прогноз деформаций на 10 лет.

Разработаны и проведены следующие мероприятия: поставлены дополнительные контрольно-измерительные приборы; периодически выполняется цементация швов 1—2 и 2—3, установлены предварительно напряженные анкеры, проходящие через секцию 1 в правобережное примыкание для предотвращения развития трещины, параллельной основанию, которая прогнозировалась исследованиями на математической модели и, как оказалось, в действительности прошла через секцию 1.

Надо, однако, отметить, что причина локального набухания бетона в отдельных частях плотины, бетонировавшихся в одно время, так и не была установлена. Однако последствия его проявления, благодаря принятым мерам, постепенно устраняются.

Гравитационная плотина Кастельно имеет высоту 60 м. С самого начала ее эксплуатации, как указывается в [Д-24] ФНК, в ней наблюдались необратимые явления: неравномерные смещения гребня к нижнему бьефу. Тогда это было объяснено предполагавшимися пластическими деформациями скалы в основании, модуль деформации которой был в 5—10 раз меньше, чем у бетона сооружения. Дальнейшие наблюдения с помощью отвесов и геодезических марок, а также изучения фильтрационных расходов показали, что за 20 лет смещения плотины изменили знак, гребень стал перемещаться в верхний бьеф, т.е. в том же направлении, что и смещения при сезонном разогреве плотины. Вместе с тем, швы между секциями оказались плотно зажатыми.

Высказано предположение, что причиной этих явлений является набухание бетона в теле плотины. В дальнейшем оно подтвердилось результатами измерений, проводившихся с помощью трех обратных отвесов, заделанных в толще основания, а также данными нивелировки на гребне. Натурные исследования, выполненные с применением плоских домкратов, заделанных в шов, установили, что арочные напряжения не могли превышать 4 МПа. Было выявлено большое влияние на смещения плотины химической реакции в бетоне, вызывающей его набухание и анизотропное поведение в условиях ограниченных деформаций в сторону берегов. В предстоящих исследованиях будут тщательно изучаться физические свойства бетона и его составляющих, что необходимо для выяснения природы наблюдаемых явлений.

6. ПОВРЕЖДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПЛОТИН

В середине 40-х годов нашего века в среде французских гидротехников, возглавляемых известным инженером А. Койном, широко обсуждались новые прогрессивные мысли и взгляды на критерии проектирования арочных плотин. Утверждалось [15], в частности, что действительная несущая способность таких плотин должна быть существенно большей, чем это считалось до сих пор. Поэтому предлагалось при проектировании арочных плотин принимать более высокие допускаемые напряжения на сжатие в бетоне — вместо 4,5—5 МПа допускать 8—10 МПа, т.е. увеличить их практически вдвое.

Распространению этого взгляда способствовало также и то, что при строительстве арочных плотин уже много лет применялись высокопрочные бетоны марок 250—300 и больше с В/Ц 0,43—0,52. К тому же, опыты показали, что фактическая кубиковая прочность бетона в арочных плотинах на 20—40% выше марочной.

Кроме того, предлагалось не принимать во внимание растягивающие арочные напряжения, определявшиеся тогда простыми расчетами плотин, распространенными в то время (расчеты по котельной формуле, методом арка-центральная консоль и т.п.). Это обосновывалось предположением, что трещины, раскрывающиеся в растянутой зоне, не могут проникать в глубь сечений в основном сжатых арок и что образующиеся вторичные арки автоматически обеспечат хорошую работу всей плотины.

Для подтверждения этой концепции во Франции в 1953—1961 гг. были построены две экспериментальные плотины — Гаж высотой 41 м в Центральном массиве и плотина Толла высотой 88 м на о. Корсика [Д-37].

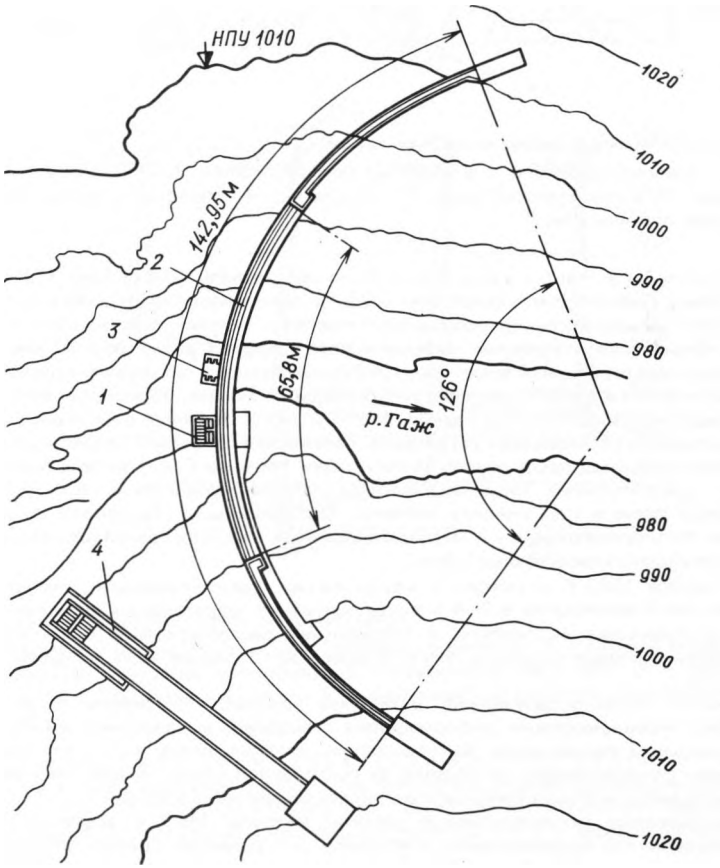


Рис. 11. План плотины Гаж:

1 — донный водосброс; 2 — водослив на гребне; *3* — временное отверстие для пропуска строительных расходов; 4 — водоприемник

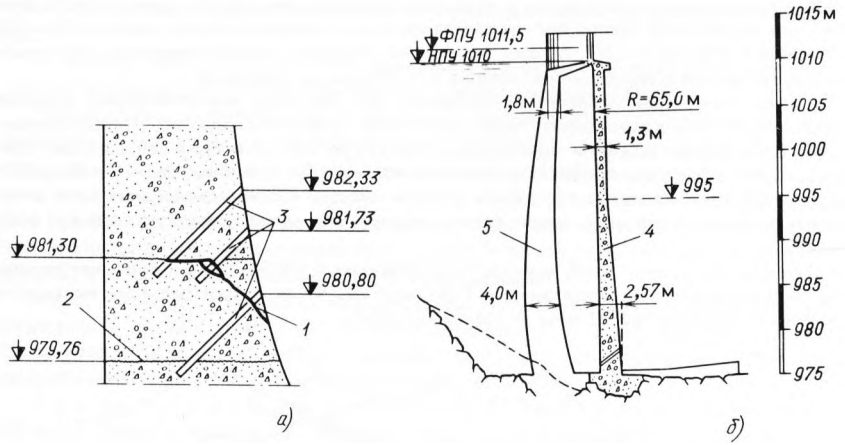


Рис. 12. Поперечный разрез по плотинам Гаж:

а — трещина сдвига; *б* — поперечные сечения плотин; *1* — след трещины в плотине Гаж-1; *2* — строительный шов; *3* — скважины; *4* — профиль плотины Гаж-1; 5 — профиль плотины Гаж-II

А р о ч н а я п л о т и н а Г а ж была построена в 1954 г. (рис. 11). Толщина плотины у гребня 1,3 м, у основания — 2,57 м, максимальная толщина в пятах около 4 м. Центральная часть верховой грани и нижняя — низовой армировались в консольном направлении стержнями периодического профиля диаметром 30 мм, а также сетками конструктивной арматуры, предупреждавшими, по мнению конструкторов, возникновение в плотине температурных трещин в зимнее, морозное время.

Предполагалось, что в основании плотины лежат прочные однородные граниты. Более поздние исследования установили, однако, что основание неоднородно.

Через 3—4 года после начала эксплуатации плотины Гаж в ее теле были обнаружены горизонтальные трещины, которые концентрировались в зоне у подошвы верховой грани в трех секциях плотины. Эти трещины не пересекали толщу сооружения. На неармированных и малоармированных участках граней плотины наблюдалось раскрытие строительных швов.

В ноябре 1963 г. в секции *1* между двумя раскрывшимися строительными швами, расположенными в 2—4 м выше основания, образовалась широкая трещина. Для установления ее глубины и направления распространения были пробурены скважины, которые показали, что она пересекает большую часть толщины плотины (рис. 12) .

Анализ трещинообразования в плотине показал, что трещина была, видимо, вызвана неравномерными деформациями основания, вызвавшими изгиб плотины в консольном направлении. Высказывалось предположение о том, что появлению трещины способствовало устройство за построенной плотиной довольно массивной плиты водобоя, которая увеличила жесткость защемления консоли.

Выполненные ретроспективные расчеты методом МКЭ и другими методами подтвердили это предположение и показали, что развитию трещин способствовали ползучесть бетона, колебания температуры и фильтрация воды из верхнего бьефа.

Несмотря на многочисленные попытки восстановить водонепроницаемость плотины с помощью покрытия или экрана не удалось. Это привело к принятию решения о замене ее другой плотиной, имеющей менее смелую конструкцию (см. гл. 3) .

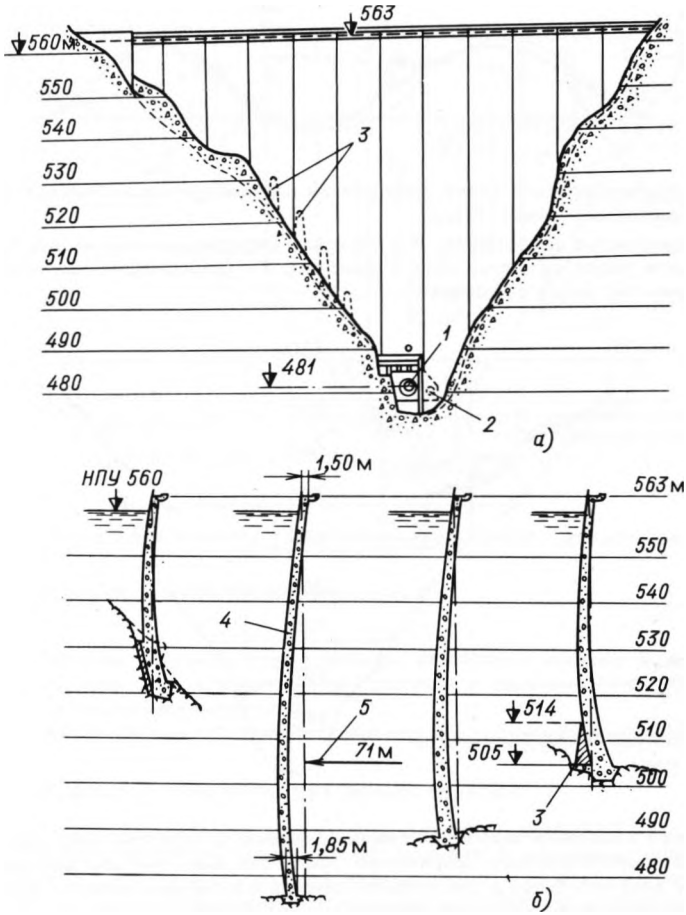


Рис. 13. Арочная плотина Толпа (низовая грань) :

а — развертка низовой грани; *б* — поперечные сечения; *1* — донный водосброс; *2* — временное отверстие для пропуска строительных расходов; *3* — подпорки (костыли); *4* — центральная консоль; *5* — радиус арки на уровне гребня плотины

Тонкостенная цилиндрическая арочная плотина Толла высотой 88 м была построена в 1960 г. на основании, сложенном монолитным гранитом (рис. 13). Конструкция этой плотины, также как и плотины Гаж, была исключительно смелой — толщина ее в центральной консоли 1,5 м, к берегам она несколько утолщается.

Первое наполнение водохранилища производилось на половину высоты плотины в 1960 г., после чего водохранилище было сработано. Второе наполнение, в 1961 г., производилось до уровня, отстоящего от гребня на 20 м.

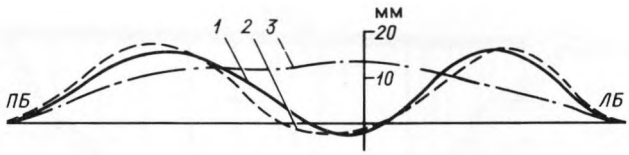


Рис. 14. Арочная плотина Толпа. Деформации верхней арки, вызываемые давлением воды и разогревом низовой грани:

1 — измеренные деформации; *2* — расчетные деформации, полученные при сращивании шести видов смещений арок и консолей; *3* — деформации, рассчитанные при сращивании трех видов смещений

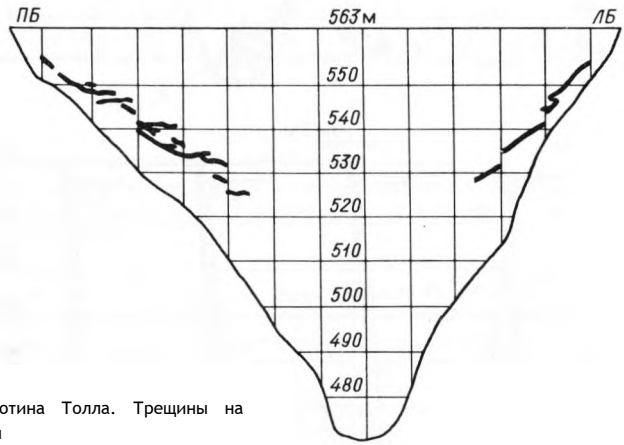


Рис. 15. Плотина Толла. Трещины на низовой грани

Натурные измерения зарегистрировали появление у подошвы береговых консолей больших растягивающих напряжений. Необычны были прогибы верхней арки — в сторону верхнего бьефа в центральном сечении и в сторону нижнего бьефа в четвертях дуги, считая от право- и левобережных примыканий (рис. 14). После снижения уровня воды на низовой грани были обнаружены трещины в основном у подошвы береговых консолей (рис. 15).

Измерения напряжений, выполненные в апреле—мае 1961 г. при ППУ на ∇ 540 м (рис. 16), показали, что на низовой грани ниже уровня воды действуют главные сжимающие напряжения, достигающие 2,0 МПа, и растягивающие — 0,75 МПа. На уровне воды в водохранилище и в верхней части плотины главные растягивающие напряжения оказались существенно большими (до 2,1 МПа). При снижении уровня воды на 5 м в июне—июле 1961 г. максимальное растяжение в левобережных консолях возросло до 3,8 МПа, а в правобережных до 5,3 МПа. Результаты расчетов плотины, выполненных полным методом арок-консолей (с шестью уравниваниями смещений), качественно совпали с полученными в измерениях, но по значениям расчетные величины были в 1,5—2 раза больше.

Основными причинами наблюдавшихся повреждений, по-видимому, являются большая жесткость основания, не позволяющая поворачиваться пятам консолей и арок, значительная инсоляция, вызывающая разогрев тела плотины (но не скального

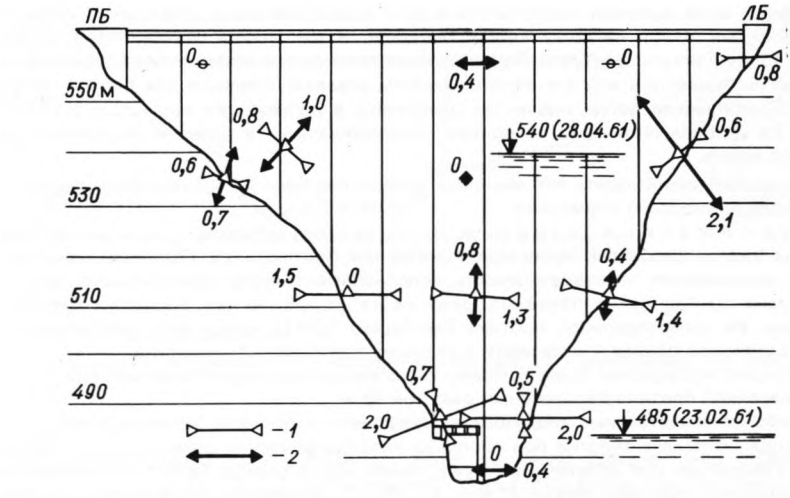


Рис. 16. Низовая грань плотины Толла. Напряжения (МПа), измеренные в апреле—мае 1961 г.:

1 — сжимающие; *2* — растягивающие

массива), наконец, неудачная форма плотины, ее наклон к нижнему бьефу, обусловивший смещения гребня в центральной консоли к верхнему бьефу при неблагоприятном распределении напряжений.

Ниже дается краткое описание выполненной впоследствии перестройки плотины.

7. ПОВРЕЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ БЕТОННЫХ ПЛОТИН

Этот вопрос обсуждался во многих докладах [Д-17, Д-36, Д-47 и др. 1, так как выход из строя элементов плотин может привести к серьезным повреждениям сооружений. В некоторых случаях они индивидуальны и не повторяются на других гидроузлах. Из многих приведенных в докладах примеров мы остановимся лишь на нескольких, более общих.

З а с о р е н и е д р е н а ж н ы х с и с т е м. Это широко распространенное повреждение, неоднократно встречающееся в бетонных плотинах. Главная опасность засорения дренажей — повышение противодавления на подошве плотин, а следовательно, снижение устойчивости, увеличение градиентов фильтрации в основаниях. Для плотин, построенных с небольшими запасами прочности и устойчивости, а таких немало в США, Индии и других странах, выход из строя дренажей может привести к значительным неблагоприятным последствиям. Не случайно поэтому этот вопрос затрагивается в нескольких докладах на Конгрессе.

В [Д-17] (Великобритания) описываются особенности поведения плотины Эррохти, построенной в Северной Шотландии в 1957 г. на слабом скальном основании. Высота этой плотины 50 м, длина по гребню 500 м. В ходе строительства плотины для укрепления трещиноватого основания были выполнены его укрепительная цементация, а также вертикальный дренаж между контрфорсами. После нескольких лет эксплуатации плотины многие дрены оказались закупоренными продуктами выщелачивания цемента, поступавшими, из закрепленной зоны основания. Процесс

ускорился из-за высокой кислотности воды в водохранилище, создаваемой большими залежами торфа на водосборной площади. В некоторых случаях происходила даже полная закупорка дрен. Одновременно отмечалось разуплотнение основания, что могло привести в итоге к неравномерным осадкам, опасным для плотин такого типа. Выполненная затем прочистка обеспечила в дальнейшем нормальную работу дрен. Регулярная промывка позволила поддерживать их в рабочем состоянии длительное время.

За последующие десять лет заметных осадок плотины не происходило, сооружение функционировало нормально.

Повреждения затворов. Выход из строя затворов — очень распространенный вид повреждений, происходивший на многих плотинах. Основная опасность этого повреждения — невозможность использования всего водосливного фронта гидроузла при пропуске паводков, даже не катастрофических. Известны случаи в Испании. На гравитационной плотине Сан-Тереза [Д-47] выход из строя автоматических затворов привел к переливам и размыву примыкания к плотине.

Большие затруднения были вызваны переливами воды при поврежденных затворах на арочной плотине Вальдеканьес высотой 98 м.

Наиболее значительные разрушения, связанные с отказом затворов вследствие прекращения подачи энергии при пропуске катастрофических расходов и выхода из строя генератора для собственных нужд, имели место осенью 1979 г. на индийской ирригационной плотине Мачху-II (см. гл. 4). В результате катастрофы погибли сотни людей, жителям нанесен очень большой материальный ущерб.

Кавитация на водосливах. Этот вид повреждений встречается часто на бетонных водосливах и водоспусках. Однако в докладах о них лишь упоминается, обычно без существенных подробностей.

Краткие сведения о кавитационных повреждениях на водосливе бетонной плотины Братской ГЭС приводятся в [Д-36]. В результате интенсивного воздействия высокоскоростного потока воды в отдельных пролетах произошло разрушение бетона на глубину до 1 м. Очагами этих разрушений явились местные выступы высотой 2—4 см на поверхности водослива. Бетон на участках разрушений подвергался в раннем возрасте воздействию мороза, что облегчило его эрозию. Заполнение каверн прочным кавитационным бетоном после установки анкеров, заделанных в здоровый бетон, и укладки арматурных сеток обеспечило нормальное состояние водослива в дальнейшем.

8. АВАРИИ ПЛОТИН ИЗ КАМЕННОЙ КЛАДКИ

В [Д-31] И.К. Мурти, П.И. Маке и Б. Панта (Индия) приводятся три аварии плотин из каменной кладки, которые в двух случаях привели к разрушениям.

В Индии с давних пор и до нашего времени широко распространено возведение вручную плотин из каменной кладки на известковом или цементном растворе. Многие из таких плотин, как старых, так и недавно построенных, находятся в хорошем состоянии. Однако некоторые из них имеют повреждения или разрушились.

Плотина Квадаквасла трапецеидального профиля (рис. 17) была построена в 1870 г. на хорошем скальном основании (базальт) из каменной кладки на известковом растворе. Высота плотины 33 м, ширина по основанию 17,2 м (52% высоты). Устройство деформационных швов и дренажей в ней не предусматривалось. С современной точки зрения плотина была явно недостаточно устойчивой и прочной — по данным выполненных позже расчетов в ней должны были возникать растягивающие

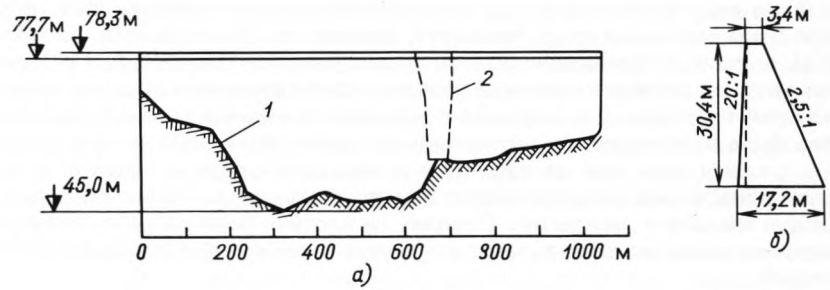


Рис. 17. Плотина Квадаквасла:

а — продольное сечение; *б* — поперечное сечение; *1* — основание; *2* — зона разрушения

напряжения, примерно 0,4 МПа. Хотя никаких трещин или повреждений в плотине не было обнаружено, была признана необходимость ее усиления. При этом рассматривался ряд мероприятий: предварительное натяжение тросами, устройство дополнительных контрфорсов, присыпка низовой грани грунтом или же постройка вместо нее новой плотины.

Однако еще до начала выполнения каких-либо работ, в июне 1961 г., в результате перелива при продолжительных ливнях произошло разрушение грунтовой плотины Пеншет, строившейся выше по течению. При этом уровень воды в верхнем бьефе плотины Квадаквасла поднялся на 1,3 м выше проектного и произошел перелив через ее гребень воды слоем 2,7 м. Естественно, что плотина такого обжатого профиля выдерживала подобную перегрузку (25%) лишь несколько часов, а затем разрушилась. Неожиданно было то, что разрушение ее произошло не в самой нагруженной части, а в месте, где ее высота составляла лишь 2/3 максимальной. Оказалось, что именно в этом месте был резкий перелом контура основания. Разрушение началось с образования на напорной грани, непосредственно в зонах над местным выступом основания (см. рис. 17), трещины, распространявшейся вверх под некоторым углом. Одновременно происходило раскрытие горизонтальной трещины на контакте с основанием. Затем под давлением воды произошел сдвиг части плотины с поворотом (как двери) относительно ее правобережной части, сохранившей устойчивость. Создавшийся при этом большой изгибающий момент вызвал образование в заделке новой вертикальной трещины, ставшей границей разрушенной зоны плотины. Было также отмечено, что перед началом разрушения плотина сильно вибрировала вследствие засасывания воздуха под струю.

Интересно отметить, что испытания кернов длиной 91 см, взятых в теле разрушенной плотины, показали достаточно высокие результаты: прочность кладки на сжатие 12 МПа, на раскалывание 0,6 МПа. Соответственно прочность базальта в основании на сжатие составила 25—100 МПа, а раствора 5 МПа. Средняя прочность раствора на растяжение была 0,04 МПа.

Плотина Чикахоул из каменной кладки на известковом растворе была построена на р. Чикахоул (Индия) в 1966 г. Высота плотины 30 м, ширина по основанию 20,6 м, средний наклон граней 0,7. В основании плотины залегают скальные породы — выветрившиеся гранито-гнейсы слоистой текстуры. Для улучшения качества основания в ходе строительства была выполнена его укрепительная цементация. При ее проведении был слышен звук как от взрыва, и в кладке плотины у правого борта была обнаружена большая вертикальная трещина, а также несколько трещин меньшего раскрытия. Поэтому на плотине были затем выполнены широкие цементационные работы с целью укрепления кладки в районе трещин.

Плотина была построена и пущена в эксплуатацию. Она удовлетворительно работала 6 лет. Однако 8 декабря 1972 г. через плотину прошел необычно большой паводок, вызвавший поднятие уровня воды в водохранилище на 1,5 м выше проектного, произошел прорыв плотины, в результате которого вся правобережная часть была полностью разрушена.

Причины разрушения тщательно изучались. Были выполнены разнообразные исследования и расчеты, проводились опыты на моделях из хрупких материалов и на фотоупругих моделях, определялись свойства материалов плотины и основания.

В этих исследованиях было установлено, в частности, что плотность каменной кладки плотины была на 10—15% ниже проектной. Кроме того, вследствие отсутствия в плотине дренажа и проведения укрепительной цементации основания, противодавление должно было быть Максимальным. В проекте же оно принималось равным 2/3 полного значения. С учетом этих данных растягивающие и сжимающие напряжения в плотине, даже при нормальном уровне воды в водохранилище (а тем более при повышенном), оказались недопустимо большими. Из-за плохой связи кладки тела плотины с кладкой облицовки последняя отделилась и обрушилась. Это привело к уменьшению сечения плотины и новому увеличению напряжений, приведших к ее разрушению.

Отмечается также, что примененный на строительстве известковый раствор (состав 1:4) не отвечал основным требованиям и был крайне неоднороден. Так, прочность раствора на сжатие изменялась в пределах 1,05-5,1 МПа при среднем ее значении 2,9 МПа. Прочность на разрыв соответственно изменялась от 0,15 до 0,39 МПа при среднем значении 0,26 МПа. Изучение образцов из остатков разрушенной кладки позволило установить многочисленные нарушения сцепления между кладкой и скалой, вызванные, видимо, укрепительной цементацией, проведенной при высоком давлении.

В докладе отмечается, что ряд индийских плотин из каменной кладки на известковом и частично цементном растворе еще и сейчас находится в неудовлетворительном состоянии и на некоторых из них проводятся работы по усилению.

Плотина Бандарадара высотой 82 м описывается в качестве примера. На ней еще в 1969 г. были обнаружены интенсивные протечки воды через каменную кладку. Позже были установлены и крупные тре-

щины — 7 вертикальных протяженностью до 7 м в нижней части на низовой грани и несколько наклонных и горизонтальных — на верховой. Модельные исследования, проведенные методом объемной фотоупругости, подтвердили вероятность образования в плотине сквозных трещин. Усиление плотины выполнялось с помощью 14 мощных контрфорсов, примыкающих к низовой грани. Работы еще не были завершены ко времени представления доклада. Указывается, однако, что еще многие из существующих плотин из каменной кладки подлежат усилению в ближайшее время.

Из рассмотрения случаев аварий на плотинах из каменной кладки можно сделать заключение, что такие плотины могут быть безопасными, но требуют высокого качества исполнения. Обязательно устройство -дренажа для снижения противодавления. Должны создаваться деформационные швы в местах переломов основания. При появлении трещин цементация не всегда эффективна, особенно опасно ее проведение под высоким давлением — оно может вызвать образование опасных трещин.

Глава 3

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И РЕМОНТ БЕТОННЫХ ПЛОТИН

Ремонтные работы на поврежденных плотинах **рассматриваются** во многих докладах, представленных на Конгресс. Однако лишь в семи из них описание выполненных работ приводится с достаточной подробностью. Основное внимание в этих докладах уделяется мероприятиям, проведенным с целью восстановления водонепроницаемости комплекса плотина—основание, повышения прочности и устойчивости сооружений, безопасного пропуска максимальных расходов, а также устранения трещин и других повреждений кладки, вызванных различными причинами, в частности старением плотин.

К числу ремонтных мероприятий, выполняемых для восстановления водонепроницаемости плотин и оснований, относятся: работы по защите поверхности сооружений различного рода покрытиями; усиление существующих или устройство новых водоупорных элементов типа цементационных завес, диафрагм, понуров и т.п., заделка швов и трещин; повышение водонепроницаемости материалов плотин и основания путем инъекций в них смол, цементных, глинистых и других растворов; укрепление и обжатие анкерами; возведение подпорных стен и контрфорсов; устройство и восстановление деформационных швов и т.п. В докладах приводятся примеры проведения подобных мероприятий при ремонтах плотин.

9. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАЗРУШЕННЫХ БЕТОННЫХ ПЛОТИН

Восстановление бетонных плотин в случаях полного их разрушения производится чаще всего с изменением створа сооружения. Это связано, видимо, с тем, что при катастрофической аварии происходят значительные повреждения (типа размывов, обвалов и т.п.) в берегах и в руслах реки, образуются нагромождения обломков скалы и бетона. Считается поэтому, что проще и экономичнее перенесли створ, желательно, в нижний бьеф, чтобы укрыть следы разрушений в водохранилище, создаваемом новой плотиной.

В [Д-37] приводятся краткие сведения о перестройке экспериментальной французской арочной плотины Гаж, возведенной в 1953 г.

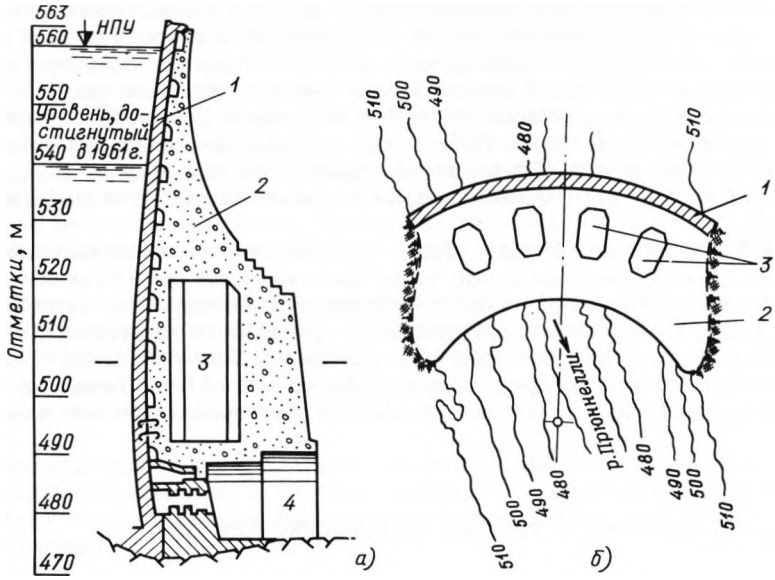


Рис. 18. Плотина Толла после достройки:

а — поперечное сечение; *б* — план; *1* — старая плотина; *2* — пристроенная новая конструкция; *3, 4* — проемы

В результате произошедших повреждений эта плотина стала опасной, так как дальнейшее развитие повреждений могло привести к разрушению и принести большой ущерб. Восстановление плотины, производившееся в 1966 г., свелось по существу к ее замене. Непосредственно на старой была построена новая плотина несколько большей толщины, но той же высоты (см. рис. 12). Было решено прежнюю плотину не разбирать, а оставить в нижнем бьефе, где ее существование не представляет никакой опасности.

В том же докладе дается описание выполненного в 1965 г. усиления, которое свелось по существу к коренной перестройке арочной плотины Толла высотой 88 м, построенной в 1961 г. на о. Корсика. Эта плотина также возводилась как экспериментальная и имела необычно малую толщину: 1,6 м. Лишь у основания и берегов она несколько уширялась (см. рис. 13). Повреждения этой плотины и их причины были рассмотрены выше.

Перестройка плотины должна была выполняться без опорожнения водохранилища. Поэтому ее усиление необходимо было проводить с низовой стороны. Затруднение вызвало то, что геологические и топографические особенности ствоа не позволяли пристроить новую часть плотины к предыдущей — это было возможно лишь для верхних арок. Нижние же арки, вследствие резкого расширения ущелья за прежним створом, пришлось отодвинуть. Это определило новый профиль плотины, который показан на рис. 18. Существенно, что пристроенная часть плотины по проекту сможет выдержать весь гидростатический напор самостоятельно. Сохранение на прежнем месте старой плотины создает дополнительный запас прочности сооружения. Для некоторого уменьшения объема бетона в плотине в ее теле оставлены большие проемы.

Выполнение работ по пристройке новой части плотины потребовало большой осторожности. Были опасения, что при устройстве ее береговых примыканий с применением даже небольших взрывов скала под пятами существующей плотины может быть повреждена. Поэтому работы велись лишь с применением пневматического инструмента при тщательном контроле за состоянием сооружения.

10. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ ПЛОТИН

Ремонтные работы по восстановлению водонепроницаемости бетонных сооружений и их оснований, проводившиеся с целью повышения безопасности их эксплуатации и снижения потерь воды, рассматриваются наиболее полно и систематично в [Д-23-49] на примере 30 бетонных плотин различной высоты и конструкции.

З а щ и т а п о в е р х н о с т и б е т о н а . Применение листовых материалов для защиты верховых граней бетонных сооружений заканчивалось до последнего времени неудачами. Два десятилетия тому назад с этой целью применяли асфальтобетонные плиты, войлок из стекловолокна или синтетического волокна, которые крепили всевозможными смолами. Во многих случаях (на плотинах Лак Анель, Герледан и др.) отмечался быстрый износ, набухание и отрыв гидроизолирующих листов.

С появлением новых синтетических материалов начинается широкое применение тонких штукатурных защитных покрытий. Добавка в цементный раствор полиацетатвинила (примерно 15 % массы цемента) обеспечивает очень прочное закрепление защитного слоя на основном материале, предотвращает образование поверхностных трещин и повышает морозостойкость вследствие увеличения объема воздуха, заключенного в порах материала штукатурки (около 9%) . Упругость тонкого защитного покрытия позволяет отказаться от устройства в нем швов. Лишь на участках, на которых возможны относительные смещения блоков сооружения, устройство швов необходимо. Штукатурные покрытия, существующие на ряде плотин полтора десятка лет, хорошо зарекомендовали себя и в тяжелых климатических условиях. С их помощью удалось избежать выщелачивания бетона плотины от действия морозов и агрессивных вод *(Ph* = 5,1) на семи высокогорных гравитационных плотинах каскада От Руана (Франция) .

Для создания водонепроницаемой поверхности и защиты от агрессивной воды применяют смолы различного вида. Ремонт покрытий после расчистки повреждений успешно выполняется, например, с применением эпоксидной смолы, неопрена, гапалона, полиацетатвинила, бутадиенового стирола и др. Для предотвращения кавитации можно применять либо растворы с добавкой ахромина или корунда, либо чугунные облицовки. Тонкие покрытия делают и из раствора эпоксидной смолы с наполнителем — кварцевым песком. Однако самой надежной защитой считается гранитная кладка на цементном растворе.

Покрытия низовой грани, предназначенные для защиты бетона и для улучшения внешнего вида, опасны тем, что могут поддерживать высокое поровое давление в теле плотины. Во избежание этого необходимо устраивать дрены.

З а д е л к а ш в о в и т р е щ и н . Недостаток битумов, использовавшихся в течение многих лет для гидроизоляции швов, заключается в том, что зимой, когда от них требуется максимальная деформируемость, они затвердевают, летом же становятся жидкотекучими, сцепление их с бетоном снижается, поэтому водопроницаемость швов возрастает.

Теперь для заполнения швов и трещин в распоряжении строителей имеются такие материалы, как виниловая смола, полиэтилентетрасульфид (тиокол), полиуретановая смола и многие другие.

Качество склейки зависит, как известно, не только от качества используемого материала, но и от состояния ремонтируемой поверхности. Поверхность старого

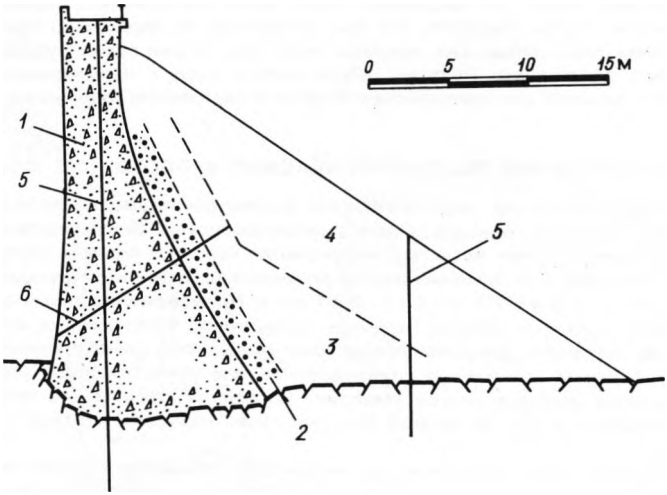


Рис. 19. Плотина Альфред:

1 — каменная кладка; *2* — дренажный слой; *3* — уплотненная насыпь; *4* — каменная наброска; *5* — вертикальные скважины; *6* — наклонные скважины для инъекции цементного раствора

бетона перед склейкой с новым должна быть тщательно зачищена, шероховатость ее увеличена насечкой, желательна пропитка или хотя бы покраска, эпоксидной смолой. Если повреждения относительно невелики, то швы могут быть заделаны раствором эпоксидной смолы с наполнителем, подаваемым в шов под небольшим давлением.

Заделка трещин осуществляется таким же образом, что и заделка швов, только разделка их оказывается более сложной. Техника заделки такова: после расчистки боковых поверхностей трещин укладывают полистироловую полосу, закрепляя ее гвоздями, вбитыми в трещину, затем с обеих сторон под нее подают раствор эпоксидной или другой смолы.

Восстановление водонепроницаемости плотин цементацией. Инъекция цементного раствора позволяет успешно уплотнять тело плотины, однако, не обладая большой текучестью, раствор не проникает во все пустоты. Радиус распространения раствора, инъектируемого в скважины, невелик, 1,5—2,5 м. Поэтому цементация не обеспечивает обычно требуемую водонепроницаемость поврежденного бетона.

В [Д-23] описывается плотина Альфред в качестве примера (рис. 19). Высота плотины около 25 м, возведена из бутовой кладки с земляной насыпью и каменной наброской с низовой грани.

В 1960 г. водолазы обнаружили трещины на верховой грани плотины; были высказаны предположения о наличии пустот в ее основании. Контрольное бурение установило высокую водопроницаемость тела плотины и основания, а также признаки сильного выщелачивания раствора в швах. Проект ремонтных работ предусматривал инъекцию цементного раствора в вертикальные скважины, пробуренные с гребня через 2,5 м, а также в наклонные скважины, пробуренные с низовой грани через 2,5 м, и в горизонтальные скважины на верховой грани (на рисунке не показаны) с шагом 2,5 м. После осуществления этих мероприятий было произведено уплотне-

ние швов (расчистка их выполнялась отбойным молотком), а также пескоструйная обработка и торкретирование поверхности плотины. В результате проведения ремонтных работ фильтрация через плотину, составлявшая при заполненном водохранилище 50 л/мин, уменьшилась в 1970 г. до 10 л/мин. Однако в последующем фильтрация постепенно снова нарастала. Дополнительная цементация привела к снижению фильтрации, которая затем вновь увеличилась в 1978 г. до 20—30 л/мин.

Лучший эффект получается обычно при инъектировании смол, обладающих относительно небольшой вязкостью. Так, инъекция акриловой смолы в строительные швы на верховой грани плотины Келлауа, выполненная с помощью 3140 игл, снизила фильтрационный расход с 24 до 2 л/с.

Упрочнение бетона арочной плотины Туррите ди Галликано с применением цементации описано в [Д-40] (Италия). Необходимость ее проведения была установлена исследованиями ультразвуковым методом. Именно они позволили выявить в этой плотине наличие зон, в которых бетон имел низкое качество. Цементация производилась со стороны верхнего бьефа через почти горизонтальные скважины, пробуренные приблизительно на середине высоты плотины, а также через вертикальные скважины, пройденные с гребня через тело плотины и в скальном основании на глубину в несколько метров. При инъекции применялся пуццолановый цемент очень тонкого помола с удельной поверхностью 7500—9000 $см^2/г$. Чтобы в 24 скважины, пробуренные для ультразвуковых исследований, не попадал цементный раствор, их предварительно заполняли песком, который потом был удален. Исследования, проведенные после цементации, показали эффективность выполненных работ: увеличились объемный вес бетона, его временное сопротивление и модуль упругости, водопоглощение его оказалось незначительным.

Для повышения водонепроницаемости скальных оснований плотин, как указано в [Д-23], применяется обычно цементация, с помощью которой производится усиление существующей завесы, либо создается новая. Уменьшению фильтрации через основание плотины может также содействовать устройство понура или шпунтовой стенки. В докладе приведен ряд примеров их успешного выполнения.

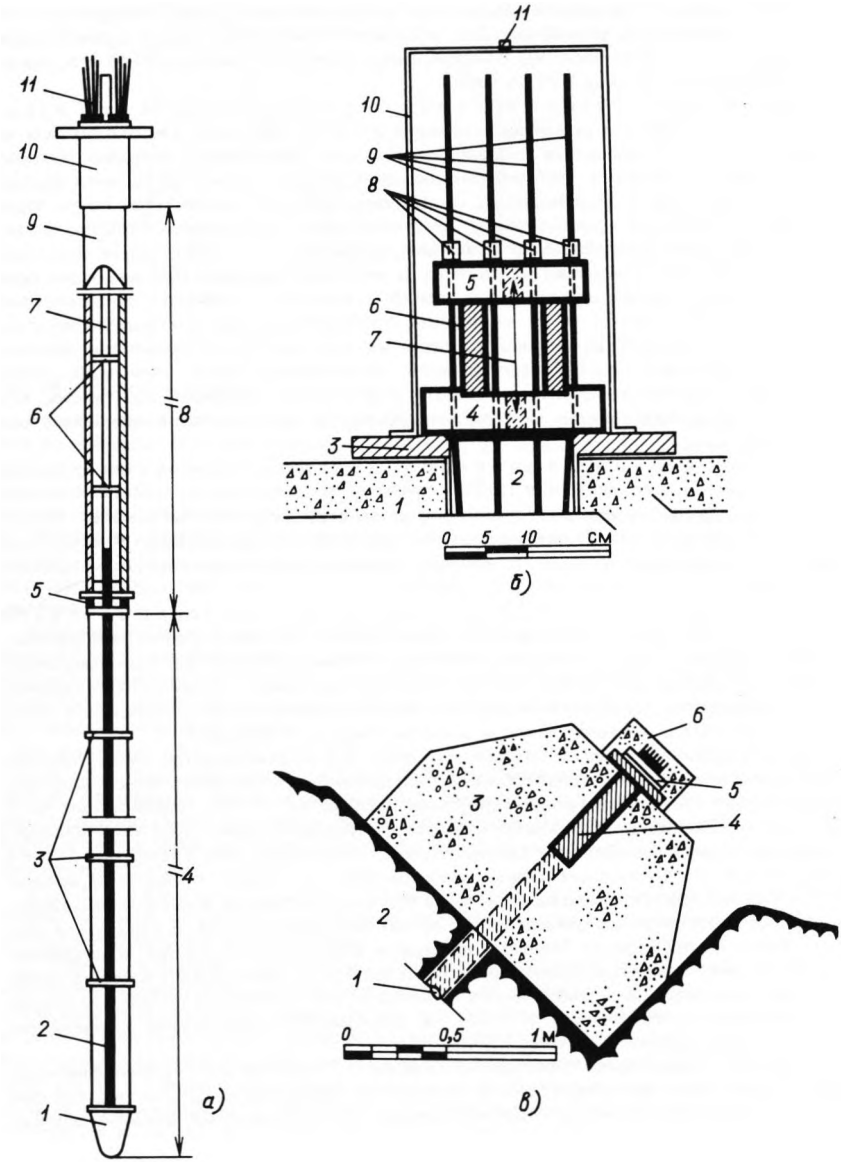
Для устранения суффозии в арочной плотине Рооде Эльсберг (ЮАР) [Д-3] (см. с. 26) проводились значительные по объему ремонтные работы. В основании этой плотины залегает песчаник, сильно ослабленный выветриванием и многочисленными трещинами. По существу он представлял собой слабосвязанный песок. Наблюдения показали наличие значительных выносов фильтрационным потоком твердых частиц, включая частицы довольно больших размеров.

При составлении проекта ремонтных работ это обстоятельство было принято во внимание и высказано предположение, что цементация при наполненном водохранилище может привести к неблагоприятным последствиям. Под воздействием необходимого для выполнения этой работы высокого давления может произойти раздробление ослабленных песчаников, а цементный раствор будет действовать как смазка, уменьшающая сопротивление трения в основании, что может привести к аварии. Цементация же при низком давлении была бы неэффективной, она сопровождалась бы выносом раствора из основания по путям фильтрации воды. В результате усиления завесы не произойдет. Поэтому на первом этапе ремонта каверны в основании были заполнены цементным раствором, благодаря чему прекратился вынос в скважины крупных фракций и уменьшился фильтрационный поток в туннель. Но общий фильтрационный расход через плотину не уменьшился, продолжали вымываться и частицы песка крупностью менее 0,5 мм.

На втором этапе были пробурены скважины, параллельные цементационной завесе. Через них в настоящее время проводится цементация. На участке, где она уже выполнена, вынос твердых частиц прекратился, а суммарный фильтрационный расход значительно снизился.

11. УКРЕПЛЕНИЕ ПЛОТИН АНКЕРАМИ

Как известно, анкеры могут применяться для того, чтобы повышать устойчивость плотин, обеспечивать возможность наращивания их в высоту или предупреждать развитие неблагоприятных деформаций с помощью создаваемых усилий, способных компенсировать деформации от набухания бетона, неравномерных осадок и т.п.



На гравитационной плотине Фонтана [Д-1] (США) применение натяжных анкеров в сочетании с другими мероприятиями позволило предотвратить аварию. Описание конструкции этой плотины, причин и характера ее повреждений приводилось в гл. 2. Напомним, что в секциях криволинейной части плотины после 30 лет ее эксплуатации были обнаружены трещины (см. рис. 7), распространяющиеся от низовой грани к дренажной галерее и далее в направлении к верховой грани на уровне 25—30 м ниже максимального уровня воды в водохранилище. Предполагалось, что главной причиной трещинообразования является продольное расширение основной части плотины при интенсивном нагревании солнцем ее низовой грани.

Еще до детального выяснения причин необычного возникновения трещин в плотине были срочно приняты временные меры, которые должны были улучшить ее состояние. Прежде всего организовали систематический полив и разбрызгивание воды на гребне и на низовой грани плотины в жаркое время; для этого использовалась вода из водохранилища. Это мероприятие позволило понижать в очень теплые дни температуру бетона плотины на 17 °С, что содействовало некоторому уменьшению раскрытия трещин. Одновременно начались работы по усилению поврежденных секций плотины с помощью анкеров. Для выполнения этой работы у верховой грани была смотирована на барже плавучая бурильная установка, которая использовалась при пониженном уровне водохранилища для проходки в теле плотины наклонных скважин диаметром 127 мм. После пересечения скважиной трещин бурение продолжалось еще на глубину 30 см. Затем бур удалялся, скважина в районе трещины заполнялась цементным раствором, частично попадавшим в трещину. После затвердевания раствора бурение скважины продолжалось до проектной глубины. Затем в скважины закладывался трос из высокопрочной стали ($R_р$ = 1656 МПа), состоящей из 90 проволок диаметром 6 мм, он заделывался концом в нижней части скважины.

Натяжение анкеров выполнялось с помощью домкратов. Нагрузка в каждом анкере возрастала постепенно, ступенями по 8420 кН до создания в анкере усилия порядка 33700 кН. Напряжения в проволоках достигали при этом 0,8 $R_р$ = 1325 МПа.

Процесс натяжения анкеров выполнялся в таком порядке: сначала натягивались анкеры в центре блока, затем переходили к растяжению такой же нагрузкой соседних анкеров и т.д. После завершения на данной ступени нагружения всех 25 анкеров приступили к следующему этапу нагружения, осуществлявшемуся в таком же порядке. Этим достигалось постепенное и более равномерное обжатие всей укрепляемой зоны плотины. На окончательной стадии усилие растяжения в тягах снижалось с 3360 до 2930 кН, т.е. до значения, отвечающего напряжению в проволоках, равному 0,7 $R_р$. Цементация скважин производилась после достижения в анкерах заданного усиления и проверки их состояний.

Цементация обжимаемой трещины производилась через специальную систему труб, установленных в плоскости трещины с выходами в галерею. В большинстве

Рис. 20. Анкеровка откоса вблизи плотины Кабра Коррал:

а — анкер; *1* — наконечник; *2* — труба для омоноличивания анкера; *3* — наружные распорки; *4* — часть анкера постоянной длины; *5* — фиксирующее устройство; *6* — внутренние распорки; 7 — труба для омоноличивания завершающей части анкера; *8* — завершающая часть анкера переменной длины; *9* — оболочка; *10* — хвостовая часть анкера; *11* — клиновидные зажимы; б — детали анкера: *1* — бетон; *2* — анкерные тросы; *3* — хвостовая часть оболочки анкера; *4* — опорная плита; *5* — плита, воспринимающая растяжение анкера; *6* — кольцо, передающее усилие анкера; 7 — полость, заполненная битумом; *8* — клиновидные зажимы; *9* — тросы; *10* — ограждающий короб; *11* — пробка; б — детали опорного блока: *1* — анкер; *2* — скала; *3* — бетонный блок; 4 _ хвостовая часть оболочки анкера; 5 — опорная плита; *6* — герметизирующий блок

случаев она выполнялась после натяжения анкеров заданной нагрузкой. Лишь в трех блоках она была осуществлена после первой ступени нагружения, что позволило восстановить сопротивление сдвигу по трещине и предотвратить возможность опасного смещения блоков при натяжении анкеров.

Выполнение предварительных ремонтных работ на плотине Фонтана, бесспорно, снизило риск возникновения аварии, но с их помощью не удалось привести плотину в состояние, пригодное для нормальной эксплуатации. Расчеты, проведенные методами МКЭ, показали, что для этого необходимо еще устройство постоянною деформационного шва, отделяющего прямолинейную часть плотины от криволинейной. Описание работ по устройству такого шва приводится ниже.

Укрепление анкерами крутого откоса скального массива описано в [Д-39]. Вблизи плотины Кабра Коррал в Аргентине на оси водосбросных туннелей и помещений затворов в результате проведения планировочных работ в скальном массиве, сложенном песчаником с прослойками глинистых и иловых материалов, образовался крутой откос. При первом наполнении водохранилища в этом откосе на затопляемых отметках появились небольшие трещины. При последовавшем опорожнении водохранилища количество трещин и их раскрытие увеличилось. Было решено закрепить откос предварительно напряженными анкерами из расчета по одному анкеру на 16 м откоса. В докладе приведен подробный расчет напряжений в анкерах. Каждый анкер состоит из 20 жил высокопрочной стальной проволоки диаметром 7 мм в полихлорвиниловой оболочке Скважины для установки анкеров бурились за пределы возможной поверхности обрушения, поэтому длина анкеров составила 80 м. Детали анкеров показаны на рис. 20. На 12 анкерах поставлены приборы для измерения их удлинения. После установки анкеров при последующих наполнениях водохранилища скальный массив оставался устойчивым.

12. УСИЛЕНИЕ ПЛОТИН КОНТРФОРСАМИ

В 1964 г. в Индии было обследовано состояние четырех плотин, возведенных в начале столетия из бутовой кладки на известковом растворе [Д-32] При осмотре тщательно изучались признаки "старения" плотин, проявлявшиеся в виде увеличенной фильтрации, сильной трещиноватости и местных повреждений кладки, уменьшения водонепроницаемости швов. Кроме того, проводились расчеты, учитывающие влияние на прочность и устойчивость этих плотин действия противодавления, землетрясений и других факторов, не рассмотренных в первоначальных проектах.

Полноценное обследование этих плотин затруднялось отсутствием в них контрольно-измерительной аппаратуры и смотровых галерей.

Основная часть доклада посвящена рассмотрению способов укрепления плотины Бхатгхар высотой 56,4 м, которая была построена в 1927 г. на р. Елванди. Общая длина плотины 1625,5 м, из которых 325,5 м занимают водосбросы, оборудованные 81 плоскими затворами 3,12x2,44 м, в том числе 45 — автоматического действия (поплавковых). На рис. 21 показаны профили глухой и водосливной частей плотины Бхатгхар.

Бутовая кладка в плотине и облицовка граней правильными рядами выполнялись вручную на известковом растворе, для которого использовалась гидравлическая известь хорошего качества с добавкой песка.

После осмотра плотины был проведен расчетно-теоретический анализ, который показал, что при полном противодавлении и расчетном сейсме в ее сечениях могут возникнуть растягивающие напряжения до 0,62 МПа, которые способны привести плотину к аварии.

Расчеты показали, что устройство в основании плотины галереи могло снизить противодавление только на 20%, причем растягивающие напряжения в кладке оставались бы выше допустимых. В проекте усиления плотины были рассмотрены три

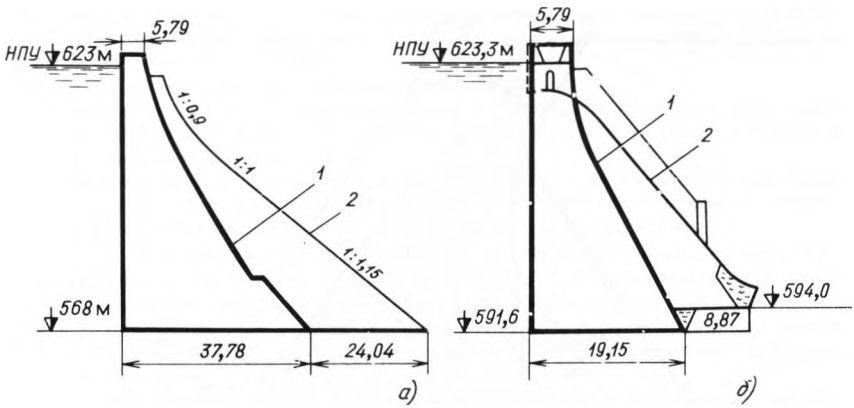


Рис. 21. Плотина Бхатгхар:

а — сечение глухой части; *б* — сечение водосливной части; *1* — низовая грань старой плотины; *2* — низовая грань усиленного профиля

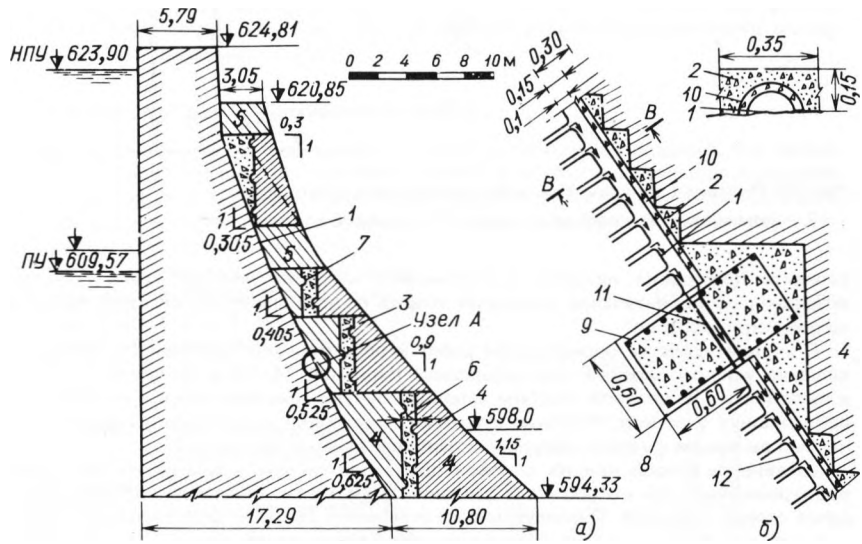


Рис. 22. Усиление плотины Бхатгхар:

а — профиль усиленной плотины; *б* — узел *А*; *1* — контакт между старой и новой кладкой; 2 — бетон; *3* — полость для омоноличивания; *4* — кладка, выполняемая независимо от уровня воды геред плотиной; 5 — кладка, выполняемая после подъема воды выше уровня НПУ, *6* — низовая грань после усиления; 7— выступ в кладке; *8* — выемка для шпонки; *9* — арматура; *10* — полукруглая дренажная трубка; *11—12* — выходы воды

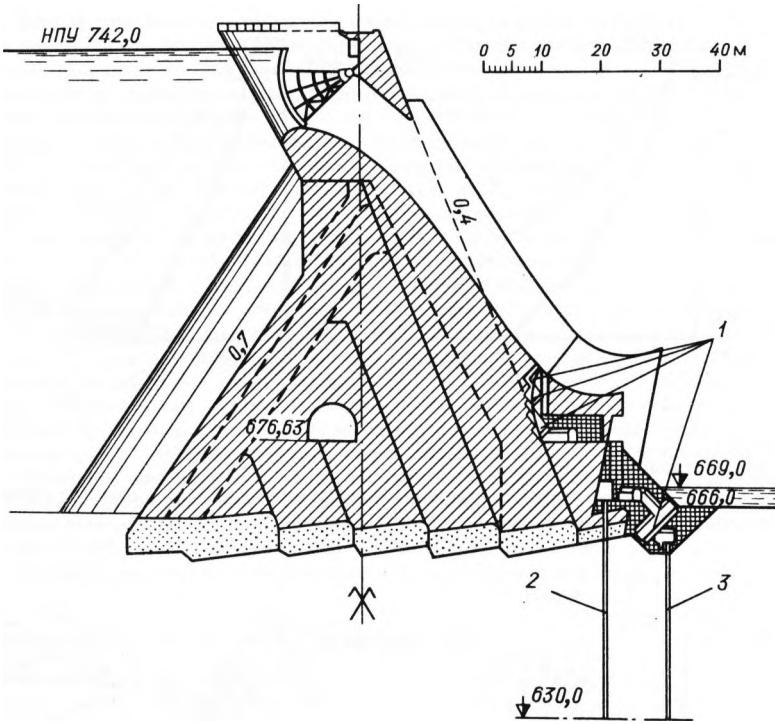


Рис. 23. Плотина Гранваль. Усиление центральных контрфорсов:
1 — домкраты; *2* — верховой отвес; *3* — низовой отвес

варианта: анкеровка плотины к основанию; нагрузка низовой грани грунтом; возведение дополнительной каменной кладки по всей длине плотины или пристройка в ней контрфорсов.

С учетом удобства производства работ и простоты эксплуатации было принято решение усилить плотину контрфорсами толщиной 16—18 м на глухих участках и выполнить с ее низовой стороны дополнительную каменную кладку по всей длине водосливных участков. Расчет напряженного состояния усиленного профиля плотины был выполнен с учетом следующих наиболее важных положений:

соединение старой кладки с новой производится при таком расчетном уровне водохранилища, при котором все давление воды может безопасно восприниматься одной старой плотиной. Последующие же изменения давления будут восприниматься совместно всей составной конструкцией усиленной плотины;

противодавление вдоль подошвы плотины изменяется линейно от полного напора под верховой гранью до нуля — под низовой;

на поверхности контакта старой и новой кладки, где предусматривался дренаж, допускается уменьшение противодавления на 50 %;

расчетное сейсмическое ускорение составляет 0,07 g;

на верховой грани плотины при всех условиях ее работы — максимальном уровне воды в водохранилище, землетрясении и других действующих силах — должно быть хотя бы минимальное сжимающее напряжение;

максимальное напряжение в кладке усиления не должно превышать 2,54 МПа.

При оценке устойчивости плотины сцепление принималось равным с =1,38 МПа, тангенс угла внутреннего трения tg φ = 0,65, минимальный коэффициент запаса на сдвиг 4,0.

На рис. 22 показан принятый вариант усиления плотины.

По принятому варианту каменная кладка воздвигалась ярусами в виде двух клиньев, разделенных между собой метровым вертикальным швом, который в последующем бетонировался.

Для надежности передачи усилий от старой кладки к новой на контакте были устроены горизонтальные железобетонные шпонки поперечным сечением 0,6 х 0,6 м или 0,8 х 0,8 м, расположенные на расстоянии от 4 до 6 м между осями.

На контакте между старой и новой кладкой устроена дренажная система. Профильтровавшая из старой кладки вода попадает в наклонные полукруглые дренажные трубы диаметром 200 мм, расположенные на расстоянии 3 м между осями.

В старой плотине не было контрольно-измерительной аппаратуры, за исключением термометров и прямых отвесов, установленных в шахте для измерения смещений и наклонов плотины.

Проведенные после ремонта измерения показали, что относительный наклон плотины при нагружении уменьшился. Это свидетельствует об эффективности выполненных укрепительных работ.

В новой кладке измерительные приборы не закладывали. Лишь в той части плотины, где размещалась дренажная галерея, производились измерения параметров фильтрации.

Другой пример усиления контрфорсов плотины приведен в [Д-37]. Из-за недостаточных размеров двух центральных контрфорсов в плотине Гранваль раскрылись наклонные штрабленые швы (рис. 23). Подробное описание выполненного ремонта этой плотины приводится в [10].

13. УСТРОЙСТВО ДЕФОРМАЦИОННЫХ швов

Некоторые плотины, в особенности старой постройки, возводились без деформационных швов. Это привело к возникновению в их теле трещин и других повреждений. В нескольких докладах приводятся описания работ по устройству деформационных швов в существующих бетонных плотинах. Наиболее подробно этот процесс описан для плотины Фонтана [Д-1] (США), где он использовался для создания широкого деформационного шва в гравитационной плотине (рис. 24), о которой уже говорилось выше (см. с. 31).

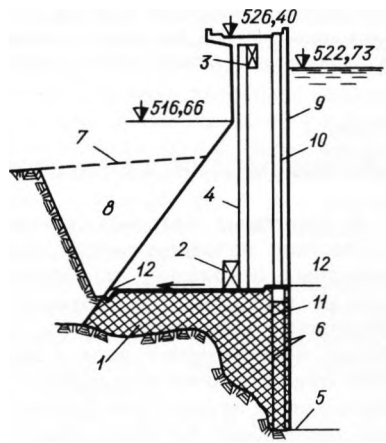


Рис. 24. Секция плотины Фонтана после устройства в ней деформационного шва: *1* — скальное основание; *2* — дренажная галерея; *3* — инспекционная галерея; 4 — инспекционная шахта; *5* — подошва плотины; *6* — медные шпонки; *7* — уровень обратной засыпки; *8* — удаляемый грунт; *9* — гидроизоляция на верховой грани; *10* — гидроизоляция в скважинах диаметром 0,8 м; *11* — контакт гидроизоляций с основными шпонками; *12* — низ прорези

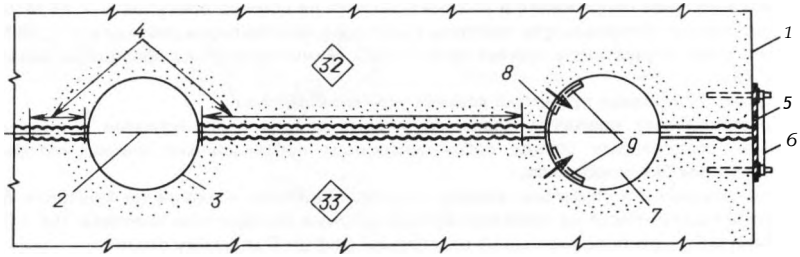


Рис. 25. План прорези в плотине Фонтана. Гидроизоляция прорези:

1 — верховая грань плотины; *2* — деформационный шов; *3* — смотровая шахта диаметром 0,9 м; *4* — прорезь; *5* — шпонка — транспортерная лента; *6* — стальная защитная пластина; *7* — шахта диаметром 900 мм; *8* — транспортерная лента; *9* — металлические пластины, прижимаемые к стенкам шпонки анкерами; *32*, *33* — номера секций плотины

Устройство шва на глубину 30 м между прямолинейным и криволинейным участками плотины было вызвано необходимостью улучшения неблагоприятного напряженного состояния сооружения, вызываемого интенсивной инсоляцией низовой грани плотины, значительной в жаркие месяцы года.

Для создания деформационного шва в плотине предстояло сделать в ней вертикальную прорезь по всей ее ширине на глубину 30 м и установить в этой прорези противофильтрационные шпонки.

Работы по устройству прорези было решено выполнять путем бурения с гребня плотины вертикальных скважин диаметром 127 мм и шагом 114 мм (рис. 25). При этом скважины несколько перекрывали друг друга, оставляя прорезь переменной ширины, составляющей на узких участках 76 мм. Для контроля использовались специально пробуренная недалеко от верховой грани вертикальная шахта диаметром 900 мм, а также существующая смотровая шахта того же диаметра.

Оригинально были сделаны и противофильтрационные шпонки в прорези (см. рис. 25). Одна из шпонок — первичная — монтировалась на верховой грани. Вторичная гидроизоляционная шпонка устраивалась в специально пробуренной шахте диаметром 900 мм. Для шпонок использовалась транспортерная лента, прижимаемая к стенке шахты металлическими пластинками на анкерах.

Глава *4*

АВАРИИ ПЛОТИН ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В грунтовых плотинах серьезные повреждения образуются чаще всего вследствие непредвиденного заранее неблагоприятного поведения неоднородных оснований, ослабленных действием механической или химической суффозии; в результате этих проявлений в толще оснований образуются каверны, трещины, сосредоточенные пути фильтрации, приводящие к снижению и даже к потере их несущей способности. В основаниях под действием веса воздвигаемой плотины, гидростатического давления на нее и на чашу водохранилища, а также действия напорной фильтрации происходят местные просадки, трещины, смещения скальных мас-

сивов, отражающиеся на состоянии плотины. Не меньшее значение имеют и аналогичные процессы, протекающие в теле грунтовых плотин. Обычно они возникают при неправильном выборе материала сооружения (в особенности — водоупорного элемента: ядра, экрана и т.п.), при некачественном выполнении строительных работ, плохом уплотнении грунта, которые приводят к неравномерным осадкам в теле плотины. Вредно сказывается, например, промораживание отдельных слоев насыпей в процессе их возведения, пересыхание укладываемых грунтов, препятствующее их уплотнению.

Существенное влияние оказывают различные неучтенные проектом внешние воздействия: размывы откосов волнами, паводковыми водами, переливающимися через гребень ливневыми дождями, а также повреждения при сейсмических воздействиях, к которым грунтовые плотины гораздо более чувствительны, чем бетонные. Конкретные проявления разрушений, вызываемых этими и другими причинами, могут быть самыми разнообразными. Это и полное разрушение сооружения, оползание его откосов, образование провальных воронок, местные повреждения отдельных элементов и многие другие. Ниже рассматриваются наиболее характерные случаи повреждений, описанные в ряде докладов, представленных на Конгрессе.

14. ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В ТЕЛЕ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН

Трещинообразование — наиболее распространенный вид повреждения грунтовых плотин, приводящий иногда даже к их разрушению. В докладах приводятся описания нескольких случаев раскрытия трещин, иногда значительной протяженности и ширины, которые происходили по различным причинам.

Неравномерная осадка является одной из наиболее распространенных причин, вызывающих появление в плотинах трещин.

В [Д-36] описаны трещины, появившиеся в плотине Чарвакской ГЭС высотой 168 м (рис. 26). Во время строительства этой плотины из каменной наброски с центральным суглинистым ядром и гравелисто-песчаными переходными зонами при высоте насыпи, достигшей 130 м, у контакта низовой упорной призмы с переходным слоем образовалась продольная вертикальная трещина глубиной до 6 м, протяженностью 450 м с раскрытием до 18 см. Через месяц в суглинистом ядре над левобережным переломом поверхности основания образовалась поперечная трещина глубиной до 4 м с раскрытием 2—3 см. Обе трещины были заделаны: продольная — тонкозернистым песком, поперечная — инъекцией глинистого раствора.

Причиной образования продольной трещины явились неравномерные объемные деформации. — осадки и горизонтальные смещения низовой призмы; поперечная трещина в ядре была вызвана его смещением по направлению к руслу на переломе склона ущелья. В процессе последующей эксплуатации эти трещины никак не проявлялись.

В [Д-37] описано образование трещин в плотине Жифомон (Франция) высотой 22 м, отсыпанной из малопроницаемых

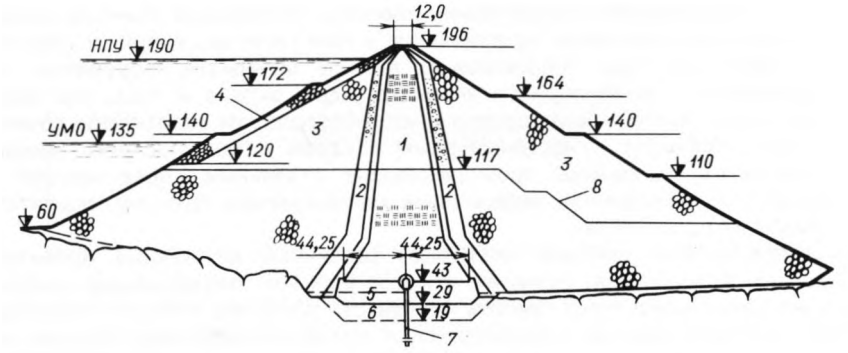


Рис. 26. Чарвакская плотина. Поперечный разрез:

1 — суглинистое ядро; *2* — песчано-гравийные переходные зоны; *3* — каменная наброска; *4* — защитная каменная наброска; *5* — бетонная пробка с галереей; *6* — площадная цементация; 7 — цементационная завеса; *8* — контур первой очереди насыпи (по проекту)

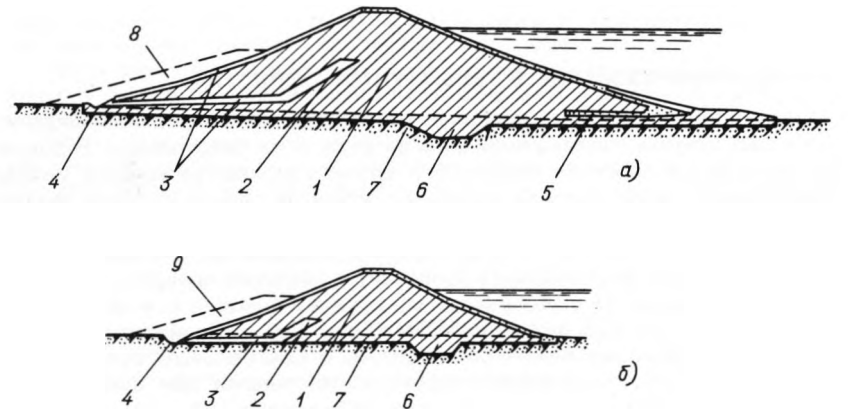


Рис. 27. Плотине Жифомон. Типовые поперечные сечения:

а — сечение 169 (высота 29 м); *б* — сечение 179 (высота 11 м); *1* — глинистая насыпь; *2* — трехслойный наклонный фильтр; *3* — дренаж низового откоса; *4* — дренажная канава; 5 — дренаж верхового откоса; *6* — зуб; 7 — естественная поверхность основания и дно котлована; *8* и *9* — пригрузка

глинистых материалов (рис. 27), весьма своеобразного очертания в плане (рис. 28), законченной в 1975 г.

Отсыпка плотины осложнялась комковатостью глины и трудностью достижения однородности и необходимой плотности насыпи. Это привело к ее большим осадкам, достигавшим 60 см, тогда как предполагалось,

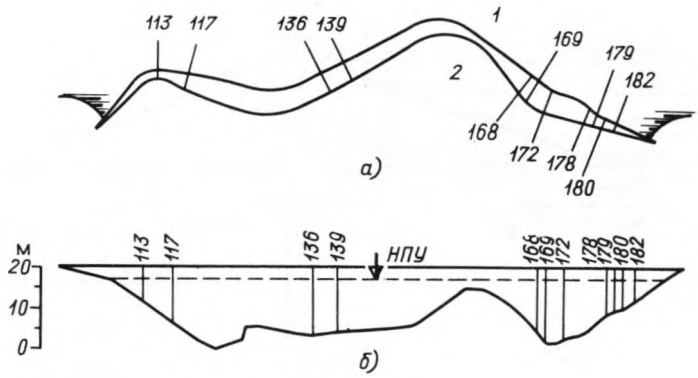


Рис. 28. Гидроузел Жифомон:

а — план; *б* — продольный разрез плотины; *1* — водохранилище; *2* — городок Жифомон; *113—182* — номера поперечных сечений

что при максимальной высоте насыпи 19 м они не превысят 20 см. Следствием таких осадок было появление в плотине продольных трещин, параллельных гребню. Пригрузкой низовой грани было достигнуто удовлетворительное состояние плотины.

Отмечено, что плотина была оборудована контрольно-измерительной аппаратурой, результаты наблюдения за деформациями и поровым давлением использовались при установлении причин повреждения и необходимости ремонта сооружения.

На плотине Зильфенштейн (рис. 29) высотой 41 м, построенной в 1954—1958 гг. из грунтовых материалов в Баварских Альпах (ФРГ) [Д-8], имело место возникновение значительных трещин в ядре плотины в результате неравномерной осадки и, возможно, образования свода, с выносом из-под него мелкозернистых частиц грунта.

Каньон образован скалистыми бортами, в основном, сложенными крепкими доломитами. Справа крутой склон почти вертикально опускается на глубину около 100 м. Крепкие доломиты на дне каньона покрыты аллювием неоднородной структуры, состоящим из слоев гравия и песка, с включениями ила, со средним коэффициентом фильтрации $1 \cdot 10^{-3}$ м/с. На уровне верха аллювия правый вертикальный борт прерывается горизонтальной площадкой шириной около 25 м и далее вновь поднимается вертикально.

Плотина возведена непосредственно на аллювии. Особенности конфигурации основания были учтены при разработке проекта плотины. Для повышения ее трещиностойкости в ядро укладывался грунтоцемент подобранного состава с влажностью, несколько большей, чем оптимальная; благодаря этому оно стало более водонепроницаемым, хотя поровое давление в нем и возрастало. У правого борта выполнен бетонный пилястр, заходящий в ядро. На горизонтальном уступе правобережного примыкания устроена подушка из пластичного суглинка; в состав грунто-

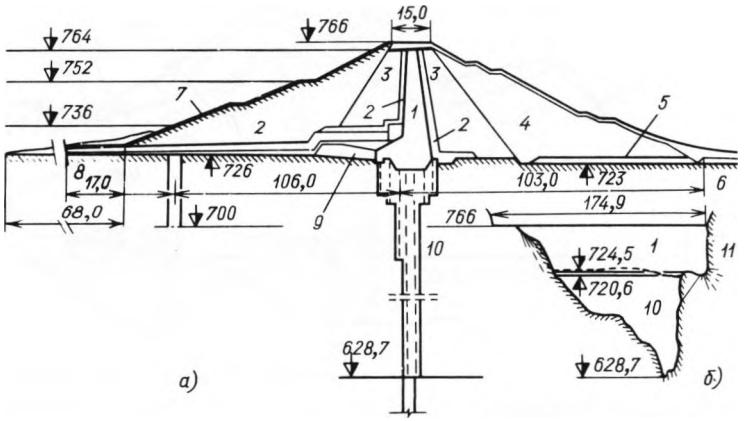


Рис. 29. Поперечный разрез по плотине Зильфенштейн:

а — поперечное сечение; *б* — продольное сечение; *1* — ядро из грунтоцемента; *2* — слоистые фильтры из гравия и песка; *3, 4* — призмы из карьерного гравия; 5 — слой крупного гравия; *6* — слоистый известняк; 7— крепление откоса камнем вручную; *8* — асфальтобетон; *9* — дрена; *10* — цементационная завеса; *11* — зона основания, укрепленная цементацией

цемента, который укладывался на подушку, на нижних отметках добавляли 2 % бентонита, выше — 1 % бентонита.

Под ядром устроена цементационная завеса до коренных пород. По обе стороны ядра отсыпаны фильтры из моренного гравия и гравийные упорные призмы. Для удаления воды из низовой призмы и отвода фильтрационной воды из-под плотины выполнена каменная наброска из известняка с подстилающим фильтром. Для удлинения пути фильтрации под верховой призмой плотины уложен полупроницаемый материал, соединяющий ядро с водонепроницаемым асфальтобетонным слоем на верховом откосе перемычки.

Организовано постоянное наблюдение за поведением ядра и цементационной завесы, для чего установлено 30 датчиков давления воды и шесть телескопических марок (труб) для измерения уровня воды в ядре. Проводилось также измерение расхода фильтрации через плотину. На рис. 30 показаны эпюры осадок ядра.

После завершения возведения плотины все еще происходило заметное уплотнение ядра, причем в центре сечения *А— А* больше, чем в центре прибрежной части (сечения *Б—Б* и *В—В)*. Следовательно, материал ядра с 2% бентонита дает большую осадку, чем материал с 1 % бентонита. Пластичная подушка оказалась малоэффективной. Из-за того что ядро очень узкое в средней и верхней частях и зажато плотными упорными призмами, в нем, возможно, образовался грунтовый свод (рис. 31), а также трещины. На участке плотины в зоне правобережного уступа скалы, вероятно, образовались не только горизонтальные, но и наклонные трещины.

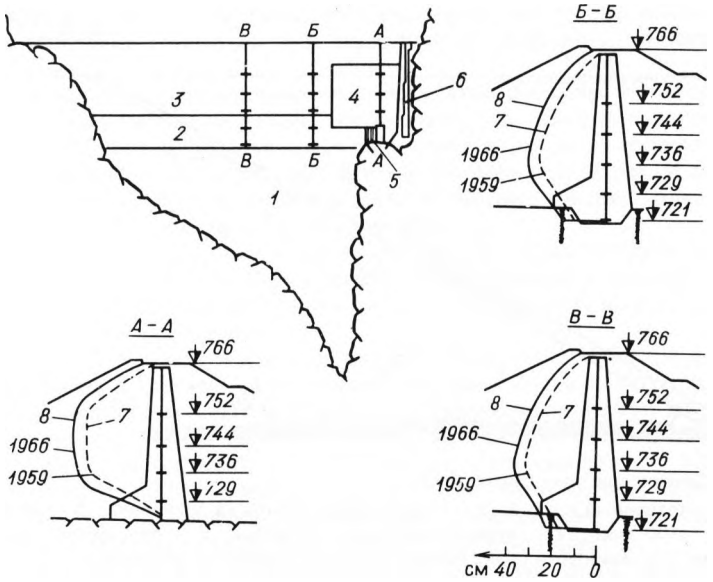


Рис. 30. Продольный разрез по оси плотины Зильфенштейн и поперечные сечения ядра:

1 — цементационная завеса; 2 — грунтоцемент; 3 — грунтоцемент с добавкой 1 % бентонита; 4 — грунтоцемент с 2% бентонита; 5 — пластичная подушка; 6 — бетонный устой; 7 — эпюры осадок ядра в сечениях А—А, Б—Б, В—В замеренных в 1959 г.; 8 — то же, в 1960 г.

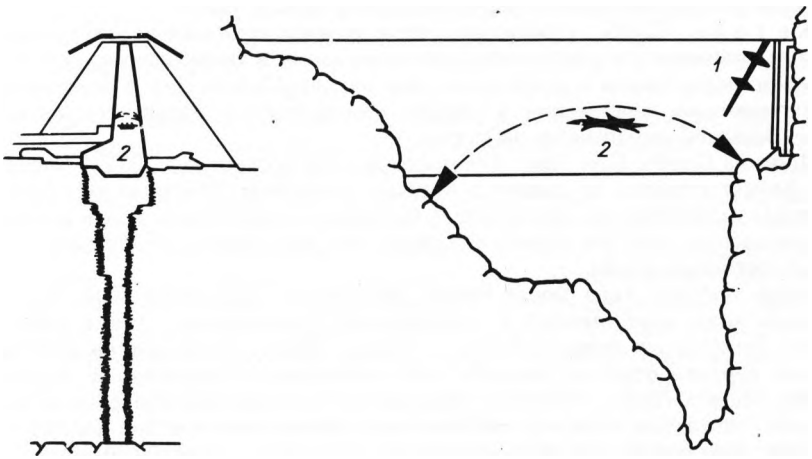


Рис. 31. Плотина Зильфенштейн. Вероятное положение трещин в ядре:

1 — наклонные трещины; 2 — горизонтальные трещины

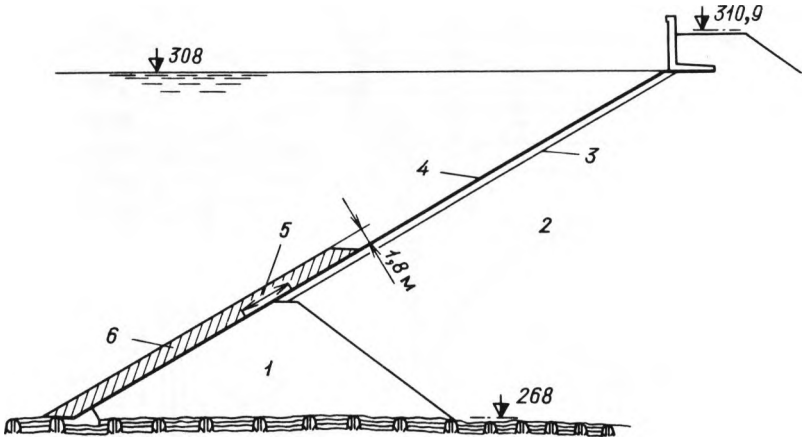


Рис. 32. Сечение плотины Скотте Пик:

1 — уплотненный гравий; *2* — уплотненная насыпь из аргиллита; *3* — дробленый доломит (100 мм); *4* — асфальтобетонное покрытие; 5 — положение трещин в покрытии; *6* — защитный слой гравия (по проекту ремонта плотины)

Измерения показали, что расход фильтрации через ядро увеличивается с течением времени, однако вода остается прозрачной. Хотя состояние плотины не вызывало опасений, было решено выполнить цементацию. Цементационные работы проводились при наполненном водохранилище. Последующие систематические наблюдения за уровнем воды по трубам телескопических марок и измерения фильтрационных расходов показывают отсутствие каких-либо нарушений целостности ядра.

А в т о р ы [Д-15] утверждают, что в экранах всех каменнонабросных плотин развиваются растягивающие напряжения в направлении, приблизительно нормальном к основанию. На плотине Скотте Пик в Австралии растягивающие напряжения в экране увеличились в результате необычайно большой деформации наброски.

Плотина Скотте Пик (рис. 32) высотой 43 м построена в 1972 г. Верховой банкет отсыпан из гравия и хорошо уплотнен. Основная часть тела плотины выполнена из аргиллита — материала, значительно более деформирующегося, чем уплотненный гравий. На верховой грани уложен асфальтобетонный экран.

Через полтора года после начала наполнения водохранилища, когда уровень воды приближался к нормальному подпорному, резко увеличилась фильтрация через плотину — с 5 до 100 л/с. В экране на участке вблизи верхней отметки банкета были обнаружены трещины. В течение последующего года с помощью водолазов были выполнены ремонтные работы; открытые трещины заполнялись щебнем, песком или мешками с цементным раствором, все поверхностные дефекты заделывались рулонным бутилкаучуком. После выполнения этих работ фильтрация через плотину начала снижаться, но вскоре вновь увеличилась. Таким образом,

возникла надобность в радикальных мероприятиях по обеспечению водонепроницаемости плотины. Эти мероприятия подробно описаны ниже, в гл. 5.

Специалисты, анализировавшие работу этой плотины и выполнявшие капитальные ремонтные работы, ретроспективно пришли к заключению, что было бы целесообразней сразу выполнить экран не из асфальтобетона, а из железобетона, хотя это потребовало бы больших затрат. И в железобетонном экране можно было ожидать появления трещин, однако стоимость ремонта была бы значительно меньше.

Фильтрационные повреждения. Большая часть повреждений плотин вызывается нарушением фильтрационного режима в теле и основании плотины. Фильтрационный поток даже с небольшой мутностью должен вызывать опасения.

В [Д-29] приведены характерные статистические данные. В Южной Корее построено на скальном основании очень много ирригационных плотин из грунтовых материалов, в основном высотой до 20 м и в нескольких случаях до 50 м. Во многих из этих плотин была обнаружена значительная фильтрация: в 27% плотин, построенных до 1970 г., и в 17% — после 1970 г. Уменьшение числа плотин, в которых обнаружена недопустимая фильтрация, объясняется, по-видимому, улучшением в последние годы подготовки оснований при их строительстве.

Во многих случаях обнаруживали интенсивную фильтрацию и через основание плотины, происходившую вследствие недостаточно полного удаления поврежденных пород при отрывке котлована. Трещины в основании, образовавшиеся при взрывах скальных пород в котловане, также становятся иногда причиной сосредоточенной фильтрации воды через основание.

Береговые примыкания плотин чаще всего сложены твердыми скальными породами, но иногда в них имеются и выветрившиеся слабые породы и осыпи. Оставленные в примыканиях слабые породы и трещины становились причиной значительной обходной фильтрации воды.

В [Д-3] (ЮАР) указывается, что результаты измерений параметров фильтрационного потока не всегда позволяют правильно судить о его действительной опасности. Так, например, земляная плотина Могото была на грани разрушения, хотя внешне ничто на это не указывало — наблюдалась лишь едва заметная струйка фильтрующейся через плотину воды. Сравнительно небольшая наблюденная фильтрация в основании бетонной плотины Рооде Эльсберг вызвала размыв скалы: потребовалось проведение больших цементационных работ.

Приведенные примеры показывают, что сосредоточенные фильтрационные потоки представляют опасность для существования грунтовых плотин. Во всех сомнительных случаях должны проводиться тщательные регулярные и всесторонние наблюдения за процессом фильтрации.

Плотину Короново (рис. 33, 34) [Д-38], (ПНР) можно привести в подтверждение этому. По внешним данным она была во вполне благополучном состоянии: кривая депрессии проходила намного ниже ее нормального расчетного положения, замеренный фильтрационный расход был незначительным. Впоследствии во время эксплуатации плоти-

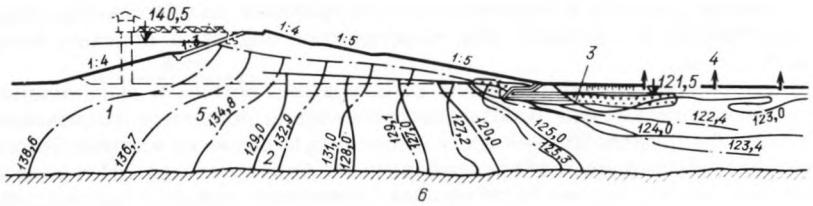


Рис. 33. Поперечное сечение плотины Короново:

1 — кривая депрессии и гидромеханическая сетка течения (получены методом ЭГДА); *2* - то же, наблюдаемые в натуре; *3* - зона рыхлого грунта; *4* — суффозионные грунты; 5 — среднезернистый песок; б—глина

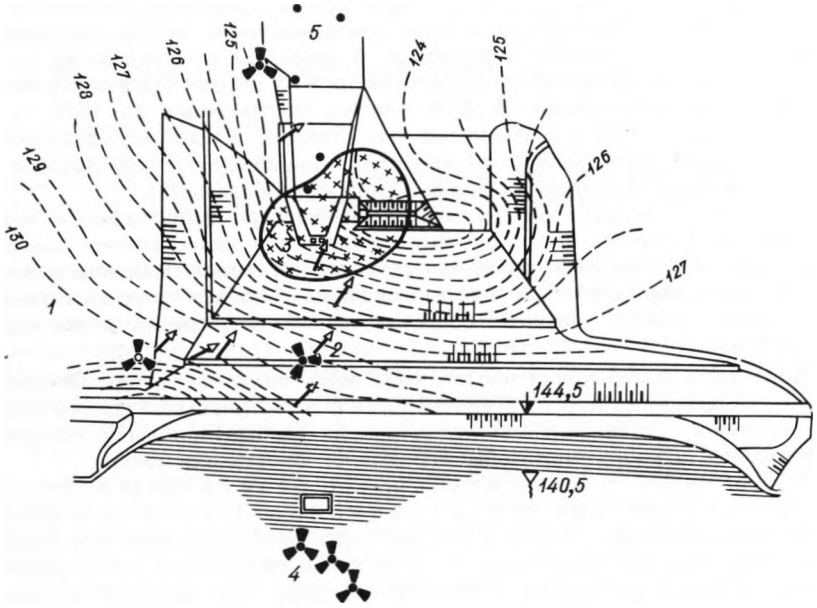


Рис. 34. Плотина Короново. План:

1 — гидроизогипсы; *2* — направления фильтрационных потоков; зона рыхлого грунта; *4* — места инъектирования радиоактивных изотопов; 5 — зоны суффозионных грунтов

ны был обнаружен большой вынос грунта из основания в водобойный колодец. Лишь после дополнительных геологических изысканий и установки серии новых пьезометров была выяснена действительная гидродинамическая картина движения фильтрационного потока в плотине и основании. Оказалось, что главное направление потока резко отклоняется от предполагавшегося нормального к оси плотины и ориентировано к оси

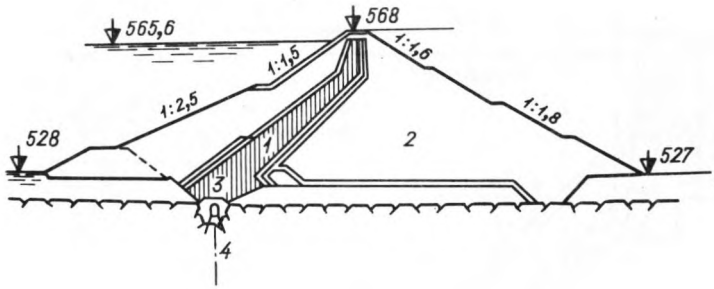


Рис. 35. Поперечное сечение плотины Хринова:

1 — водонепроницаемое ядро; *2* — упорная призма; *3* — зуб и цементационная потерна; *4* — цементационная завеса

водобойного колодца, у которого и была обнаружена большая зона рыхлого грунта.

Дополнительные исследования, выполненные с применением радиоактивных изотопов, а также измерения температуры воды и скоростей течения, показали, что в основании имеются узкие полости-трубки, заполненные проницаемым грунтом. По ним и происходила фильтрация основного потока в каверны и подземные полости, что не могли уловить имевшиеся в то время измерительные приборы. На плотине были выполнены цементационные работы, водобойный колодец был перенесен ниже по течению, укреплена низовая грань.

Авторы доклада считают, однако, что только небольшие грунтовые плотины могут сооружаться без противофильтрационных элементов, причем их дренажные конструкции должны быть рассчитаны со значительными запасами.

В [Д-21] (ЧССР) сообщается об одном случае фильтрации через тело плотины, вызвавшем ее повреждение.

Каменнонабросная плотина Хринова с наклонным ядром имеет высоту 42 м (рис. 35). Строительство закончено в 1965 г.

Упорная призма плотины отсыпана в нижней части до отметки 558 м из выветрившегося гнейса, выше — из более крепких гнейсов. Ядро выполнено из глинистых грунтов, под ним — цементационная галерея, из которой устроена цементационная завеса.

В середине 1965 г. началось заполнение водохранилища. В феврале 1966 г. при уровне воды на отметке 563 м под водосливным лотком была зарегистрирована фильтрация с расходом 4 л/с, увеличившимся за два месяца до 100 л/с. Уровень воды был снижен до отметки 550 м и фильтрация уменьшилась до 1 л/с. При повторном поднятии уровня воды выше отметки 562,5 м фильтрация вновь сильно увеличилась, вода появилась даже в контрольной скважине (рис. 36), которая до тех пор была сухой. Вскоре расход под водосливным лотком достиг 180 л/с. После снижения уровня воды ниже отметки 562,5 м фильтрационный расход вновь уменьшился до 1 л/с.

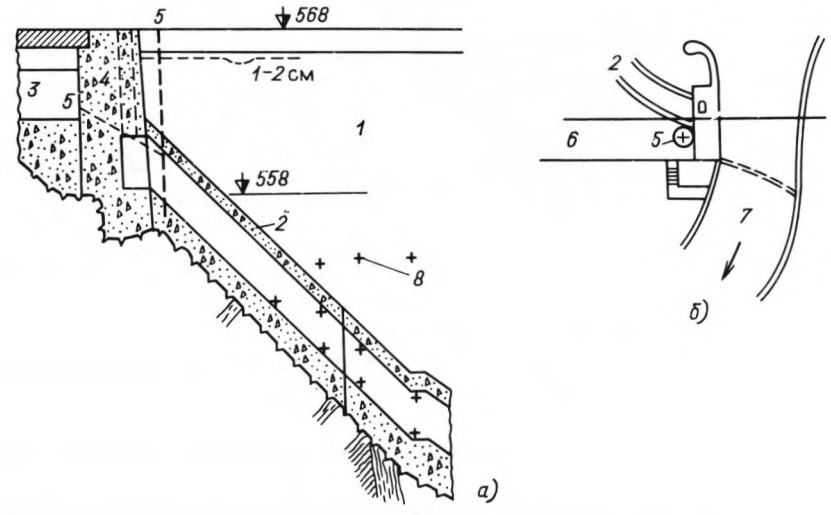


Рис. 36. Плотина Хринова:

а — продольное сечение водослива и цементационной потерны у гребня левобережной части плотины; *б* — план; *1* — плотина; *2* — цементационная галерея; *3* — затвор на водосливе; *4* — стенка водослива; *5* — смотровые отверстия; *6* — гребень плотины; *7* — водосливной лоток; *8* — пьезометрические скважины

Изучение проектных материалов и наблюдения привели к заключению, что повышенная фильтрация проходит через широкий — шириной 6—8 мм температурно-осадочный шов между цементационной потерной и водосливом выше резиновой шпонки, которая не доходила до водонепроницаемого ядра (рис. 37). Фильтрация через этот шов над шпонкой привела к образованию суффозионной каверны.

Другим существенным дефектом было то, что фильтр плохо сопрягался с более жесткой упорной призмой, причем материал фильтра проникал в поры материала упорной призмы. Кроме того, были обнаружены трещины в глинистом экране. Автор доклада считает, что в экране с крутым наклоном следует опасаться возникновения трещин от растягивающих напряжений; конструкция экрана должна быть запроектирована таким образом, чтобы эти трещины не возникали.

В [Д-27] описаны образование трещин и фильтрация через плотину, вызванные нарушением технологии возведения плотины (Аргентина). Каменнонабросная плотина с бетонным ядром ЛосСаусес строительной высотой 65 м построена в Аргентине в 1925—1931 гг. Плотина возведена на сорокаметровой толще аллювия, прикрывающего сильно трещиноватые с тектоническими разломами граниты и порфиры. Вертикальное бетонное ядро толщиной 2,8 м, пронизывающее толщу аллювия и немного заглубленное в скальную породу, имело вертикальные цилиндрические пустоты диаметром 1,2 м, с расстоянием между их осями 1,6 м.

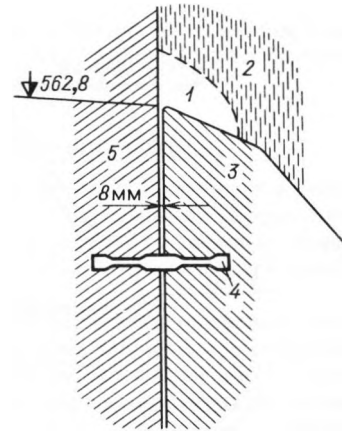


Рис. 37. Каверна над резиновой шпонкой в зоне примыкания цементационной галереи к устою водослива:

1 — каверна; *2* — ядро плотины; *3* — бетон цементационной галереи; *4* — резиновая шпонка; 5 — бетон устоя водослива

Через 10 м по высоте были устроены переходные галереи. Внизу ядра сделана дренажная галерея с выходом в нижний бьеф. На выходе установлен водомер.

Наполнение водохранилища началось до окончания возведения плотины, в результате чего бетонное ядро прогнулось и в нем появились трещины, через которые началась фильтрация воды. Эти трещины были нежелательны из-за больших потерь воды, но опасений за устойчивость плотины они не вызывали. Для уменьшения фильтрации в трещины забивали деревянные клинья и укладывали брезент, пропитанный битумом. После окончания возведения плотины при подъеме воды в водохранилище появились новые трещины, которые заделывали тем же примитивным способом.

Поведение плотины, несмотря на значительную фильтрацию, считалось приемлемым до 1968 г., когда фильтрационный расход через нее достиг 60—70 л/с. Было обследовано состояние верхней половины бетонного ядра (нижняя его половина была недоступна для осмотра). В 1977 г. фильтрация через плотину увеличилась до 238 л/с, максимальный прогиб гребня ядра увеличился до 0,5 м, что вызвало тревогу. С учетом большой сейсмичности района было решено принять немедленные меры по усилению низовой призмы дополнительной каменной наброской. Были законопачены все трещины в верхней части ядра, однако фильтрация уменьшилась не намного. Принято решение заполнить цилиндрические пустоты в ядре тощим бетоном и провести цементацию ядра.

Повреждения из-за неправильной оценки свойств основания. При очень сложных геологических и гидрогеологических условиях залегания грунтов в основании плотины предварительные изыскания часто не могут дать достаточно точных данных о его строении и характерных свойствах.

В [Д-42] изложен показательный случай недостаточно полного учета при проектировании характера и состояния пород основания, который привел к большим повреждениям плотины и к значительным дополнительным затратам на приведение плотины в пригодное для эксплуатации состояние.

Каменнонабросная плотина Куга с железобетонным экраном высотой 54 м по первоначальному проекту (рис. 38) была возведена в Италии в 1956—1960 гг. на основании, сложенном разнородными вулканическими трещиноватыми породами. Плотина опиралась на четыре тектонических

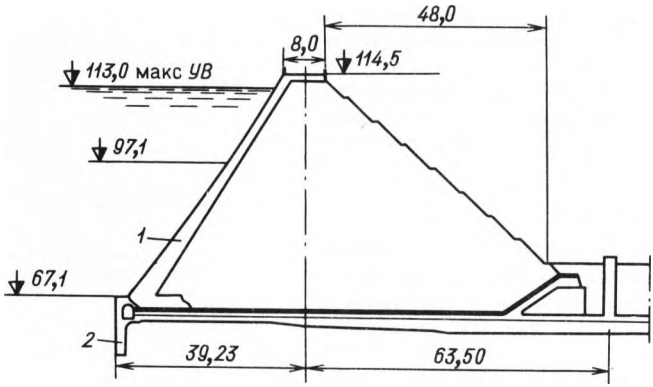


Рис. 38. Плотина Куга. Поперечное сечение:

1 — железобетонный экран; *2* — бетонный зуб

блока, разделенных тремя продольными разломами (четвертый, поперечный разлом был невдалеке от плотины в нижнем бьефе).

Отсыпалась плотина из тех же вулканических пород с фракциями крупностью от 10 до 60 см. На верховой грани, имеющей переменный уклон от 1 :0,65 до 1 :0,75, выполнена на цементном растворе каменная подэкранная кладка толщиной от 1 до 2,8 м, на которую уложен железобетонный экран толщиной от 30 до 50 см с вертикальными швами через 12 м и одним горизонтальным швом немного выше середины высоты плотины. На верху экрана — у гребня плотины — устроен парапет, внизу экран опирается на бетонный зуб, заглубленный на 6—12 м. В верхней части зуба находится дренажная (она же смотровая) галерея. Под зубом — цементационная завеса глубиной до 50 м.

Во время возведения и после его окончания происходили просадки плотины и возникали большие трещины, которые не позволили хотя бы частично наполнить водохранилище. Трещины повредили гребень плотины, экран, зуб и дренажную галерею. По существу плотина оказалась непригодной к эксплуатации. Были проведены новые изыскания и исследования, выполнены бурение многочисленных скважин и проходка шурфов, шахт и галерей для осмотра и отбора образцов грунтов из основания плотины, что позволило уточнить состояние основания плотины и характер его повреждений.

Разные осадки различных частей плотины не только вызвали в ней образование больших трещин, но и нарушили контакт экрана с подэкранной кладкой, произошли также значительные осадки гребня и повреждения экрана в зоне горизонтального шва. Нижняя часть экрана, передав дополнительную нагрузку на зуб, вызвала разрушение дренажной галереи. Образовались трещины на водосливе, в водосбросном и деривационном туннелях. Нижняя кромка экрана местами оторвалась от зуба. Возникло предположение, что повторная цементация, которая проводилась для укрепления грунтов основания, сама могла вызывать смещение отдельных зон пород в основании.

После выполнения больших работ по возведению на верховой грану новой насыпи с водонепроницаемым наклонным ядром (см. гл. 5) плоти на была приведена в удовлетворительное состояние.

15. ОБРАЗОВАНИЕ ПРОВАЛЬНЫХ ВОРОНОК И ОПОЛЗНЕЙ

Провальные воронки и оползни на плотинах часто образуются в результате суффозии грунта внутренних зон насыпи, вызываемой сосредоточенной фильтрацией, но бывает и результатом размыва наружных поверхностей плотины. Известны случаи перерастания воронок и оползней в прорывы, приводящие к разрушению плотин.

Повреждениям плотин при суффозии, вызванной несбалансированностью гранулометрического состава моренных и аллювиальных грунтов и неподготовленностью оснований, посвящен [Д-2] (США). За последние 20 лет на гребнях и откосах ряда плотин из грунтовых материалов образовались провальные воронки. Почти все они возникали в плотинах, отсыпанных из моренных, иногда из аллювиальных, грунтов с очень схожим гранулометрическим составом и характерным несоответствием частиц разной крупности. На рис. 39 показана типичная гранулометрическая кривая таких грунтов. При диаметре пограничной частицы 1 мм отношение диаметров крупных и мелких частиц равно 10,5, в. то время как для фильтра теоретически необходимо, чтобы это отношение было равно 4 или 5. Следовательно, объем мелких фракций оказался значительно больше объема пор между крупными частицами, которые как бы плавали между мелкими частицами. Несоответствие между крупными и мелкими фракциями свидетельствуют о наличии прерывистой гранулометрии в насыпи, что должно было учитываться в проекте.

Существенно также, что мелкозернистые фракции моренных грунтов непластичны или мало- и среднепластичны. Следовательно, эти грунты в отношении фильтрации были неустойчивыми, в случае появления даже незначительной фильтрации мельчайшие фракции вымываются из насыпи через трещины в основании и через фильтры, также выполненные из слишком крупных фракций. При этом объем вымытых мелких фракций иногда превышает объем пор между крупными фракциями. Все это приводит к тому, что внутренняя суффозия, начинаясь снизу, вызывает осадку, распространяющуюся кверху и завершающуюся образованием воронок на поверхности плотины.

В некоторых случаях воронки появлялись через несколько недель, а иногда через несколько лет после наполнения водохранилища. Полного

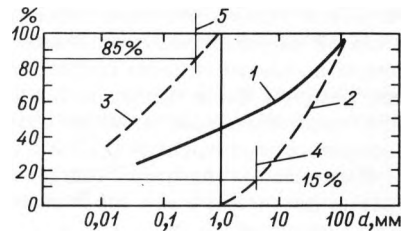


Рис. 39. Гранулометрическая кривая моренных грунтов:

1 — рыхлый грунт с широкой гранулометрией; *2* — гранулометрическая кривая крупнозернистой части грунта; *3* — то же, мелкозернистой части грунта; *4* — D_{15} = = 3,9 мм; *5* — D_{85} = 0,37 мм

разрушения плотин не происходило, хотя в ряде случаев возникали серьезные аварийные ситуации. Обычно повреждения успешно ликвидировали с помощью цементации; наблюдалось и повторное образование воронок.

Общее число плотин, получивших такие повреждения, относительно невелико.

Отмечается, что провальные воронки возникали при неблагоприятном сочетании, следующих условий: тонкое ядро, чаще всего вертикальное; низовой фильтр из крупнозернистого песка с гравием, с незначительным или полным отсутствием мелких песчаных фракций, крутые берега или очень неровное скальное основание, недостаточное уплотнение насыпи и быстрое заполнение водохранилища.

О повреждениях старой плотины из грунтовых материалов, просуществовавшей более 50 лет, являющихся следствием низкого расчетно-теоретического уровня проектирования, с одной стороны, и очень плохого качества производства строительных работ, с другой, обстоятельно освещено в [Д-13].

Плотина Могото (ЮАР) высотой 36,5 м и длиной по гребню 265 м (рис. 40) построена в 1923—1924 гг. Основание плотины — прочные скальные породы—кварциты и диабазы. Однако, как это было установлено лишь впоследствии, значительная часть основания была прикрыта конусом выноса сравнительно недавнего оползня самого разнообразного фракционного состава — от глинистых частиц до валунов размером 0,5—1,0 м с большими пустотами между ними.

Насыпь плотины, практически однородная, отсыпалась из глинистого материала. По продольной оси плотины в ее основании и под нижней частью насыпи устроен бетонный зуб, выше которого выполнено ядро из мятой глины. Верховая грань прикрыта каменными плитами, низовая грань — щебнем размером до 300 мм.

По мнению авторов доклада, все примененные материалы и их укладка в сооружение были на очень низком уровне.

Следует отметить, что на ход и качество строительства оказали большое влияние контролирующие финансовые органы, которых не удовлетворяли темпы возведения плотины. Они опасались, что ввиду недостатка воды не соберут ожидаемый урожай апельсинов. По их требованию руководство строительством было заменено. Новое руководство, по мнению докладчиков, стремилось лишь удовлетворить требования заказчика, не заботясь о качестве возведения плотины, что и привело в дальнейшем к печальным событиям.

На протяжении всего периода эксплуатации в плотине наблюдались большие деформации.

Первыми серьезными повреждениями были появившиеся в 1939 г. на обеих гранях плотины продольные трещины, параллельные гребню, в самой высокой части плотины. В это время осадка гребня плотины в самом высоком сечении составляла 0,75 м, т.е. 2 % высоты. Вдоль трещин при ремонте были прорыты траншеи, заполненные затем мятой глиной. Для восстановления отметки гребня на нем была сооружена стенка из сланцевых плит высотой 0,75 м и шириной 3 м.

Деформации плотины продолжались; к 1976 г. наибольшая осадка гребня достигали 2 м — 5,5 % высоты, смещение гребня в сторону нижнего бьефа достигло 75 см.

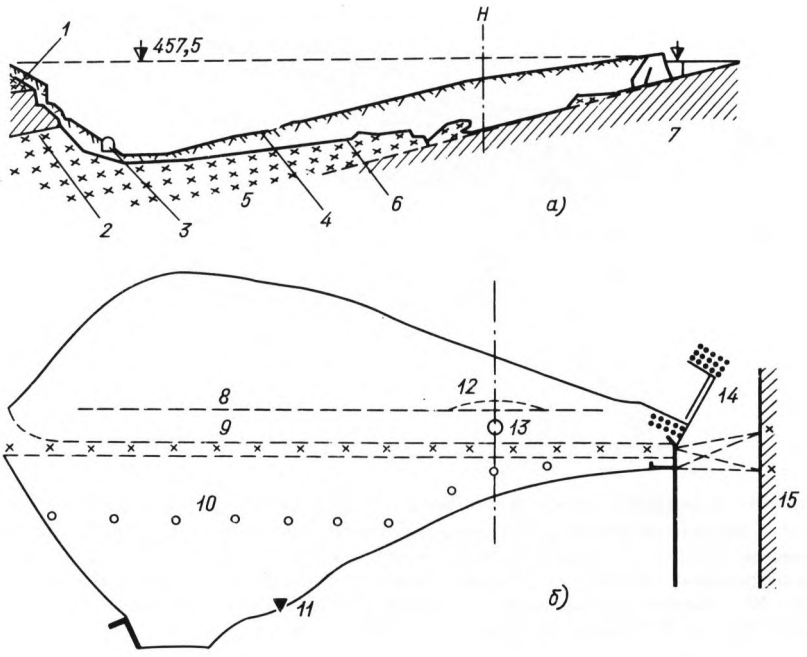


Рис. 40. Плотина Могото:

а — продольный разрез по оси плотины; *б* — план; *1* — лава и сланцы; *2* — кварциты; *3* — галерея; *4* — естественная поверхность основания; *5*— диабазы; *6* — поверхность скалы; *7* — кварциты; *8* — урез воды; *9* — марки; *10* — пьезометры; *11* — грифон; *12* — измененное положение уреза воды на откосе плотины; *13* — провальная воронка; *14* — водослив; *15* — стенка водослива

В 1976 г. в верхней части напорной грани, в сравнительно высокой части плотины (8 м), но как раз там, где толщина слоя оползневого материала под плотиной была наибольшей, образовалась провальная воронка эллиптической формы размером 2x3 м, глубиной 2 м и объемом 10 м^3. В это время уровень воды в водохранилище находился ниже воронки, благодаря чему удалось избежать тяжелых последствий. Сразу же было организовано бурение исследовательских скважин, которые показали, что в основании плотины имеются пустоты. Стали очевидными причины сосредоточенной фильтрации в направлении конуса оползня и выноса грунта плотины на низовую грань. На рис. 41 показан возможный механизм обрушения верхового откоса.

Заполнение провальной воронки глиной не приостановило деформации. Через полгода поверхность воронки спустилась еще на 1 м и сместилась вниз.

Для предотвращения дальнейших деформаций и прекращения выноса грунта была выполнена прежде всего инъекция раствора цемента с бенто-

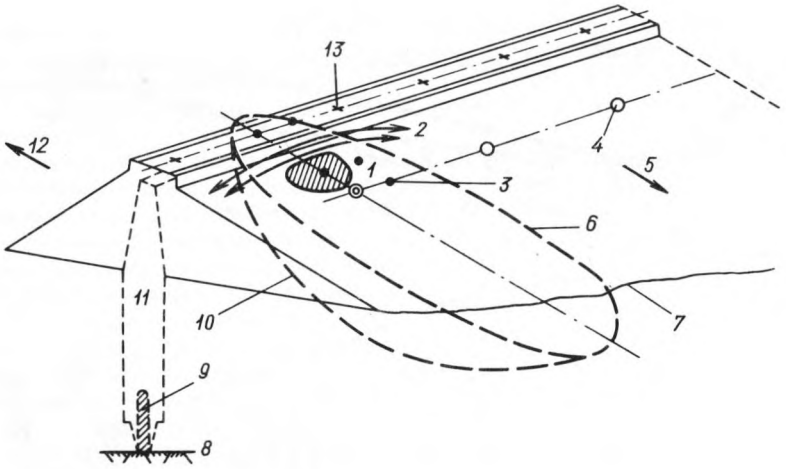


Рис. 41. Возможная схема разрушения откоса верховой грани плотины Могото: *1* — провальная воронка; *2* — свод, образовавшийся над воронкой; *3*— телескопические реперы; *4* — марки на поверхности откоса; 5 — верховая грань; *6* — границы разрушения грунта; *7* — подошва плотины; *8* — коренная порода; *9* — бетонный зуб; *10* — поверхность разрушения в толще плотины и в основании; *11* — глинистое ядро; *12* — нижний бьеф; *13* — марки на гребне плотины

нитом через две скважины, что принесло некоторый успех. Затем было выполнено бурение скважин по всему гребню плотины и инъектирование цементно-песчаного раствора. Описание основных ремонтных работ приводится в следующей главе.

В [Д-35] описаны характерные повреждения на плотинах из грунтовых материалов и их аварии на примере шести плотин, построенных в Индии; четыре из них были возведены около 100 лет тому назад и две — в 1975—1976 гг. Как на многих других индийских плотинах из грунтовых материалов, в рассматриваемых плотинах были обнаружены повреждения — трещины и провальные воронки, даже крупные оползни и прорывы, которые приводили обычно к авариям в течение первых двух-трех лет после заполнения водохранилища. Для плотин в Индии характерно образование оползней после обильных дождей, как на низовом откосе, так и на верховом — при пониженных уровнях воды. Образованию оползней способствовали трещины на поверхности насыпи, раскрывающиеся при пересыхании грунта и заполняемые в последующем дождевой водой.

Выводы из анализа аварий и повреждений плотин, описанных в [Д-35], сводятся к следующему:

однородные плотины из высокопластичной глины требуют неустанных наблюдений и значительного ремонта;

из-за недостаточно полного представления о консолидации насыпи при укладке глину обильно поливали, что приводило к возникновению

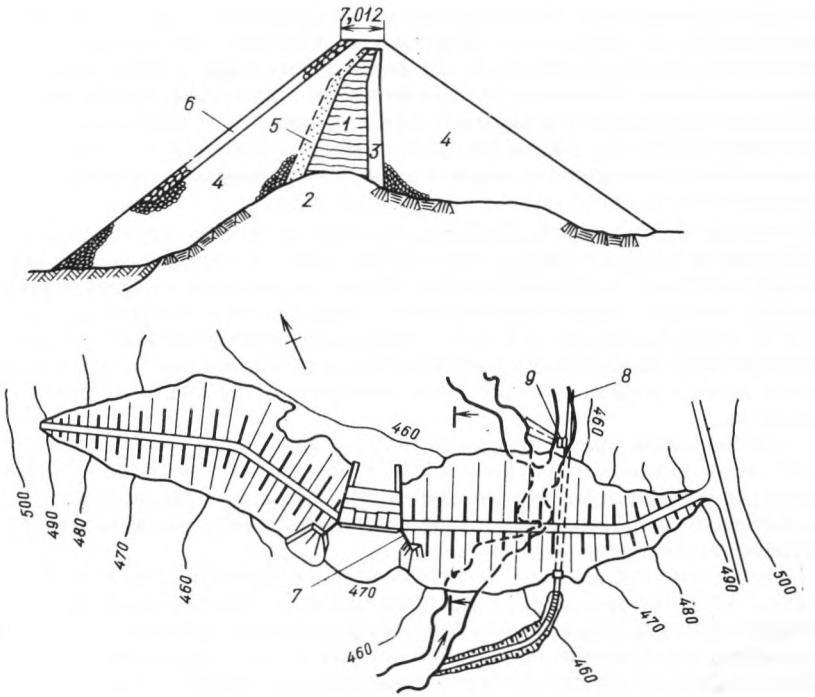


Рис. 42. Плотина Роуэллен. Поперечный разрез и план:

1 — ядро плотины; 2 — слой глины на контакте; *3* — фильтр; *4* — каменная наброска; *5* — переходная зона (мелкий камень) ; *6* — наброска из крупного камня; 7 — сопрягающая стенка; *8* — водовод; *9* — водоспуск из водовода

большого порового давления и способствовало повреждениям плотин;

возникновение трещин на откосах приводило к попаданию в них дождевой воды и образованию оползней;

грани плотин из глинистых грунтов следует прикрывать слоем грунта или камня с достаточно высокими прочностными показателями толщиной 2—5 м;

устойчивость существующих плотин может быть повышена пригрузкой их грунтом на слое фильтра, с соответствующим дренажем;

необходимо проводить тщательные геологические исследования даже для самых малых плотин.

В [Д-14] описано образование провальной воронки в плотине; из грунтовых материалов на контакте с бетонной стенкой. Плотина Роуэллен из каменной наброски с ядром из моренной глины на р. Мерси (Австралия) высотой 43 м и длиной по гребню 579 м (рис. 42) была построена в 1966 г. На возвышенной части основания в центре плотины, между двумя высокими железобетонными сопрягающими стенками расположен водослив длиной по фронту 52 м.

Для обеспечения фильтрационной устойчивости контактов ядра с сопрягающими стенками в последних со стороны ядра устроены вертикальные выступы (пилястры) по всей высоте ядра, заходящие в тело ядра на 90 см. Обращают на себя внимание три детали: ядро с верховой стороны перекрывает усадочный шов в сопрягающей стенке, в этом шве нет шпонки, выше водослива стенка может свободно изгибаться, в то время как ниже стенка удерживается криволинейным бетонным водосливом.

Вскоре после окончания строительства, в январе 1967 г., началось наполнение водохранилища. Уже в июле 1968 г. стала наблюдаться осадка верха плотины приблизительно на 30 см возле сопрягающей стенки. В ноябре 1968 г. около правой стенки образовалась воронка диаметром 1,5 м и глубиной около 1,3 м. Поскольку было очевидно, что осадки сопровождались выносом материала насыпи, во избежание его дальнейшего выноса водохранилище было немедленно сработано до безопасной отметки.

Исследование причин аварии началось с удаления в зоне воронки верхней части плотины на глубину 3,7 м, чтобы обнажить ядро со стороны выступа сопрягающей стенки. Далее был отрыт шурф размером 2,13 х х 1,83 глубиной 9 м. Затем выше выступа из шахты были вручную пробурены скважины.

Результаты наблюдений свидетельствуют о наличии в насыпи недостаточно уплотненных зон, о пестроте свойств примененных грунтовых материалов и о протекающих в них суффозионных процессах. Очевидно, причиной образования провальной воронки была суффозия, вызванная фильтрацией по контакту ядра с сопрягающей стенкой вследствие отхода ядра от стенки. Эксперты, исследовавшие повреждение плотины, обратили внимание и на недостаточную ширину гребня плотины, что привело к утоньшению ядра и фильтров в их верхней части, а также на отсутствие должного технического надзора за укладкой ядра и фильтров.

Два примера образования оползней на берегах водохранилищ, близких по своему характеру, описаны в [Д-24]. Эти оползни представляют большую опасность для населения и расположенных в нижнем бьефе сооружений, поэтому поведение берегов тщательно контролируется.

1) На правом берегу водохранилища, образованного плотиной Женисья (Франция), находится неустойчивая зона площадью около 21 га, с которой в водохранилище вытекают поверхностные мутные глинистые потоки. Объем грунта в этой неустойчивой зоне составляет 1,4 млн. м^3, из них 750 тыс. м^3 смещаются со скоростью 10 см/год, а 100 тыс. м^3 — со скоростью 25 см/год, что представляет серьезную опасность. В случае обрушения 100 тыс. м^3 грунта волна в водохранилище по расчету может иметь высоту до 4 м.

Созданная дренажная сеть уменьшала в 4—5 раз скорость движения оползня. Установлена аппаратура для наблюдений за смещениями с дистанционной передачей данных наблюдений на пульт управления ГЭС Женисья. Разработаны правила эксплуатации: в периоды средней активности (2—5 мм/день) и сильной активности (5—10 мм/день) оползня

местные работники немедленно оповещают вышестоящую организацию. Если в течение трех дней будет наблюдаться смещение со скоростью 1 см/день, должна объявляться тревога. Уровень воды в водохранилище должен быть снижен на 5 м, т.е. так, чтобы при сползании грунта в водохранилище он оставался ниже максимального подпорного уровня.

2) Вблизи левобережного примыкания плотины Мон-Сени (Франция) геологические исследования выявили предрасположенную к подвижкам зону шириной 600 м. За поведением зоны установлено тщательное наблюдение геодезическими способами по 42 маркам и при помощи инклинометра по 2 скважинам. Средняя скорость подвижки почти постоянна, но замечено, что годовая скорость сильно зависит от погодных условий: в годы с малыми осадками она вдвое меньше средней, а в годы с большими зимними и весенними осадками — в 10 раз больше средней. В такие годы вместо обычных двух измерений в год проводят два измерения в месяц.

16. РАЗРУШЕНИЯ ГРУНТОВЫХ плотин

В трех докладах, представленных на конгресс, описаны случаи разрушения плотин из грунтовых материалов. Непосредственными главными причинами этих разрушений были перелив через гребень и суффозия в теле и основании сооружений.

В [Д-35] описаны разрушения двух индийских плотин.

Плотина Дханибара высотой 18 м, построенная в 1975—1976 гг., разрушилась в июне 1976 г. (рис. 43). Водослив при плотине, рассчитанный на максимальный расход 584 $м^3/с$, не смог пропустить фактический расход, достигавший 956 $м^3/с$, что и привело к катастрофе.

Плотина Манивали высотой 21 м построена также в 1975—1976 гг. Прорыв плотины произошел в ее русловой части на длине 25 м при первом

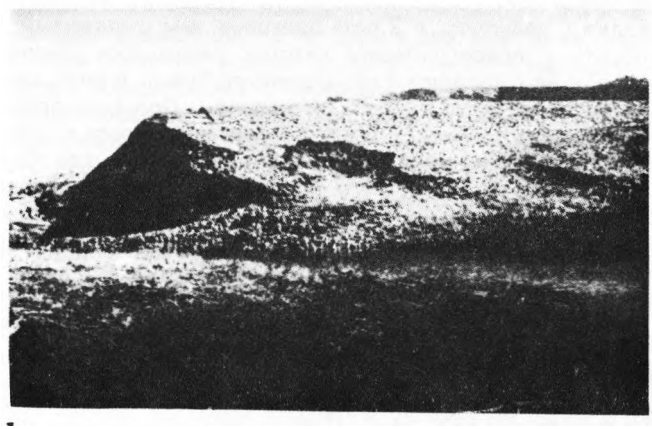


Рис. 43. Плотина Дханибара. Общий вид разрушения

наполнении водохранилища. Наблюдавшаяся в начале заполнения небольшая фильтрация в основании плотины к моменту окончания наполнения водохранилища увеличилась до 0,5 м³/с. При этом у основания низовой грани были замечены выходы мутной воды. Через 3 ч после этого произошло разрушение плотины. Установлено, что причиной аварии явилось то, что траншея в скальном основании под зуб была вырыта на недостаточную глубину и вода под большим напором начала фильтровать через трещиноватую скалу, размывая тело плотины и вызывая ее большую осадку. Гребень плотины оказался ниже уровня воды в водохранилище, что привело к переливу и разрушению плотины.

В [Д-11] описано разрушение строительной перемычки из-за перелива через гребень. Возведение в ЮАР каменнонабросной плотины Ханс Стриждом высотой 57 м с наклонным ядром намечалось выполнять под защитой верховой каменнонабросной перемычки с вертикальным ядром высотой 22 м, которая должна была войти впоследствии в состав верховой призмы плотины. Относительно дорогая конструкция перемычки была принята с целью накопления опыта выполнения каменной наброски. Строительные расходы с вероятной повторяемостью один раз в 20 лет должны были пропускаться через туннель диаметром 6,2 м.

Возведение перемычки началось в июне 1976 г. Каменные призмы отсыпались слоями толщиной 1,5 м, ядро из супеси—слоями 0,3 м. Под действием веса передвигавшихся по насыпи автомашин, доставлявших строительный материал для фильтров, глинистое ядро перемычки оказалось переуплотненным.

вследствие производственных задержек строительство перемычки было временно прекращено. Так как ожидалось, что паводок будет небольшим, решили пропускать его при недостроенной перемычке, защитив построенную часть насыпкой на гребень двух слоев фильтра. Общая высота перемычки составляла 18,6 м вместо 22 м по проекту.

В начале марта 1977 г. на строительство поступили сведения о приближении паводка с расходом, в 2 раза большим, чем ожидаемый. Было решено разобрать у правого берега участок перемычки шириной 20 м. Однако паводок не вместился в образованную брешь, и вода, поднимаясь, начала переливаться через гребень перемычки. Попытка предотвратить размыв устройством прорана у левого берега не привела к успеху. Началось быстрое разрушение центральной части перемычки, где образовалась брешь шириной 100 м, после чего положение стабилизировалось. Весь процесс разрушения перемычки продолжался 2 ч 30 мин. В проране сохранилась лишь часть насыпи высотой 3 м, остальной материал отложился на расстоянии 200 м ниже перемычки.

Отмечена также неудовлетворительная конструкция строительного туннеля. При пропуске паводковых расходов в нем наблюдались сильные хлопки и вибрация, расход через туннель сильно колебался.

Разрушение плотины Ксонкса высотой 48 м в ЮАР описано в [Д-12]. Плотину начали строить в 1970 г. Основание плотины — выветрившиеся долеритовые породы. Подготовка основания заключалась в удалении мягких грунтов и галечников. Под низовым откосом в русле

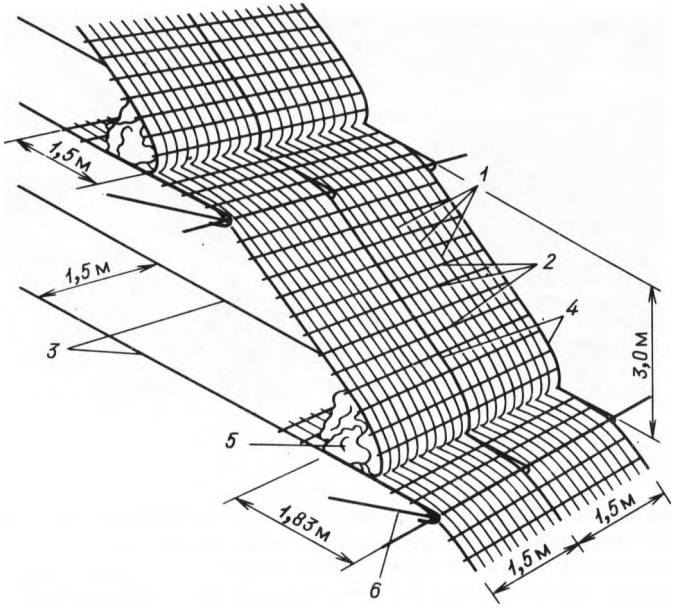


Рис. 44. Армирование низового откоса каменнонабросной плотины Ксонкса:

1 — высокопрочная проволока диаметром 6,4 мм вдоль откоса; 2 — проволока диаметром 10 мм поперек откоса; 3 — главные анкерные стержни диаметром 29 мм; 4 — стержни диаметром 19 мм, связывающие края арматурной сетки; 5 — каменная наброска: 6 — добавочные наклонные стержни диаметром 29 мм

и на правом берегу грунты вынимались до крепких пород, на левом берегу были оставлены крупные валуны.

Для пропуска строительных расходов под плотиной были устроены два водовода, каждый диаметром 1,2 м, один у дна, другой на левом берегу на отметке выше середины высоты плотины. Пропуск паводковых расходов намечалось осуществлять с переливом через строящуюся плотину. Проектом было предусмотрено армирование низовой призмы стальными сетками, детали которого показаны на рис. 44.

Первый ряд сеток в русле и на правом берегу крепится к расчищенной скале основания стальным анкерами, на левом берегу сетки прикреплялись к крупным валунам проволокой.

Так как донный водовод мог обеспечить пропуск только меженных расходов, было предусмотрено возводить плотину таким образом, чтобы в русловой части насыпь была несколько ниже, чем в прибрежных частях, для создания возможности перелива лишь на среднем участке плотины. Действительно, в период строительства дважды вода переливалась через плотину, не вызывая повреждений.

Когда уже насыпь верховой призмы и уровень укладки фильтров и ядра достигли высоты 20,5 м, а низовой призмы 24 м, прошли большие

Рис. 45. Разрушение плотины Титон

затяжные дожди. Уровень воды перед плотиной начал быстро подниматься, затем вода стала проходить через низовую наброску и сливаться по низовой грани плотины. Вопреки задуманному, левобережная часть насыпи оказалась ниже остальной и именно здесь был больший перелив через плотину. Низовая призма продержалась лишь короткое время, затем началось образование большого прорана, и через сутки водохранилище полностью осушилось. Большие разрушения претерпели каменная наброска и фильтры, металлическая арматура низовой призмы была сильно повреждена. Ядро и верховая призма оказались более устойчивыми, значительная их часть осталась неповрежденной.

Волна, прошедшая через проран, нанесла значительный урон пахотным землям в нижнем бьефе. Однако жертв не было. Восстановление плотины было выполнено в соответствии с первоначальным проектом.

Особое место среди аварий плотин из грунтовых материалов занимает самая большая авария, происшедшая между двумя Конгрессами: XII и XIII — разрушение плотины Титон в США. Бюро мелиорации США подготовило доклад по этой плотине для XIII Конгресса, но он в соответствии с требованиями СИГБ тогда не был принят, так как проводившиеся исследования и анализ причин аварии еще не были закончены. Об этой крупнейшей катастрофе лишь упоминается в генеральном докладе Янсена. Однако имеющиеся основные данные об этой плотине и ее разрушении заслуживают внимания.

Плотина Титон (рис. 45) имела высоту над дном реки 93 м и общую строительную высоту 123 м. В ее состав входили широкое вертикальное ядро, выполненное из иловатых грунтов с песком и гравием, верховая переходная зона из гравия и песка, верховая набросная призма, низовая переходная зона из гравия и песка, прикрытая призмой из карьерной смеси, каменная наброска на низовом откосе. Под ядром был выполнен зуб из материала ядра, из которого была проведена трехрядная цементационная завеса. Отсыпка плотины была закончена в ноябре 1975 г

5 июня 1976 г., когда водохранилище было заполнено на 1 м ниже порога водослива, плотина разрушилась. Несмотря на своевременное предупреждение о грозящей катастрофе, погибли 14 человек. При стоимости гидроузла 102 млн. долларов убытки составили 400 млн. долларов, а с учетом других последствий их размер превысил 1 млрд. долларов.

Расследование причин аварии плотины производилось двумя комиссиями — назначенной Министерством внутренних дел США и специальной, назначенной властями штата Айдахо, в составе десяти крупнейших специалистов. В докладах комиссий подробно описаны проведенные в большом объеме исследования, характер разрушения плотины, дан анализ возможных его причин. Краткие выводы специальной комиссии сводятся к следующему: разрушение плотины произошло из-за суффозии в зубе ядра плотины на правобережном участке, причем частицы грунта выносились по контакту плотины с водопроницаемыми скальными породами в зоне примыкания плотины, эти пути выноса были расширены усиленным поступлением воды из водохранилища; существовали открытые, не заполненные цементным раствором трещины в скальном основании, по-видимому, возникли трещины и в зубе плотины, однажды начавшись, суффозия быстро развивалась по всему телу плотины.

К аналогичным выводам пришла и комиссия, назначенная МВД США, которая считает, что авария явилась следствием недостаточной защиты насыпи от фильтрации воды через ее тело и по контакту насыпи с сильно трещиноватым скальным основанием.

Р а з р у ш е н и е п л о т и н ы М а ч х у - I I (Индия) произошло в августе 1979 г. и привело к исключительно большому материальному ущербу, многочисленным человеческим жертвам [15].

Река Мачху протяженностью около 120 км протекает на территории штата Гужарат в Западной Индии и впадает в залив Кеч Аравийского моря. В 50 км выше плотины Мачху-II существовала грунтовая плотина Мачху-I. Плотина Мачху-II высотой примерно 60 м была построена в 1972 г. в следующем составе: центральная плотина из каменной кладки, включающая 18 водосливных пролетов общей длиной 206 м и глухие секции длиной 91 м; левобережная и правобережная земляные плотины.

Водосливные пролеты, рассчитанные на пропуск при ФПУ 6000 м^3/с, были оборудованы плоскими затворами шириной 9 м и высотой 6 м. Общая стоимость строительства гидроузла составляла 3,8 млн. долларов.

В начале августа 1979 г. в бассейне р. Мачху выпадали обильные муссонные дожди, вызвавшие большой приток воды в водохранилище. 10 августа наблюдался значительный подъем воды перед грунтовой плотиной Мачху-I и к 21 ч вода стала переливаться через ее гребень. Операторы на плотине Мачху-II были немедленно предупреждены о необходимости увеличения открытия всех затворов на высоту до 1,8 м. Позже было дано распоряжение о полном открытии всех затворов. Однако электрооборудование 3 затворов оказалось в это время неисправным и открыть удалось только 15 затворов. Сделанные затем попытки открыть 3 затвора вручную не увенчались успехом. Вода продолжала прибывать, и расход ее достигал по разным оценкам 10—14 тыс. м^3/с. Были приняты срочные меры для предупреждения населения об опасности надвигавшегося наводнения,

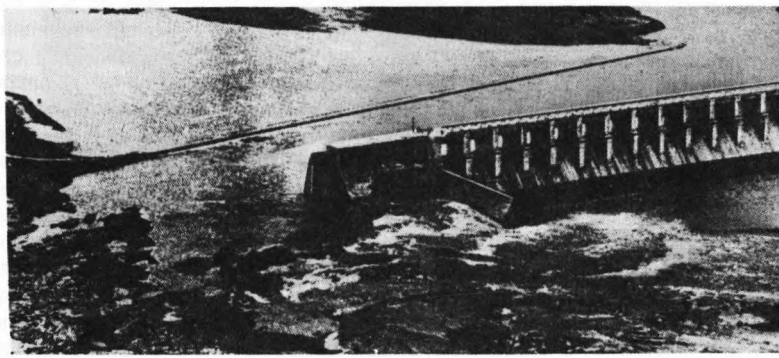


Рис. 46. Разрушение плотины Мачху-II

для чего использовались громкоговорители. Но многие жители не успели вовремя эвакуироваться из опасной зоны.

В 1 ч 30 мин 11 августа уровень воды перед плотиной Мачху-II достиг отметки 60,5 м и начался прорыв воды в нижний бьеф, в основном через гребень земляных плотин. При этом левобережная плотина была размыта на длине 1066 м, правобережная — на участке длиной 700 м (рис. 46). В 15 ч произошло затопление города Морви, расположенного в 8 км от плотины. Глубина слоя воды на улицах города достигала 4,5 м.

На своем пути волна прорыва затопила 68 деревень, разрушила 12700 домов, повредили 6700 строений. Только в городе Морви в первые дни было зарегистрировано 1540 погибших людей.

Государственная экспертная комиссия, изучавшая причины катастрофы на плотине Мачху-II, пришла к заключению, что она была вызвана в основном ошибками при проектировании и эксплуатации гидроузла. Неправильно были определены вероятные максимальные осадки в бассейне реки, ошибочно установлены модуль стока бассейна, максимально возможные паводковые расходы. Соответственно было занижено проектное число водосбросов. Неисправность трех затворов, а также несвоевременное открытие остальных и, наконец, малодейственная система оповещения населения об опасности способствовали тому, что последствия катастрофы оказались столь значительными.

В настоящее время проект плотины полностью переработан. Предполагается, что стоимость ее восстановления превысит 10 млн. долларов.

Глава 5

РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕМОНТ ПЛОТИН ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ремонтные работы на грунтовых плотинах носят самый разнообразный характер. Их назначение — обеспечение нормальной эксплуатации плотин, претерпевших аварии различной интенсивности. Объем ремонтных работ зависит от вида и характера повреждений плотин. Различают обычно мелкие, в основном, профилактические

ремонты, выполняемые силами коллективов эксплуатационников. Более крупные ремонты производятся уже специализированными подрядными организациями. При очень больших повреждениях или разрушениях приходится проводить значительные восстановительные работы, иногда даже перестройки плотин. Эти работы выполняют специализированные организации, имеющие достаточный опыт в строительстве гидротехнических сооружений.

Восстановление или существенные изменения конструкций плотин проводятся по проектам, в которых учитываются результаты анализа повреждений, их причины. Часто на работы по восстановлению поврежденных гидротехнических сооружений объявляются конкурсы, заключаются контракты.

Значительная часть ремонтных работ, как указывается во многих докладах и сообщениях на Конгрессе, производится для устранения излишней фильтрации через тело и основания плотин, которая вызывает в них внутреннюю эрозию, образование провальных воронок и т.п. Большое внимание уделяется вопросам восстановления и расширения дренажных систем, укреплению обрушившихся откосов плотин, закреплению их поверхности.

17. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН

При проведении на плотинах ремонтных работ во всех странах широкое распространение получило применение различных методов инъецирования в их толщу и в основание всевозможных растворов: цементных, глинистых, синтетических. Во многих случаях инъекционные работы производятся без прекращения эксплуатации гидроузла при наполненном водохранилище.

Ремонтные работы на грунтовых плотинах США, выполнявшиеся с применением инъекций, описываются, например, в [Д-5].

Плотина Вульф Крик высотой 61 м строилась с 1941 по 1951 г. Напорный фронт образован бетонной гравитационной плотиной длиной по гребню 547 м и грунтовой длиной 1200 м. В основании сооружений находятся закарстованные известняки мощностью до 60 м, прикрытые аллювиальными отложениями толщиной от 6 до 14 м. Под верховой частью плотины был устроен зуб, пересекающий слой аллювиальных отложений и заглубленный в скалу. В процессе его выемки обнаружились системы глубоких карстовых каналов и трещин, параллельных трассе зуба и пересекающих ее под разными углами. Часть из них была заполнена глинистым илом. Со дна зуба после расчистки каналов была сделана цементационная завеса на глубину 15 м. Обратная засыпка зуба выполнялась тонкими слоями и уплотнялась катками. Позже оказалось, что не все опасные каналы и щели были хорошо заделаны.

Грунтовая плотина (рис. 47) отсыпалась непосредственно на слой аллювиальных отложений. Под низовой частью плотины был уложен песчано-гравийный фильтр и устроена сеть разгрузочных дрен. Строительство плотины было закончено в декабре 1950 г. С 1952 по 1967 г. состояние плотины никаких опасений не вызывало: оценка ее безопасности основывалась только на визуальных наблюдениях и на измерениях расхода в дренажных скважинах; в теле плотины и ее основании не было установлено ни одного пьезометра.

В октябре 1967 г. состояние плотины потребовало проведения цементации, которая, по оценке специалистов, все же не обеспечила безопасную эксплуатацию сооружения. Работы было решено продолжить.

После рассмотрения ряда вариантов реконструкции плотины и ее основания (постройка новой плотины, расширение существующей и др.) было решено сделать из стальных труб диаметром 0,66 м вдоль всей грунтовой плотины непрерывную вертикальную бетонную стенку-диафрагму общей высотой 84,7 м. Она должна была пронизать всю насыпь и углубиться в основание на 30,5 м — не менее чем на 3 м ниже отметки самой глубокой скалы с признаками выщелачивания.

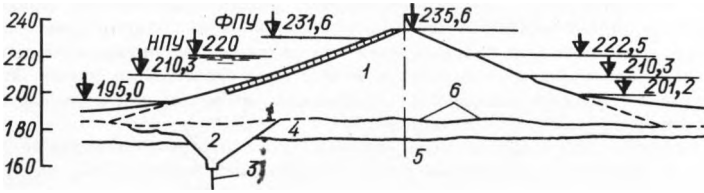


Рис. 47. Поперечное сечение грунтовой части плотины Вульф Крик:

1 — водонепроницаемая укатанная наброска; *2* — зуб; *3* — цементационная завеса; *4* — аллювий; 5 — скала; *6*— дренаж

Работа начиналась с выемки грейфером колодцев диаметром 1,29 м, глубиной до 21 м. Колодцы заполнялись жидким бентонитом и в них опускались временные обсадные трубы диаметром 1,19 м, через которые продолжалась выемка из тела плотины до глубины около 43 м. При достижении этой глубины в скважину устанавливались обсадные трубы диаметром 1,04 м и опускались до уровня скалы. Затем из них производилось бурение скважины диаметром 0,91 м в скальной породе. После цементации трещин вокруг скважин в них опускались постоянные обсадные трубы диаметром 0,66 м с толщиной сменок 8 мм. Нижний конец труб был закрыт заглушкой. Затрубное пространство заполнялось жидким цементным раствором, затем производилось извлечение временных обсадных труб. После схватывания раствора постоянные обсадные трубы заполнялись быстротвердеющим бетоном.

Спустя 20 сут с помощью специально сконструированного грейфера производилась выемка грунта между трубами. Ниже поверхности основания скала предварительно рыхлилась фигурным долотом. После очистки скважин от остатков бурения (шлама) производилось их заполнение подвижной бетонной смесью (осадки конуса 17—19 см), содержащей 334 кг/м^5 низкощёлочного цемента, 68 кг/м пуццолана, 949 кг/м^3 мелкого заполнителя и 168 кг/м воды. Принимались специальные меры для предупреждения расслоения бетона при его укладке в скважины по трубам диаметром 26 см.

Во время ремонта водохранилище не опорожнялось, что дало значительный экономический эффект.

Проведение цементационных работ в основании плотины из грунтовых материалов для уменьшения фильтрации на контакте насыпи с зубом описано в [Д-41) (Италия).

Плотина Зокколо в восточных итальянских Альпах высотой 66,5 м отсыпана на слое аллювия мощностью более 100 м в 1961—1965 гг. из однородной гравийно-песчаной смеси с включением валунов. На верховой грани уложен асфальтобетонный экран. Под нижней кромкой экрана в основании устроен зуб из забитых на глубину 50 м вплотную друг к другу бетонных свай толщиной 0,5 м. Назначение зуба — уменьшение фильтрационных градиентов под основанием плотины. По верху зуб смыкается с бетонной смотровой галереей, к которой примыкает экран. Для отвода фильтрационной воды за плотиной предусмотрено устройство разгрузочных скважин и дренажной призмы. Установлены приборы для наблюдения за поведением плотины.

В течение первых десяти лет фильтрация постепенно увеличивалась со 120 до 240 л/с. Для уменьшения фильтрации было принято решение выполнить двухрядную цементационную завесу вдоль всего зуба с его верховой стороны. Завеса выполнялась из скважин диаметром 80 мм глубиной 15 и 25 м с расстоянием между скважинами 1 м. Кроме того, под центральной частью плотины проводилась цементация из

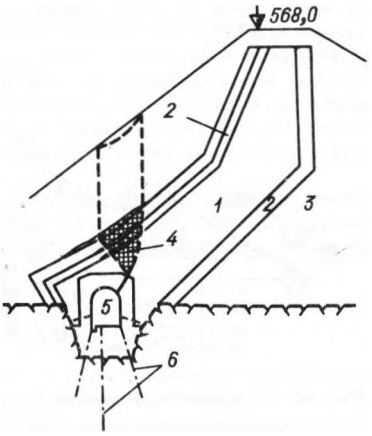


Рис. 48. Сечение плотины Хринова на участке повреждения в результате выноса материала ядра в потерну:

1 — ядро плотины; *2* — переходные зоны; *3* — упорная призма; *4* — место прорыва, инъектированное глино-цементным раствором; 5 — потерна; *6* — пьезометрические скважины

еще двух рядов более мелких скважин.

Для инъекции применялся состав (по массе) : цемента 26,6 %, бентонита 6,6%, воды 66,8 %.

В [Д-21] (ЧССР) описывалось повреждение наклонного ядра каменнонабросной плотины Хринова. Оно было устранено инъецированием в каверну (рис. 48) глиноцементного раствора. Состав раствора: 280 кг глины (при *W*= 80%); 35 кг цемента, 885 л воды на 1 м *(γ = 1,2* т/м).

В [Д-29] указывается, что на большей части плотин из грунтовых материалов в Южной Корее имела место фильтрация через скальное основание и береговые примыкания. В большинстве случаев опорожнить водохранилище было невозможно, поэтому для устранения фильтрации выполнялась инъекция с применением цементных или грунтовых растворов, а также различных химических веществ.

Повреждение плотины Роуэлле и, описанное в [Д-14] (Австралия), как уже указывалось раньше, было устранено устройством шпунтовой стенки в зоне провальной воронки на контакте плотины с правой сопрягающей стенкой водослива. Стальной шпунт корытного профиля забивался до уровня скального основания из предварительно отрытого в теле плотины шурфа. Грунт под шурфом цементировался до производства обратной засыпки. После завершения засыпки на отметке верха ядра в нем пробурили скважины. Часть из них, находящихся вблизи от стыков шпунтин, заполняли цементным раствором, остальные — химическим раствором. Усадочный шов верховой стенки также зацементировали. После окончания всех этих работ восстановили гребень плотины. В течение 10 лет, истекших после выполнения ремонта, никаких повреждений в плотине не наблюдалось.

18. ПРИГРУЗКА ОТКОСОВ ГРУНТОМ

Часто встречающимся видом ремонтных работ, направленным главным образом на увеличение устойчивости насыпи и, частично, уменьшение фильтраций, является пригрузка откосов грунтом.

В [Д-35] (Индия) описано, что во всех случаях повреждений плотин из грунтовых материалов ремонтные работы сводились к устройству пригрузочных насыпей на низовых откосах плотин. Лучший эффект получали, устраивая фильтр между первоначальной насыпью и пригрузкой, а также при устройстве дренажных систем.

Таким образом укреплялась, например, плотина Экрук высотой 27 м, на которой из-за сильных и продолжительных ливней 5 раз происходили оползни низового откоса и 1 раз — верхового.

Характерным является и ремонт плотины Ашти высотой 18 м. В средней части этой плотины укладывалась призма из сортированного грунта, по сторонам размещались призмы более плотной коричневой земли, пригружаемые отсыпкой из смеси

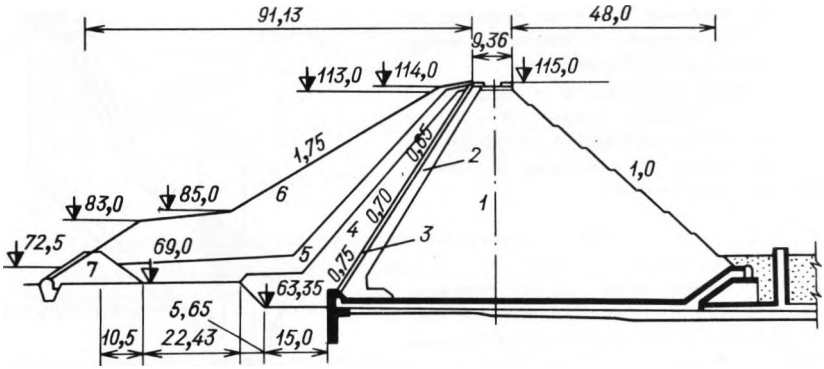


Рис. 49. Поперечное сечение плотины Куга после ремонта и завершения возведения:

1 — первоначальная плотина; *2* — экран старой плотины; *3* — слои битума и фильтр на поверхности первоначального экрана; 4 — ядро; *5* — переходная зона; *6* — каменная наброска; 7 — каменнонабросная перемычка

(в равных долях) черной земли и дробленого камня. Плотина претерпела ряд аварий: происходили оползни откосов, просадки гребня, местные вздутия. В октябре 1962 г. в ней образовалась поперечная трещина, сопровождавшаяся просадкой гребня на 0,6 м.

Для повышения устойчивости плотины в нижнем бьефе за поврежденными участками из камн.. на слое фильтра были отсыпаны пригрузочные призм высотой 2,4—3 м шириной до 15 м. Кроме того, в теле плотины через каждые 15 м были устроены разгрузочные дренажные колодцы, а в обнаруженных зонах высачивания фильтрационных вод на откос укладывался наслонный дренаж.

При укреплении плотин Вагхад и Каламба применялись аналогичные меры: создавались дренажные системы, отсыпались пригрузочные банкеты. Надежность' плотин значительно возросла.

Ряд примеров пригрузки низовой грани плотин приведен в других докладах.

Выполнение больших строительных работ для исправления ошибки, допущенной из-за недостаточного учета характера и состояния основания, а по существу постройка новой плотины Куга, описаны в [Д-42] (Италия). Для приведения плотины в состояние, пригодное для эксплуатации, пришлось существенно изменить ее конструкцию.

Напомним, что первоначальная плотина, построенная в 1956—1960 гг., состояла из каменной наброски с железобетонным экраном, опиравшимся внизу на бетонный зуб, в верхней части которого устроена дренажная (она же смотровая) галерея. В результате неодинаковых деформаций четырех различных частей основания в плотине образовались многочисленные трещины, большим разрушениям подверглись экран и дренажная галерея.

В первую очередь был выполнен ремонт существующей плотины. Экран скрепили с подэкрановой кладкой анкерами диаметром 20 м, выполнили цементацию пустот через скважины, пробуренные сквозь Экран (из расчета по одной скважине на каждые 4м^2). Поврежденный бетон был удален, экран вновь забетонирован и покрыт гидроизоляционным слоем. В дренажной галерее — в пазах, прорубленных в стенках и перекрытии, — установили через 1 м стальные арочные крепи, к которым приварили 12 стальных горизонтальных балок, к ним прикрепили проволочные сетки, затем всю конструкцию забетонировали.

После окончания ремонта на плотине перед экраном было устроено новое водонепроницаемое ядро (рис. 49). Работа началась с укладки на верховой поверхности существующего экрана слоя битумной эмульсии, на который укладывался фильтр из пористого асфальтобетона толщиной 60 см с коэффициентом фильтрации (5÷5) x 10^{-2} мм/с. Этот фильтр внизу опирается на зуб, в котором для отвода фильтрационной воды были пробурены скважины в дренажную галерею. На поверхность фильтра отсыпалось ядро из илистых грунтов, затем переходная зона и верховая каменная призма.

После пробных заполнений водохранилища были проведены геодезические, пьезометрические и фильтрационные наблюдения на базе большой сети контрольно-измерительных приборов, которые установили вполне удовлетворительное состояние плотины.

19. РЕМОНТ ЭКРАНОВ

В [Д-23] описаны ремонтные работы по устранению повреждений экранов на верховых гранях французских плотин из каменной наброски.

Наиболее сложной оказалась работа по ремонту массивных железобетонных экранов каменнонабросных плотин. Обычно разрушенные участки плит экрана удалялись и заменялись бетоном, укладываемым в опалубке. Основная задача — хорошо связать старый бетон с новым, чтобы конструкция работала как единое целое. В докладе приводится несколько характерных примеров ремонта экранов грунтовых плотин.

На плотине Грезиоль был успешно выполнен ремонт 14 поврежденных швов в массивном бетонном экране. Для ремонта применялся бетон, приготовленный с добавкой полиацетатвинила. В основании шва была оставлена старая медная шпонка, разрушенная часть бетонного экрана удалялась, края оставшегося бетона покрывались эпоксидной смолой. При бетонировании у деформационного шва зона шва оставлялась пустой, но после затвердения бетона она заливалась полиуретановой смолой.

Пример ремонта асфальтобетонного экрана плотины Круг Вильденштейн показан на рис. 50. Эта плотина высотой 38 м была построена в 1965 г. При первом наполнении водохранилища экран был частично разрушен. Воронку в насыпи, образовавшуюся на глубине 18 м, временно засыпали под водой, осевший участок плотины зацементировали из дренажного коллектора. Одновременно продолжали медленно заполнять водохранилище, фильтрационный расход при этом составил 12 л/с. Повторное устранение повреждения произвели после опорожнения водохранилища! Впоследствии фильтрационный расход через плотину при НПУ снизился до допустимого значения (6—7 л/с).

В 1964 г. пришлось снова вернуться к ремонту экрана и произвести замену его тонкими плитами толщиной 12,5 см, имеющими в плане размеры 45 x 75 м. Общая площадь экрана 13000 $м^2$ разделялась четырьмя деформационными швами на 5 частей, которые заанкеривались краями в берегах, в бетонные элементы у гребня и у основания откоса. Плиты минимальной толщиной 7 см укладывались на слой водонепроницаемого асфальтобетона.

Через 5 лет эксплуатации в экране на 10% его площади были обнаружены повреждения, в том числе трещины в бетоне, расслоения, дробление (местами до пылевидного состояния), местные повреждения, иногда проходящие на всю толщину плиты, интенсивная коррозия арматуры. Длинные трещины в асфальтобетоне раскрывались вдоль деформационных швов. Причиной всех этих повреждений признано неблагоприятное напряженное состояние экрана.

Проведенное локальное лечение не дало положительных результатов. Поэтому в 1974 г. экран был заменен гибким асфальтобетонным покрытием толщиной 10 см, армированным для предупреждения сползания по крутому откосу. При этом обеспе-

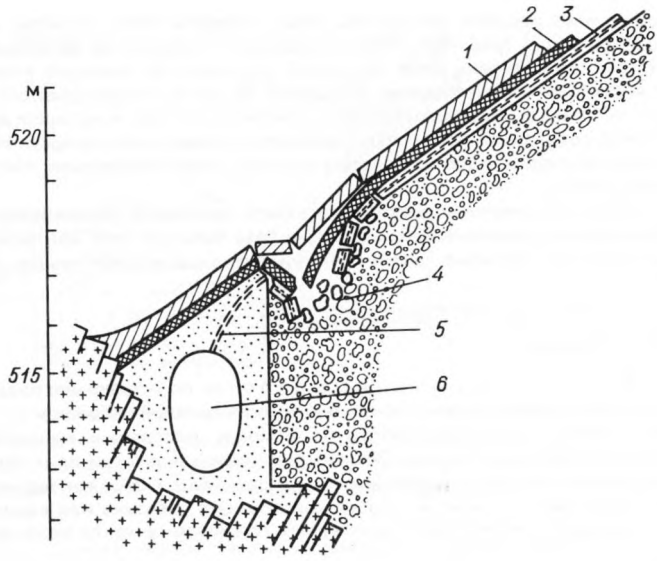


Рис. 50. Плотина Круг Вильденштейн:

1 — защитный слой из железобетона 12,5 см; *2* — асфальтобетон 7 см; *3* — пористый бетон 15 см; *4* — насыпь плотины; 5 — дрены; *6* — дренажный коллектор

чивалась хорошая связь нового асфальтобетона с ранее уложенным, который за 10 лет довольно сильно состарился.

На основании анализа ремонтов, выполненных, в основном, на французских плотинах, авторы в своем докладе предлагают при восстановлении швов и лечении экранов грунтовых плотин применять следующие материалы: глинистые растворы, обладающие хорошей устойчивостью к агрессивным водам; полиацетатвиниловую смолу; эпоксидные и виниловые смолы; полиэтилентетрасульфид (тиокол), наиболее пригодный для восстановления швов, испытывающих большие деформации; полиуретановые смолы, которые в настоящее время наиболее широко применяются при разнообразных ремонтах.

Отмечается, что широко применявшиеся раньше силиконы в настоящее время почти не используются. Для склейки бетонов разного возраста рекомендуется применять эпоксидные смолы. При строительстве и ремонте экранов предлагается наряду с бетоном широко применять асфальтобетоны, позволяющие создавать гибкие конструкции, приспосабливающиеся к деформациям насыпей.

Эксплуатация и ремонт асфальтовых экранов в специфических условиях высокогорных районов описаны в [Д-33]. В 60-х годах в Австрии в высокогорных районах построено пять каменнонабросных плотин с асфальтобетонными экранами. Несмотря на то, что на поверхности водохранилищ круглый год держится лед, в качестве противофильтрационного элемента плотин был выбран экран, а не ядро, прежде всего из-за отсутствия вблизи строительных площадок пригодного материала для ядра и невозможности его устройства вследствие часто выпадающих дождей, а также кратковременности строительного периода, ограниченного только летними месяцами.

Так, плотина Ошеникзее высотой около 60 м с асфальтовым экраном по экономическим соображениям отсыпалась в несколько очередей с последовательным уширением профиля. Для возможности осмотра экрана верховой откос плотины и прилегающая к нему акватория поддерживались в свободном ото льда состоянии. Это достигалось нагнетанием в воду сжатого воздуха, вызывающего циркуляцию воды. Нагнетание воздуха производилось плавучей насосной станцией, которая начинала работать осенью. Для подачи воздуха по гребню плотины прокладывалась система перфорированных труб. При температуре воздуха, опускавшейся временами до —35 °С, температура воды в зоне работы описанной установки составляла +2 - +3 °С.

После обнажения поверхности экрана на больших глубинах обнаружили многочисленные каверны глубиной в несколько сантиметров. Были рассмотрены различные способы возможного ремонта асфальтобетонных экранов. Установлено, что укрепление экрана рулонным материалом, пропитанным битумом, не могло дать удовлетворительного решения, так как несмотря на тщательную просушку поверхности экрана на ней остается влага, приводящая к образованию воздушных пузырей. По этой причине пришлось проводить испытания других материалов: синтетических, битумных растворов, мастики, полиэфирэластомеров, армированных шерстистым полиэфирным материалом. Наилучшие результаты получены при применении полиэфирэластомера, но это весьма дорогостоящий вариант ремонта. Хорошие результаты в лабораторных условиях показало применение холодной битумной мастики слоем толщиной 1 см. Однако следует учитывать, что внезапные сильные дожди могут смыть свежеуложенную и еще не затвердевшую мастику.

Поскольку существующее асфальтобетонное покрытие при напоре воды 50 м было более или менее непроницаемым (фильтрация через плотину составляла не более 5 л/с), было решено для закупорки пор пропитать поверхность экрана битумной эмульсией. Для защиты поверхности экрана от выветривания был уложен износоустойчивый горячий мелкозернистый асфальтобетон, содержащий 10% пустот, чем исключалась возможность образования крупных пузырьков.

В [Д-15] приведены подробные данные о ремонте асфальтобетонного экрана плотины Скотте Пик, описанной выше. На этой плотине необходимо было восстановить водонепроницаемость битумного экрана, имевшего многочисленные трещины, и предотвратить возникновение новых трещин.

Рассматривалась возможность применения бутил каучуковых рулонов, свинца, стали, пластиков, битумных матов. Рессматривалось даже предположение об устройстве водонепроницаемого наклонного ядра под экраном путем цементации насыпи через наклонные скважины, пробуриваемые с гребня. Было принято решение о выполнении усиления экрана отсыпкой песчано-гравийной смеси с заданным гранулометрическим составом. Считалось, что мелкие частицы необходимы для обеспечения низкой проницаемости отсыпки, а достаточно крупные — для заполнения больших трещин. Слой отсыпки был принят равным 1,8 м. Укладка гравийного слоя на откос производилась под водой с помощью грейфера без опорожнения водохранилища. В результате проведенных лабораторных работ такая смесь была подобрана; подтверждена устойчивость отсыпки гравия в воду на откосе насыпи 1 :1,7.

Весьма серьезным вопросом выполнения отсыпки был выбор технологии, которая должна была обеспечить высокое качество укладки грунта. Были рассмотрены двенадцать вариантов отсыпки экрана, из них наиболее удачными признаны пять. На строительстве был выбран вариант (рис. 51), в котором используется самодвижущаяся баржа, имеющая приемный бункер, загружаемый с береговой пристани, и бадья на штоке емкостью 23 м .

Перед началом отсыпки гравийной смеси все обнаруженные трещины были заранее прикрыты бутилкаучуковыми рулонами.

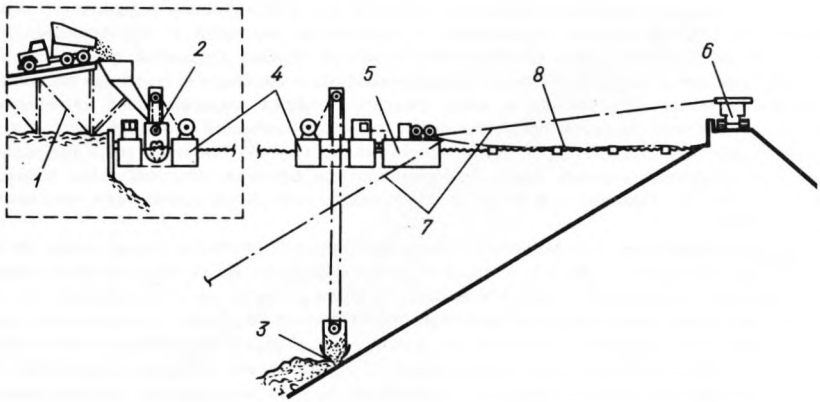


Рис. 51. Схема ремонта плотины Скотте Пик:

1 — автомобильная эстакада на берегу с бункером и лотком; *2* — загружаемая емкость; *3* — бадья для укладки грунта на откос; *4* — самоходная баржа; 5 — док; *6* — опорное устройство на гребне плотины; 7 —тросы-растяжки; *8* — силовой кабель

С помощью описанного устройства без опорожнения водохранилища удалось за один сезон уложить на поврежденный участок экрана 36 000 м^3 гравийно-песчаной смеси при глубине воды до 43 м. Фильтрация через плотину в последние два года была незначительной — около 3 л/с.

Периодические исследования поверхности экрана с помощью эхолота показали, что оползания гравия по откосу не наблюдается, также как не было обнаружено и местных уменьшений толщины экрана.

20. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН

Описания способов восстановления нескольких плотин в США приводятся в [ОД-2].

Плотины Эддикс и Баркер из грунтовых материалов, построенные для регулирования паводков, аналогичны по размерам. Характер выполненной реконструкции одинаков. Плотина Эддикс, построенная в 1948 г., имеет высоту 14,8 м и длину по гребню 18,6 км; плотина Баркер построена в 1945 г., высота 11,1 м и длина по гребню 21,95 км. По мере развития жилищного строительства в непосредственной близости от плотин, у их низовых откосов, были выкопаны канавы поверхностного дренажа, перерезавшие фильтрующие слои основания. Это вызвало увеличение фильтрации через песчаные грунты в основании; весьма значительной оказалась и поверхностная эрозия тела плотин. При реконструкции, необходимой для предотвращения аварии, вдоль наиболее опасных участков плотин в основании были устроены грунтово-бентонитовые стенки в грунте толщиной 0,9 м, пересекающие фильтрующие слои. Общая длина таких стенок у плотины Эддикс составляет 8715 м, у плотины Баркер — 3080 м.

Намывная плотина Хеншоу высотой 33,5 м и длиной по гребню 594 м построена в 1922 г. в непосредственной близости от тектонического разлома. Реконструкция предусматривает снижение нормального подпорного уровня и возведение затем новой плотины, непосредственно за существующей.

Плотина Рэд Блафф высотой 31 м построена в 1936 г. Растворение гипсов в основании привело к образованию в нем пустот и к обрушению покрывающих их грунтов. В 1973 г. была обнаружена просадка напорной грани плотины. При ремонте были проведены большие работы, выполнявшиеся в два этапа — в 1973 и 1977—1978 гг. — в основании плотины производилась цементация карстовых полостей, для чего была пробурена 571 скважина общей длиной 15100 м. Подсчитан^, что из предполагаемого объема пустот 2830—4670 м заполнено раствором 1780 м , т.е. 40-60%.

Намывная плотина Сан-Пабло (Калифорния) имеет высоту 52 м, длину 370 м, ширину по гребню 15 м. Она расположена между двумя сейсмически активными сбросами. Поверочные расчеты плотины, выполненные методом конечных элементов, установили ее недостаточную устойчивость при расчетном восьмибалльном сейсме.

Для предотвращения аварии в первую очередь был снижен на 6 м уровень водохранилища и началась разработка проектов усиления плотины. Из предложенных 12 вариантов реконструкции был принят к исполнению вариант, предусматривающий пригрузку верхового откоса плотины слоем каменной наброски общим объемом 765 тыс. м^3. Перед отсыпкой камня намечается полностью осушить водохранилище, удалить со дна перед плотиной слой ила и аллювия толщиной до 30 м, уложить на верховой откос плотины слой песчаного фильтра для устранения порового давления, которое может развиться в существующей насыпи во время землетрясения. Лишь после этого намечено выполнить пригрузку верхового откоса камнем.

Каменнонабросная плотина Ят-I в Новой Калифорнии была практически разрушена катастрофическими паводками, в результате которых вся наброска плотины оказалась смытой в нижний бьеф.

При ее восстановлении использовались временные мостовые опоры, построенные ранее при строительстве. Вместо разрушенной плотины на ее месте была построена контрфорсная той же высоты.

В [Д-9] описаны реконструкция плотины Гури (Венесуэла) высотой 52 м, а также опыт изучения и улучшения свойств осадочных отложений в основании плотин из грунтовых материалов. При перестройке плотины Гури должны быть наращены существующие и возведены новые секции гравитационной плотины, наращены две земляные плотины до высот 90 м (по обе стороны русла реки) общей протяженностью 7 км. Так как грунты в районе плотины Гури осадочные, были проведены их широкие полевые и лабораторные исследования. Установлено, что верхний слой основания состоит из грунтов, смытых с береговых склонов, и аллювиальных отложений толщиной 0,5—3 м; под ним находится трехметровый слой полностью выветрившегося гнейса, который квалифицируется как осадочный грунт; ниже залегает гнейс, сохранивший свою первоначальную скальную структуру, толщина его местами превышает 70 м. Еще ниже залегают коренные породы. Проведенные полевые и лабораторные испытания показали, что благодаря естественной цементации грунты основания выдерживают нагрузки до 0,4 МПа, после чего происходит их разрушение. Однако при нагрузке более 1,0 МПа отмечалась тенденция к упрочнению грунтов.

Поэтому основание плотины Гури предварительно уплотнялось путем замачивания через траншеи и скважины диаметром 0,5 м с шагом 15—20 м. На некоторых участках основания сапролит полностью удалялся. Водонепроницаемость грунта проверялась с помощью радиоактивных изотопов.

Глава 6

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОТИН ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ

21. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проектированию и строительству больших плотин обычно предшествуют и сопутствуют многообразные исследования, призванные оценить прочность и устойчивость этих сооружений, обеспечить их безопасную работу.

В [Д-36] (СССР) указывается, что за последние десятилетия объем и глубина знаний в области прочности и устойчивости гидротехнических сооружений значительно выросли. Это связано с серьезными успехами в развитии таких научных дисциплин, как строительная механика, механика грунтов и скальных пород. Применение быстродействующих ЭВМ позволяет теперь отказаться от многих упрощенных расчетных схем, перейти от решения отдельных частных задач к математическому моделированию. Появилась реальная возможность установить влияние на проектируемое сооружение практически всех известных видов воздействия, причем, как каждой нагрузки в отдельности, так и в различных их сочетаниях. Постепенно накопился и некоторый запас статистических данных о свойствах материалов сооружений и оснований, их изменениях во времени. Поэтому расчеты прочности и оценки надежности сооружения прежними способами с единым коэффициентом запаса стали уже неоправданными.

В настоящее время гидротехнические сооружения согласно действующим в СССР нормам [6—9] должны проектироваться по предельным состояниям. Эффективность оценки состояния сооружений обеспечивается за счет применения системы расчлененных коэффициентов, учитывающих (с известным приближением) реально возможные сочетания нагрузок, их отклонение от нормативных значений, условия работы сооружения, последствия аварии и повреждений, изменчивость свойств материалов. Расчет по предельным состояниям предполагает использование статистических характеристик свойств материалов, нагрузок, условий работы сооружений. В настоящее время запас имеющихся данных недостаточен, что не дает возможности дать вероятностную характеристику количественной оценки надежности гидросооружения. Критерием надежности служит близость состояния сооружения к предельному, позволяющая судить о надежности как о достоверном событии, т.е. дать ответ в одной из двух формулировок: "надежно" или "не надежно".

Такая оценка надежности гидротехнических сооружений регламентируется действующими нормами. В дальнейшем накопление достаточно большого объема данных о поведении сооружений в различных условиях, о материалах, нагрузках и других факторах позволит перейти к вероятностным оценкам надежности сооружений, получаемым статистическими методами. Однако применение расчетов по предельным состояниям уже сейчас в той форме, в какой это возможно, обеспечивает прогресс в гидротехническом строительстве, позволяет проектировать более экономичные сооружения, стимулирует дальнейшие исследования и развитие

метода. Следует отметить, что этот перспективный метод за рубежом пока не используется.

В настоящее время в СССР исследования для повышения безопасности гидротехнических сооружений проводятся в следующих основных направлениях:

изучение свойств материалов сооружений и оснований в различных природных условиях и их изменений во времени;

натурные исследования и визуальные обследования плотин;

модельные исследования;

математическое моделирование и расчеты[1].

Не приводя детального описания всех исследований, выполняющихся в СССР в перечисленных направлениях, остановимся кратко на основных из них.

Изучение в створах сооружений и в лабораториях прочностных и деформативных свойств массивов оснований, их структуры выполняется как традиционными методами, так и новыми, в том числе разработанными в СССР. Например, изучение упругих характеристик, ползучести, анизотропии и других свойств оснований производится методами центрального гидравлического штампа (ЦГШ), методом касательных нагрузок (КН), усовершенствованными прессиометрическими и другими методами. На наиболее крупных и ответственных сооружениях — Красноярской, Братской, Усть-Илимской и других гидроэлектростанциях проводились непосредственно в строительных котлованах опыты по сдвигу больших бетонных штампов по поверхности скалы. Изучение морфологии поверхностных трещин позволяет оперативно определять сдвиговые характеристики пород. Широко применяются ультразвуковые, сейсмометрические, акустические и другие методы инженерной разведки пород. Результаты подобных исследований позволяют с большей достоверностью оценивать несущую способность оснований, прогнозировать их поведение во время строительства и после его окончания.

Исследования свойств строительных материалов, в частности бетона: его прочности, трещиностойкости, пористости, водонасыщения, водонепроницаемости и других свойств. В СССР многочисленными расчетами и экспериментами доказана возможность повышения расчетного сопротивления бетона в зонах бетонных сооружений, находящихся в условиях сложного напряженного состояния. Это позволило, обеспечивая требуемую прочность сооружений, снизить марку бетона в плотинах Саяно-Шушенской, Ингурской и других гидроэлектростанций, сократив при этом расход цемента. Аналогичные исследования начали проводиться и за рубежом.

Натурным исследованиям плотин, повреждениям плотин и применяющимся способам ремонта придавалось на Конгрессе исключи-

[1] При проектировании и строительстве отечественных гидроузлов выполняются также гидравлические, фильтрационные, ледотермические и многие другие исследования, которые обсуждались на XIII Конгрессе СИГБ по вопросам № 48 и 50 (см. вып. 3, 4) .

тельно большое значение. Они, как известно, не только дают сведения о состоянии в данный момент, но и служат для апробации предпосылок и допущений, принимаемых в расчетах, позволяют оценивать результаты лабораторных исследований сооружений, а также свойства материалов, использованных при их возведении. В некоторых случаях результаты натурных наблюдений позволяют выявить новые, ранее неучитываемые явления, влияющие на работу сооружений. Так, в исследованиях на плотинах Братской и Усть-Илимской ГЭС было обнаружено явление температурного обжатия граней столбчатых блоков и изменение характера работы сооружений при омоноличивании их тела в результате цементации швов между столбчатыми блоками. Результаты исследований принимались в основу при усовершенствовании конструкции многих сооружений проектируемых гидроузлов.

Натурные исследования выполняются сейчас на всех крупных гидротехнических сооружениях. При снятии показаний приборов и их обработке в последнее время начали шире применяться автоматизированные системы, значительно ускоряющие процесс получения результатов измерений и позволяющие проводить оперативный контроль за состоянием сооружений.

На основании обобщения результатов натурных наблюдений и обследований выявляются характерные виды отказов (повреждений), влияние их на работу и на долговечность сооружений; устанавливаются критерии оценки прочности и надежности гидротехнических сооружений; разрабатываются ремонтные мероприятия для восстановления эксплуатационного состояния сооружений; определяются характеристики кинематики и напряженного состояния плотин во время землетрясений.

Постановка, вопросы организации и проведения натурных исследований, описание полученных результатов и их анализ широко обсуждались во многих докладах на Конгрессе. На наиболее интересных из них остановимся ниже.

М о д е л ь н ы е и с с л е д о в а н и я проводятся в настоящее время во многих странах — в СССР, Италии, Испании, Португалии, Индии, Южной Корее. Об этом говорилось в представленных докладах на Конгрессе. С помощью моделей разрешается ряд вопросов, важных для рационального проектирования плотин.

В [Д-36] указывается, что в Советском Союзе на моделях из упругих материалов изучаются, в основном, напряженно-деформированное состояние сложных пространственно работающих конструкций, а также исследуется процесс прохождения через сооружения сейсмических волн; устанавливаются особенности распространения трещин в сооружениях;

на прочностных моделях воспроизводятся основания, выявляются предельные состояния проектируемых сооружений, возможные их отказы, устанавливаются вероятные формы разрушений;

на геомеханических моделях детально отображаются не только геометрические параметры комплекса плотина-основание, но и механические свойства их материалов, характерные ослабления (например, тектоническими и другими трещинами, отверстиями и др.), изучаются

возможные формы разрушения и устанавливаются критерии прочности и устойчивости.

При решении задачи повышения надежности плотин, и других сооружений модельные исследования, видимо, и впредь будут находить широкое применение.

В целях развития направления математического моделирования выполняются следующие работы.

Широко разрабатываются и используются при проектировании методы расчета, базирующиеся на оценке прочности.

Для расчетного анализа поведения грунтовых плотин в процессе их возведения и нагружения используется теория консолидации трехфазной среды (скелет + вода + воздух), обладающей к тому же сложными реологическими свойствами (ползучестью). Учитывается последовательность возведения различных частей сооружения (послойная укладка и другие методы строительства).

Для оценки устойчивости откосов разрабатываются новые методы решения задачи в двухмерной и трехмерной постановке, основанные на отыскании кривых или поверхностей скольжения, минимизирующих коэффициент запаса при возможных перемещениях грунтовой массы.

В статических расчетах бетонных плотин учитывается технология и последовательность их возведения. Определяются температура и термонапряженное состояние бетонных блоков при столбчатом и послойном возведении плотины, прогнозируется последующее изменение напряжений в полностью или частично омоноличиваемых массивах по мере их остывания и подъема воды в верхнем бьефе.

Анализ поведения образовавшихся трещин или раскрывшихся строительных швов производится на базе теории хрупкого разрушения и теории систем с односторонними (не воспринимающими растягивающих нормальных напряжений) связями.

Для расчета подпорных стенок и шлюзовых камер предложены методы, учитывающие изменение жесткости сооружения после трещинообразования, поведение сооружения при появлении растягивающих нормальных напряжений на контакте; учитывается также навал стенок на грунт при сезонных колебаниях температуры.

Для расчетов прочности сооружений методами строительной механики с учетом случайных изменений механических характеристик материала, вызванных технологическими причинами, в рамках вероятностного подхода выбираются математические модели системы сооружение-основание.

Разрабатываются методы оптимального проектирования одномерных элементов гидротехнических сооружений. Начата разработка алгоритмов выбора оптимальной конструкции и армирования бетонных и железобетонных сооружений в рамках двухмерной схематизации.

Вопросы обеспечения надежности построенных, строящихся и проектируемых сооружений решаются в СССР путем проведения тщательного расчетного и модельного обоснования при проектировании, строительного и эксплуатационного контроля за сооружением, уточнения расчетных схем и выполнения ретроспективных расчетов построенных плотин с учетом данных натурных исследований и результатов обследований.

Общие вопросы организации и проведения натурных исследований плотин и других сооружений на Конгрессе специально не рассматривались. Основное внимание уделялось проведению наблюдений на конкретных сооружениях при возникновении на них аварийных ситуаций, а также исследованиям для контроля эффективности выполняющихся ремонтных работ. Однако некоторые из высказанных общих положений представляются существенными.

Весьма важным является правильный отбор для исследований показателей работы сооружений, которые определяют его нормальное эксплуатационное состояние или могут свидетельствовать об ухудшении состояния. Эти вопросы на конкретных примерах рассматриваются, например, в [Д-45] (Франция), в котором рекомендуется:

при организации натурных исследований, по возможности выбирать средства наблюдений, которые могут быть использованы в течение всего срока службы сооружения;

уделять особое внимание наблюдениям во время первого периода наполнения водохранилища, чтобы вовремя выявлять отклонения в поведении плотины;

по данным наблюдении в первые годы эксплуатации установить нормальное состояние сооружения, с которым должно производиться сравнение в последующие годы для выяснения тенденции изменения его поведения и состояния;

при назначении контролируемых показателей состояния сооружения учитывать не только средства измерений, но и способы обработки и анализа результатов наблюдений;

при выборе измерительной аппаратуры для контроля длительных процессов отдавать предпочтение более простым, но надежным приборам, невзирая на то, что они могут иметь несколько меньшую чувствительность.

В докладе отмечается, что выводы не должны основываться на анализе результатов измерений только одного какого-либо параметра. Диагностика сооружения должна опираться на весь комплекс результатов наблюдений.

Эти общие положения не представляются, однако, исчерпывающими. Действительно, важно не только правильно выбрать контролируемый показатель, но и обосновать место измерительных точек, выбираемое с учетом реальной последовательности возведения и загружения сооружения, характера воздействий на него специфических нагрузок и других факторов, которые должны учитываться при составлении проекта. Представляется пока что неосуществимым требование долговечности измерительной аппаратуры, не меньшей, чем срок службы сооружения. Тем не менее эти рекомендации заслуживают большого внимания.

23. НАБЛЮДЕНИЯ НА БЕТОННЫХ ПЛОТИНАХ

В организации наблюдений на бетонных и грунтовых плотинах при наличии некоторых общих моментов имеются и специфические особенности.

В [Д-45] предлагается при натурных исследованиях бетонных плотин важнейшими показателями работы плотин считать смещения и наклоны сооружений и оснований, скорости, расходы и давления фильтрационных потоков, деформации бетона и скалы, значения напряжений. Аналогичные указания содержатся в ряде других докладов. Рассмотрим их несколько подробнее.

С м е щ е н и е п л о т и н ы — это важнейший показатель работы сооружения, отражающий воздействие напора воды, температурного режима, а также усадку и ползучесть бетона. Измерение смещений дает возможность при сравнении их с расчетными значениями выявлять нарушения в работе сооружения.

Авторы различают абсолютные смещения сооружения относительно точек, находящихся за его пределами (они измеряются геодезическими методами с точностью до 1 мм), и относительные смещения, т.е. изменения расстояния между точками на самом сооружении (измеряемые при помощи прямых и обратных откосов, обычно с точностью до 0,1 мм). Анкеры обратных отвесов заделывают на достаточно большую глубину, часто до 40 м, а в исключительных случаях до 50 м. Расположение смотровых галерей на разных отметках дает возможность наблюдать за деформациями всей плотины.

И з м е р е н и я с м е щ е н и й о с н о в а н и я особенно сложны, поскольку они обычно незначительны. Для выявления опасного их смещения необходимы более точные приборы. Для наблюдений за смещениями поверхности скального основания устраивают галереи и бурят скважины, в которых устанавливаются обычные стержневые или проволочные измерительные приборы.

Наблюдения за фильтрацией через тело плотины и е е о с н о в а н и е выполняются сравнительно просто, интерпретация данных наблюдений используется в качестве основного средства контроля нагрузок, развития трещин в бетоне или в скале основания и т.д.

Наблюдения за противодавлением в основании плотины позволяют лучше понять фильтрационный режим в сооружении. Благодаря разработке новых приборов теперь стало возможным проводить и непрерывные измерения.

Напряжения в бетоне и скале практически можно определять только косвенным путем — по относительным деформациям, определение которых затрудняется из-за сложности физико-химических процессов, происходящих в материале[1]. Использование экстензометров (по принятой в СССР терминологии — преобразователей линейных деформа-

[1] Метод Карлсона для непосредственного измерения напряжения, а также компенсационный метод, предложенный в СССР В.И. Кравцовым и С.Я. Эйдельманом, не нашли в практике исследований широкого применения.

ций) позволяет обнаружить деформации растяжения, приводящие к образованию трещин, и дать важные сведения о поведении плотины. Однако для проведения наблюдений в течение всей жизни сооружения даже самые надежные существующие закладные приборы непригодны.

Для наблюдения за наклоном плотины и поворотом блоков бетонирования предпочитают использовать геодезические методы вместо клинометров из-за сложности применения последних.

В настоящее время почти все большие плотины снабжаются контрольно-измерительными приборами. Так, в плотине Фонтана, как указывается в [Д-1], в процессе ее возведения было заложено 400 различных измерительных приборов, в том числе 320 датчиков деформаций и напряжений и термометров сопротивления. Наблюдения по заложенным приборам велись непрерывно. Около половины всех приборов уже почти 30 лет работают и дают достоверные данные. После обнаружения в плотине трещин на ней были установлены еще некоторые приборы, главным образом щелемеры.

Вместе с наблюдениями по приборам ведутся также большие лабораторные работы для определения качества, механических и структурных характеристик бетона внутри плотины. Для этого из тела плотины выбуриваются керны.

В плотине Вульф Крик [Д-5] во время восстановительных работ было поставлено около 300 пьезометров и несколько инклинометрических труб.

На плотине Кельнбрайн можно ежедневно получать 600 данных о показаниях приборов. Предусмотрена автоматическая запись отсчетов по приборам и дистанционная передача их на ЭВМ центрального поста, где выполняют их обработку и дают оценку состояния плотины.

Ниже приводятся несколько примеров размещения контрольно-измерительной аппаратуры и некоторые результаты проведенных наблюдений.

Контрфорсная плотина Пракана [Д-25] (Португалия) высотой 60 м построена в 1948—1951 гг. (рис. 52). Основание плотины — кремнистые сланцы, неоднородные, но достаточно прочные. Под верховой гранью плотины устроена цементационная завеса глубиной 30 м.

Для наблюдений за плотиной установлены контрольно-измерительные приборы. Наблюдения начались в период строительства плотины и ведутся регулярно уже 28 лет. По данным наблюдений проведены большие расчетно-теоретические исследования. Они позволили сформулировать следующие положения:

бетон на стенках контрфорсов и на низовых гранях оголовков не поврежден, но на верховой грани плотины отмечена сильная трещиноватость в горизонтальном и вертикальном направлениях. Такое же растрескивание наблюдается и в шахтном водосбросе;

необратимые деформации за 21 год достигли следующих значений: смещения контрфорсов в сторону нижнего бьефа 25 мм, подъем 16 мм;

рассеяние теплоты гидратации в оголовке контрфорса закончилось примерно через год после остывания его стенки;

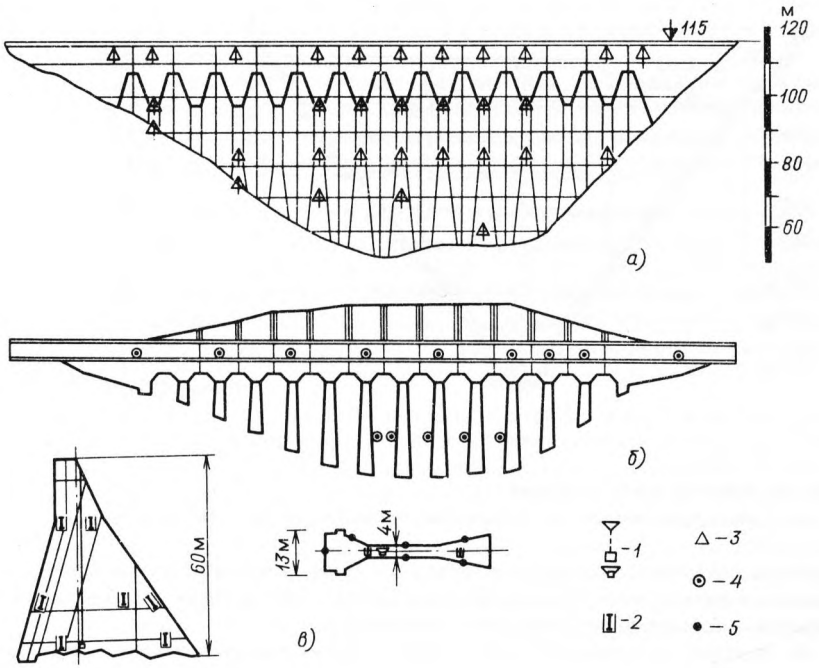


Рис. 52. Плотина Пракана. Проект расстановки аппаратуры для наблюдений за деформациями и напряжениями:

а — вид с нижнего бьефа; *б* — план; *в* — контрфорс; *1* — отвес; *2* — струнный тензометр; *3* — неподвижная марка; *4* — нивелировочный репер; *5* — измерительная точка

измеренные в 1973 г. напряжения на верховой грани плотины при опорожненном водохранилище оказались равными: вертикальные сжимающие 2 МПа, горизонтальные растягивающие 3 МПа;

фильтрация через основание и тело плотины, а также противодавление в основании находятся в пределах нормы;

анализ образцов бетона показал, что вода в водохранилище умеренно агрессивна, фильтрующаяся вода содержит небольшое количество сульфатов.

В а р о ч н о й п л о т и н е К о н т р а (Швейцария) [ОД-5] размещены розетки и приборы для измерения деформаций (рис. 53). Плотина высотой 220 м принята в эксплуатацию в 1965 г. и с тех пор находится под постоянным наблюдением. Выполняются измерения температуры, деформаций плотины и основания, противодавления и фильтрационных расходов, устанавливаются напряжения в бетоне.

Н а б л ю д е н и я з а а л л ю в и а л ь н ы м о с н о в а н и е м п л о т и н ы ГЭС К а д е р у с (Франция) описаны в [Д-45]. Плотина образована

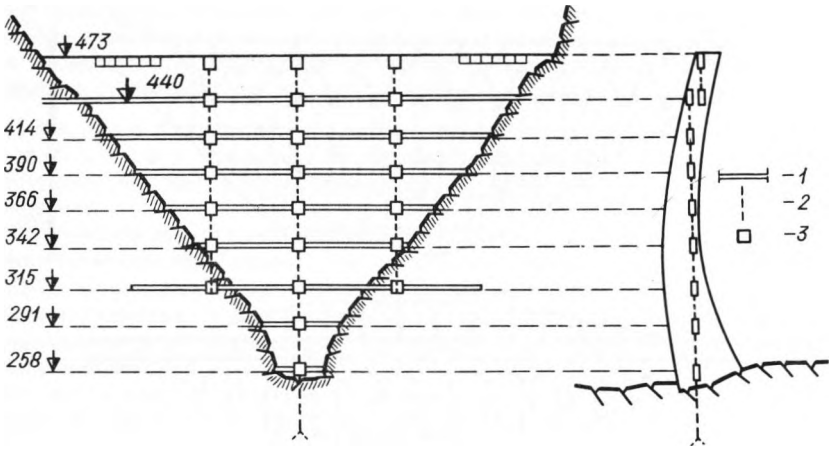


Рис. 53. Арочная плотина Контра:

1 — смотровая галерея; *2* — обратный отвес; *3* — измерительная точка

шестью секциями размером каждая 6*17 м, в каждой из которых установлен гидроагрегат. В основании сооружения залегают глинистые плиоценовые сильно деформируемые отложения.

В процессе наблюдений определялись вспучивание и осадка основания, напряжения и поровое давление в основании, угол наклона секций.

Вспучивание глины происходило с начала выемки котлована, бетонирование приостановило его, и затем начался процесс уплотнения — большее в центре котлована и меньшее в крайних секциях.

Наблюдения за арочной плотиной Толла высотой 50 м [Д-37] показали, что в процессе подъема уровня воды в водохранилище наблюдался скачок в показаниях экстензометра: это был предупреждающий сигнал, отметивший нарушение монолитности бетона в плотине. При последующем подъеме воды в бетоне обнаружилась трещина. Появление трещины зафиксировано также геодезическими измерениями. В дальнейшем трещинообразование в плотине настолько увеличилось, что пришлось плотину по существу перестроить (см. гл. 3).

Наблюдения за сдвигом в верхнем бьефе непосредственно у каменнонабросной плотины Дербенли-Кхан (Иран) высотой 100 м показали, что наполнение водохранилища вызвало реактивацию старого оползня, расположенного непосредственно выше плотины. Это создало прямую угрозу паводковому водосбросу и водоприемным сооружениям. Береговое примыкание плотины сложено известняковым мергелем, песчаником, глиной и содержит осыпи. Деформации оползня измерялись экстензофорами в девяти скважинах; в двух скважинах пьезофорами определялось поровое давление. Измерения показали, что всякое понижение уровня воды сопровождается осадкой основания, достигающей на нижних двадцати метрах скважин нескольких миллиметров.

Уменьшение эффективности дренажа в секции гравитационной плотины Герледан высотой 55 м описано в [ОД-25].

Наблюдения ведутся при помощи пьезометров. На основании их показаний можно констатировать, что медленное поднятие пьезометрического уровня происходит как следствие снижения фильтрационного расхода. Стало ясно, что необходимо предпринять меры по восстановлению засоренного дренажа.

На арочной плотине Вуглан (Франция) было отмечено в 1978 г. распространение трещины приборами, установленными в подошве секции. Эта плотина снабжена большим количеством измерительных средств: марками, отвесами, тензометрами, пьезометрами, мерными водосливами. Появление этой трещины, не сказавшей влияния на поведение сооружения, было обнаружено по данным наблюдений за расходом фильтрации.

Исследования влияния выщелачивания извести из бетона на состояние испанской гравитационной плотины Лос Пеарес высотой 94 м, сданной в эксплуатацию в 1955 г., описаны в [Д-46].

Вблизи верховой вертикальной грани, приблизительно на равных расстояниях по высоте, в плотине устроены четыре горизонтальные потерны, соединенные между собой и с основанием вертикальными дренами. В связи с тем, что в потернах и дренах наблюдался большой осадок извести, в 1976 г. были начаты исследования с целью определения влияния этого явления на прочность бетона и, следовательно, на безопасность плотины.

При организации исследований исходили из следующих соображений. При схватывании портландцемента выделяется около 20% (от массы цемента) гидрата окиси кальция, который заполняет пустоты вязкой микроструктуры силикатов, уменьшает проницаемость бетона и создает щелочную среду, предотвращающую коррозию арматуры. При неправильной же дозировке количество свободной извести может оказаться больше 20%. Вода, фильтрующая через бетон, может растворить и вынести лишнюю известь, но, соприкасаясь с воздухом, известь может выпадать в осадок в виде углекислого кальция. В этом случае водопроницаемость бетона увеличивается. Плотина Лос Пеарес возводилась в условиях, которые заставляют предполагать наличие в бетоне повышенного количества извести. Это могло привести к увеличению проницаемости бетона и фильтрации, снижению прочности бетона и выходу из строя дренажной системы.

Целью проведенных исследований было определение качества бетона в зоне между верховой гранью плотины и стенками горизонтальных потерн. После очистки от грязи всех галерей и дрен, которые не были забиты углекислым кальцием, были устроены коллекторы, что позволило измерять расход в дренах на отдельных участках плотины.

Затем были проведены исследования бетона. Определялись три параметра: электрическое сопротивление, скорость прохождения ультразвуковых (сейсмических) волн и водопроницаемость бетона. Для фильтрационных исследований пробурили семь скважин, из которых были извлечены керны, подвергнутые механическим испытаниям.

В результате анализа и сопоставления всех исследований, включая лабораторные анализы содержания извести в фильтрующейся через бетон воде, получили распределение качества бетона по. зонам. Исследователи пришли к выводу, что в настоящее время состояние плотины не требует срочных мероприятий по ее усилению, но необходимо продолжать тщательные наблюдения.

24. НАБЛЮДЕНИЯ НА ПЛОТИНАХ ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Важнейшими показателями состояния и работы насыпных плотин в [Д-45] считаются горизонтальные смещения, осадки и поровое давление в насыпи и основании (особенно аллювиальном). Осадки, проявляющиеся, как правило, во время строительства и в первые годы эксплуатации, измеряются геодезическими методами при помощи гидростатических нивелиров, телескопических глубинных марок, электромагнитных зондов.

В плотинах с экраном особое внимание следует обратить на измерение его деформаций.

Наблюдения за изменениями порового и фильтрационного давления в насыпи и в основании выполняют при помощи датчиков давления и пьезометров.

Наблюдения за фильтрацией в насыпных плотинах имеют такое же важное значение, что и в бетонных. Об изменении фильтрации в аллювиальном основании можно судить лишь косвенно, на основании измерений пьезометрами среднего уклона уровня грунтовых вод.

Авторы доклада указывают на большую важность визуальных наблюдений за образованием трещин, фильтрацией, за разрушением материала, высачиванием влаги и т.п.

В [Д-7] указывается, что при сложных геологических и гидрогеологических условиях в основании единственным средством, дающим возможность проследить за процессом деформации плотины, является проведение контрольных наблюдений при помощи измерительной аппаратуры.

На рис. 54 приведено расположение контрольно-измерительной аппаратуры, установленной на одной из венгерских плотин из грунтовых материалов, построенной на переслаивающихся осадочных породах. Проводились измерения горизонтальных смещений открытых поверхностей, определялись осадки основания плотины, фильтрация через тело и основание плотины, температура и химический состав фильтрующей воды.

Для оценки фильтрационной устойчивости плотины использовались показания системы пьезометров, а также данные о фильтрационных расходах и о температуре фильтрующей воды.

В [Д-28] приведено подробное описание натурных наблюдений на двух плотинах из грунтовых материалов с ядром — Соянганг и Андонг (рис. 55), построенных в 70-х годах в Южной Корее. Одной из целей организации наблюдений было сопоставление поведения плотин, близких по конструкции, но возведенных из разных материалов.

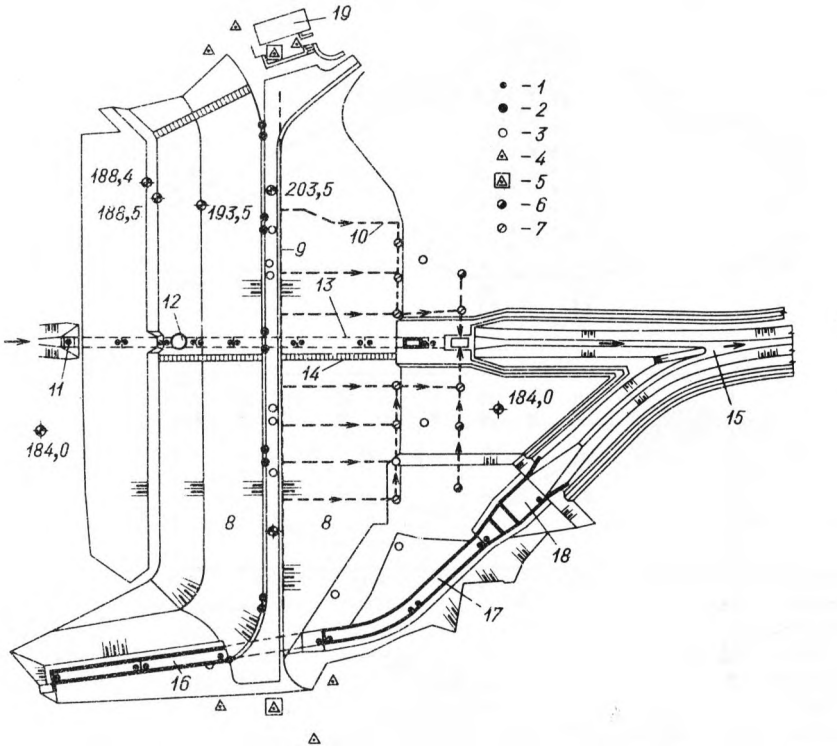


Рис. 54. Схема расположения контрольно-измерительной аппаратуры на плотине из грунтовых материалов:

1 — поверхностные марки для измерения осадок; *2* — глубинные марки; *3* – пьезометрические скважины; *4* - контрольные реперы; *5*– базовый репер для измерений горизонтальных и вертикальных смещений; *6* — разгрузочные скважины (колодцы); 7 — смотровые колодцы для контроля дренажной сети; *8* – глинистое тело плотины; *9* — вертикальная двухслойная дрена; *10* — горизонтальный дренаж; *11* — донный водосброс; *12*— башенный водозабор; *13* — туннельный водовыпуск; *14* — лестница; *15* — отводящий канал; *16* – паводковый водосброс; *17* — лоток; *18* – водобойный колодец; *19* — операторская

Параметры плотин следующие:

	Плотина Соянганг	Плотина Андонг
Годы строительства.	.1967—1973	1971-1976
Высота плотины, м	.123	83
Длина по гребню, м	.447	542
Материал:		
ядра	Глина	Выветрелый гранит
фильтров	Гравий с песком	Речной песок
призм	Гравий с песком	Выветрелый гранат
наброски на призмах	Карьерный камень	Карьерный камень

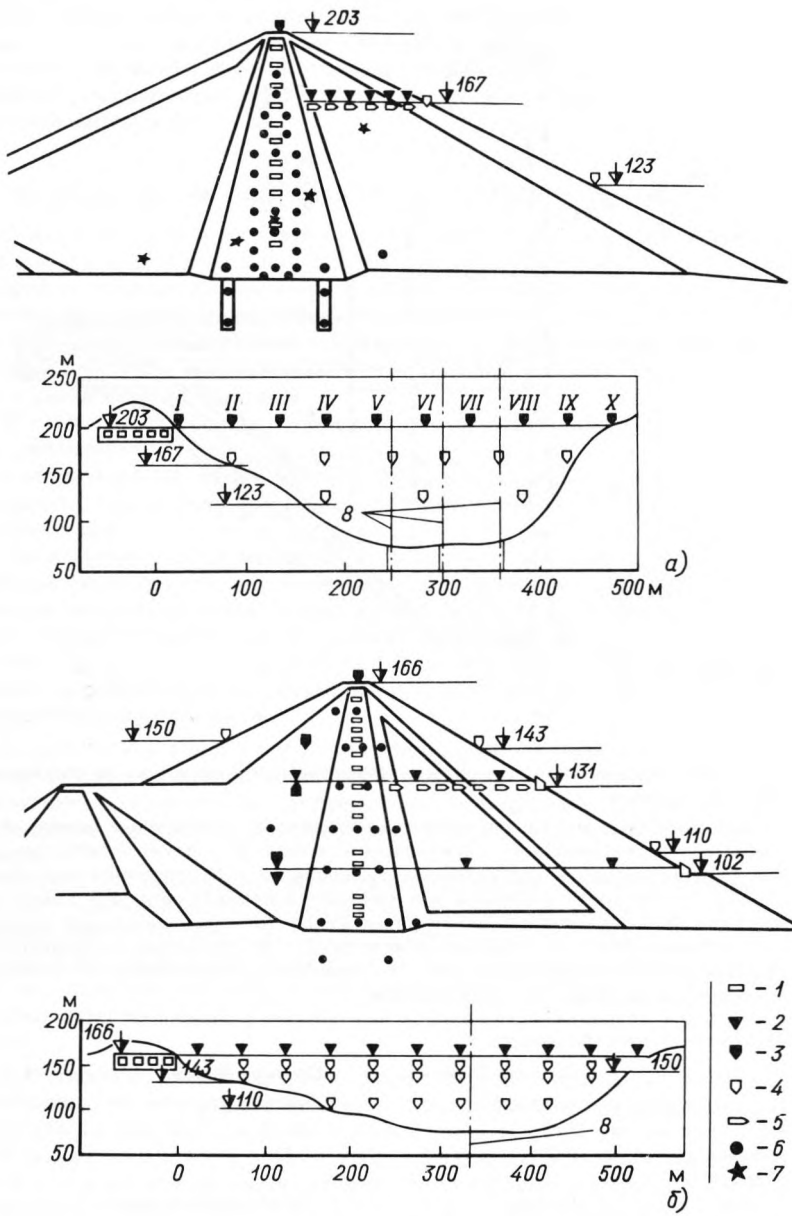


Рис. 55. Размещение контрольно-измерительной аппаратуры:

а — в плотине Соянганг; *б* — в плотине Андонг; *1* — телескопические марки; 2 — пьезометры; *3* — марки на гребне; *4* — поверхностные марки; *5* — деформометры: *6* — пьезодинамометры; *7* — месдозы грунтовые; *8* — измерительные створы

Таблица 11. Наблюдаемые показатели и установленная контрольно-измерительная аппаратура

Наименование	Плотина Соянганг			Плотина Андонг		
	Количество, шт.:			Количество, шт.:		
	измерительных сечений	измерительных створов	приборов	измерительных сечений	измерительных створов	приборов
Поровое давление	3	—	103	1	—	24
Напряжение в грунте	3	—	15	—	—	—
Осадка	3	—	3	1	—	1
Горизонтальное смещение тела плотины	3	—	3	1	—	1
Относительная осадка тела плотины	3	—	3	1	—	2
Осадка гребня плотины	—	1	10	1	—	11
Осадка поверхности плотины	—	2	9	—	3	24
Итого:	15	3	146	5	3	63

В результате проведенных исследований получены обширные данные по всем наблюдавшимся показателям (табл. 11). Некоторые данные сопоставлены с расчетными. Обе плотины находятся в хорошем состоянии. Измерительные приборы работают нормально, хотя приборы прямого наблюдения сохраняются лучше закладных. Так, из 102 пьезодинамометров типа "Карлсон" за короткий срок вышло из строя 18, т.е. 17,6%, в то время как из 24 трубчатых пьезометров вышел из строя только один, т.е. 4,2 %.

На плотине Зокколо из грунтовых материалов с асфальтобетонным экраном [Д-41] установлено большое количество контрольно-измерительных приборов для измерений вертикальных и горизонтальных смещений гребня и граней плотины, ее внутренних зон; вертикальных и горизонтальных смещений и наклонов смотровой галереи в основании экрана; вертикальных и горизонтальных смещений и деформаций поперечной дренажной галереи в основании плотины; вертикальных смещений верха зуба и сопряжения зуба со смотровой галереей; уровней воды и пьезометрических напоров в теле плотины и грунте основания; фильтрационных расходов.

Проведенные натурные исследования позволили установить наличие повреждения в зоне сопряжения экрана со шпунтом, которое было затем устранено цементацией в зоне верховой периметральной галереи.

25. НОВЫЕ МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Новые методы исследований динамических показателей разрабатываются в Италии. Как указывается в [ОД-7], создана экспериментальная программа определения динамических параметров

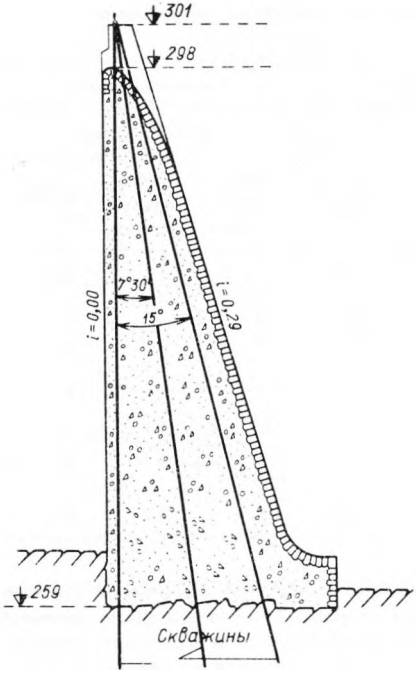


Рис. 56. Плотина Туррите ди Галликано. Расположение геофизических скважин в поперечном сечении

плотин, находящихся в эксплуатации. Для каждого особо ответственного сооружения составлялась карта идентификации. Для этого на каждой плотине проводятся испытания с применением вынужденной вибрации, создаваемой двумя механическими вибраторами, установленными на гребне плотины. Реакция сооружения воспринимается высокочувствительными датчиками, установленными в 48—150 точках (в зависимости от размеров плотины). Исследования ведутся в диапазоне частот от 2 до 15 Гц. По показаниям датчиков определяют собственную частоту и форму колебаний плотины. На ряде плотин такие испытания уже проведены и получены очень важные данные.

Для наблюдений за изменением свойств бетона и образованием трещин в [ОД-5] рекомендуется использовать геофизический метод и метод, основанный на измерении электрического сопротивления материала.

Опыт успешного применения геофизического метода исследования целостности бетона плотины, основанного на различии скорости прохождения ультразвуковых волн, описан в [Д-40]. Эти исследования были проведены в 1972—1973 гг. в Италии на арочной плотине Туррите ди Галликано высотой 42 м. Как уже было сказано в гл. 3, вскоре после возведения обнаружилась фильтрация через плотину, составлявшая, по измерению в ее основании, несколько литров в секунду. Лабораторные исследования кернов показали значительную пористость, наличие крупных пустот, признаки повреждений и значительные изменения механических характеристик бетона.

После анализа возможных методов исследования было решено использовать ультразвуковой метод, основанный на изучении характеристик прохождений в бетоне звуковых сигналов, создаваемых специальными электроакустическими датчиками.

Чтобы получить возможно больше информации, было пробурено 24 скважины диаметром 75 мм в 8 вертикальных сечениях на расстоянии 5—6 м между ними во всей высоте плотины с забуриванием в скалу основания на несколько метров (рис. 56).

Измерения ультразвуковым способом производились через каждые 25 см по глубине опускавшимся зондом, состоявшим из цилиндра диаметром 45 мм, выполненного из звуконепроницаемого материала, на концах которого размещены два цилиндра из пьезоэлектрического материала, один из них генерирует импульсы и работает как передатчик, другой работает как гидрофонический приемник. Длина базы измерений между соседними скважинами была переменной, но не более 6 м.

В комплект контрольно-измерительных приборов входил осциллограф, оборудованный поляроидной камерой, присоединенной к датчику интервалов времени с цифровой шкалой. Запись производилась при включении генератора акустических сигналов. Время измерялось датчиком интервалов. Скважины, заполненные водой, обеспечивали постоянные условия акустической связи и, следовательно, передачи сигналов между датчиками и телом плотины.

Анализ осциллограмм дал сведения о скорости распространения ультразвуковых волн, являющейся, как известно, физической характеристикой, зависящей от упругости и пористости бетона.

Осциллограммы фиксировали распределение в исследовавшемся бетоне трех групп упругих волн — продольных, поперечных и поверхностных. Первые обладают самой большой скоростью, последние наименьшей. Поперечные волны с гораздо большей амплитудой в крепком бетоне, чем продольные, являются наиболее чувствительными компонентами звуковых сигналов при выявлении дефектов, пористости и трещин. Они могут передаваться только ненарушенным материалом, а трещины, особенно в перпендикулярном к распространению волн направлении и заполненные водой, представляют непреодолимое препятствие для поперечных волн. Продольные и поверхностные волны в этих условиях лишь ослабляются и замедляются. Измерения дали информацию об их скорости и затухании.

Полученные данные ультразвуковых исследований (рис. 57) для определения степени повреждения могут использоваться только при наличии однозначного соответствия между скоростью звуковых волн и техническими характеристиками исследуемого материала. Это было достигнуто многочисленными лабораторными испытаниями образцов из тех же скважин, которые использовались при ультразвуковых исследованиях. Было исследовано более 3000 кернов. Анализ результатов позволил установить граничную скорость распространения сигналов $V_г$ = = 3750 м/с, позволяющую интерпретировать данные натурных измерений, т.е. устанавливать различие между хорошим и плохим бетоном. Так, для бетона классов *A и B* (плотность δ = 2220—2180 кг/м^3) v = 4200—3950 м/с, для требующих усиления бетонов классов C, *D* и *E* (δ = 2090—2000 кг/м^3) *V*< 3600 м/с.

После установления зависимости между скоростью сигнала и физико-механическими характеристиками бетонов (плотностью, коэффициентом фильтрации, модулем упругости, временным сопротивлением на сжатие) были проведены натурные исследования, результаты которых подтвердили необходимость выполнения укрепительных работ. Впоследствии весь цикл наблюдений был повторен. Это дало возможность оценить эффектив-

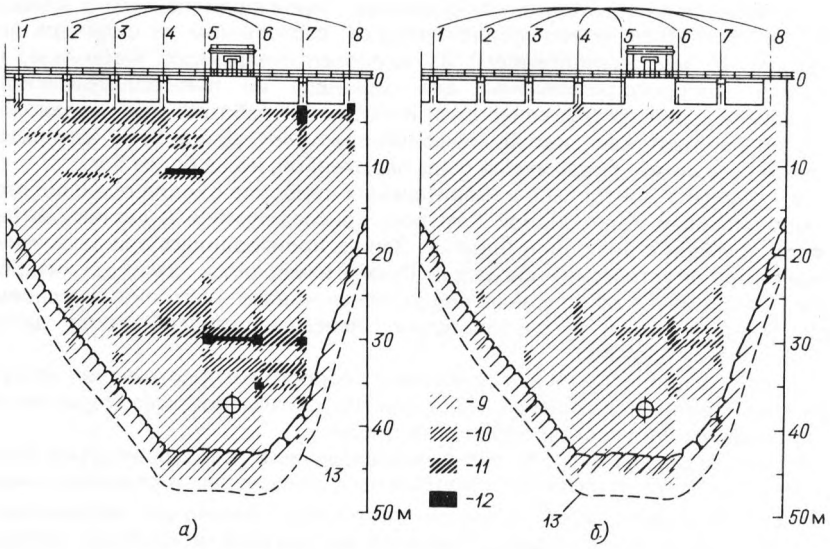


Рис. 57. Плотины Туррите ди Галликано. Скорости распространения ультразвуковых волн в бетоне плотины. Вид с верхнего бьефа:

а — до цементации; *б* — после цементации; *1—8* места расположения скважин для геофизических исследований; скорости распространения упругих волн: *9* — 3750 м/с; *10* — 3500—3750 м/с; *11* — 3250—3500 м/с; 12 — 3250 м/с; *13* — граница исследованной скалы в основании

ность цементации. Результаты новых исследований показали, что качество бетона улучшилось — увеличилась плотность на 5—9 %, временное сопротивление на 28—50 %.

26. НОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

О новых измерительных приборов сообщается в [Д-45].

Геодиметры — электронно-оптические приборы для измерения расстояний от 10 до 1000 м и более с точностью до ±5 мм (точные геодиметры) и до ±1 мм (высокоточные геодиметры). В настоящее время появились во Франции. В докладе описания прибора нет.

Дистофор (рис. 58) — закладной прибор для измерения линейных деформаций; он выполнен в виде трубки, состоящей из элементов, соединенных герметичными муфтами. По длине трубки располагаются датчики для измерения смещений (до одного на метр). Работа этих датчиков основана на явлении резонанса двух электромагнитных соосных цепей: наружной и внутренней. Наружная цепь образована электромагнитом и емкостью. Относительное смещение цепей изменяет индуктивность внутренней цепи и, следовательно, частоту ее собственных колебаний, измерение которой дает сведения о значении смещения на данной базе

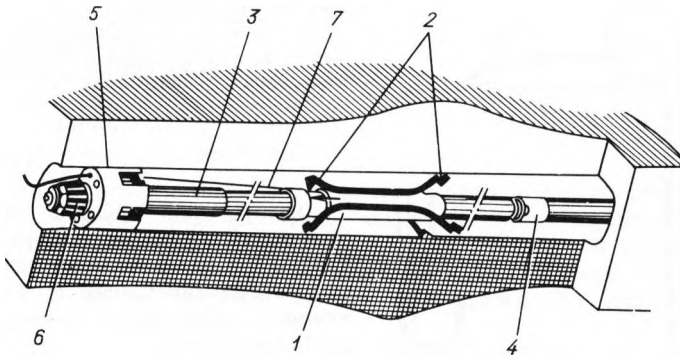


Рис. 58. Дистофор:

1 — металлический патрубок; *2* — пружина для прижатия патрубка к стенкам скважины; *3* — стержень; *4* — герметичная муфта; *5* — головка; *6* — герметичное соединительное устройство; *7* — устройство для отжатия пружины

прибора. Прибор закладывается в скважину, пробуренную в плотине или основании, и заделывается одним концом. Точность измерения датчиком составляет 0,02 мм. В настоящее время на французских плотинах заложено 100 приборов длиной до 45 м, предполагается закладка приборов длиной 100 м.

Экстензофор (рис. 59) — передвижной зонд с такими же электромагнитными датчиками, что и в дистофоре.

Пьезофор — устройство, которым можно проводить непрерывные пьезометрические измерения.

В скважину вводится герметичная расширяющаяся оболочка, которая при наполнении водой упирается в стенки скважины и полностью перекрывает скважину в продольном направлении. Передвижной зонд в оболочке позволяет изолировать небольшой участок скважины с помощью двух уплотнителей. Выделенная таким образом полость затем изолируется: по обе стороны от оболочки устанавливается давление, равное поровому давлению в данной точке.

В настоящее время основаниям плотин уделяется не меньше внимания, чем самим плотинам: в Италии, как сообщается в [ОД-7], для наблюдений за основаниями на возможно большую глубину созданы также приборы, как длиннобазисные струнные тензометры с базой до 50—60 м, водоприемники пьезометров, обратные отвесы, заанкеренные на большой глубине. Разработаны также сложные геофизические методы для проверки изменений деформативных характеристик грунта.

Для измерения деформаций, напряжений и температуры в теле плотин разработаны длиннобазисные струнные тензометры, дистанционные приборы для измерения осадок в недоступных местах, инклинометры со струнными датчиками, специальные уровнемеры.

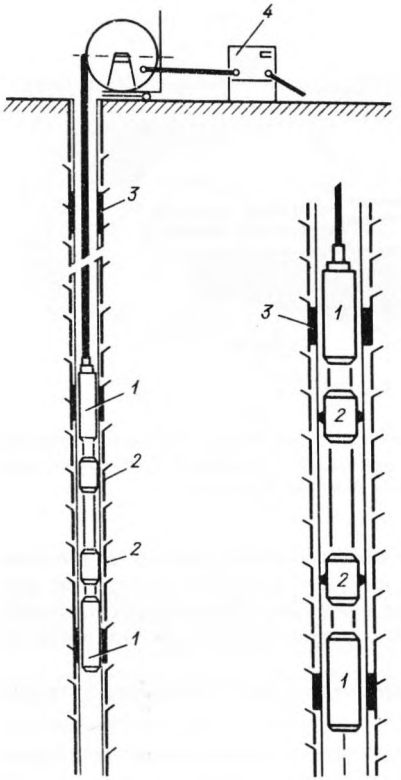


Рис. 59. Экстензофор:

1 - датчики; 2 —центрирующее устройство; *3* — металлическая втулка; *4* — регистрирующая аппаратура

Значительный прогресс наблюдается в геодезических приборах, основанных на ранее не применявшихся физических принципах, с помощью которых достигается высокая точность измерений.

Основное нововведение в наблюдениях на плотинах за последние 10 лет - автоматизация измерений с дистанционным считыванием отсчетов и записью показаний приборов. В связи с этим представляет интерес описанная в [Д-18] система автоматизации наблюдений на примере арочной плотины Кельнбрайн. Плотина высотой 200 м построена в густонаселенном районе. Система рассчитана на приборы с электрическим выходным сигналом или приборы, к которым можно присоединить датчики с электрическим выходным сигналом.

На плотине Кельнбрайн установлено около 350 таких приборов для измерения деформаций и напряжений в теле плотины и основании, порового и фильтрационного давления в основании, фильтрационного расхода, а также для сбора некоторых метеорологических данных и фиксации уровня воды в водохранилище.

Однако некоторые совершенно необходимые измерения, такие как фиксация раскрытия швов и трещин, определение углов наклона блоков плотины и многие другие все еще приходится выполнять вручную, что сказывалось на регулярности проведения измерений, возможно и на точности их выполнения.

На плотине Кельнбрайн кабели от всех приборов были выведены на 9 пультов, каждый прибор может быть вызван селекторным переключателем. Для проверки правильности вызова прибора на схеме загорается соответствующий символ. Все данные измерений по приборам, а также метеорологические данные и уровень воды в бьефах преобразуются в блоке логической обработки и хранятся в запоминающем устройстве. Сбор всей информации в этом устройстве происходит один раз в день. Далее по каждой точке измерения для запоминания выбираются следую-

щие данные:

ежедневное среднее значение;
минимальное значение;
максимальное значение;
значение в 0 ч;
значение в 12 ч;
значение, измеренное вручную.

Существует дополнительное устройство ввода в форме электронной записной книжки, представляющей собой портативную коробочку с клавиатурой, светящимся индикатором и запоминающим устройством. Все собранные данные хранятся на двух идентичных дисках, что гарантирует от случайного стирания данных наблюдений. Эти данные могут быть выведены и на дисплей.

К сожалению, подобные системы на плотинах являются пока что исключением.

27. ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПЛОТИН

Целью исследований и наблюдений является оценка и обеспечение безопасности плотин. Как указывается в [ОД-7], эксперименты, начатые в конце 60-х годов, уже позволяют удовлетворительно воспроизводить работу бетонных плотин с помощью детерминированных математических моделей, базирующихся на упрощенных расчетных предпосылках. Значительно лучшие результаты дает математическая модель, основанная на методе конечных элементов. В ряде докладов приводятся ссылки на выполнение поверочных расчетов этим методом. Во всех подобных расчетах должны учитываться данные исследований и наблюдений.

Например, финское Национальное управление [Д-10] водного хозяйства разработало регистр—специальный перечень необходимых данных, регулярно поступающих со строительства в лабораторию и после обработки обратно на строительство. Эти данные используются для расчетов на ЭВМ и анализа состояния строящихся сооружений.

На стадии проектирования результаты расчетов на ЭВМ могут использоваться и для оценки пригодности выбранных строительных материалов, уточнения размеров элементов плотины и т. п. В процессе строительства они позволяют контролировать качество выполняемых работ, соответствие их нормам и техническим условиям.

В период эксплуатации плотины регистр используется для определения состояния элементов сооружения, которые вызывают опасение с точки зрения безопасности сооружения.

Таким образом, на основе собранных данных, заложенных в память ЭВМ, можно объективно оценивать состояние плотины, определить меры, требующиеся для обеспечения ее безопасности, если в этом возникла необходимость.

В последние 15 лет на многих итальянских плотинах [Д-44] используется для постоянного контроля за деформациями математическое моделирование. Полученные в расчетах значения параметров сравнивают с наблюденными в натуре. В результате сравнения за более или менее про-

должительное время цифровых значений или графиков изменения показателей можно сделать вывод о состоянии сооружения. Однако не следует забывать, что любая методика оправдывает себя, если она будет достаточно простой для персонала, не обладающего глубокими знаниями самой методики, и будет давать быстрые ответы. Для этого авторы предлагают ряд упрощающих предположений, уже много лет применяющихся повсеместно при проведении натурных исследований.

Далее в докладе приводятся подробное описание математической модели плотины и результаты сравнения значений показателей, полученных на моделях шести итальянских арочных и гравитационных плотин, с наблюденными в натуре. Рассчитанные и полученные в результате наблюдения значения показателей оказались близкими между собой.

Определение деформаций описанным способом должно дополниться наблюдениями за фильтрацией, развитием трещин и т.п. В [Д-34] (КНР) описывается постановка исследований в арочной плотине Куанши высотой 80 м, которая, как показали исследования, находится в хорошем состоянии.

Глава 7

ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ ПЛОТИН

Вопросы организации и анализа опыта проведения контроля безопасности плотин освещались на конгрессе в ряде докладов, девять в основном были посвящены этим вопросам, а в четырех докладах описана организация государственного контроля в различных странах.

Однако единого взгляда по этим вопросам еще не сложилось. В докладах содержится ряд общих положений об обязательном контроле безопасности плотин на государственном или ведомственном уровне. Вместе с тем имеются и различия, отражающие административно-правовые и технико-экономические условия в отдельных странах. Использование опыта организации и проведения контроля, изложенного в докладе на конгрессе, может помочь в организации контроля в конкретных условиях нашей страны.

Вопрос о критериях безопасности плотин, поднимавшийся в некоторых выступлениях на конгрессе, также не нашел своего окончательного решения.

В [Д-17] обстоятельно изложены существующие методы проведения регулярных наблюдений за состоянием плотин в Северной Шотландии. В системе Гидроэлектрического управления страны функционируют 84 плотины, на которые распространяется британское законодательство по безопасности водохранилищ. В их числе 58 гравитационных, 9 контрфорсных, 4 арочные (из них одна из предварительно напряженного бетона), 6 земляных, 6 каменнонабросных и 6 комбинированных — гравитационных, пригруженных с низовой стороны каменной наброской. Из перечисленных плотин лишь 56 внесены в Международный Регистр (МРП). Только 9 из общего числа плотин построены более 30 лет назад, остальные можно счи-

тать современными. Несмотря на умеренность климата Шотландии, многие сооружения эксплуатируются в тяжелых условиях — в зимние месяцы ночные морозы резко сменяются положительными дневными температурами с интенсивной солнечной радиацией, т.е. ежесуточно происходит замораживание и оттаивание бетона.

К 1971 г. накопились результаты десятилетних натурных наблюдений за поведением плотин, что позволило уточнить основные принципы и задачи контроля за всеми плотинами Управления. На основании полученных результатов предложено проводить следующие пять видов обследований.

О с м о т р ы , предусмотренные законом, должны проводиться не реже 1 раза за 10 лет, обязательно инженерами, не участвовавшими в проектировании или строительстве плотины и, следовательно, не отвечающими за их повреждения.

К о н т р о л ь н ы е о с м о т р ы , выполняемые через 2—5 лет — в зависимости от условий работы и поведения плотины, ее значения для региона. На плотинах с внешними повреждениями они проводятся чаще (например, ежегодно). Осмотры проводятся инженерами Управления — квалифицированными специалистами не менее чем с 10-летним стажем работы. В заключение дается оценка условий эксплуатации сооружения, определяется объем и требуемые сроки выполнения необходимых профилактических или ремонтных работ.

О с м о т р ы с интервалом от 3 до 12 мес, выполняемые эксплуатационным персоналом. При их проведении в основном рассматриваются вопросы эксплуатации сооружения, но в случае обнаружения отклонений от нормальной работы об этом немедленно должно оповещаться Управление.

Е ж е г о д н ы е о с м о т р ы гидромеханического оборудования

Е ж е н е д е л ь н ы е в и з у а л ь н ы е о с м о т р ы сооружений эксплуатационным персоналом.

Кроме того, еженедельно должны проводиться измерения расходов фильтрации через тело плотины и определяться состав примесей в профильтровавшейся воде (мутность, химический состав).

При контроле с помощью измерительных приборов устанавливаются осадки, горизонтальные и вертикальные смещения, повороты, прогибы сооружений, а также относительные деформации и температура.

В табл. 12 приводятся данные об установленной Управлением частоте снятия показаний приборов.

В 1971 г. Гидроэлектрическое управление создало специальную группу по изучению паводков.

Во Ф р а н ц и и , к а к у к а з ы в а е т с я в [Д-22] и [Д-23], в 1966 г. с о з д а н П о с т о я н н ы й т е х н и ч е с к и й к о м и т е т п о п л о т и н а м . Специальными постановлениями регламентируется контроль за гидротехническими сооружениями государственными органами, установлено число контрольных осмотров плотин и правила составления документации: протоколов осмотра, книг записей, отчетов по наблюдениям и анализу поведения сооружений. Все плотины выше 20 м и плотины, образующие водохранилище объемом более 15 млн. $м^3$, поставлены под особый контроль специальной службы, которая является государственным учреждением, независимым от эксплуатирующих организаций.

Таблица 12. **Порядок контроля за поведением плотин**

Состояние и поведение плотины	Тип плотин	Возраст плотины	Состав контроля и его частота
Нормальное	Арочная	Первые 5 лет	Снятие показаний всех приборов ежеквартально
Нормальное		Более 5 лет	Снятие показаний всех приборов 2 раза в год
Нормальное	Гравитационная и контрфорсная	Первые 5 лет	Снятие показаний всех приборов 2 раза в год
Нормальное	То же	Более 5 лет	Снятие показаний всех приборов 1 раз в 5 лет
Нормальное	Из грунтовых материалов	Первые 5 лет	Нивелирование 2 раза в год, измерение порового давления ежемесячно (только на земляных . плотинах)
Нормальное	То же	Более 5 лет	Нивелирование 1 раз в год, измерение порового давления 2 раза в год (только на земляных плотинах)
Непредвиденное или неопределенное поведение или особые обстоятельства	Гравитационная или контрфорсная	Первые 5 лет	Снятие показаний всех приборов 2 раза в год. Измерение отвесом 4 раза в год
То же	То же	Более 5 лет	Снятие показаний всех приборов 1 раз в 3—5 лет или по мере необходимости. Измерение отвесом 4 раза в год или снятие показаний основных приборов 2 раза в год
То же	Из грунтовых материалов	Всех возрастов	Нивелирование 2 раза в год, измерение порового давления ежемесячно

Контроль за сооружениями состоит из визуальных наблюдений, измерений при помощи контрольно-измерительной аппаратуры и испытаний работы водосбросных устройств. Перечень измеряемых показателей включает деформации, напряжения, расходы фильтрации, противодавление, поровое давление. Количество измеряемых показателей по 110 наблюдаемым плотинам в среднем равно 60 и колеблется от 4 на небольших плотинах до 400 — на самых крупных.

В докладе подчеркивается большое значение визуальных осмотров. Для обследования подводных частей сооружений под водой привлекают водолазов с телевизионными камерами. Один раз в 10 лет для детального осмотра производят полное опорожнение водохранилища.

Все результаты измерений централизованы и в кратчайшие сроки обрабатываются с использованием ЭВМ и сравниваются с результатами расчетов, выполненных при проектировании сооружений.

Как сообщается в [ОД-2], в 1972 г. государственными органами США утверждена национальная программа обследования плотин, которая охватывает все плотины высотой 7,6 м и более, а также те, емкость водохранилищ у которых превышает 62000 м^3. Обследования производятся в соответствии с инструкциями по инспекции безопасности плотин.

Обследования, проведенные по программе в первые же месяцы, установили, что около 4% осмотренных плотин ненадежны, а 1% требует немедленного принятия мер по устранению опасности аварии.

После разрушения плотины Титон (США) в июне 1976 г. был разработан в государственном масштабе ряд мер по усилению контроля за выбором створов, проектированием, строительством, эксплуатацией и надзором за состоянием плотин. Обращает на себя внимание создание в заинтересованных ведомствах независимых подразделений по оценке безопасности плотин, подчиняющихся непосредственно главам этих ведомств, а также Федеральному управлению по безопасности плотин, в состав которого входят представители президента страны.

Организация контроля и проведение наблюдений в Швейцарии описаны в [ОД-5], в котором приведены данные наблюдений по большому ряду швейцарских плотин. По установленной в 1957 г. в Швейцарии системе контролю подлежат все плотины высотой 10 м и более, а также высотой 5—10 м, если объем водохранилища больше 50000 м^3. Наблюдению подлежат и плотины ниже 5 м, если они представляют опасности для районов, находящихся в нижнем бьефе. Непосредственный контроль за поведением гидротехнических сооружений осуществляется на всех стадиях возведения сооружений государственным органом — Федеральной службой дорог и дамб. Организации, проектирующие, строящие и эксплуатирующие сооружения, должны представлять контролирующей организации все необходимые материалы по утвержденному перечню.

В других странах контроль за безопасностью плотины осуществляется эксплуатирующими предприятиями и объединениями, но по своим требованиям он приближается к тому же уровню, что и в случае государственной системы контроля. В своей работе контролирующие организации пользуются рекомендациями Комитета по моделям и натурным исследованиям Международной комиссии по большим плотинам.

Описание организации контроля за безопасностью и состоянием больших плотин в Португалии приводится в [Д-25]. В стране ведутся систематические наблюдения за 30 большими бетонными плотинами высотой от 22 до 115 м, построенными начиная с 1947 г.

При первом, наиболее ответственном, заполнении водохранилища измеряют:

смещения сооружений, раскрытия швов, температуру бетона и деформации в нескольких избранных точках, соответствующих измерительным точкам в испытанных моделях сооружения;

показатели фильтрации и противодавления;

смещение бортов долины, уровни верхнего и нижнего бьефов, деформации, вызванные землетрясениями. Эти показатели также используются

для оценки поведения массивов породы вблизи плотин и водохранилищ. Для наблюдения за наведенными землетрясениями, вызванными наполнением крупных водохранилищ, использовалась сеть микросейсмографов, установленных в регионе.

Результаты измерений, проведенных при поднятии уровня воды, сравнивают со значениями показателей, полученными при помощи математических и физических моделей.

На раннем этапе эксплуатации, обычно в течение первых пяти лет, показания всех приборов, установленных на плотине и в ее основании, снимаются 1 или 2 раза в неделю. Измерение смещений геодезическими способами выполняется 1 или 2 раза в год. При переходе к постоянной эксплуатации интервал времени между снятием показаний приборов, установленных в плотине, может быть увеличен до 15 дней или 1 мес, а замеры смещений геодезическими способами производятся 1 раз в 1 или 2 года. Однако осмотры плотины производятся каждый год. Для наблюдений за воздействием землетрясений на плотину устанавливают сейсмографы у ее основания и на гребне. После землетрясения плотина должна быть тщательно осмотрена.

Для обработки большого объема данных наблюдений используются ЭВМ. Достоверность результатов наблюдений в некоторых случаях проверяется на гидравлических, тепловых и физических моделях. Весьма полезны математические модели.

Согласно информации, приведенной в [Д-6], в Финляндии в 1962 г. начато регулярное обследование плотин компании "Иматран Войма" специалистами этой компании. Первое обследование плотины проводится сразу после ее возведения, а затем через каждые пять лет. Кроме того, ремонтные группы эксплуатационного персонала ГЭС проводят ежегодные визуальные обследования.

Организация и проведение контроля на плотин Румынии подробно изложены в [Д-19]. Самым существенным естественным неблагоприятным фактором в Румынии считается высокая сейсмичность, составляющая 6—9 баллов по шкале МСК — Меркали, причем на половине территории государства сейсмичность выше 7 баллов. Это вызывает надобность в постоянном совершенствовании методов наблюдения за поведением плотин. Наблюдения проводятся на всех трех этапах: возведения, заполнения водохранилища и постоянной эксплуатации. Все измерения и первичная обработка данных наблюдений производятся эксплуатационными службами, которые извещают проектную организацию обо всех явлениях, выходящих за рамки, установленные проектом, и сотрудничают с ней при ликвидации аварии.

Проектная организация обязана предоставлять:

проект установки контрольно-измерительных приборов, технические условия на их приемку, хранение, тарировку, схемы монтажа, порядок обслуживания и снятия показаний приборов;

экстремальные и предельно допустимые значения расчетных напряжений, деформаций, фильтрационных расходов, а также формуляры, типовые графики и другие материалы, необходимые для первичной обработки данных наблюдений;

программы и инструкции по проведению инструментальных наблюдений за поведением конструкций.

В обязанности эксплуатационной службы входят:

проведение регулярных ревизий измерительных приборов и, в случае необходимости, их ремонт;

при возникновении аварийной обстановки — прекращение частично или полностью эксплуатации сооружений;

предупреждение в аварийных случаях населения и организаций, размещающихся в нижнем бьефе, о максимально возможных уровнях подъемов воды.

Наблюдение за поведением плотины начинается одновременно с началом строительства. Эксплуатационные службы ведут Журнал событий на каждом сооружении, в который записывают все аварии или повреждения с подробным указанием и анализом их обстоятельств — причин, последствий, проведенных мероприятий.

При контроле за плотинами в Румынии руководствуются следующими положениями:

параметры, подлежащие наблюдению — внешние нагрузки, напряжения и деформации, изменения физико-механических параметров основания и тела плотины. Число измеряемых показателей может быть увеличено в зависимости от местных условий;

определение параметров поведения проводится тремя путями — при помощи контрольно-измерительной аппаратуры, визуально и специальными исследованиями в поле или лаборатории;

все показатели независимо от способа их определения, должны иметь начальные значения, которые именуются нулевыми измерениями, к ним привязывают все последующие измерения;

контрольно-измерительная аппаратура устанавливается по проекту, составляемому с учетом характера основания, статических расчетов, конструктивных решений и слабых точек комплекса конструкция — основание.

В комплексе изучаемых показателей самыми важными считаются деформации и фильтрация. На всех плотинах, возведенных в последние годы, имеется возможность контролировать фильтрационные расходы в целом по плотине и раздельно через основание, тело плотины, откосы и т.д. В настоящее время применяются устройства для автоматической подачи сигнала, когда фильтрационные расходы превышают допустимый предел. Устанавливают отвесы и другие приборы, которые в момент превышения измеряемыми параметрами допустимых значений подают автоматически сигнал в помещение смотрителя плотины. Это не исключает визуального контроля, который проводится по программе, специально доставляемой для каждой плотины и отдельных ее частей на всех стадиях эксплуатации.

Некоторые коррективы в организацию наблюдений внесло землетрясение, произошедшее в Румынии 4 марта 1977 г. силой 7,2 балла по шкале Рихтера. По шкале МСК — Меркали в районе трех высоких плотин было землетрясение силой от 6,5 до 7 баллов. Все большие плотины вели себя хорошо и не имели повреждений, наблюдалось лишь временное и незна-

чительное увеличение фильтрации, дополнительное смещение составляло доли миллиметра. Однако землетрясение заставило внести некоторые изменения в организацию наблюдений за их поведением. Были составлены инструкции на случаи экстраординарных нагрузок (больших паводков, землетрясения) или обнаружения повреждений.

В каждом случае предписывается анализировать поведение всех плотин, выяснять необходимость установки нового оборудования, дополнительной контрольно-измерительной аппаратуры. Все большие плотины высотой более 100 м, возведенные на слабых основаниях, надлежит оборудовать сейсмостанциями. Плотины, создающие большие водохранилища в развитых районах, должны быть снабжены аппаратурой, обеспечивающей автоматическую расшифровку данных наблюдений по приборам, а также системой телевидения для контроля за состоянием низовой грани.

Опыт длительных наблюдений на японских плотинах [Д-26] показал, что все основные отклонения от нормального поведений плотин и почти все аварии происходили в первый период до конца первого наполнения водохранилища, за исключением тех, которые явились результатом воздействия природных явлений — землетрясений и больших паводков.

Второй период — до достижения установившихся значений измеряемых величин продолжается примерно три года. В этот период необычное поведение плотин замечалось редко. Исключение составляют случаи, которые были вызваны природными явлениями или упущены в первый период наблюдений.

В эксплуатационный период наблюдаются повреждения плотин, вызванные воздействием морозов, эрозии, ухудшением качества бетона, причем измерения закладными приборами уже не проводятся вследствие истечения срока их гарантийной работы.

Авторы доклада считают наиболее важным проведение измерений в первый период, особенно в процессе первого полного наполнения водохранилища, при этом наиболее существенным показателем для суждения о безопасности плотин являются фильтрация через их тело или основание. В несколько меньшей мере сказываются их деформации, которые рассматриваются часто как обобщенный показатель состояния сооружений гидроузла. Иногда определяющими оказываются фильтрационное и поровое давление, напряжения в бетоне и грунте и т.п.

Отмечается, что сравнение результатов измерений с расчетными значениями требует много труда, однако вследствие больших допущений в расчетах и неучета в них ряда факторов оно не имеет практической ценности[1].

Наиболее целесообразным методом оценки безопасности плотины является наблюдение за тенденцией изменения измеряемых величин: их уменьшение, постоянство или увеличение. В последнем случае имеет значение, как происходят изменения — с убывающей или возрастающей

[1] Это мнение японских инженеров представляется спорным. Исследования на Братской, Усть-Илимской и других ГЭС достаточно близки к получаемым в расчетах, выполняемых современными методами.

скоростью. Возрастание скорости увеличения измеряемых показателей может свидетельствовать об уменьшении безопасности плотины; причины «того требуют внимательного изучения.

В докладе приведены результаты натурных наблюдений, главным образом за фильтрацией, на четырех бетонных и двух каменнонабросных плотинах. Отмечается, в частности, что фильтрация через температурно-усадочные швы имеет заметные сезонные колебания, связанные с температурными деформациями тела плотины.

Неожиданное увеличение фильтрации в процессе первого заполнения водохранилища наблюдают сразу же вскоре после достижения уровня воды заданной отметки (например НПУ). Такое явление обнаружено, например, в плотине Кошибу через 9 мес после полного заполнения водохранилища. Предполагается, что внезапное увеличение фильтрации явилось результатом раскрытия трещины в основании, которая постепенно заполнялась мелким материалом, что вскоре привело к уменьшению фильтрации, а через год и фильтрационное давление возвратилось в исходное положение.

При резком увеличении фильтрации необходимо принять следующие меры:

проверить, какова фильтрующаяся вода: мутная или чистая;

вновь просмотреть геологические данные о строении и составе пород в основании, чтобы выяснить, не содержит ли оно такие грунты, которые могут быть вымыты фильтрационным потоком;

произвести наблюдения за изменениями фильтрации и фильтрационного давления при тщательно поддерживаемом постоянном уровне воды в водохранилище.

В большинстве каменнонабросных плотин, построенных ранее в Японии, на подошве низовой грани измерялся суммарный поток воды, вызываемый фильтрацией через тело плотины, а также грунтовой и поверхностной воды, не имеющей отношения к водохранилищу. Такой способ не дает точного представления о фильтрационном расходе. Теперь начал применяться усовершенствованный способ сбора фильтрационных потоков — порознь с различных участков.

Деформация тела плотины и ее основания является также одним из наиболее важных показателей ее безопасного состояния. Поскольку на деформацию бетонных плотин оказывают влияние различные факторы — изменение температуры и уровня воды, ползучесть основания и т.д. — рекомендуется проводить многофакторный анализ, чтобы разделить влияние отдельных причин на деформацию плотины. Если деформация плотины резко нарастает, то должны быть немедленно проверены напряжения в бетоне, чтобы суметь вовремя принять необходимые меры.

В каменнонабросных плотинах часто устанавливают приборы для измерения деформации внутренних зон насыпи. Однако при контроле безопасности этих плотин следует уделять большее внимание результатам измерения поверхностных деформаций, чем измерениям деформаций внутренних зон, хотя последние могут быть использованы для исследования причины необычных деформаций на поверхности сооружения.

Приведенные материалы свидетельствуют о том, что вопрос обеспечения гарантированной безопасности плотин и других ответственных сооружений является сейчас одним из наиболее важных для инженеров-гидротехников всех стран мира. Интерес к этому вопросу непрерывно растет в связи с тем, что значительная часть (от 20 до 40%) эксплуатирующихся плотин имеет возраст свыше 50 лет. По существующим представлениям этот срок близок к гарантийному, принятому при проектировании многих из этих сооружений. Можно предполагать, что для большей части из них ресурс надежности почти исчерпан.

Однако опыт, накопленный в ходе эксплуатации целого ряда больших плотин, свидетельствует о том, что срок жизни их может быть значительно более длительным, чем предполагали раньше. Если состояние плотины достаточно хорошо и регулярно контролируется, выполняются необходимые текущие ремонтные работы, ликвидируются имевшие место повреждения, производится, при необходимости, усиление конструкции или материала, то эксплуатация может длиться 100 лет и более. Примеров этому немало.

Однако нельзя не учитывать факторы, которые будут рано или поздно приводить к недопустимому ухудшению состояния сооружения, даже при правильной их эксплуатации. К числу этих факторов относится, например, старение материалов плотин и оснований — изменение со временем их прочности, водонепроницаемости и других свойств. Часто утверждается, что вечных плотин на свете не существует, и спорить с этим трудно. Поэтому в нужных случаях необходимо заблаговременно предусматривать капитальный ремонт — укрепление сооружений или даже замену устаревших, ослабевших конструкций современными, изготовленными из более совершенных материалов и лучше запроектированными. Следует также помнить, что продолжительная безупречная работа сооружения отнюдь не гарантирует того, что и впредь оно будет хорошо работать. Многочисленные примеры показывают, что на многих плотинах после длительной нормальной эксплуатации вследствие медленного протекания таких процессов, как суффозия, выщелачивание и другие происходят иногда аварии, приводящие в ряде случаев к быстрому разрушению.

Все эти обстоятельства выдвигают первоочередные задачи — проверку действительного состояния всех плотин, эксплуатировавшихся длительное время, объективную оценку их работоспособности, всесторонний анализ и широкое обсуждение всех обнаруженных недостатков. При этом следует исходить из того неоспоримого факта, что глубина наших познаний в области механики грунтов, строительной механики, гидравлики и многих других дисциплин, используемых при строительстве гидротехнических сооружений, значительно выросла. С новых научных позиций должны выполняться не только проектирование и строительство новых гидроузлов, но и оценка работоспособности и надежности существующих.

Очень ценно, что ряд рассмотренных докладов, был посвящен организации эффективного контроля, который должен проводиться на всех стадиях создания плотин — при проектировании, во время строительства и в ходе эксплуатации. В докладах высказывается единодушное мнение,

что этот контроль должен быть авторитетным, действенным, всеобъемлющим. Из приведенных материалов можно видеть, что во многих странах вопросам организации и проведения контроля уделяется исключительное внимание. Выдвигаются требования проводить такой контроль обязательно на государственном уровне, полагая, что ведомственный контроль не может быть достаточно эффективным. В некоторых государствах (Франция, США, Швейцария и др.) уже приняты законы, регламентирующие правила контроля, сформулированы конкретные требования, которые направлены на обеспечение безопасности сооружений и соблюдение разумной экономии.

В нашей стране вопросу обеспечения надежности плотин издавна уделяется большое внимание. Основные требования к качеству создаваемых ответственных гидротехнических сооружений формулируются в Строительных нормах и правилах (СНиП), имеющих силу государственного закона. Периодически производятся пересмотры СНиП с учетом современного уровня развития науки и строительной техники. Проводятся периодические проверки выполнения норм: в таких проверках, организуемых союзными и республиканскими министерствами; участвуют, как правило, проектировщики, научные работники разного профиля, строители. Однако эта работа, несомненно, должна быть усилена.

Особая ответственность за безаварийную работу больших плотин, как подчеркнуто в докладах на Конгрессе, возлагается на проектные организации. Недостаточная полнота изысканий, выполненных на стадиях проектирования, нерациональные проектные решения, принятые без учета особенностей створов, района строительства, свойств оснований и т.п., неоднократно являлись основной причиной аварий больших плотин. Здесь уместно напомнить о разрушениях по этим причинам арочной плотины Мальпассе, грунтовой плотины Титон и ряда других плотин, аварии которых рассматривались выше. Многие грунтовые плотины оказались разрушенными в результате непредусмотренных переливов воды через гребень, которые чаще всего происходили вследствие недостаточных размеров водосливов, предусмотренных по проекту.

К числу аварий, обусловленных ошибками проектирования, нельзя отнести повреждения экспериментальных арочных плотин Ла Гаж и Толла, которые пришлось впоследствии заменить более массивными. При проектировании этих плотин французские инженеры шли на сознательный риск, считая допустимыми сжимающие напряжения порядка 8,5—10,0 МПа, т.е. на 40—50% большие, чем принимаемые в то время для бетонных плотин. Несмотря на неудачу, эксперименты принесли несомненную пользу, так как содействовали тому, чтобы в последующие годы в проектируемых арочных плотинах считались допустимыми напряжения порядка 7,0—8,0 МПа. Это дало заметную экономию при строительстве многих плотин без ущерба для их прочности. Можно отметить, что в нашей стране после проведения соответствующих исследований в бетоне таких уникальных плотин, как Ингурская и Саяно-Шушенская были приняты максимальные расчетные напряжения порядка 10,0—10,5 МПа.

В докладах приведены многочисленные примеры разрушений и повреждений плотин разного типа, происходивших в результате неправильной эксплуатации плотин. Подчеркивается большая роль натурных иссле-

цований, позволяющих при хорошей их организации давать объективную оценку состояния строящихся и эксплуатируемых сооружений. Вопросам организации проведения натурных исследований, автоматизации процесса измерений и обработки их результатов с применением ЭВМ и методов математического моделирования во многих докладах предлагается уделять больше сил и внимания.

Большой урон принесли ошибки и просчеты при строительстве плотин, например разрушение грунтовой плотины Могото (ЮАР) произошло вследствие неудовлетворительного качества выполнения строительных работ. Подобные случаи происходили неоднократно. К числу их относится тяжелая авария (в июле 1983 г.) на строительстве высокой грунтовой плотины Гуазио (Колумбия), на которой в результате большого оползня погибло 160 чел.

Несомненное практическое значение имеют приведенные в докладах сведения о выполнявшихся на различных плотинах ремонтных мероприятиях. При проведении этих работ, наряду с традиционными методами, применялись и оригинальные. Интересно, например, выполнено устройство деформационного шва в бетонной плотине Фонтана (США), при котором применялось прецизионное бурение серии скважин. Хорошо был организован подводный ремонт откоса плотины Скотте Пик. Обмен опытом по этому вопросу очень полезен.

В докладах и выступлениях на Конгрессе высказывались рекомендации, призванные повысить безопасность плотин. Предлагается, в частности, особое внимание уделять вопросам совершенствования методов и программ расчета плотин совместно с основаниями с учетом всех вероятных воздействий в различных сочетаниях — нагрузок, температурных изменений, трещинообразования материалов, их набухания, разжижения, просадок грунтов, выщелачивания бетона, его деградации со временем и многих других факторов.

Большое значение имеет правильная организация строительства водоупорных элементов плотин, хорошее дренирование и постоянное поддержание дрен в рабочем состоянии. Конечно, все эти рекомендации предполагают наличие контроля за состоянием плотины, о чем уже говорилось выше.

Учитывая, что причины ряда крупных аварий установить с достаточной точностью не удавалось, предлагается также тщательно изучать все случаи крупных аварий и разрушений плотин, накапливая материал для последующих, крайне необходимых обобщений.

Для рассмотрения Конгрессом высказывается несколько предложений.

1. Организовать при Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ) постоянный технический комитет по старению и разрушению плотин. Рекомендовать национальным комитетам всех стран — членов СИГБ создать свои технические комитеты, занимающиеся этими вопросами. Такие комитеты должны иметь тесную связь с СИГБ.

2. При Испольнительном Комитете СИГБ организовать группу экспертов, в функцию которых будет входить сбор и анализ мирового опыта

в области плотиностроения, проведение консультаций в сложных аварийных и других случаях.

3. Организовать при группе экспертов библиотеку по вопросам строительства больших плотин. Предоставить право странам — членам СИГБ пользоваться, в случае необходимости, материалами, собранными в этой библиотеке. Эти предложения! бесспорно, заслуживают внимания.

Изучение материалов Конгресса, несомненно, окажется полезным отечественным гидротехникам при создании надежных и экономичных плотин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вуцель В.И. Обеспечение надежности плотин из грунтовых материалов. — Труды Гидропроекта, 1978, № 59, с. 81—90.

2. Гогоберидзе М.И. Научные основы постановки натурных исследований на плотинах. — Тбилиси: Мецниереба, 1980. 270с.

3. Оценка и обеспечение надежности гидротехнических сооружений. В кн.: Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. — Л.: Энергоиздат, 1981. 184 с.

4. Розанов Н.С., Соколов И.Б., Храпков А.А., Серков В.С., Севастьянов В.И. Повреждения плотин и исследования по обеспечению их надежности и безопасности. — Гидротехническое строительство, 1979, №8, с. 6—10.

5. Розанов Н.С. Проектирование и исследование арочных плотин во Франции. — Л.: Энергия, 1966. 273 с.

6. СНиП П-50-74. Гидротехнические сооружения речные. Основные положения проектирования. — М.: Стройиздат, 1975. 24 с.

7. СНиП П-16-76. Основания гидротехнических сооружений. — М.: Стройиздат, 1977. 32 с.

8. СНип П-54-77. Плотины бетонные и железобетонные. — М.: Стройиздат, 1978. 41 с.

9. СНиП П-56-77. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. — М.: Стройиздат, 1977. 32 с.

10. Технический прогресс в проектировании и строительстве больших плотин (по материалам X Международного конгресса по большим плотинам) / А.А. Борового. — М.: Энергия, 1976. 512 с.

11. Carlier M. Protection des population a l'aval des Grands Barrages. — C.r. Acad. Agr. France. V. 67, p. 410—416.

12. Cuenod Y., Dal Vesco E. Geologica v causes of dam breaks and failures. — Bull, of the Int. Ass. of Engineering Geology, N 20, 1979, p. 202—203.

13. Gruner E. Hazards in Dam Operation. — World Dam Todsy, Tokyo, 1976, p. 410—416.

14. Hansen K.D., Roehm L.H. The response of concrete dams to earthquakes. — Water Power & Dam Construction, V—IV, 1979, p. 27—31.

15. India's worst dam disaster. — Internat. Water Power and Dam Constr., V—31, 1979, N 10, p. 3.

16. Lecons tirees des accidents de barrages. — General raport CIGB (ICOLD), Paris, 1974, 189 p.

17. Deterioration cases collected and their prelimonary assesment. V.I., 2, JCOLD, Paris, 1979, 260 p.

СПИСОК ДОКЛАДОВ ПО ВОПРОСУ 49

''Аварии плотин"

Д-1. T. J. ABRAHAM, R.C. SLOAN *(United Slates)*.
Analysis and repair of cracking in TVA's Fontana dam caused by temperature and concrete growth

Д-2. J. L. SHERARD *(United States)*.
Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils

Д-3. W. C. S. LEGGE, C. GROBBELAAR *(South Africa)*.
An evaluation of the effects of underflow at three dams

Д-4. A. W. SYKES, E. A. N. GOISTER *(South Africa)*.
Grass protection of downstream earthfill slopes

Д-5. C. A. FETZER *(United States)*.
Wolf Creek dam-Remedial work, engineering concepts, actions and results

Д-6. P. LEHTINEN *(Finland)*.
On the deterioration of concrete observed in dams and hydraulic structures in Finland

Д-7. F. HAMVAS *(Hungary)*.
Quality surveys on earth dams built on sedimentary soils

Д-8. H. BEIER, F. LIST, W. LORENZ (*Germany)*.
Subsequent sealing in the impervious core of the Sylvenstein dam

Д-9. Z. PRUSZA, T. CHOUDRY *(Venezuela)*.
Collapsibility of residual soils

Д-10. E. LOUKOLA *(Finland)*.
The use of control test data in the calculation of dam safety

Д-11. W. A. ODENDAAL, F. C. VAN ZYL *(South Africa)*.
Failure of a cofferdam due to overtopping

Д-12. D. MacKELLAR, N. J. SHAND *(South Africa)*.
Failure of a reinforced rockfill dam during construction

Д-13. J. E. JENNINGS, H. F. MARKER *(South Africa)*.
The extraordinary development of a sinkhole on the upstream face of a fifty-year old earth dam with associated piping through the foundation

Д-14. W. R. MITCHELL, M. D. FITZPATRICK *(Australia)*.
An incident at Rowallen dam

Д-15. B. A. COLE, P. J. E. FONE *(Australia)*.
Repair of Scotts Peak dam, Tasmania

Д-16. P. A. S. FERGUSON, M. LE MASURIER, A. STEAD *(Great Britain)*.
Combs reservoir : Measures taken following an embankment slip

Д-17. F. G. JOHNSON, J. R. CRICHTON, G. R. CURTIS *(Great Britain)*.
Surveillance and deterioration of dams of the North of Scotland hydro-electric board

Д-18. H. HAUTZENBERG *(Austria)*.
Automatic supervision of Koelnbrein arch dam

Д-19. A. DIACON, C. CONSTANTINESCU (*Roumanie*).
Methodes utilisees en Roumanie pour le controle du comportement des barrages

Д-20. P. PETER *(Czechoslovakia)*.
Estimating the changes caused by the hydrodynamic loading of soils in dam foundations

Д-21. J. VERFEL *(Tchecoslovaquie)*.
Ditermination des causes des defauts et leur riparation sur un barrage en enrochement

Д-22. GROUPE DE TRAVAIL DU COM1TË FRANCAIS *(France)*.
Methodes de detection des deteriorations des barrages

Д-23. GROUPE DE TRAVAIL DU COM1TË FRANCAIS *(France)*.
Riparations et entretien des barrages entraines par le vieillissement ou un accident

Д-24. GROUPE DE TRAVAIL DU COM1TË FRANCAIS *(France)*.
Quelques exemples de detection d'anomalies et degradations de barrages frangais

Д-25. J. O. PEDRO, C. A. FLORENTINO, A. F. DA SILVA GOMES *(Portugal)*.
Observation methods for controlling the safety and deterioration of concrete dams

Д-26. R. IIDA, K. HOJO, N. MATSUMOTO *(Japon)*.
Safety monitoring of dams during first filling of reservoirs

Д-27. S. J. VALLESPIR *(Argentina)*.
Stabilization and seepage control treatment

Д-28. Y. I. KIM *(Korea)*.
Dam behaviour measured by embedded instruments

Д-29. J. B. KIM *(Korea)*.
Investigation on leakage through fill type dam

Д-30. F. BUDWEG *(Brazil)*.
Dam safety assessment by worldwide cooperation : A challenge to ICOLD

Д-31. Y. K. MURTHY, P. M. MANE, B. PANT *(India)*.
Tensile failure in some stone masonry gravity dams in India

Д-32. S. S. APTE, A. K. SHENOLIKAR, S. N. SAHASRABUDHE, G. J. KULKARNI *(India)*.
Strengthening of old gravity dams in Maharashtra

Д-33. H. KIESSLING *(Austria)*.
Examination and reinforcement of asphaltic surface sealings on dams situated in high mountain regions

Д-34. CHU HAI-NING, YU WEI-YANG, HUANG ZHEN-BO, CHEN WA-NY, LIU RUI-XIANG *(China)*.
Analysis of observation data of Quanshui arch dam and estimation of its strength safety factor

Д-35. P. K. NAGARKAR, R. P. KULKARNI, M. V. KULKARNI *(India).*
Lessons from incidents and failures of dams in Maharashtra

Д-36. I. B. SOKOLOV, N. S. ROSANOV, A. A. KHRAPKOV, V. I. SEVASTIANOV, V. S. SERKOV *(URSS).*
Ruptures et accidents aux barrages et recherches sur leur sicuriti

Д-37. GROUPE DE TRAVAIL DU COM1TË FRANCAIS *(France).*
Disordres graves constatis sur des barrages francais

Д-38. W. WOLSKI, P. KROL, W. MIODUSZEWSKI *(Poland).*
Influence of an uncontrolled seepage on the earth dam safety

Д-39. J. A. MURIEL *(Argentina).*
Placing of anchorings of great length as reinforcements for the right bank abutment of General Belgrano Dam in Cabra Corral

Д-40. E. CARABELLI, A. SAMPAOLO, M. SPERINDE *(Italy).*
Geophysical methods for determining the integrity of concrete of a dam

Д-41. A. CROCE, A. MOTTA, C. LINARI *(Italy).*
Deterioration and restoration of the foundation watertightness in the Zoccolo earth dam

Д-42. S. BACCINI, F. MANCA *(Italy).*
Damage to the Cuga dam in Sardinia and subsequent repair and completion works

Д-43. F. LIONETTI, G. CRAVIARI *(Italie).*
Contribution *к* l'itude des fissurations qui se manifestent dans les bitons de masse, *к* travers les observations conduites sur trois grands barrages de l'Azienda Elettrica Municipale de Milan

Д-44. M. A. FANELLI, G. GIUSEPPETTI *(Italy).*
Experience gained during control of static behaviour of some large Italian dams

Д-45. GROUPE DE TRAVAIL DU COMITË FRANCAIS *(France).*
Parametres significatifs du comportement des barrages et choix des appareils de mesure

Д-46. R. DEL HOYO FERNANDEZ-GAGO *(Espagne).*
Etat actuel du biton du barrage de Los Peares

Д-47. G. GOMEZ LAA, M. ALONSO FRANCO, J. L. ROMERO HERNANDEZ *(Spain).*
Reflections on some incidents in Spanish dams

ОБОБЩАЮЩИЕ ДОКЛАДЫ ПО ВОПРОСУ 49

"Аварии плотин"

ОД-1. GENERAL PAPER. R. Widman (Austria)
Developments in Austrian concrete dam construction

ОД-2. GENERAL PAPER.
USCOLD: G. W. Dukbeth, H. W. Anderson,
E. L. Dodson, A. G. Strassburger (USA)

ОД-3. RHODESIAN COMMITTEE ON LARGE DAMS (Rhodesia).
GENERAL PAPER

ОД-5. COMITE NATIONAL SUISSE DES GRANDS BARRAGES
RAPPORT DE SYNTHESE

ОД-7. ITALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS
GENERAL PAPER

ГД-49. R. B. Jansen. DETERIORATION OR FAILURE OF DAMS

УКАЗАТЕЛЬ ПЛОТИН

Агуэда 14
Альдеавилья 15
Алькантара II 14
Альфред 48
Андонг 100
Арбон 16
Арасена 15
Арнанда Саллес ди Оливейро 4
Арлансон 16
Атасар 16
Ашти 83
Бандарадара 44
Баркер 88
Бембесар 15
Бенемариас 16
Бимон 34
Бор 26
Братская 13,42
Бхатгхар 52
Вагхад 8
Вадо 14
Вайонт 4
Вальгросина 31
Вапьдеканьес 42
Вальделауфен 17
Вега ди Тера 15
Вильамека 16
Вуглан 99
Вульф Крик 81,96
Гаж 37,45
Герледан 99
Грезиоль 85
Глено 4
Гранваль 54
Г уавио 120
Гури 89
Дербенли-Кхан 98
Дханибара 75
Женисья 74
Жерте 14
Жифомон 57
Зильфенштейн 59
Зокколо 82,103
Изу 5
Ингурская 91,119
Кабра Коррал 51
Кадерус 97
Каламба 84
Квадаквасла 42
Канкано 30
Кастельно 36
Кастрело 17
Кельнбрайн 96,108
Контра 97
Короново 63
Кошибу 117
Красноярская 91
Круг Вильденштейн 85
Ксонкса 76
Куанши 110
Куерда дель Посо 16
Куга 67,84
Курпсайская 30
Ла Гаж 119
Ла Жиротт 25
Лак Анель 47
Лос Малинос 15
Лос Пеарес 99
Лос Саус$с 66
Мальпассе 4,119
Манивали 75
Мансильа 16
Мария Кристина 14
Мармарикская 5
Мачху-1 79
Мачху-М 5,42,79
Мирафлорос 17
Могото 63,70,120
Мон-Сени 75
Монтежак 15
Одиель 14
Ондская 13
Ордунте 16
Ортотокойская 5
Отфаж 25
Ошеникзее 87
Пеншет 43
Пердигуера 15,17
Пракана 96
Пуэнте 15
Пьедрас 14,17
Ракова 27
Ринобайо 14
Рооде Эльсберг 26,49
Роуэллен 73,83
Рэд Блафф89
Саллес ди Оливейро 5
Сан-Джакомо 29
Сан-Мартин 14
Сан-Пабло 89
Сан-Тереза 14,42
Сан-Эстебан 15
Саяно-Шушенская 91,119
Сегозерская 5
Сент Френсис 4
Скотте Пик 62,87,120
Соянганг 100
Тайбилья 17
Тарбелла 5
Титон 4,78,119
Токтогульская 30
Толла 37,46,98
Торехон Тахо 14
Туррите ди Галликано49,1 04
Усть-Илимская 13,91
Фонтана 31,51,55
Ханс Стриждом 76
Хандула 14
Хеншоу 88
Хринова 65,83
Чарвакская 57
Чикахоул 44
Чирюртская 12
Шамбон 34
Широковская 5,13
Эвклидос дель Хунха ч
Эддикс 88
Экрук 83
Эль Каррисал 15
Эль Тобар 16
Эррохти 41
Ят-1 89

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие..... 3
Введение..... 4
Г л а в а 1. Статистика аварий плотин и причины их возникновения..... 8
1. Общие сведения..... 8
2. Характерные виды повреждений плотин..... 10
3. Анализ основных причин аварий и повреждений плотин..... 18
Глава 2. Характерные аварии бетонных плотин и плотин из каменной кладки..... 24
4. Повреждения бетонных плотин, связанные с особенностями строения оснований..... 25
5. Неблагоприятные воздействия изменений температуры, усадки и набухания бетона..... 28
6. Повреждения экспериментальных плотин..... 36
7. Повреждения элементов бетонных плотин..... 41
8. Аварии плотин из каменной кладки..... 42
Глава 3. Восстановление и ремонт бетонных плотин..... 45
9. Восстановление разрушенных бетонных плотин..... 45
10. Восстановление водонепроницаемости плотин..... 47
11. Укрепление плотин анкерами..... 50
12. Усиление плотин контрфорсами..... 52
13. Устройство деформационных швов..... 55
Г л а в а 4. Аварии плотин из грунтовых материалов..... 56
14. Трещинообразование в теле грунтовых плотин 57
15. Образование провальных воронок и оползней.....5Э
16. Разрушения грунтовых плотин 75
Глава 5. Реконструкция и ремонт плотин из грунтовых материалов..... 80
17. Восстановление водонепроницаемости грунтовых плотин..... 81
18. Пригрузка откосов грунтом..... 83
19. Ремонт экранов..... 85
20. Восстановление грунтовых плотин..... 88
Глава 6. Исследования плотин для обеспечения их безопасности..... 90
21. Основные направления исследований..... 90
22. Вопросы организации натурных исследований..... 94
23. Наблюдения на бетонных плотинах..... 9д5
24. Наблюдения на плотинах из грунтовых материалов.....100
25. Новые методы наблюдений..... 103
26. Новые измерительные приборы и автоматизация измерений..... 106
27. Оценка безопасности плотин..... 109
Глава 7. Организация контроля за состоянием плотин 110
Заключение..... 118
Список литературы..... 121
Приложения..... 122
Указатель плотин..... 126

Николай Семенович Р о з а н о в
Александр Иванович Ц а р е в
Лерен Петрович М и х а й л о в
Игорь Борисович С о к о л о в

Проектирование и строительство больших плотин.
Аварии и повреждения больших плотин

Редактор издательства *О.А. Прудовская*
Художественный редактор *Б.Н. Тумин*
Технический редактор *Н.М. Брудная*
Корректор *Е.В. Кудряшова*
Оператор *Л. А. Дорманова*

ИБ № 702

Набор выполнен в Энергоатомиздате на Композере ИБМ-82. Подписано в печать 28.10.85.Т-15446.Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная № 1. Печать офсетная.Усл.печ. л. 7,44. Усл. кр.-отт. 7,67. Уч.-изд. л. 10,11.Тираж 1430 экз. Заказ 1076. Цена 55 к.
Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10
Московская типография №9 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
109033, Москва, Ж-33, Волочаевская ул., 40

55 к.

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ