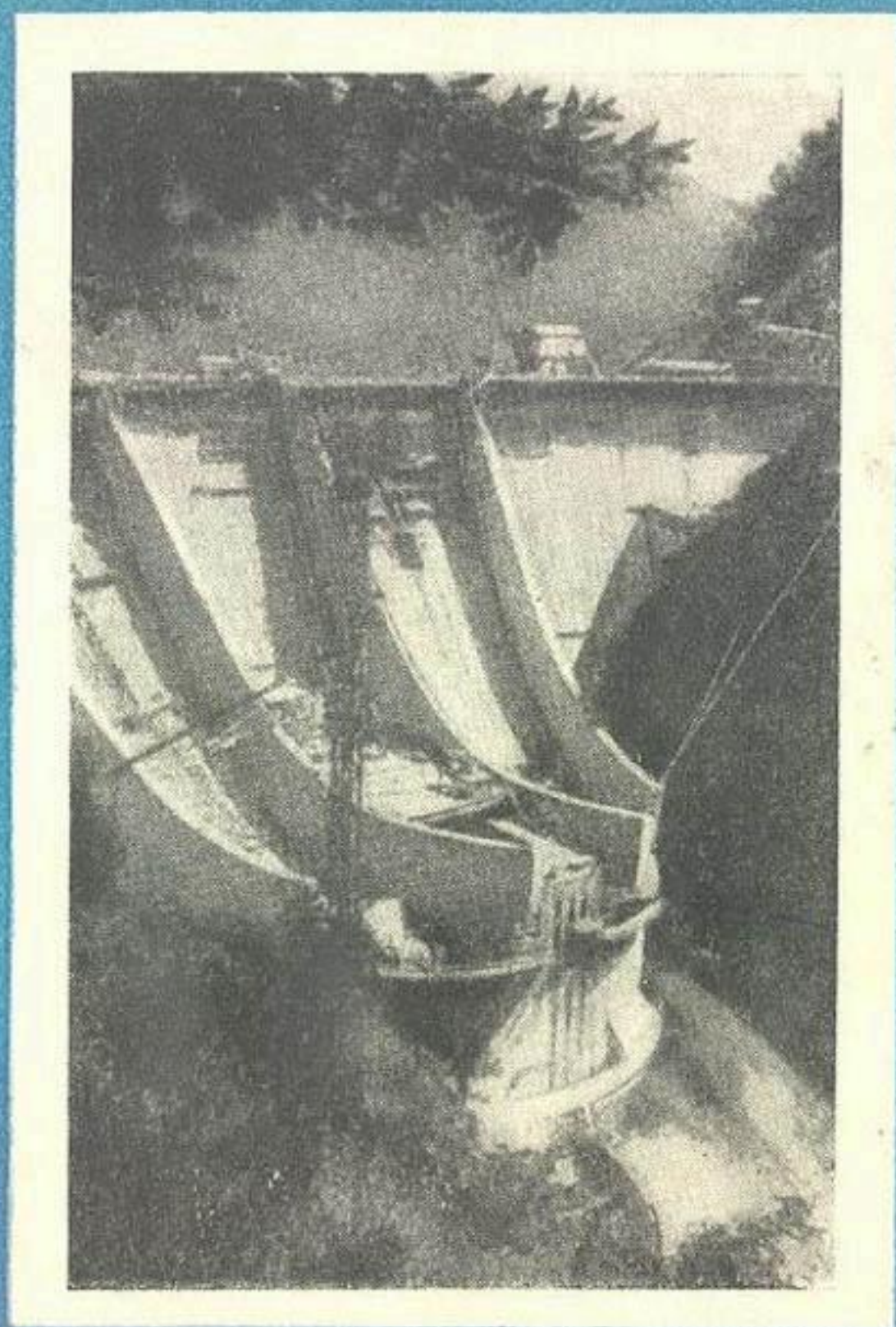


Ф. Т Е Л Ь К Е

627.8

Т-31

32307



Водохранилищные плотины

ГОССТРОЙИЗДАТ

1957

TALSPERREN

von

Dr.-Ing. habil F. Tölke, VDI
o. Professor an der Technischen Hochschule Stuttgart

Walter de Gruyter et C
Berlin 1953

Ф. ТЕЛЬКЕ

*Доктор наук, ординарный профессор
Высшей технической школы в Штуттгарте (ФРГ)*

ВОДОХРАНИЛИЩНЫЕ ПЛОТИНЫ

Перевод с немецкого А. В. Сулима-Самуйло

Под общей редакцией
д-ра техн. наук проф. М. М. Гришина

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ И АРХИТЕКТУРЕ

Москва—1957

Редактор — д-р техн. наук проф. Гришин М. М.

Книга кратко знакомит инженеров и научных работников с новейшими достижениями не только германской, но и вообще западноевропейской и американской техники в области крупного плотнострoения. Особенно подробно автор останавливается на бетонных и железобетонных плотинах, в частности облегченных, но есть ряд интересных сведений и по земляным и каменно-набросным плотинам. Интерес представляют данные о подборе состава бетона для плотин, в частности бутобетона, и о методах работ.

Книга рассчитана на инженеров-строителей, проектировщиков и научных работников.

ГЛАВА I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Водохранилищная плотина является подпорным сооружением, которое удерживает на необходимом уровне воду водохранилища и имеет также паводковый водосброс, донный водоспуск и водобойный колодец.

В плотине устраивают водозаборы и подводящие трубопроводы к турбинам гидроэлектростанции, если она является составной частью подпорного сооружения, как, например, в случае гидроэлектростанции Кастело до Бодэ (Castelo do Bode) (рис. 1 и 2) [1]. Плотины для водохранилищ могут быть бетонными (рис. 3) [2], железобетонными и земляными (рис. 4).

При наличии скального основания предпочтение отдается бетонным и железобетонным плотинам, а в случае перекрытия больших пойм рек рекомендуется устраивать каменно-набросные и земляные плотины.

Устройство подпорных сооружений вызывает необходимость проведения крупных мероприятий по отводу строительных расходов в период их строительства. Место возведения сооружения отгораживается низовой и верховой перемычками, а река отводится через один или два отводных тоннеля. Эти отводные тоннели часто используются позже для подвода воды к турбине или как донные водоспуски.

При устройстве водохранилищных плотин в широких речных долинах, когда отводные тоннели следует исключить, наилучшим образом оправдало себя ограждение котлованов в русле ячеистыми перемычками по частям. Иногда не остается другого выхода, как отвести временно, на период строительства, всю реку, как, например, при строительстве земляной плотины Девис (Davis) на р. Колорадо (рис. 5) [3].

Водохранилищные плотины служат водохозяйственным и энергетическим целям. Часто обе задачи могут быть объединены. Многочисленные водохранилищные плотины в бас-

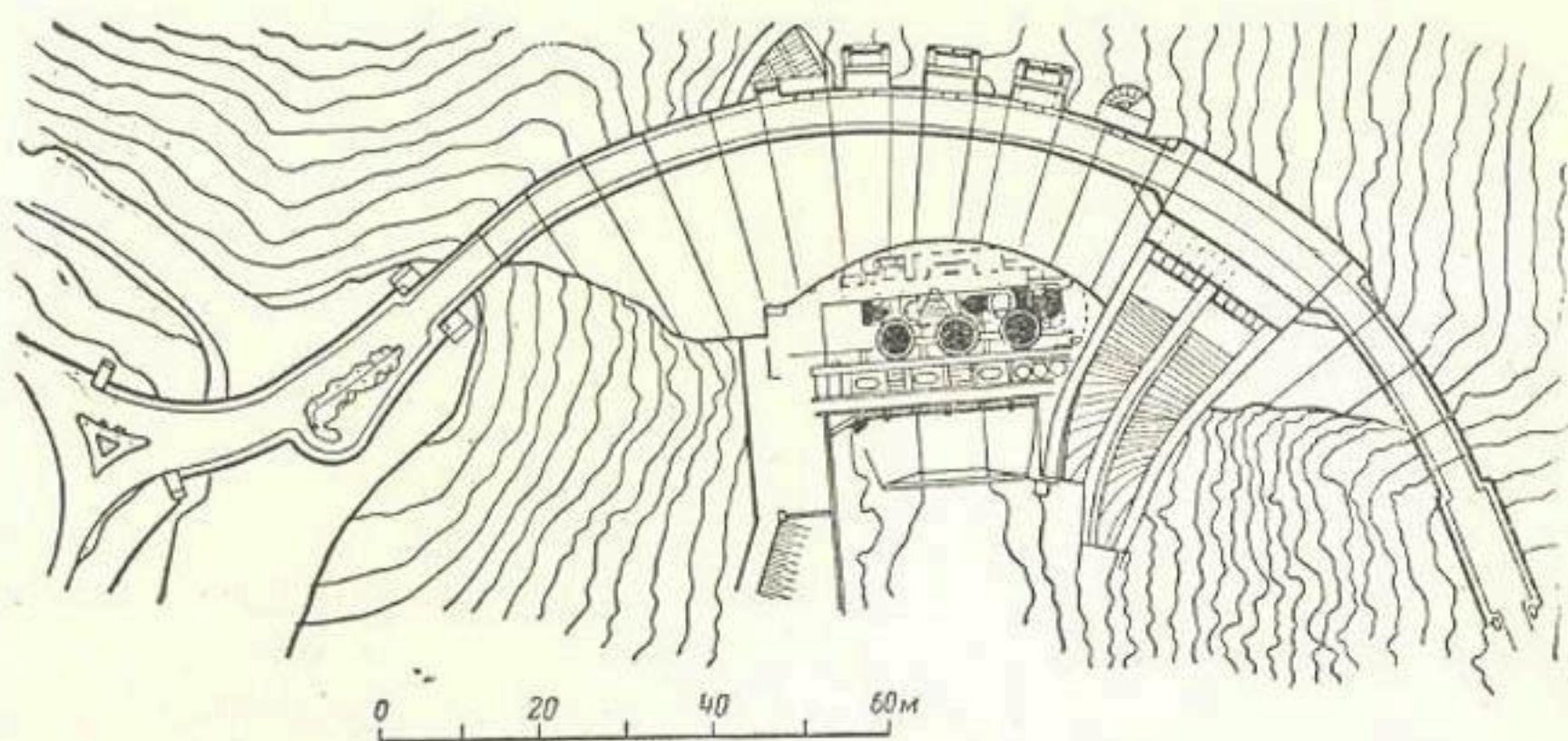


Рис. 1. Плотина Кастело до Бодэ

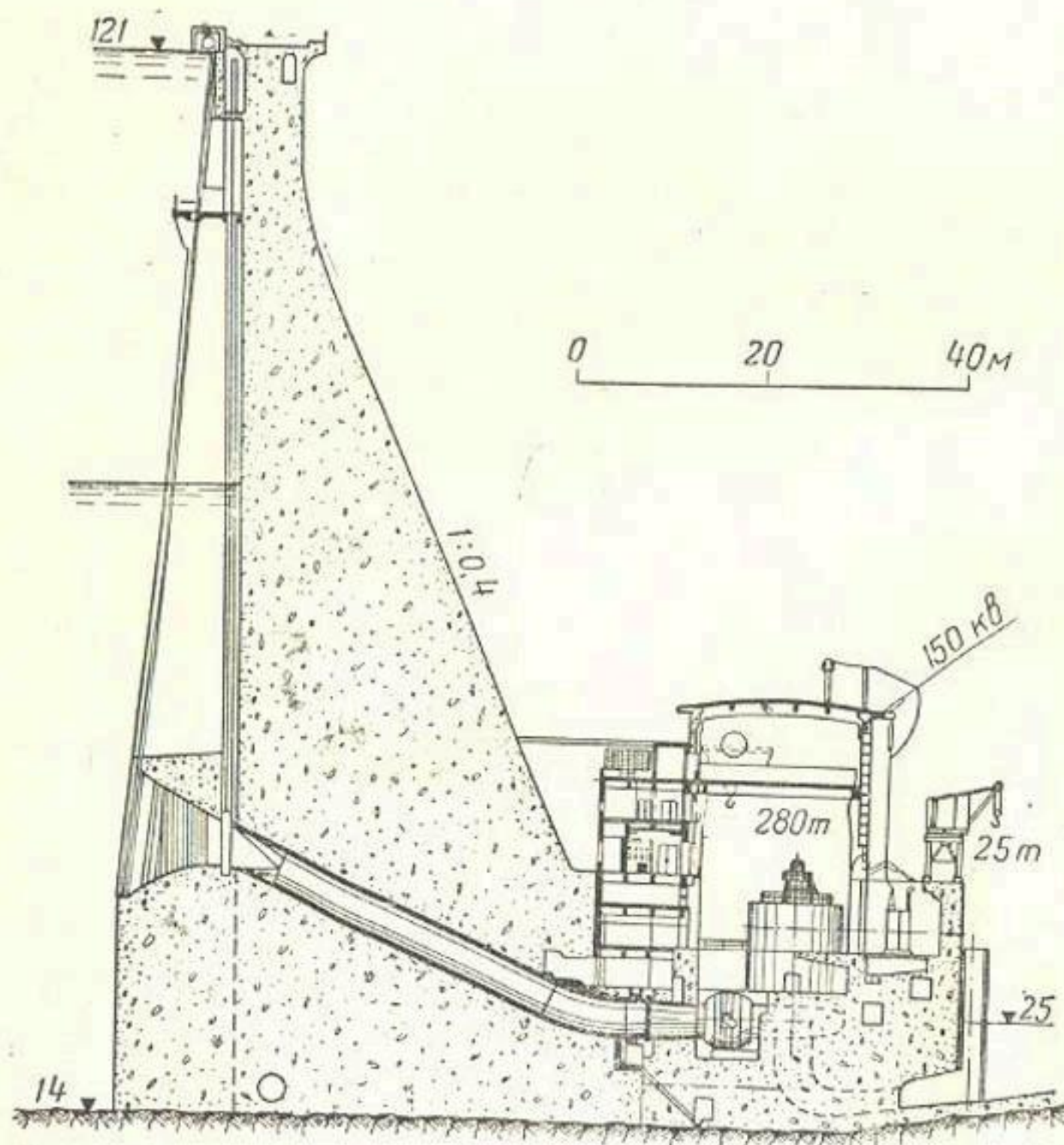


Рис. 2. Плотина Кастело до Бодэ

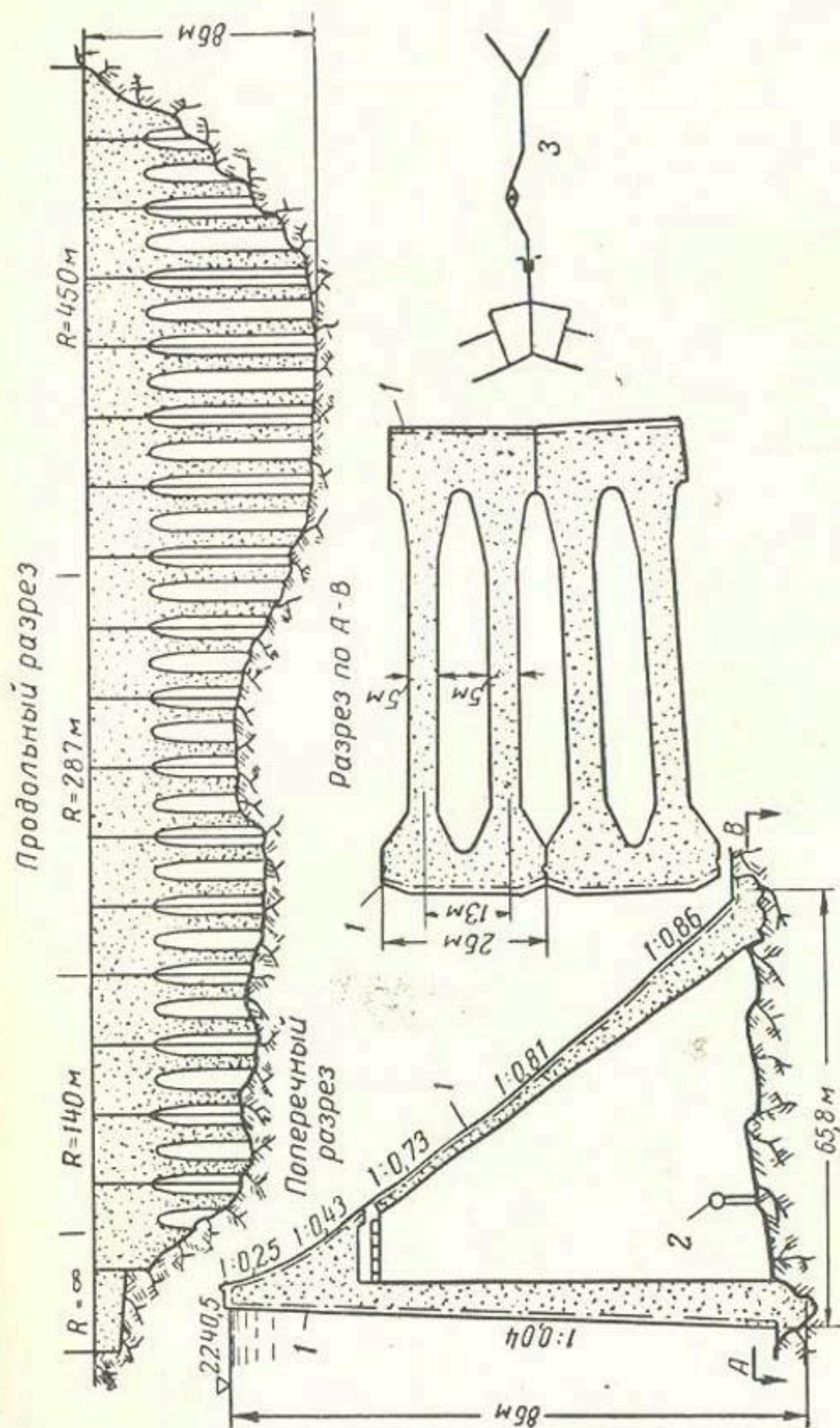


Рис. 3. Контрфорсная плотина Диксанс (Дикхенс) (Швейцария)

1 — облицовка тесовым камнем; 2 — отверстие для сообщения между полостями; 3 — уплотнение шва медными листами и асфальтом

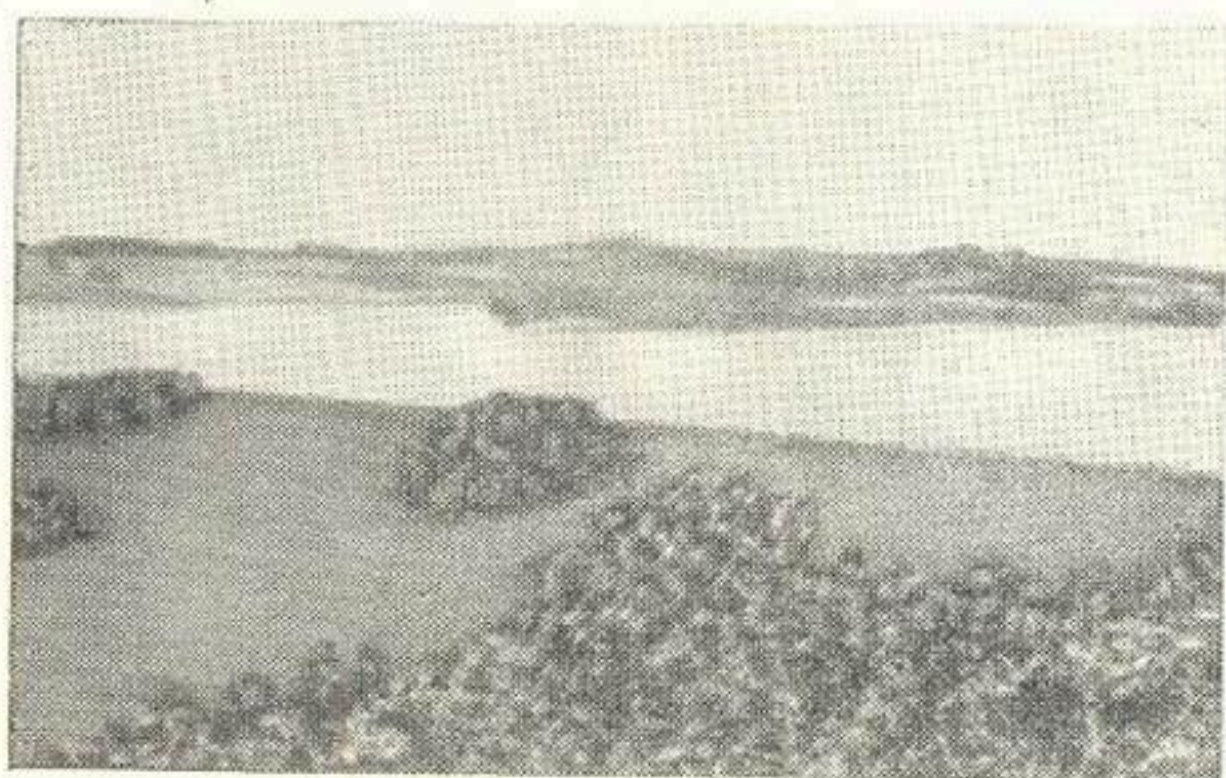


Рис. 4. Плотина Бевер (Bever) (высота 42 м)

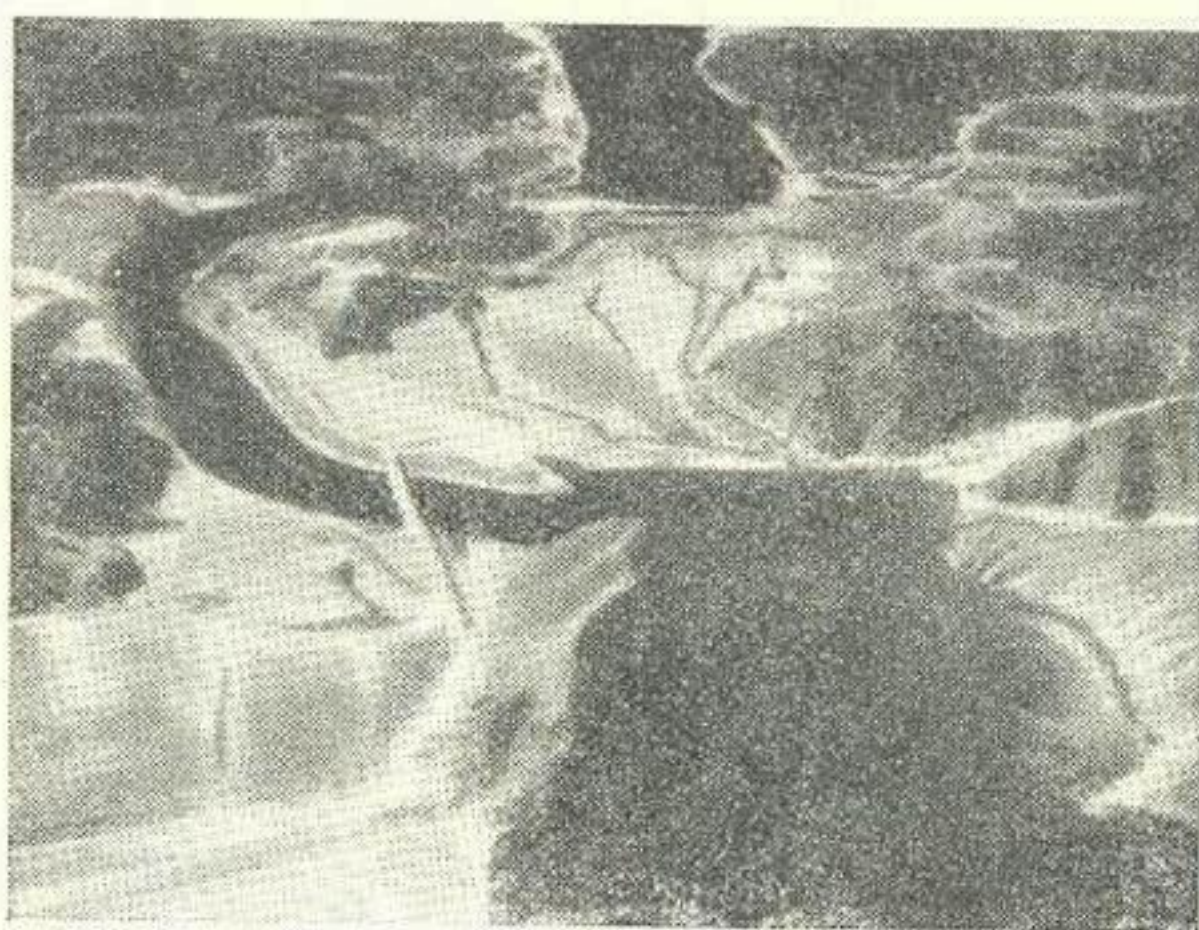


Рис. 5. Отвод р. Колорадо при строительстве водохранилищной плотины Дэвис (емкость водохранилища 2,2 млрд. м³) при помощи земляной перемычки

сейне Рура и Вуппера построены для регулирования рек и обеспечения водой населения. Водохранилищные плотины в западных штатах США служат в основном для орошения и снабжения питьевой водой, а другие плотины, такие как в бассейне Теннесси или Миссисипи, построены в целях судоходства и защиты от наводнений.

На р. Колумбия и ее главном притоке Снэйк в настоящее время воздвигаются многочисленные водохранилищные плотины, которые должны создать большую судоходную магистраль от Тихого океана до водохранилищной плотины Хеллс-Кэньон (Hells-Canyon). При многих плотинах предусмотрено сооружение гидроэлектростанций, которые будут давать большое количество энергии, без чего не было бы возможным финансировать строительство чисто водохозяйственных сооружений. В то же время нет недостатка в примерах использования водохранилищных плотин только для энергетических целей, как это имеет место в энергетике Швеции, Норвегии, Италии и Швейцарии, где производство электрической энергии почти исключительно базируется на использовании энергии рек. Особенно характерным примером для строительства водохранилищных плотин в чисто энергетических целях является гидроэлектростанция на озере Шлюхзее [3], в которое впадают реки южного Шварцвальда. Накопленную воду в озере используют для каскада трех ступеней гидроэлектростанций, расположенных до верхнего Рейна.

Вначале стремились разрешить гидротехнические и энергетические задачи посредством строительства большого числа небольших водохранилищных плотин; в настоящее время общепризнана целесообразность строительства крупных водохранилищных плотин.

Типичным примером в этом отношении может служить Калифорния [3], где население с 1940 г. по 1947 г., согласно переписи, возросло более чем на 40% и достигло 10 млн. человек.

В то же время уровень грунтовых вод в бассейне Сакраменто-Сан-Джоаким понизился местами до глубины 80 м и ниже; создавалась угроза засоления почвы от проникающей воды из моря. Эту угрозу предупредили благодаря широкому и дальновидным мероприятиям, построив водохранилищную плотину Шаста (Shasta), образующую водохранилище объемом 5,5 млрд. м³. Вместе с построенной одновременно плотиной Лейк-Миллертон (Lake-Millerton) с объемом водохранилища 0,5 млрд. м³ эти два водохрани-

лища имеют емкость в два раза больше, чем во всех 28 водохранилищах Калифорнии, построенных раньше, с общим объемом 3 млрд. m^3 . Постройка такой большой плотины позволила осуществить многолетнее регулирование стока, благодаря чему были значительно смягчены затруднения с водой в Калифорнии в засушливый 1948/49 г. Так, в водохранилищах имелись запасы:

а) на 1 мая 1947 г. — плотина Шаста — 3,1 млрд. m^3 ; 29 остальных плотин — 2,4 млрд. m^3 ;

б) на 1 мая 1948 г. — плотина Шаста — 3,7 млрд. m^3 ; 29 остальных плотин — 2,1 млрд. m^3 .

Точно так же и в Германии принимаются в расчет эти соображения при проектировании водохранилищных плотин, а также учитываются находящиеся уже в строительстве. Большое водохранилище Росхауптен (Rosshaupten) на р. Лех будет иметь емкость 170 млн. m^3 и водохранилище Сильвенштейн в бассейне р. Изара по окончании строительства — даже 1 млрд. m^3 .

Создание больших водохранилищ приводит неизбежно к строительству высоких подпорных сооружений. Так, например, находящаяся в строительстве бетонная плотина Вайонт (Vajont) (Италия) высотой 257 м будет самой высокой арочной плотиной в мире. Упомянутая выше плотина Сильвенштейн (Sylvenstein) будет иметь окончательную высоту 194 м над скальным основанием, а длину — 90 м. В основании этой плотины имеется мощный поток грунтовых вод, а поэтому перед инженерами ставятся совершенно новые задачи, которые едва ли могут быть разрешены методами, применяемыми до сих пор при строительстве плотин.

Характер основания может решить вопрос, следует ли строить эту мощную плотину арочной или каменно-набросной.

ГЛАВА 2

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Чем выше подпорное сооружение, тем больше встречается трудностей с фундированием этого сооружения; чем больше давление воды, тем плотнее должен быть грунт под сооружением и тем большую несущую способность необходимо требовать от грунта. Предварительные геологические и геотехнические исследования должны в настоящее время

проводиться значительно детальнее, чем это казалось необходимым в начале развития строительства водохранилищных плотин.

Если мы вспомним строительство водохранилищных плотин в Германии за последние 20 лет, то при строительстве многих крупных плотин обнаруживались неожиданные трудности. Эти трудности, к несчастью, вскрывались в большинстве случаев только в процессе строительства, при выемке котлована под сооружение и вызывали излишний расход средств, доходящий до 1 млн. марок и больше.

Для экономичности сооружения водохранилищной плотины весьма существенное значение имеет то, чтобы недостатки основания будущей плотины распознавались своевременно, чтобы можно было или найти своевременно более подходящее место для возведения плотины, или заранее учесть ожидаемые трудности строительства. Однако это требует более глубокого изучения геологических и геотехнических условий основания сооружения, чем это имело место до сих пор. В соответствии с опытом корпуса инженеров Военного департамента США, геологи которого изучили за последние 15 лет свыше 1 000 проектов водохранилищных плотин при самых различных петрографических условиях, причем из этих проектов более 100 уже осуществлены или осуществляются, предварительные геологические исследования охватывают следующие вопросы:

- а) установление физико-географической и геологической истории водораздела;
- б) определение общего характера залегания скальных пластов;
- в) установление общей картины грунтовых вод с особым учетом возможности утечек воды из водохранилища;
- г) обеспечение подходящими строительными материалами;
- д) исследование возможного отрицательного влияния подпора на условия верхнего бьефа;
- е) установление подходящего места створа плотины в районе, намеченном по данным предварительного исследования;
- ж) геофизическое исследование залегания слоев в створе плотины в связи с условиями местности;
- з) составление геологических карт и профилей створа плотины;

- и) детальное геотехническое исследование створа плотины в целях нахождения наилучшего;
- к) установление характера пород, залегания и структур их на выбранном месте створа;
- л) приближенное установление глубины залегания скальной породы, на которой можно основать сооружение, или положения водонепроницаемого слоя (водопора);
- м) исследование физических свойств грунтов основания;
- н) установление количества и качества строительных материалов;
- о) установление режима грунтовых вод.

Геологическое исследование может быть ограничено во многих случаях получением керна с минимальным диаметром 75 мм. В случае сложного геологического строения рекомендуется применение буров Каликс диаметром 900 мм по дну долины и устройство штолен на склонах. Очень существенно, чтобы керны исследовались опытными петрографами. Затем необходимо использовать буровые скважины, чтобы провести опыты на водопроницаемость. Скважины должны быть тщательно нанесены на карту. Скальное основание должно быть проверено на вертикальное давление сжатию, срезу, на прочность сцепления с бетоном, на сопротивление при чередующемся смачивании и высыхании. Кроме того, важно определить объемный вес и модуль упругости E , причем в этом случае речь идет в меньшей степени о модуле упругости образцов породы, чем о модуле упругости массива трещиноватой породы, который значительно ниже.

Очень поучительны для характеристики доброкачественности горной породы также исследования на упругий удар, которые производят путем сбрасывания металлического шарика с определенной высоты на образец горной породы. Высота прыжка шарика дает при этом непосредственный критерий доброкачественности породы.

ГЛАВА 3

УСТРОЙСТВО ОСНОВАНИЙ

Работы по строительству водоподпорного сооружения не следует начинать до тех пор, пока не будет уверенности в том, что в дальнейшем не потребуются более или менее значительные изменения в проекте, связанные с большими затратами.

Можно работать экономично и соблюдать сроки строительства только в том случае, если основание подпорного сооружения детально изучено. Поэтому нельзя удовлетворяться предварительными геологическими и геотехническими исследованиями основания сооружения там, где могут встретиться трудности фундирования, необходимо прибегать в таких случаях к устройству шахт и тоннелей, как

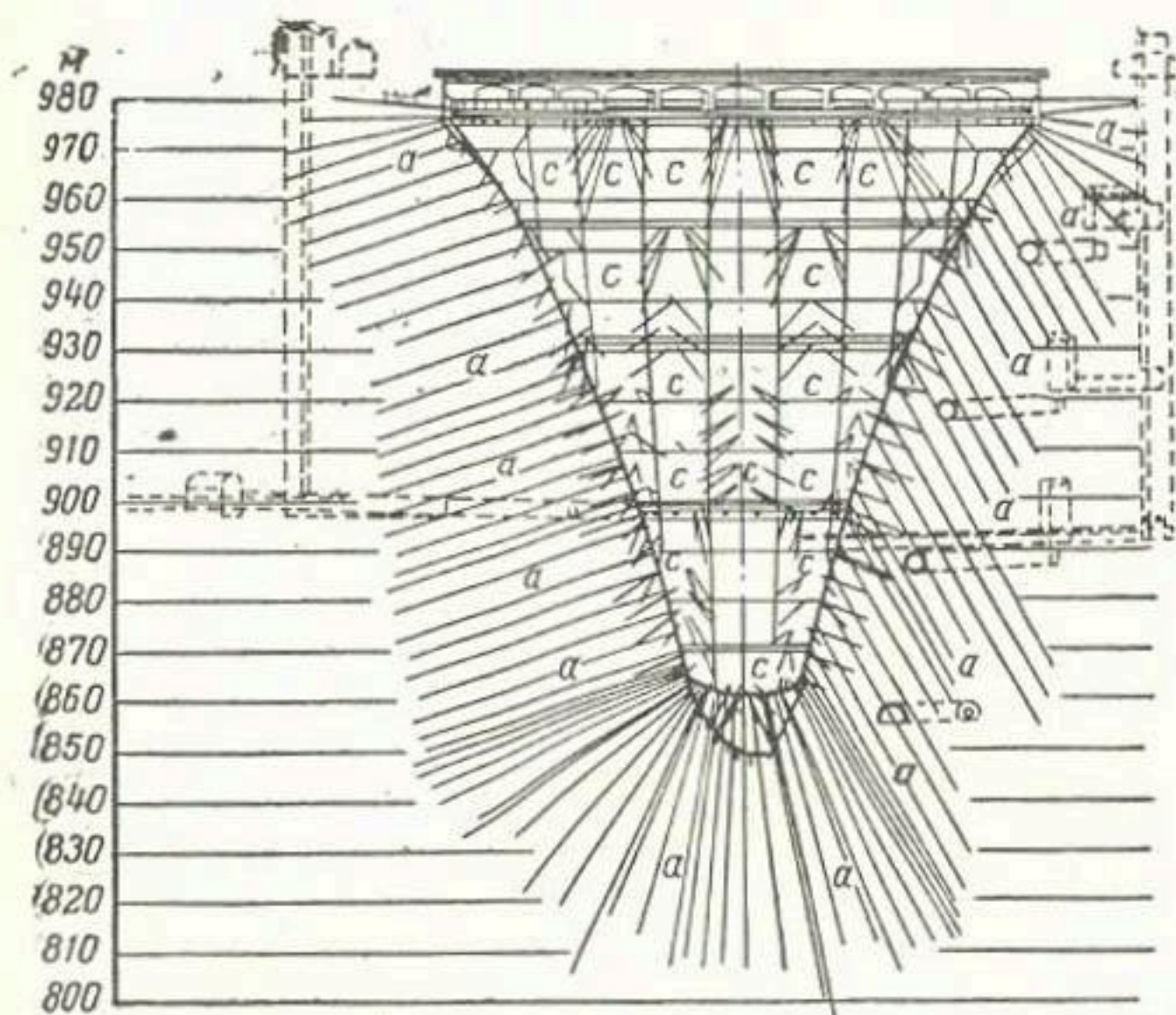


Рис. 6. Плотина Лумиси (Lumici). Цементация

это показано на рис. 6. Ценную помощь могут оказать также буры Каликс, которыми можно пробурить скважины большого диаметра, дающие возможность осмотреть стенки скважины. При осмотре скважины можно установить характер залегания и качество породы, наличие трещин и степень водопроницаемости породы, что дает возможность судить о величине противодействия воды на подошву сооружения и о необходимых противофильтрационных мероприятиях.

Особая тщательность исследования требуется в случае складчатых и пронизанных сбросами слоев породы, а также при наличии растворимых в воде пород, таких как известняк, доломит, мрамор и гипс. Такого же тщательного исследования требуют горные породы, которые имеют

склонность к быстрому распаду на воздухе или в воде, например мергель или сланцевые глины.

При плотинах более или менее высокого напора верхние слои грунта по всей площади основания вынимаются вплоть до слоя прочной «звонкой», способной к большому сопротивлению породы. Если при этом невозможно обойтись без взрывных работ, то необходимо все же иметь в виду, что излишние и неправильно проводимые взрывные работы могут повлечь за собой значительные разрыхления грунта. Установилось хорошее правило — при выемке грунта из котлована с помощью взрывных работ ограничиваться удалением только верхнего слоя, достигающего $\frac{2}{3}$ общей глубины выемки, и при этом постепенно уменьшать размер зарядов взрывчатых веществ по мере продвижения сверху вниз. Во всяком случае, последние полметра должны быть вынуты без помощи каких бы то ни было взрывчатых веществ; здесь, следовательно, нужно органичиваться кирками, клиньями и пневматическими молотками, а зачистку производить только ручным способом.

Хорошее сцепление между бетоном и скалой может быть достигнуто только при том условии, если непосредственно перед бетонированием поверхность скалы очищается самым тщательным образом. Необходимо добиться надежного устранения не только глины, ила и грязи, но даже возможного следа жиров. В соответствии с этим после промывки скалы струей воды должна производиться еще тщательная очистка скалы вручную при помощи губки до тех пор, пока вода, которой промывается скала, не будет совершенно прозрачной. Если на такую тщательно очищенную поверхность вначале нанести слой раствора толщиной в 5—10 см, а затем слой жирного бетона, то, как показывает опыт, в этом случае прочность на разрыв по шву основания почти не отличается от прочности обычного бетона.

При наличии горных пород, которые на воздухе или в воде имеют склонность к быстрому распаду, слой жирного раствора должен быть нанесен сразу же после очистки скалы. Из этого положения неизбежно вытекает, что выемка должна производиться только небольшими участками. Как показывает опыт, при таком методическом производстве работ по основанию даже в очень затруднительных условиях может быть достигнуто удовлетворительное сцепление между бетоном, и, например, глинистым сланцем.

При устройстве оснований плотин необходимо с особой тщательностью исследовать, не могут ли на более или ме-

нее значительной глубине под сооружением образоваться поверхности скольжения. Такие поверхности скольжения могут быть обусловлены не только тектоникой, но также и характером горной породы. Они ни в коем случае не ограничиваются слоистыми горными породами, как это показывают зоны разрушения в более древних гранитных формациях, в которых в доисторическое время масса, бывшая до того монолитной, утратила эту монолитность в результате воздействия горячих паров или чрезвычайно высокого горного давления. В таких случаях самое надежное при выборе основания—дойти до такой породы, где образование поверхности скольжения и сдвига исключено. Как показывает пример строительства плотины Шлюхзее, иногда бывает возможным достигнуть поставленной цели при помощи зуба в скальном основании, что обеспечивает передачу скале сдвигающей силы. В случае долин с эрозионными руслами, что часто встречается, необходимо при выемке быть безусловно уверенным в том, что русло не располагается в трещине, идущей на большую глубину вдоль долины. В этом случае некоторые, обычно весьма экономичные, типы плотин, как, например, арочные плотины, должны быть исключены ввиду опасности недопустимого расширения долины под действием высокого напора воды.

Как показывают различные примеры возведения высоких водоподпорных плотин, обнаружение продольных трещин в период строительства влечет за собой чрезвычайно тяжелые последствия, так как это требует составления совершенно нового проекта при значительно более неблагоприятных условиях его осуществления.

В противоположность бетонным плотинам земляные плотины или плотины из каменной наброски могут воздвигаться и на податливых, не скальных основаниях. Так как в большинстве случаев не требуется удалять более или менее мощные современные отложения над скалой, то основание земляной плотины располагается почти всегда на более высоком уровне, чем основание бетонной плотины. Поэтому зачастую целесообразно строить земляную или набросную плотину также и там, где по условиям горной местности можно было бы отдать предпочтение бетонной плотине.

Хотя требования к основанию земляной или набросной плотины и могут быть менее высокими, но и при этих условиях не следует проводить геологические и геотехнические исследования менее основательно. Необходимо добить-

ся полной ясности в вопросе о наличии водопроницаемых, неустойчивых и вообще непригодных слоев основания, чтобы иметь возможность выполнить такие мероприятия, какие необходимы для обеспечения устойчивости плотины. В этом отношении механика грунтов располагает в настоящее время уже такой совершенной аппаратурой для исследования связных и несвязных грунтов, что фактически возможно исчерпывающе выяснить все интересующие нас вопросы. В то время как сомнительные верхние слои грунта, расположенные в непосредственной близости к проектной отметке основания сооружения, удаляются, на большей глубине породы могут быть искусственно укреплены.

Для земляных плотин очень существенно, чтобы со стороны нижнего бьефа была сделана пригрузка из камня или дренаж, которые должны быть продолжены до низового откоса плотины, чтобы обеспечить выход фильтрующейся воды в нижний бьеф.

Особенно эффективна наброска у подошвы низового откоса из камня крупности, соответствующей высоте сооружения (рис. 7) [7].

ГЛАВА 4

БОРЬБА С ФИЛЬТРАЦИЕЙ В ОСНОВАНИИ ПЛОТИН

Если верхний слой основания плотен и свободен от трещин, то можно удовлетворяться мероприятиями, описанными в предыдущей главе. Однако в большинстве случаев условия являются менее благоприятными, так что требуются особые мероприятия для борьбы с фильтрацией в основании.

Если при устройстве земляной или набросной плотины основанием ее является водопроницаемый грунт, лежащий на плотной скале, то самый надежный путь в данном случае—доведение водонепроницаемых частей плотины до скалы. При возведении упомянутой выше плотины Андерсон-Рэнч, которая является в настоящее время одной из самых высоких земляных плотин, было устроено ядро из глины, сопрягающееся в основании со скалой. При устройстве ядра в основании плотины была сделана широкая траншея, вдоль которой располагались 2 бетонные стенки толщиной 1 м и высотой 3 м (рис. 7 и 8) [7]. Эти стенки должны препятствовать фильтрации воды по контакту с ос-

нованием и использовались для производства цементации основания на глубину до 45 м.

Если в земляных плотинах устраивается бетонная диафрагма или при бетонных плотинах необходимы противофильтрационные мероприятия, то в этом случае наиболее надежным будет устройство глубокого зуба, как это показано на рис. 9 [8]. Этот зуб устраивается в форме бетон-

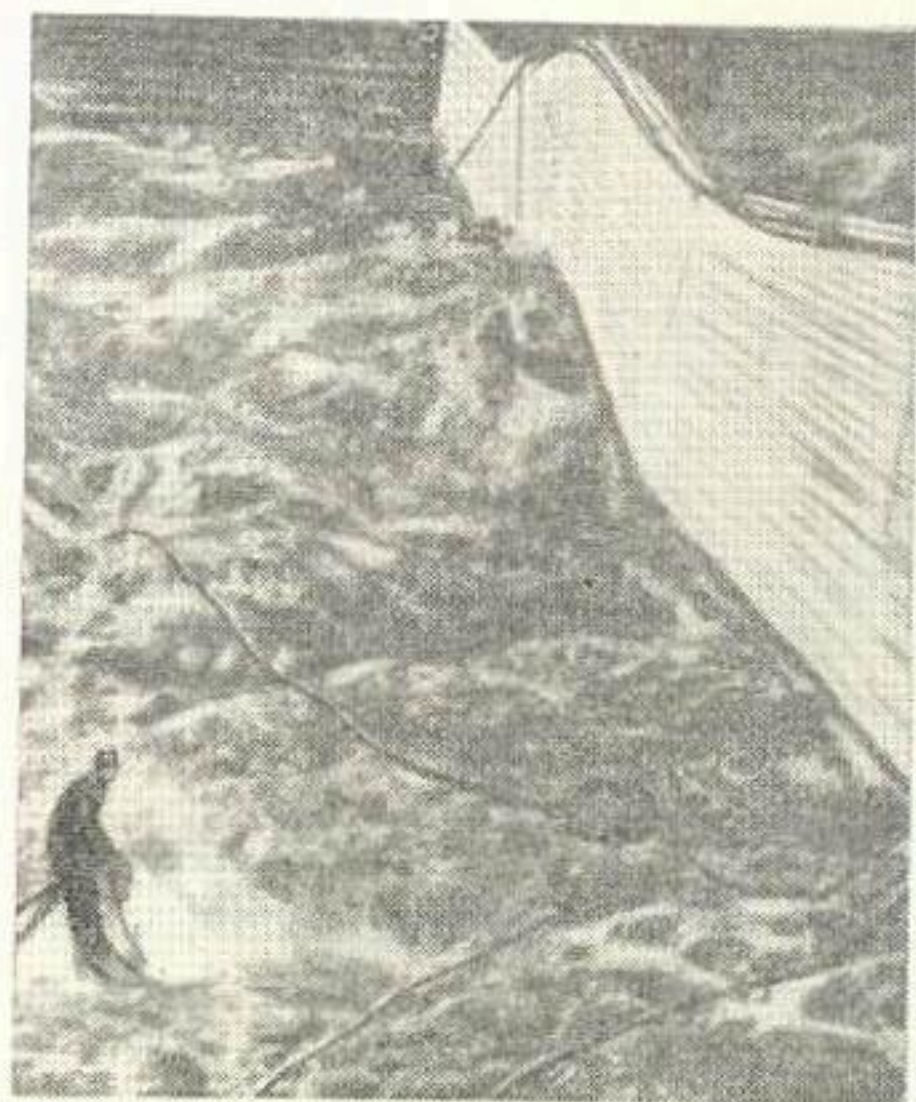


Рис. 8. Плотина Андерсон-Рэнч. Подготовка основания и зуба плотины

ной стенки, расположенной со стороны верхнего бьефа и имеющей толщину минимум 1,5 м. Зуб заглубляется до водоупора или до слоев, когда фильтрация воды не будет опасна в смысле возможности разрушения основания, и потери воды на фильтрацию несущественны.

Устройство такого зуба преследует цель создания непроницаемой преграды для фильтрационных потоков со стороны верхнего бьефа. Поэтому этот зуб, там где это возможно, доводится, как уже было сказано, до водонепроницаемой зоны основания. Кроме того, зуб по своей длине должен выходить за пределы плотины, чтобы избежать разрушения грунта в берегах фильтрующим потоком в обход плотины. Часто проницаемые слои уходят далеко в глубь берегов. В этом случае часть зуба, выходящая за пределы плотины, имеет своим назначением ослабление действия фильтрующейся воды, что достигается удлинением пути фильтрации вдоль зуба.

Как далеко может уходить зуб за пределы плотины, можно видеть на примере плотины Дервент, у которой он с одной стороны выходит за пределы плотины на 250 м и с другой—на 180 м.

Значительных размеров достигают зубья плотин и в глубину. Так, зуб водохранилищной плотины Ледибауер имеет среднюю глубину 55 м, а максимальную — 85 м [5].

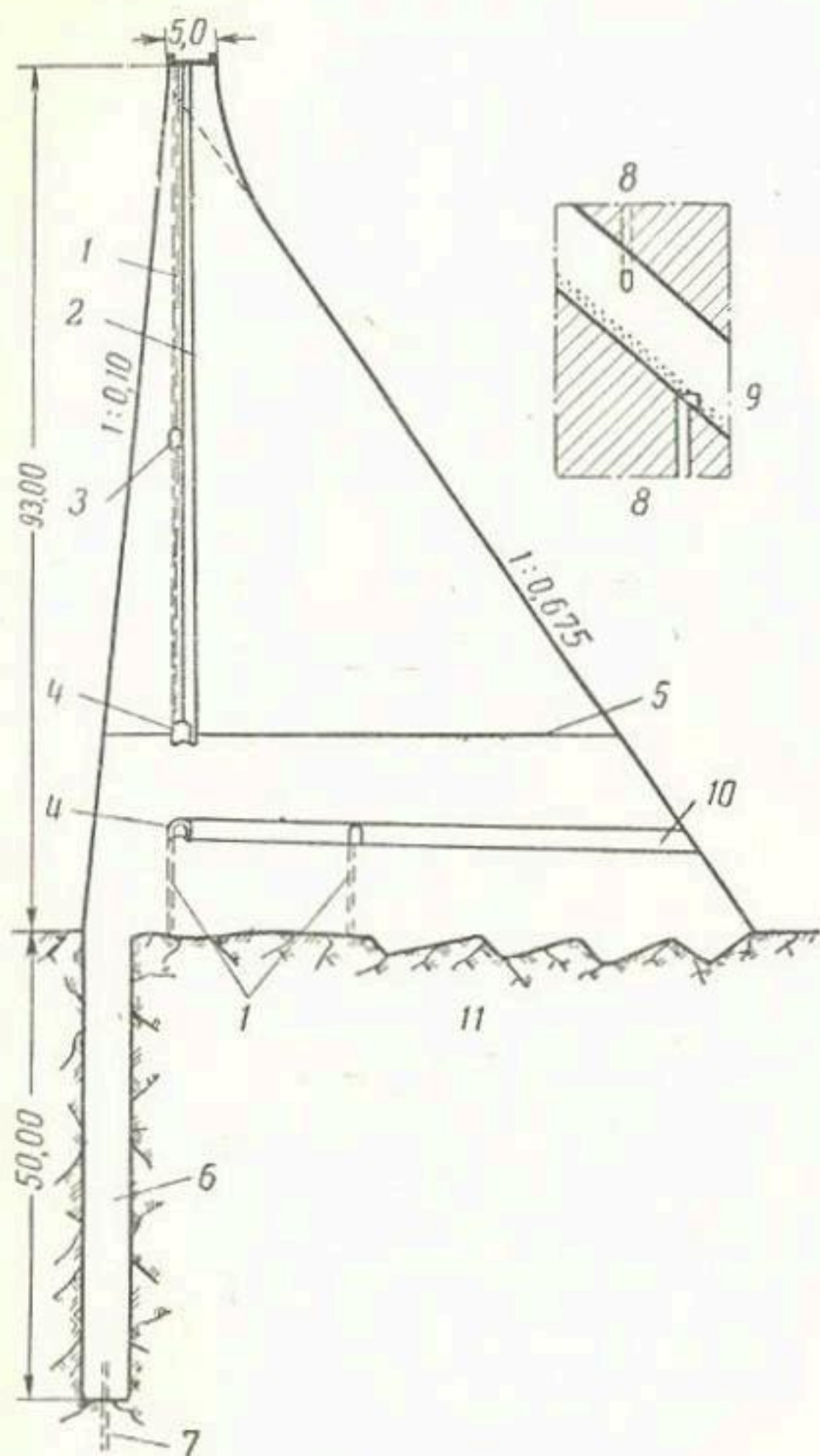


Рис. 9. Поперечный разрез плотины Уэд-Фодда (L'Qued-Fodda)

1—дренажные трубы диаметром 30 см через каждые 30 м; 2—наблюдательные шахты в швах; 3—смотровые галереи; 4—дренажная галерея; 5—начало вертикальных швов; 6—глубокий зуб плотин; 7—цементационная завеса (цементация производилась под давлением от 50 до 60 ат); 8—дренажные трубы диаметром 30 см; 9—смотровая и дренажная галерея; 10—дренажные поперечные (отводящие) галереи; 11—сильно трещиноватый известняк

В речных долинах, где расходы воды незначительны или даже сток прерывается на несколько месяцев, устройство глубокого бетонного зуба в большинстве случаев не представляет никаких затруднений при современных водоотливных средствах, а если нужно, то поставленная цель достигается путем понижения уровня грунтовых вод.

Иначе обстоит дело, если речь идет о более значительных реках и к тому же в зонах, где в любое время можно опасаться паводков. В этих условиях можно достичь поставленной цели путем опускания кессонов, а в трудных условиях применяется опускание кессонов с одновременным понижением уровня грунтовых вод. Замечательным примером может служить сооружение плотины Сайлент-Велли (Silent-Valley), у которой бетонный зуб был опущен на глубину 65 м в грунте с большим притоком грунтовой воды. Эту задачу удалось разрешить в результате сооружения ряда глубоких шахт в районе зуба, которые использовались в процессе строительства как колодцы для понижения грунтовых вод [5].

Когда шахты достигли требуемой глубины, они были соединены между собой посредством траншеи шириной в 1,5 м, которая была построена без применения сжатого воздуха и оштукатурена жирным бетоном. Проходка шахт была выполнена двумя ступенями. Когда одна шахта дошла до такой глубины, что сжатый воздух достиг максимально допустимого значения в 2,5 ат, тогда на нижнем конце шахты был образован обратный фильтр, установлен насос, снято давление воздуха, и уровень грунтовой воды был понижен в такой степени, что соседние шахты смогли быть опущены под сжатым воздухом на большую глубину. Пока это происходило, на шахтах, понижавших уровень грунтовой воды, было начато строительство новых кессонов, которые затем были погружены дальше после нового включения сжатого воздуха и при одновременной откачке воды.

Когда при строительстве подпорного сооружения Сильвенштейн нужно было опустить бетонный зуб на глубину 90 м через весьма водоносный грунт, то перед техникой строительства основания плотины была поставлена в связи с этим чрезвычайно трудная задача. Существует взгляд, что такого рода задачи с уверенностью и экономично могут решаться без открытого водоотлива, без понижения уровня грунтовой воды и без использования сжатого воздуха, путем применения крупных опускных колодцев

при развитии соответствующих специальных методов работ.

При водопроницаемых скальных породах в настоящее время все больше и больше отдается предпочтение цементации, если это позволяет характер породы. Для этой цели в скале производится бурение скважин диаметром от 60 до 120 мм на расстоянии от 1,5 до 6 м в зависимости от характера скалы на глубину, обеспечивающую надежный контакт с непроницаемым слоем горной породы. В эти скважины нагнетается цементное молоко. Существенно важно, чтобы в момент нагнетания на поверхности скалы уже был налицо слой бетона такой высоты, чтобы он был в состоянии противостоять противодавлению, обусловленному нагнетанием. Благодаря этому предупреждается приподнимание и разрыхление слоев горной породы при нагнетании при более высоких давлениях и достигается значительная экономия в цементе. Повторного бурения бетонного слоя можно избежать путем введения в него соответствующих труб. В случае плотин земляных или каменно-набросных для подготовки такого бетонного слоя делаются специальные устройства типа диафрагм (рис. 8) [7].

В случае вертикальных или круто наклонных слоев породы и трещин можно применять наклонное бурение или, еще лучше, горизонтальные буровые скважины, которые проходят из соответствующих шахт.

У арочной плотины Санта Джиустина (S. Giustina) [4], достигающей 153 м высоты и являющейся в настоящее время одной из самых высоких плотин в Европе, понадобилась противофильтрационная завеса чрезвычайно больших размеров (рис. 10) в сильно нарушенных доломитовых формациях долины Ноче, учитывая давление воды в 15 ат. Цементные скважины достигают общей длины в 30 км и общая потребность в цементе выразилась в 3 000 т. Наряду с этими работами были проведены еще и другие многочисленные работы, чтобы заделать большое число трещин и некоторые сбросы, из которых один особенно мощный сброс пересекал русло долины немного ниже плотины.

Работы по цементации должны всегда начинаться с нагнетания воды, чтобы промыть и освободить трещины от глины и ила, которые неблагоприятно воздействовали бы на сцепление между скалой и цементом. Вслед за этим целесообразно проводить испытание скважин водой под давлением, чтобы получить представление об имеющейся

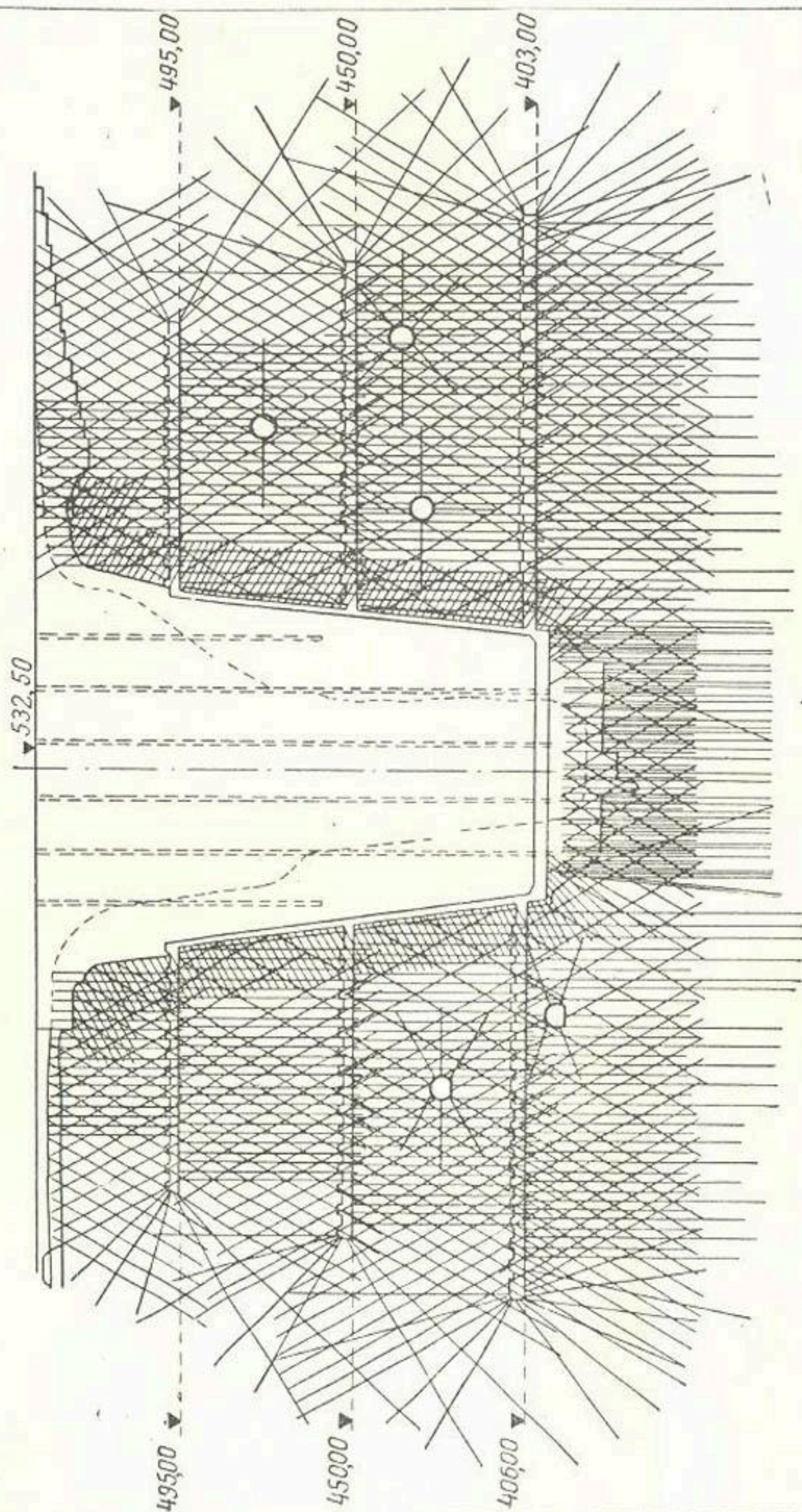


Рис. 10. Схема цементации арочной плотины Санта Джюстина

налицо проницаемости и выбрать необходимую дозировку цемента. Нагнетание цемента производится вначале тощим раствором, но постепенно доза цемента повышается. Чем мельче трещины, тем более тощим должен быть раствор. При маленьких трещинах и узких расщелинах наиболее целесообразными оказались смеси с водоцементным отношением от 8 до 25. Как только скважина не принимает больше цементного молока, она очищается, пока цементное молоко еще не схватилось. Затем скважина проверяется еще раз посредством нагнетания воды под давлением. Если она продолжает принимать воду, то операция нагнетания цемента проводится еще раз и в случае необходимости даже третий раз. Вместо многократного нагнетания можно пробурить промежуточные скважины и произвести нагнетание в них. Последнему методу отдается предпочтение, в особенности в США, где применяют расстояние между буровыми скважинами в 6 м и по мере необходимости закладывают промежуточные скважины.

В упомянутой выше плотине Андерсон-Рэнч под обеими бетонными стенками в основании плотины были, например, устроены цементационные скважины на расстоянии друг от друга в 3 м, в то время как глубины этих скважин выражались последовательно в следующих цифрах: 15, 30, 15, 45, 15, 30, 45, 30... м. При неудовлетворительном качестве скалы число скважин соответственно увеличивалось. Диаметр скважин составлял в среднем 60 мм. Скважины глубиной в 15 м бурились методом ударного бурения, а остальные скважины — методом вращательного бурения. Нагнетание производилось по ступеням от 6 до 9 м. Давление нагнетания составляло в верхних ступенях от 2 до 4 ат (избыточного давления) и доходило в нижних ступенях до 15 ат. В верхней части основания работа производилась с относительно густым раствором (водоцементное отношение по объему 2), в то время как в остальных случаях — с водоцементным отношением 5. В среднем на каждый метр скважины расходовалось 150 л цемента.

Как показывают цементационные работы на упомянутой выше плотине Андерсон-Рэнч метод нагнетания по ступеням получил в настоящее время всеобщее признание. Работу начинают под слоем бетона, пробуривают скважину до определенной глубины (максимально около 6 м), производят очистку, проверяют с помощью нагнетания воды и производят нагнетание при относительно малом давлении.

Затем бурение продолжается на бóльшую глубину и вся процедура повторяется, но уже при более высоком давлении. Дальнейшая работа проводится при постоянном увеличении давления с глубиной до тех пор, пока уменьшение количества поглощаемого цемента не позволит установить, что работу можно прекратить. При этом методе, с одной стороны, в результате постепенного повышения давления не повреждается скала и, с другой стороны, обеспечивается экономия в цементе, так как в противном случае в верхней части цементное молоко выходило бы наружу и бесполезно разливалось бы по поверхности.

При сильно трещиноватых горных породах созданию цементационной завесы должна предшествовать цементация всей скалы при малом давлении, в результате чего закрываются все видимые с поверхности расщелины и трещины и устраняется незначительное разрыхление, которое является неизбежным даже при самой осторожной выемке породы. В отношении цементационных скважин, разбросанных вдоль и поперек в соответствии с расположением трещин, которые должны быть обработаны, можно удовлетворяться глубиной скважин от 2 до 8 м. Так как без бетонной пригрузки скалы, соответствующей давлению нагнетания, невозможно достигнуть успешного проведения цементации в ширину без значительных потерь цемента, то цементационные работы при низком давлении в поверхностных слоях скалы возможны только при бетонных плотинах.

Ни в коем случае не рекомендуется с низовой стороны завесы вести цементацию под высоким давлением, так как в результате этого нарушается естественный дренаж основания. У некоторых видов плотин, например у гравитационных массивных плотин, естественный дренаж основания позади цементационной завесы имеет исключительное значение, так как благодаря ему в значительной мере снижается вредное фильтрационное противодействие воды на подошву сооружения. И при земляных плотинах нарушение естественного дренажа основания очень вредно, так как это может вызвать возникновение «артезианского давления» в нижнем бьефе и вместе с этим нежелательны высокие скорости фильтрации по подошве плотины.

В случае гравитационных массивных плотин очень выгодно позади цементационной завесы расположить на некотором расстоянии ряд дренажных скважин, благодаря чему вредное противодействие на подошву сооружения

снижается еще в большей степени. Одновременно благодаря этому создается весьма желательный контроль за качеством цементационной завесы, которая может быть испытана, разумеется, только при первом наполнении водохранилища.

Нередко в нижнем бьефе за цементационной завесой обнаруживаются источники (ключи). В этом случае не рекомендуется тампонировать упомянутые источники засыпкой их грунтом, а следует вывести их по трубам диаметром по меньшей мере 80 мм, подключив их к шахтам или тоннелям, и отсюда отвести фильтрующуюся воду к зумпфу насосов. Таким же образом предотвращается образование нежелательного «артезианского давления» в основании. Источники, которые обнаруживаются с верховой стороны цементационной завесы, обрабатываются точно так же, только с той разницей, что позже они ликвидируются с помощью цементации.

Чтобы иметь возможность в будущем возобновить цементацию, все цементируемые скважины целесообразно вводить в продольную штольную или галерею, которая проходит параллельно поверхности основания. Такие штольни (галереи) все чаще устраиваются в настоящее время не только у бетонных, но также и у земляных плотин.

Чтобы смесительная и насосная установки для цементации работали целесообразно и экономично, они должны быть оснащены многочисленным дополнительным оборудованием. Организация работ корпуса инженеров США [5], оправдавшая себя при строительстве более чем 100 водохранилищных плотин, из которых некоторые очень крупные характеризуются следующими показателями: а) наличие растворомешалки с приспособлением для обеспечения постоянной консистенции раствора; б) установление связи между цементируемой скважиной и растворомешалкой с целью поддержания на постоянном уровне числа оборотов насосов, давления и предотвращения излишнего расхода цементного молока; в) водомер и трубы для подвода воды к растворомешалке, а также для очистки скважины; г) плотно пригнанные вентили (клапаны) и измерительные приборы для контроля давления.

В случае больших пустот цементное молоко должно сгущаться добавлением известковой муки или мелкого песка. В очень трудных случаях к цели приводило добавление опилок или хлопчатобумажного тряпья. В скальных породах с ярко выраженными пустотами (кавернами) доступ

к ним обеспечивается с помощью бурения буром Каликс, затем эти пустоты очищаются и бетонируются, после чего можно проводить нормальную цементацию таких пород. В случае равномерно пористых пород цементация в большинстве случаев не оправдала себя: цементное молоко не протекает в поры. Иногда такие пористые породы удавалось уплотнять путем нагнетания химикалий.

Очень спорным вопросом в цементации является вопрос о давлении при нагнетании цемента. В некоторых странах применяют очень высокие давления, достигающие до 50 ат, в других же странах рекомендуют большую осторожность. В Германии в последнее время большое значение придается тому, чтобы использовать чрезвычайно мелко перемолотый цемент, обеспечивающий возможность раствору попасть без слишком большого давления даже в самые мелкие трещины. Так как очень мелко перемолотый цемент чрезвычайно быстро схватывается, то одновременно должны вводиться замедлители схватывания, например фосфорная кислота.

Инъекция цемента для уплотнения основания применяется только как общее правило. При более трудных условиях и в особенности при уплотнении основания земляных плотин хорошо оправдала себя инъекция бетонного раствора (глинизация), силикатирование и битумизация отдельно или в соединении с цементным раствором.

ГЛАВА 5

ВЫБОР ЦЕМЕНТА

При выборе цемента для строительства водохранилищных плотин решающими являются следующие его свойства: тепловыделение (экзотермия), прочность, небольшое содержание извести и стойкость против действия слабых кислот.

Каждый цемент выделяет при схватывании некоторое количество теплоты, это явление называется экзотермией. Вследствие чего затвердевший в опалубке бетон имеет более высокую температуру, чем та, которая соответствует среднегодовой температуре воздуха. Так как в крупных массивах бетонных сооружений отдача теплоты схватывания окружающему воздуху требует нескольких лет, то в бетонной плотине, например, после уравнивания ее температуры со

средней годовой температурой не хватает такого количества бетона, какое соответствует уменьшению объема в результате отдачи тепла. Например, если для 1 млн. м³ бетона повышение температуры, вызванное экзотермией, составляет 20° и если коэффициент теплового расширения составляет $\frac{1}{100\ 000}$, то после выравнивания температуры плотины со средней годовой температурой будет не хватать 200 м³ бетона.

Следствием этого дефицита являются значительные температурные напряжения, которые привели бы к образованию многочисленных трещин, если бы в результате устройства швов в бетонной кладке не была бы обеспечена возможность освободиться от этих напряжений. В некоторых случаях, например в арочных плотинах или в контрфорсах контрфорсных плотин, вынуждены добавлять недостающий материал в форме заполняющего раствора, который нагнетается в швы, открывшиеся в результате сжатия бетона. Так как этого процесса нельзя ждать годами ввиду необходимости принятия в эксплуатацию плотины, то выравнивание со средней годовой температурой проводится путем искусственного охлаждения, что при больших плотинах связано со значительными расходами. Поэтому при строительстве бетонных плотин предпочтение отдается таким видам цемента, которые при одинаковых свойствах прочности обладают наименьшей отдачей тепла.

На рис. 11 показаны повышения температуры для некоторых видов цемента, установленные Мусгнугом [9] при схватывании 1 кг цемента в изолированном ящике. Из графика видно, что шлаковый цемент имеет значительно меньшую экзотермию, чем портландский цемент. Поэтому было исключительно правильно, когда, например, при строительстве многочисленных водохранилищных плотин в бассейне озера Шлюхзее, был использован главным образом цемент из доменных шлаков.

Пуццолановый портландцемент, или трассовый портландцемент, который изготавливается при совместном перемалывании 70% клинкера портландского цемента и 30% трасса (пуццоланы), имеет такие же благоприятные качества в отношении экзотермии и почти равноценен портландскому цементу в отношении прочности.

Второе свойство, имеющее решающее значение при выборе цемента, — это его прочность. Прочность определяется по закону водоцементного фактора Абрамса, по которому прочность цемента зависит от весового соотношения

между водой и цементом. Из диаграммы рис. 12 видна приблизительная картина изменения прочности бетона на сжа-

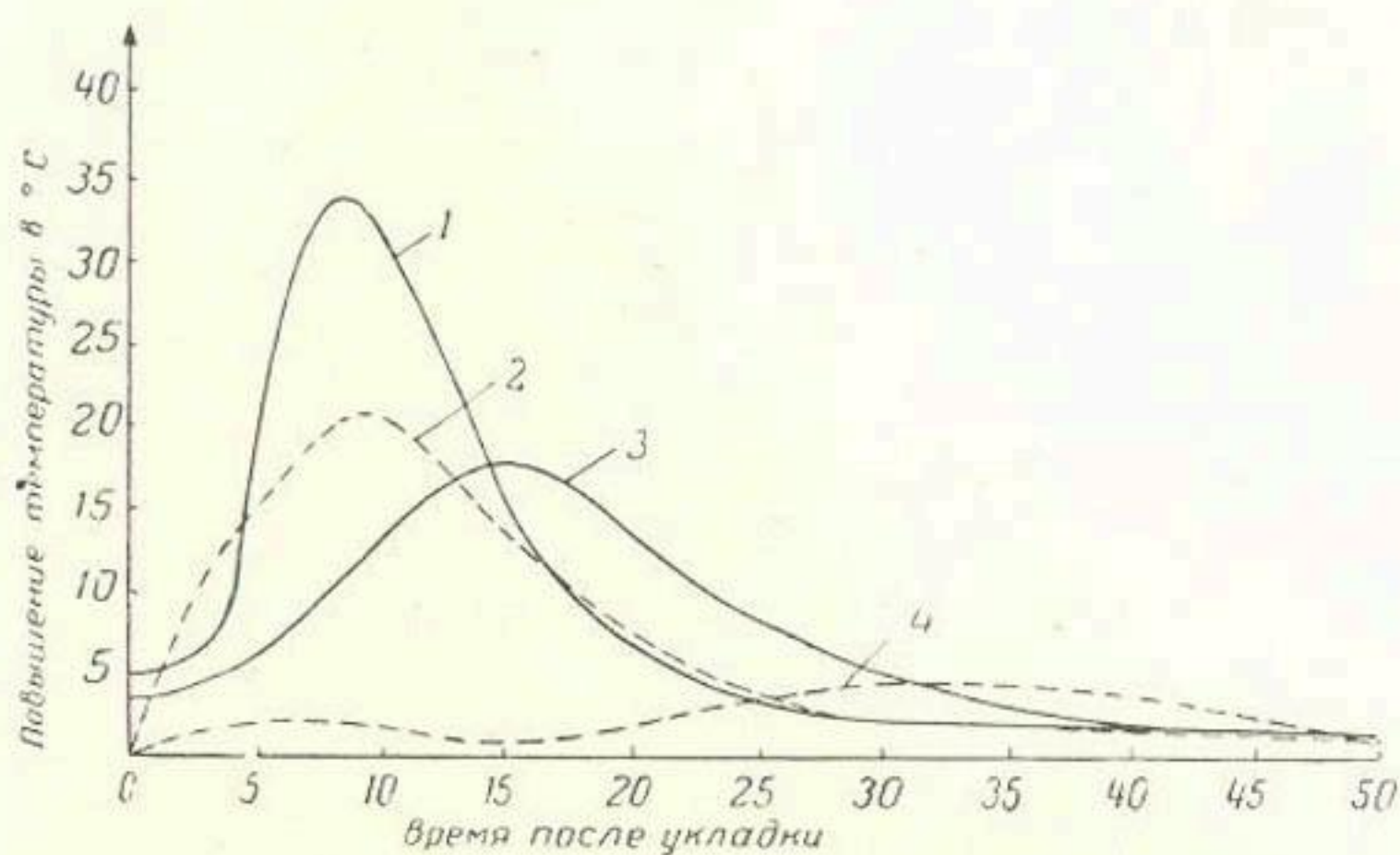


Рис. 11. График повышения температуры при схватывании и твердении разных цементов (по Мусгнугу)

1—портландский цемент; 2—3—шлаковый цемент; 4—сульфатный цемент

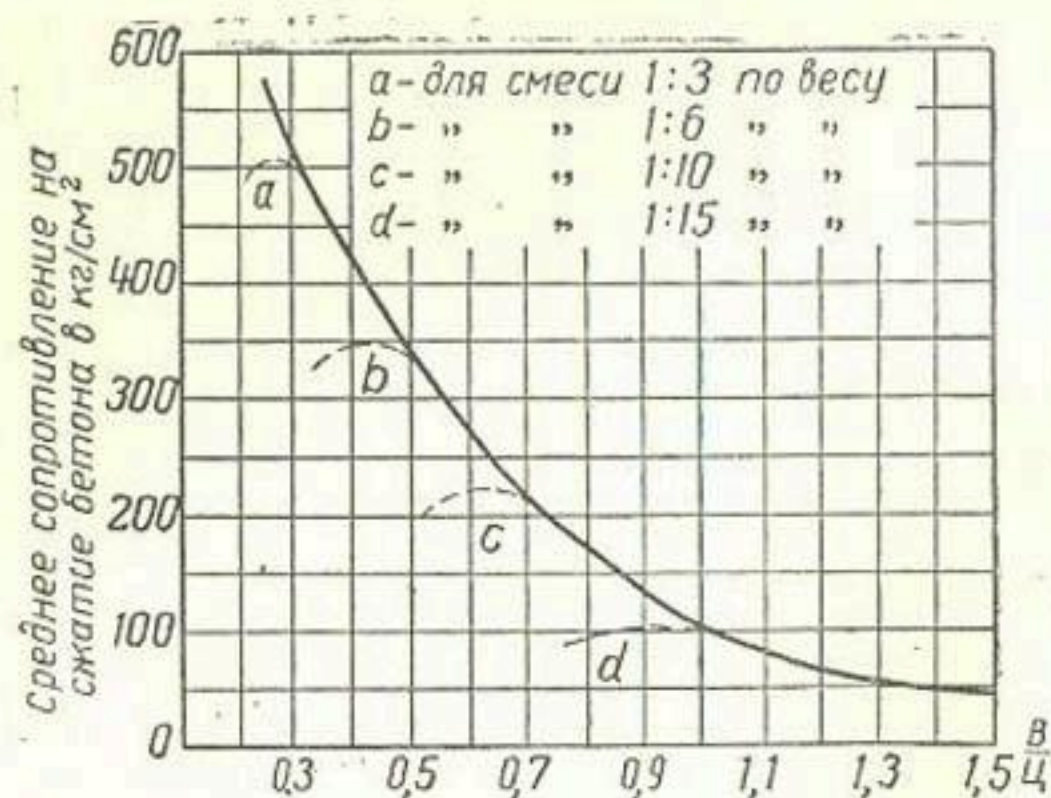


Рис. 12. График прочности шлакового и пуццоланового портландцемента на сжатие в зависимости от водоцементного отношения (по Гуммелю)

тие в возрасте 28 дней в зависимости от водоцементного отношения для шлакового цемента и для пуццоланового портландцемента. Как будет показано ниже, с помощью

нового мощного вибратора Маммут можно без особого труда достигнуть величин водоцементного фактора от 0,45 до 0,40, что соответствовало бы 28-дневной прочности бетона на сжатие примерно 400 кг/см^2 и годовой прочности примерно 500 кг/см^2 . Принимая пятикратный запас, можно считать, что такой бетон мог бы, несомненно, выдерживать напряжение в 100 кг/см^2 . Но это напряжение превышает те максимальные, которые до сих пор допускались для арочных бетонных плотин и составляли 80 кг/см^2 .

Третье и четвертое требования, которым должен отвечать цемент—это низкое содержание извести и устойчивость в отношении слабых кислот. Реки, питающие водохранилища, имеют в общем мягкую воду со слабым содержанием угольной кислоты, кроме того, часто вода содержит еще слабый раствор гумусовой кислоты. С другой стороны, цементное тесто, рассматриваемое под микроскопом, представляет собой пористую губку, которая пропускает непрерывный ток воды из водохранилища через бетонную плотину. Правда, проходят целые годы, прежде чем вода, проникшая под действием гидростатического давления в бетонную плотину со стороны водохранилища, выйдет снова наружу со стороны нижнего бьефа плотины. Слабые растворы кислот, содержащиеся в воде водохранилища, также имеют возможность в течение многих лет воздействовать на бетон и разлагать его. Кроме того, мягкая вода растворяет гидрат окиси кальция, возникший при образовании цементного камня, и создает явление выщелачивания. В Норвегии через 30 лет пришлось полностью снести бетонную плотину, потому что разложился практически весь цементный камень. Какова же будет судьба наших бетонных плотин через 100 лет? Это — серьезные вопросы, которые близко касаются строительства бетонных плотин в наше время.

Опыт показал, что в общем портландский цемент является наиболее восприимчивым к мягкой и слабокислой воде водохранилища. Затем следует пуццолановый портландцемент, в то время как шлаковый цемент является, по видимому, наименее восприимчивым.

Подводя итоги, можно, таким образом, сказать, что из видов цемента, имеющихся в настоящее время на рынке, пуццолановый портландцемент и шлаковый цемент являются самыми подходящими при строительстве бетонных плотин. Там, где слабокислый характер воды водохранилища требует осторожности, предпочтение должно отдаваться шлаковому цементу.

СУЛЬФАТНЫЙ ЦЕМЕНТ

Еще в 1909 г. Кюль установил, что наряду со щелочным возбудителем шлака доменной печи возможен еще сульфатный возбудитель, например при перемалывании шлака доменной печи с добавкой гипса. Это является изобретением, которое в свое время запатентовано под № ДРП 237777.

В дальнейшем, в особенности в Бельгии и Франции, начали изготавливать такого рода продукт, который был назван сульфатным цементом. Этот цемент нашел свое основное применение при строительных работах на морском транспорте. Испытания были весьма удовлетворительными в особенности в отношении стойкости бетона, изготовляемого с таким цементом, по отношению к морской воде. Также и в Германии в различных организациях испытывались качества бетона с сульфатным цементом, причем оказалось, что новый цемент, по-видимому, окажет решающее влияние на будущее развитие производства массового бетона для строительных работ, в частности для строительства водохранилищных плотин. При сооружении плотин в бассейне Шлюхзее, где уже давно уделялось большое внимание вопросу о более устойчивом цементе вследствие наличия там мягкой, содержащей слабый раствор угольной кислоты воды, поступающей из горных потоков Шварцвальда, и давно занимаются экспериментальным изучением возможностей, которые может дать сульфатный цемент при строительстве плотин. По имеющимся данным, достигнутые результаты являются, по-видимому, весьма удовлетворительными.

Для высококачественного бетона весьма существенно, чтобы сульфатный цемент имел определенные качества, гарантированные поставщиком и прошедшие проверку на практике. В результате упорной многолетней работы некоторых немецких цементных заводов этот вопрос в настоящее время, по-видимому, решен. Успеха удалось достигнуть в результате детального изучения составов шлаков и правильного дозирования долей гипса и ангидрита. Шлаки должны быть особенно высокоосновными (с большим модулем основности) и содержать много глинозема. Некоторое время уже официально допускалось использование сульфатного цемента для подземных и надземных сооружений. Этим самым был открыт путь для использования его

при строительстве плотин. Горнозаводские предприятия Обергаузен уже поставляют сульфатный цемент под маркой SHZ 225 и SHZ 325.

В чем же состоят преимущества сульфатного цемента в производстве массового бетона? Первое место здесь, безусловно, занимает незначительная экзотермия этого цемента. В соответствии с рис. 11 тепловыделение составляет в данном случае только незначительную долю от тепловыделения портландцемента, так что при применении сульфатного цемента для строительства плотин можно было бы полностью отказаться от мероприятий по искусственному охлаждению бетона. Кроме того, расстояние между швами можно было бы выбирать значительно большими, чем это имело место до сих пор. К тому же опасность образования трещин вследствие объемных изменений значительно уменьшалась бы, что имеет особенно большое значение для высоких бетонных плотин.

После многочисленных опытов при расходе цемента в 200 кг/м^3 была достигнута оптимальная прочность при водоцементном отношении примерно 0,65. Поэтому при сравнительно малых расходах цемента, которые в настоящее время являются обычными в строительстве плотин, прочность можно сильно повысить в результате использования сульфатного цемента, не жертвуя при этом пластичностью смеси. Не слишком трудным, вероятно, будет достигнуть в дальнейшем годичной прочности бетона на сжатие в 500 кг/см^2 и более.

Благодаря сульфатному цементу впервые в развитии строительства плотин открывается перспектива сделать бетон совершенно невосприимчивым к химической агрессии мягкой воды или слабых кислот. Сульфатный цемент в такой степени устойчив в отношении указанных выше агрессивностей, что недавно с его помощью удалось изолировать затопленные шахты калия с высоким процентом щелочи и снова пустить шахты в эксплуатацию.

Как известно, устойчивость цемента в отношении агрессивных вод зависит в основном от содержания в нем $3(\text{CaO}) \cdot 2\text{SiO}_2$ и $3(\text{CaO}) \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. В то время как эти не очень устойчивые соединения в бетоне, изготовленном на портландском цементе, составляют основную массу цементного камня, в бетоне, изготовленном на сульфатном цементе, они вообще не встречаются. В соответствии с составом сульфатного цемента, куда входят приблизительно 85 % шлака доменной печи с высоким модулем основности, бо-

татого глинистыми веществами, и 15% гипса и ангидрита, твердение его совершается на чисто кристаллической основе, а именно на образовании гидросульфоалюмината кальция $3(\text{CaO}) \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3(\text{CaSO}_4) \cdot 3(\text{H}_2\text{O})$, т. е. такого соединения, которое в бетоне, изготовленном на портландцементе, приводит к сильнейшим разрушениям, если это соединение образуется в уже затвердевшем бетоне.

ГЛАВА 7

ПОЛНОЕ УПЛОТНЕНИЕ СВЕЖЕГО БЕТОНА

Несколько лет тому назад Ленгард благодаря открытию им совершенного уплотнения свежего бетона поставил технику укладки монолитного бетона на совершенно новую основу. Эта основа еще раз претерпела изменение, после того как появились тяжелые крупные вибраторы Келлера.

Принцип полного уплотнения свежего бетона состоит в том, что смеси совершенно различной крупности и совершенно различной пластичности (от жестких до жидких) могут дать при одинаковом водоцементном отношении одинаковую прочность и одинаковый объемный вес, если в результате соответствующего уплотнения составные частицы располагаются в отношении друг друга таким образом, что объем целиком, т. е. без пор, заполнен свежим бетоном. Это, конечно, не значит, что бетон после затвердения будет свободен от пор, так как цементный камень должен содержать некоторое количество пор, соответствующее избытку воды, взятой для затворения цементного раствора, над гидратационной водой.

Если Z обозначает дозировку цемента, W — количество воды для затворения цементного раствора, S — количество песка, K — количество гравия и G — количество крупного заполнителя на 1 м^3 бетона в кг и если S_z ; S_w ; S_s ; S_k и S_g обозначают соответствующие удельные веса, то полное уплотнение свежего бетона будет достигнуто, если

$$\frac{Z}{S_z} + \frac{W}{S_w} + \frac{S}{S_s} + \frac{K}{S_k} + \frac{G}{S_g} = 1000.$$

Это является единственным решающим критерием для состава бетона плотин. Все рецепты, касающиеся идеальной кривой гранулометрического состава заполнителя, минимального содержания песка, минимального количества мел-

ких частей, утратили в современном строительстве плотин свое значение, так как при указанном полном уплотнении свежего бетона может быть достигнуто то же самое, если не лучшее. Эти новые данные нашли свое подтверждение в очень широком масштабе при строительстве водохранилищной плотины Экер (Esker) и в проведенных в связи с этим широких опытах.

ГЛАВА 8

ВИБРОБЕТОН С КРУПНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Главную опасность для прочности бетонной плотины наряду с появлением усадочно-температурных трещин представляют также водопроницаемость и обусловленная ею восприимчивость бетона к морозу, как это показывают многочисленные плотины с трещинами и повреждениями от мороза на их наружных поверхностях. Наряду с обсужденным уже целесообразным выбором цемента и надлежащими конструктивными мероприятиями, о которых речь будет идти ниже, еще одним средством для сохранности бетонной плотины является избежание структурных пор и максимальное уменьшение капиллярных пор.

Структурных пор в сооружении можно избежать, если состав бетона постоянно контролируется и достигается полное уплотнение свежего бетона.

Капиллярные поры возникают благодаря избытку воды, взятой для затворения цементного раствора, по сравнению с химически связанным количеством гидратационной воды. Как можно видеть под микроскопом, капиллярные поры придают цементному камню губчатую структуру, которая тем пористее, чем больше воды взято для приготовления бетона. В этом отношении литой бетон, который внешне кажется таким густым, фактически оказывается самым плохим бетоном, что доказано на многочисленных примерах последних 30 лет. Ни один сознающий всю ответственность строитель в настоящее время не будет строить плотину из литого бетона.

Однако и пластичный бетон, который сам по себе не заполняет всех пустот, но который также приходится уплотнять, не оправдал возлагаемых на него ожиданий, так как водоцементные отношения порядка от 0,65 до 0,80 были все еще слишком велики.

Таким образом, строительство плотин перешло на очень неудобный, слабопластичный и жесткий бетон с водоцементным отношением между 0,55 и 0,65. Этот бетон сравнительно удобно подается на место укладки с помощью общепринятых бадей, однако в этом случае имеются тоже большие трудности, так как нужно при опорожнении бадей избегать распада бетонной смеси на фракции, а, кроме того, ручным способом разравнивать и трамбовать бетон. С изобретением вибратора высокой частотности эти труд-

ности были ликвидированы.

Вибратор, имеющий форму груши на конце кабеля (рис. 13), прикладывается к вываленному из бадей бетону, имея среднюю частоту колебаний 9 000 в 1 мин. В процессе работы вибратор автоматически углубляется в бетон с большой скоростью. Благодаря эффекту вибрации бетон в определенном радиусе вокруг вибрирующей груши становится совершенно пластичным, все пустоты исчезают, и полное уплотнение свежего бетона может быть легко достигнуто при



Рис. 13. Вибрирование бетона высокочастотным вибратором

подходящем составе бетона. Одновременно достигается в буквальном смысле идеальная связь отдельных слоев друг с другом, так как вибратор автоматически входит на некоторую глубину и в вибрированный перед тем слой бетона. Каким плотным может быть уплотненный таким способом бетон, видно из рис. 13, на котором четко видны оставшиеся от груши вибратора отверстия. Эти отверстия несомненно исчезнут с укладкой следующего слоя бетона.

Заводами Вакера были разработаны вибраторы, имеющие форму бутылки, причем в бутылки был помещен мотор весом только в 20 кг. Корпус этого вибратора имеет диаметр 105 мм и длину 550 мм. На швейцарской плотине Петерихтсбоден (Rätherichtsboden) использовались амери-

канские вибраторы, обслуживаемые двумя рабочими, с мотором, расположенным непосредственно выше бутылки по ее оси. Между мотором и бутылкой сбоку имеются две ручки. Вес этих вибраторов составляет от 50 до 65 кг.

Вибраторы высокой частотности не только открыли возможность применять бетоны со слабо пластичной и жесткой консистенцией с водоцементным отношением 0,55, но они дают возможность применения бетона с более крупным заполнителем, что ведет к значительной экономии цемента. При уплотнении бетона высокочастотными вибраторами уменьшаются объемные изменения бетона, образование капиллярных пор и трещин, бетон становится более прочным, водонепроницаемым и морозоустойчивым.

Большие преимущества бетона с крупным заполнителем были установлены уже давно и широко освещены исследованиями Пфлетчингера [13] и Кессельгайма [13]. Однако испытания на самом объекте были проведены главным образом в США и на плотине Метюр (Metur) в Индии, где был применен бетон с крупным заполнителем до 300 мм. В дальнейшем снова вернулись к крупности заполнителя от 100 до 120 мм, так как опыт показал, что у сильно пластичных (до литых) смесей бетона под большими камнями образовывались разжиженные мешки, которые неблагоприятным образом влияли на прочность. Благодаря работам, которые были проведены Видманом [14] при строительстве бетонной плотины Экер и Койном [15] при строительстве некоторых французских бетонных плотин и, в особенности, арочной плотины Эгль (L'Aigle), снова вернулись к проблеме использования бетона с крупным заполнителем и установили, что при слабопластичной и жесткой консистенции «мешков» уже больше не появляется.

В то же время техника сделала еще шаг вперед, появился тяжелый вибратор «Маммут», вес которого доходит до 8 т, а площадь вибрации до 4 м² (на рис. 14 показан такой вибратор весом в 3 т и с площадью вибрации 2 м²). Эти вибраторы работают с частотой 3 000 колебаний в 1 мин. при мощности до 40 квт; вибрирующая коробка производит горизонтальные круговые колебания и передает их непосредственно камням, которые в результате этого взаимно приводят друг друга в движение.

Многочисленные отдельные опыты, а также крупные испытания обеспечили широкое решение вопросов, связанных с целесообразностью применения таких больших вибраторов.

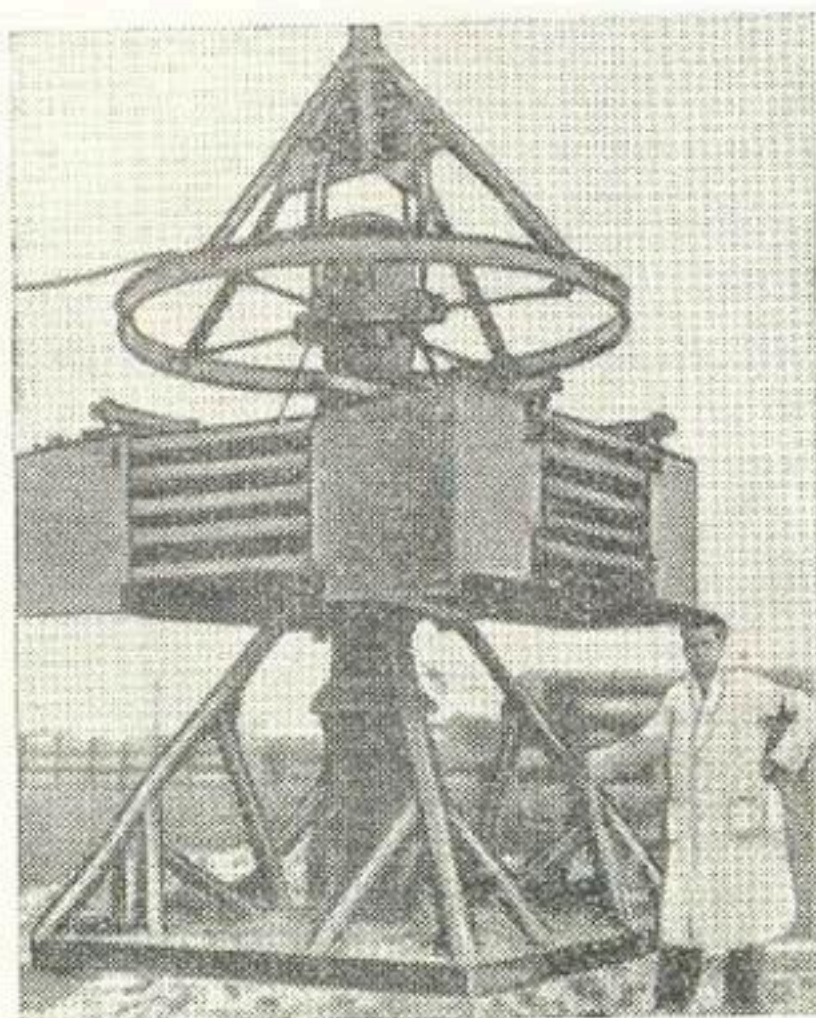


Рис. 14. Вибратор „Маммут“
весом 3 т с вибрирующей по-
верхностью 2 м²

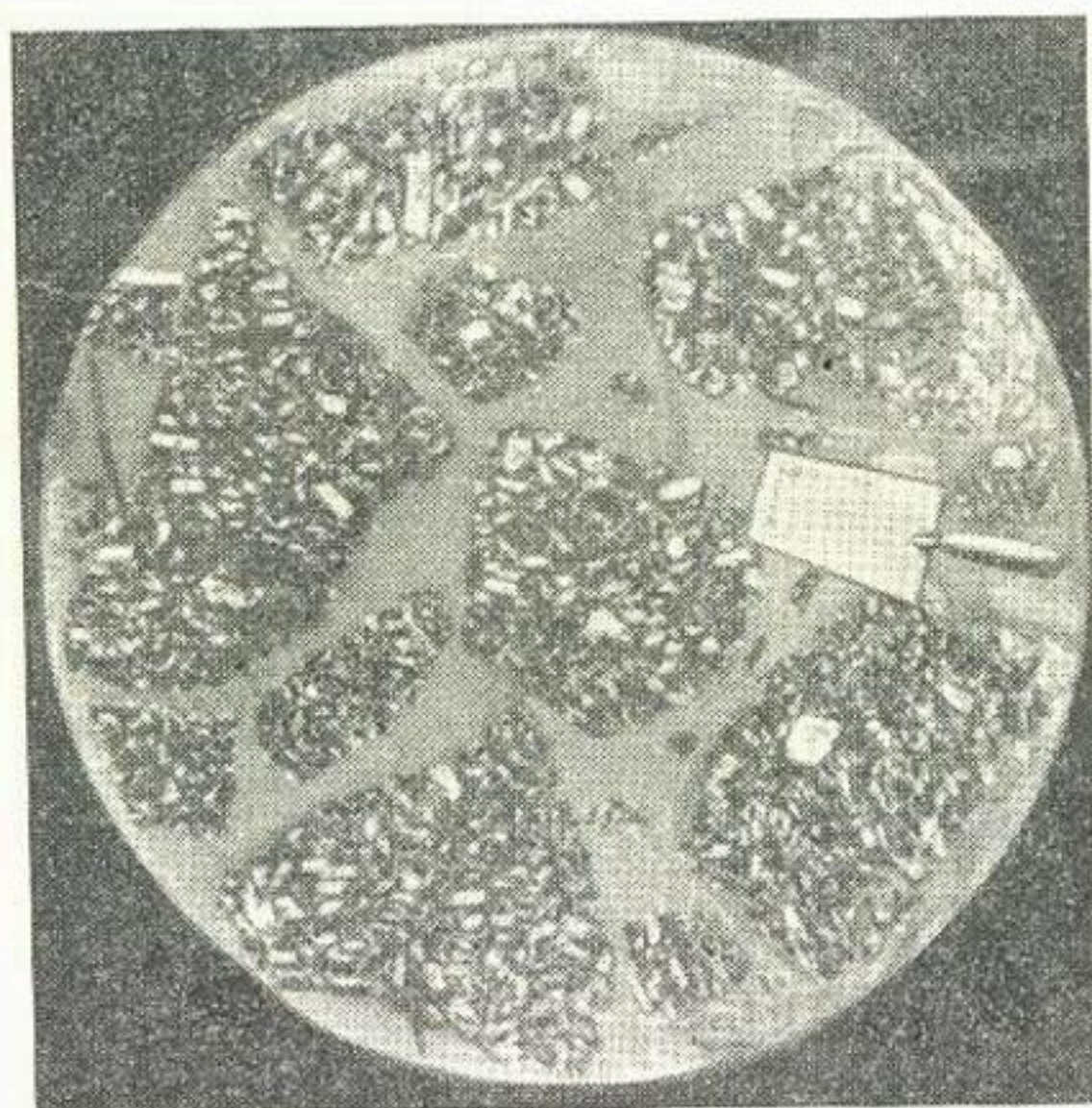


Рис. 15. Структура бетона, уложенного при
помощи вибратора „Маммут“

Вибраторы «Маммут» фактически выполняют не бетонную кладку, а своего рода бутовую. Процесс кладки происходит при этом примерно следующим образом: вначале помещают слой раствора примерно 50 см высотой, а на него кладут слой камней примерно 70 см высотой, которые затем с помощью вибратора вдавливаются в раствор. Для этого требуется в зависимости от плотности раствора от 5 до 8 мин. В то время как камни перемещаются сверху вниз, раствор двигается снизу вверх. В конечном результате получается слой бетона примерно 85 см толщины, структура которого видна из рис. 15. Затем по такому же методу укладывается второй слой бетона и, наконец, еще третий слой, так что высоты рабочих блоков бетонирования достигают примерно 2,5 м.

Многочисленные опыты показали, что даже самый «сухой» цементный раствор с водоцементным отношением от 0,45 до 0,40 становится совершенно пластичным в результате вибрации вибратором «Маммут» и что в такой цементный раствор путем вибрации могут быть введены камни диаметром до 60 см, причем это не нарушает полного уплотнения свежего бетона. Итак, техника монолитного бетона после развития, продолжавшегося в течение последнего десятилетия, по-видимому, пришла, наконец, к цели. Мы можем изготавливать вибрированный бетон с крупным заполнителем, требующий на 1 м³ только 150 кг пуццоланового портландцемента и при этом позволяет получать годовую прочность от 400 до 500 кг/см². Такой бетон будет водонепроницаемым, морозоустойчивым и не даст трещин; кроме того, как уже упоминалось выше, в результате дальнейшего перехода к сульфатному цементу он может быть сделан также невосприимчивым к химическим воздействиям агрессивной воды.

Как практически проводится работа с новыми вибраторами, описывается на примере спроектированной автором португальской арочной плотины Монфорте (N. S. de Monforte) высотой 110 м и длиной 550 м. В данном случае (рис. 16) речь идет о круглой цилиндрической арочной плотине, имеющей радиус 230 м и толщину гребня 6 м. Эта плотина имеет в своей верхней части вид купола, что снижает неизбежные для высоких арочных плотин растягивающие напряжения. Сама арка, имеющая максимальную толщину 8 м и толщину у дна долины 5 м, прилегает вертикальным сквозным продольным швом к контрфорсным опорам, замкнутым в форме ячеек. В то время как швы самой

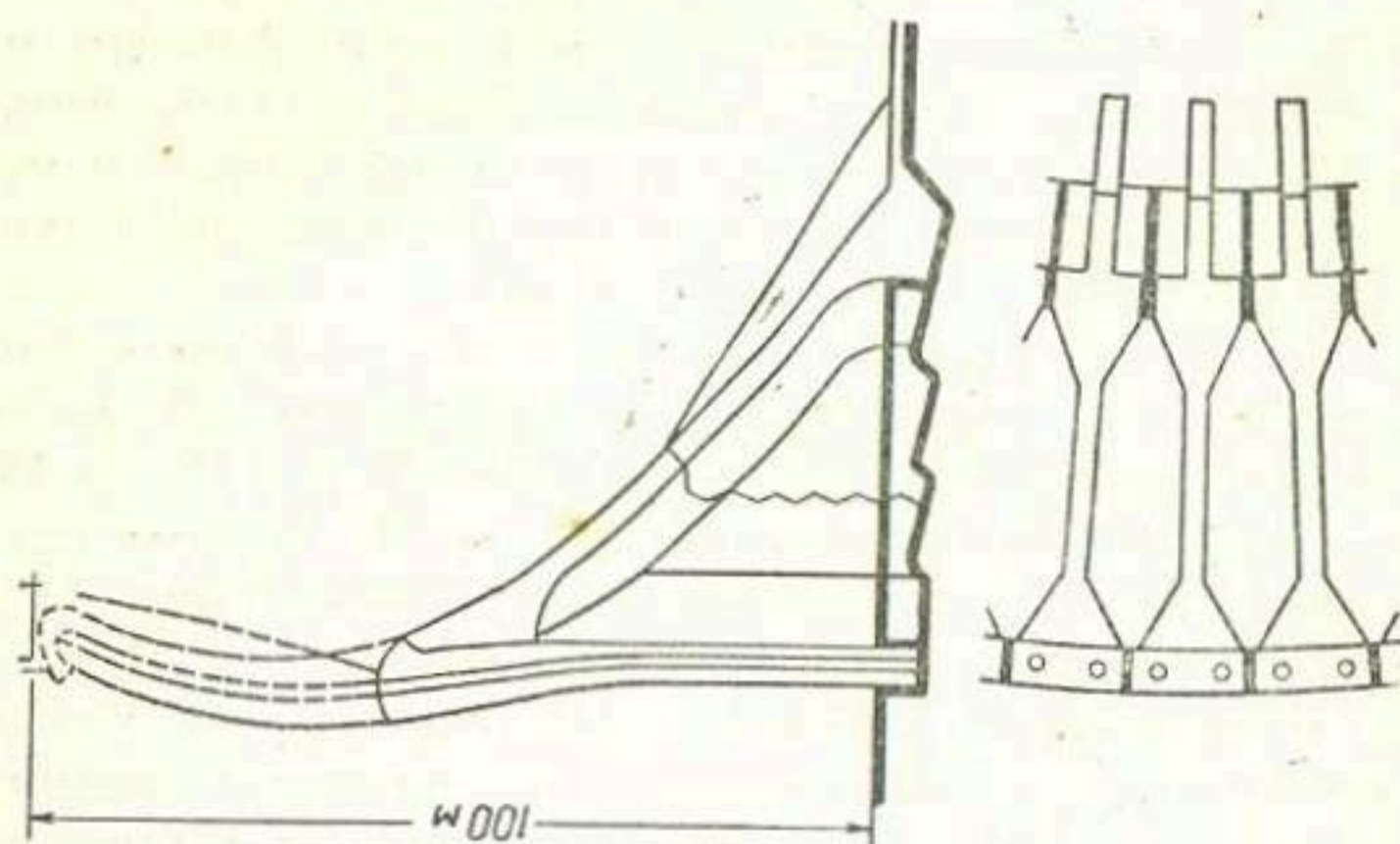


Рис. 16. Арочная плотина Монфорте (Португалия). Поперечный разрез и план контрфорсов

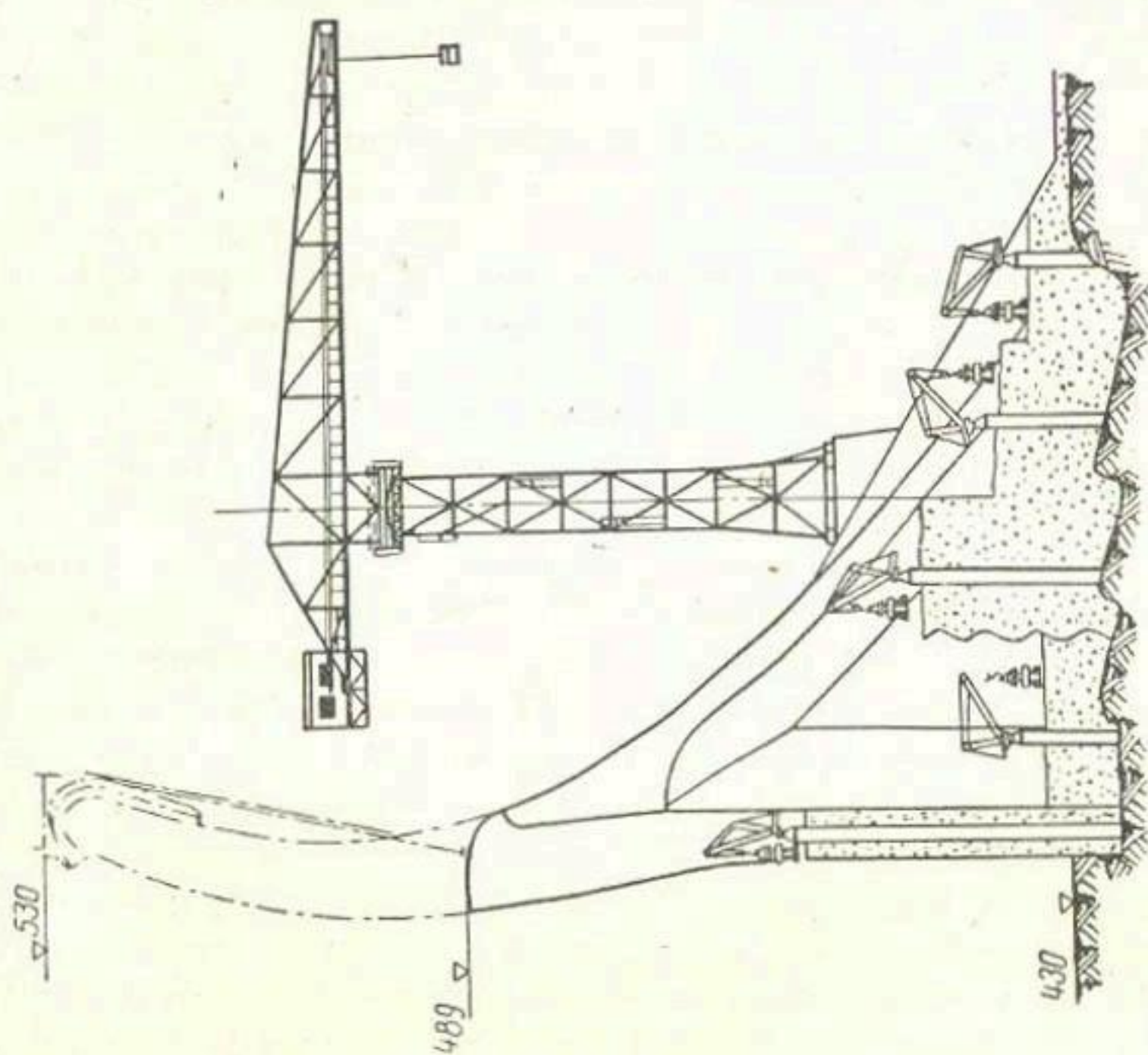


Рис. 17. Арочная плотина Монфорте (Португалия). Строительство нижней части плотины

арки уплотняются, швы, вызванные ячейками контрфорса, остаются открытыми, в результате чего объемные изменения бетона не могут вызывать здесь дополнительных напряжений. Если водохранилище пустое и арка на протяжении целых недель подвергается воздействию средней температуры воздуха 40° , то в этом случае при наличии продольного шва отрицательный прогиб происходит беспрепятственно, так что, несмотря на повышение температуры бетона до 30° , температурные напряжения продолжают оставаться ниже $\pm 10 \text{ кг/см}^2$. Максимальные напряжения на изгиб при наполненном водохранилище достигают с учетом температурных напряжений 63 кг/см^2 .

Строительство водоподпорной плотины должно производиться в целях лучшего использования механизмов двумя стадиями: при первой стадии — в пределах отметок от 420 до 489 может быть использован объем водохранилища в $60\,000\,000 \text{ м}^3$, и при второй стадии — в пределах отметок от 489 до 530 емкость водохранилища доводится до $350\,000\,000 \text{ м}^3$. В первой стадии строительство должно проводиться с помощью двух неподвижных вращающихся башенных кранов высотой 46 м, радиусом действия стрелы в 45 м. Несущая способность этих кранов 8 т рассчитана на подъем бады в 2 м^3 (рис. 17). Работа кранов состоит в подаче цементного раствора (водоцементное отношение 0,4) и камней (максимальная величина в поперечнике 600 мм), в установке опалубки и в транспортировке 10 поворотных подвижных кранов весом 8 т, с помощью которых перемещаются вибраторы. Оба крана могут выполнять кладку совместно с 10 вибраторами больших размеров примерно от 1 000 до 1 500 м^3 бетона в день. Рис. 17 иллюстрирует один из двух башенных кранов с 5 передвижными поворотными кранами в процессе работы.

Для успешной работы весьма существенно, чтобы вибрация производилась в точной увязке с укладкой камня. С этой целью создана система вертикальных или круто наклонных шахт с внутренним диаметром 1,5 м из железобетонных предварительно напряженных труб, изготовленных заранее, длина которых 2,5 м приспособлена к высоте рабочих слоев. Каждый блок арки длиной между швами 15 м имеет в середине 2 шахты, поднимающиеся снизу вверх. Эти шахты используются вначале для охлаждения бетона, а позже служат как рабочие шахты для цементации швов. В дальнейшем эти шахты остаются от-

крытыми, чтобы обеспечить возможность осмотра. Но перед сдачей плотины в эксплуатацию верхние 20 м шахт заделываются бетоном из статических соображений, а также с учетом того, что сверху будет проходить проезжая дорога. Шахты в контрфорсах (рис. 17) вплоть до средней шахты, которая используется для закрытия швов, являются чисто монтажными и после выполнения поставленной перед ними второй задачи (охлаждение бетона) они заполняются бетоном.

Благодаря шахтам бетонная вибрированная кладка с крупным каменным заполнителем может производиться таким образом, что это не будет мешать остальному процессу строительства. Для этого используются небольшие выдвижные вращающиеся краны с максимальным весом 8 т (рис. 17), которые передвигаются башенными кранами от одного рабочего блока к другому, имея радиусы действия, соответствующие участкам работы, расположенным в шахматном порядке. Как видно из рис. 18, вращающиеся краны устанавливаются с помощью цапф на опорах, расположенных непосредственно на звеньях труб и прикрепленных круглыми стальными стержнями с винтовой нарезкой. Эти стальные стержни расположены вне звеньев труб и заделываются в бетон. Благодаря такому закреплению моменты кручения, возникающие при перемещении тяжелых вибраторов, передаются на уже затвердевший бетон предыдущего слоя бетонирования, причем это делается с наименьшей затратой материала, так как стальные стержни и муфты могут выдерживать очень высокие напряжения.

Чтобы передвижные вращающиеся краны могли работать одинаково четко при вертикальном и наклонном положении шахты, они устанавливаются на опоре в наклонном положении. Наращивание звеньев труб происходит от слоя к слою 2 вращающимися башенными кранами посредством специальных клещей (рис. 19), упирающихся в гладкую внутреннюю стенку трубы, что позволяет экономично изготовлять звенья труб.

Строительство верхней, собственно арочной части плотины, производится новым методом, показанным на рис. 20. При этом способом вращающиеся части обоих башенных кранов устанавливаются на подвижных порталах и монтируются на гребне плотины. Производя работу по бетонированию, первый кран доводит секционные блоки от отметки 489 до гребня плотины, делая это через блок. Длина стрелы достигает 45 м, поэтому кран может одновременно бето-

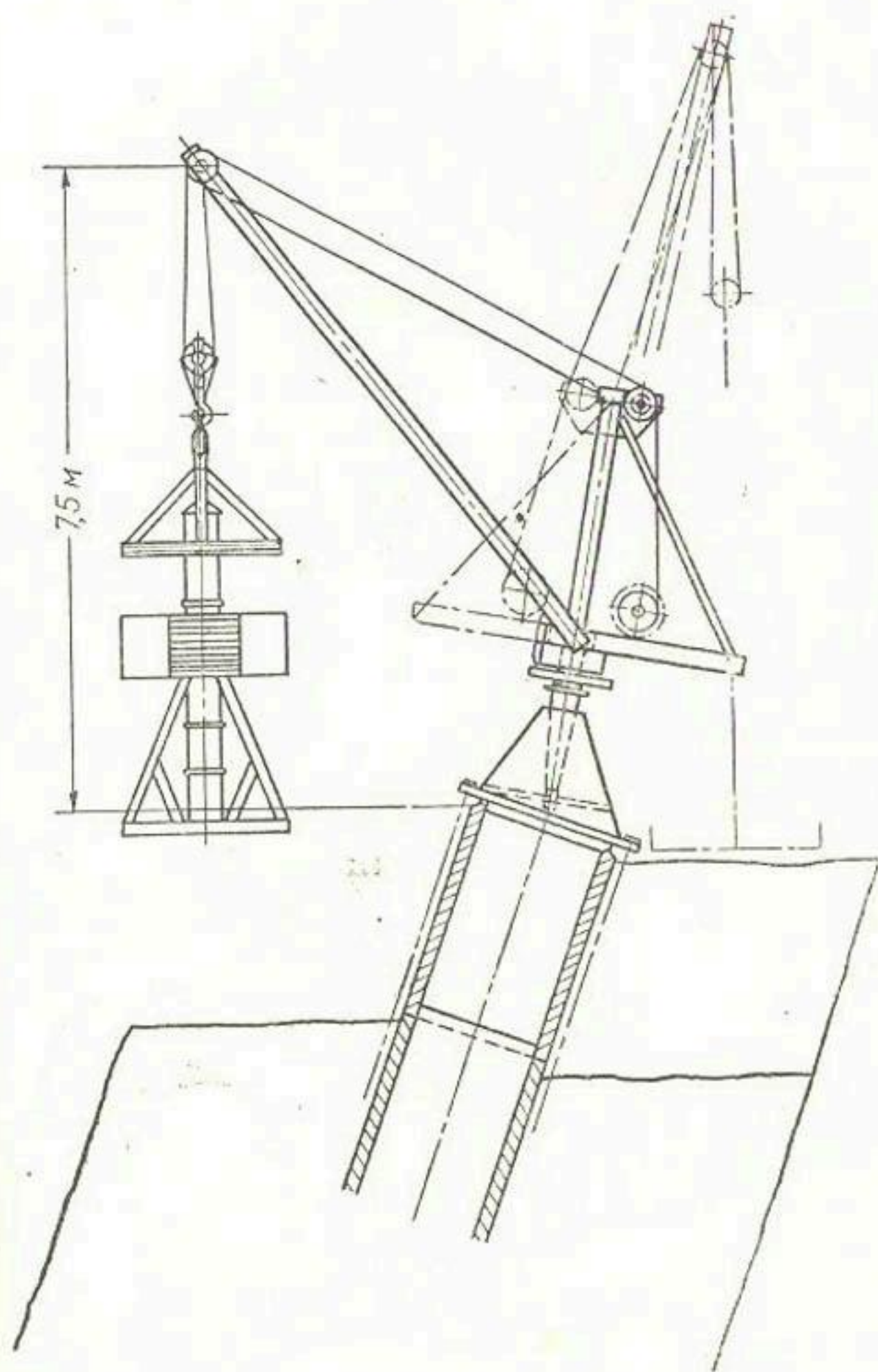


Рис. 18. Вращающийся кран с вибратором „Маммут“

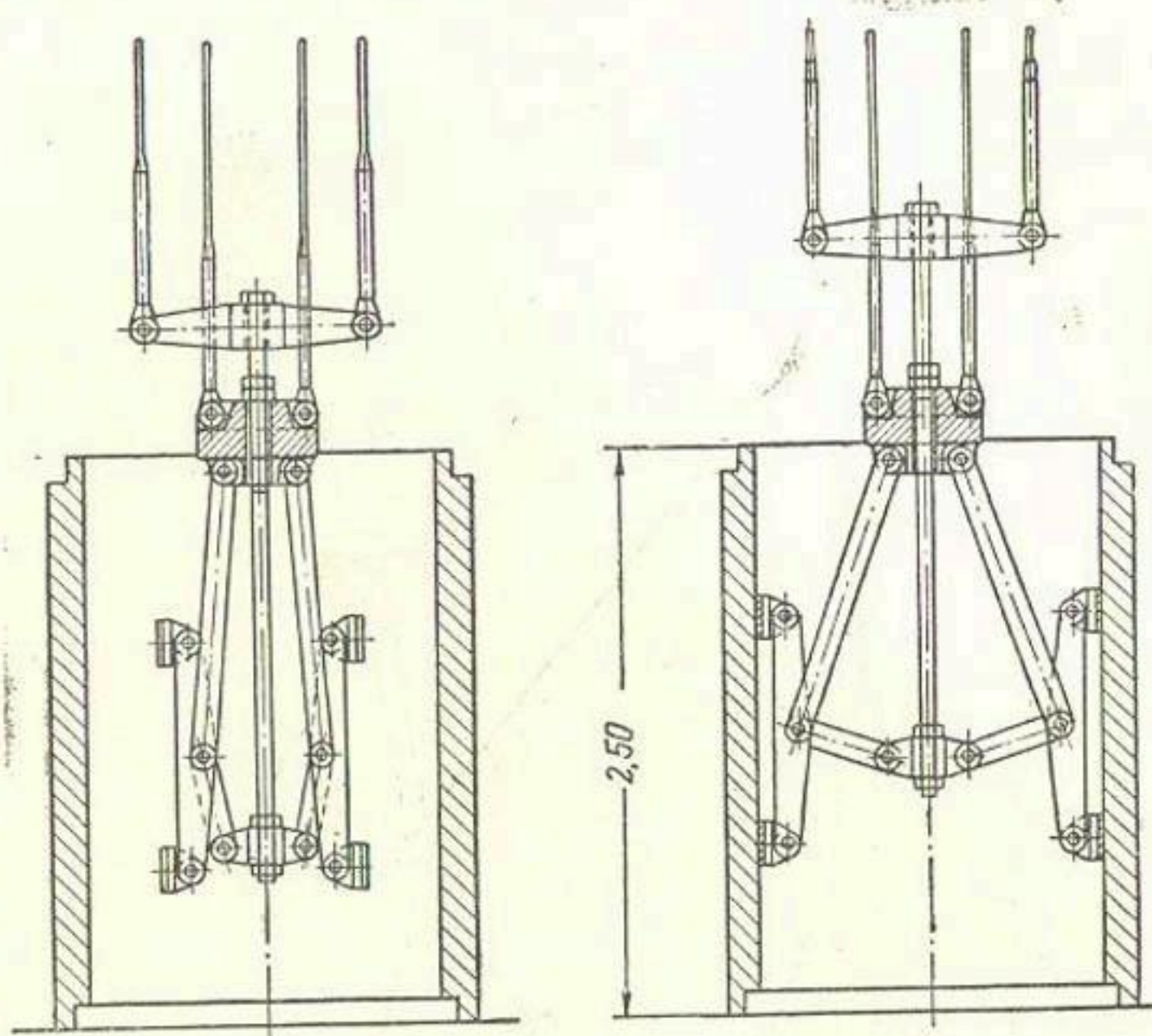


Рис. 19. Клеши для подачи труб

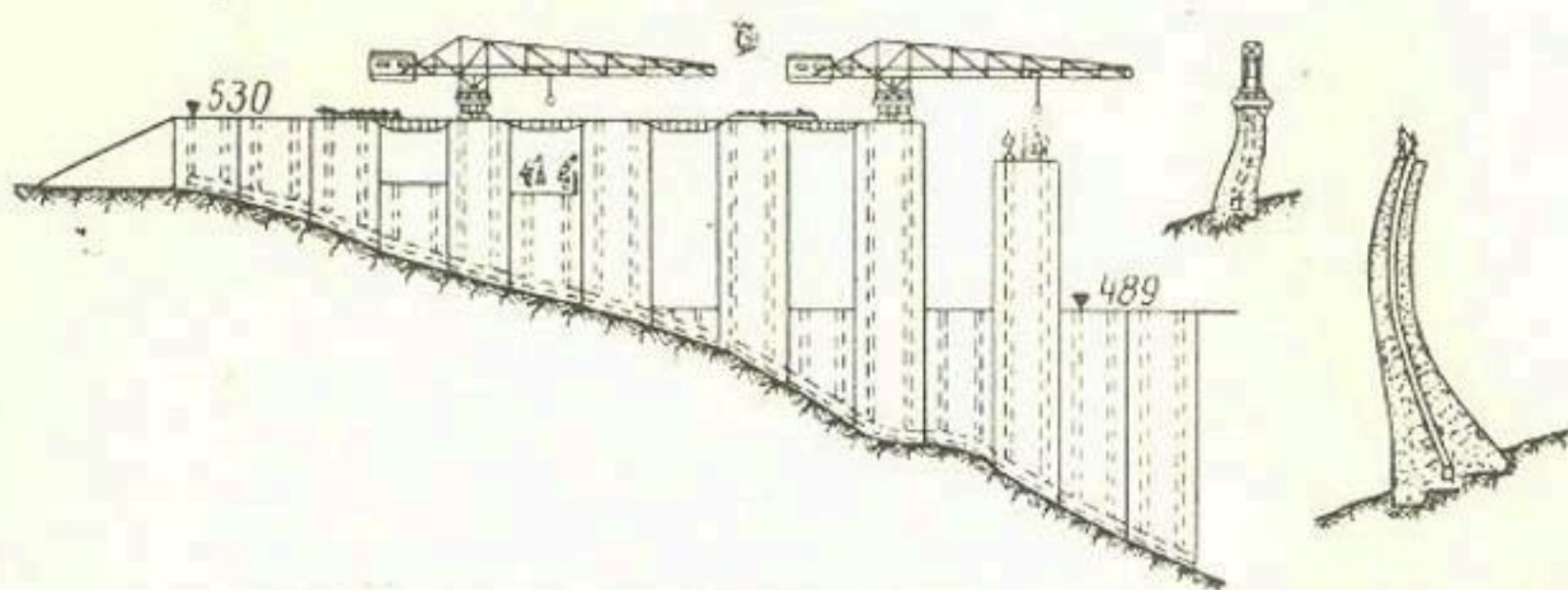


Рис. 20. Арочная плотина Монфорте (Португалия). Строительство верхней части плотины

нировать 2 блока. После окончания бетонирования первых двух блоков он перекрывает пролет мостиком и используется для переноса своих собственных транспортных путей. Этот процесс повторяется снова и снова, пока не будут смонтированы 4 соединительных мостика (что является максимальным числом). Одновременно монтируется и второй кран, который производит бетонные работы под двумя первыми мостиками от отметки 489 до отметки 515. Затем он временно отступает, чтобы дать первому крану возможность произвести работу по бетонированию этих пролетов от отметки 515 до отметки 530. Для этой цели он, продвигаясь во время работы задним ходом, демонтирует вначале первый, а затем второй соединительные мостики и перекрывает с помощью мостика новые пролеты впереди себя. Затем снова начинает действовать второй кран вначале как монтажный кран для перемещения путей по забетонированным первым двум пролетам, а затем для бетонирования до отметки 515 двух следующих пролетов. Когда все 4 мостика снова введены в действие, а первый кран произвел работы по бетонированию на самом переднем блоке вплоть до гребня, то процесс смены мостов начинается заново и т. д.

При этом способе первый кран используется на 100%, а второй — на 50%. Кроме того, данный метод работы обеспечивает возможность удаления из блоков тепла, выделяющегося в процессе схватывания бетона. По сравнению со стоимостью бетонирования с помощью эстакад или кабельных кранов здесь достигается значительная экономия.

ГЛАВА 9

БЕТОННЫЕ ПЛОТИНЫ

Бетонные плотины по своей конструкции делятся на гравитационные (массивные) плотины, арочно-гравитационные (массивные) плотины, арочные плотины; арочные с контрфорсной нижней частью и контрфорсные плотины.

Устойчивость гравитационных и арочно-гравитационных (массивных) бетонных плотин основана на действии сил тяжести; устойчивость арочных плотин и арочных с контрфорсной частью основана на работе арки и подпорной стенки, а устойчивость контрфорсных основана на принципе подпорной стенки.

1. Гравитационные (массивные) бетонные плотины

Так как устойчивость гравитационной массивной плотины базируется исключительно на ее весе, то трассировка ее не связана ни с какими статическими условиями. В соответствии с этим современные гравитационные плотины в большинстве случаев в плане прямолинейны, поскольку

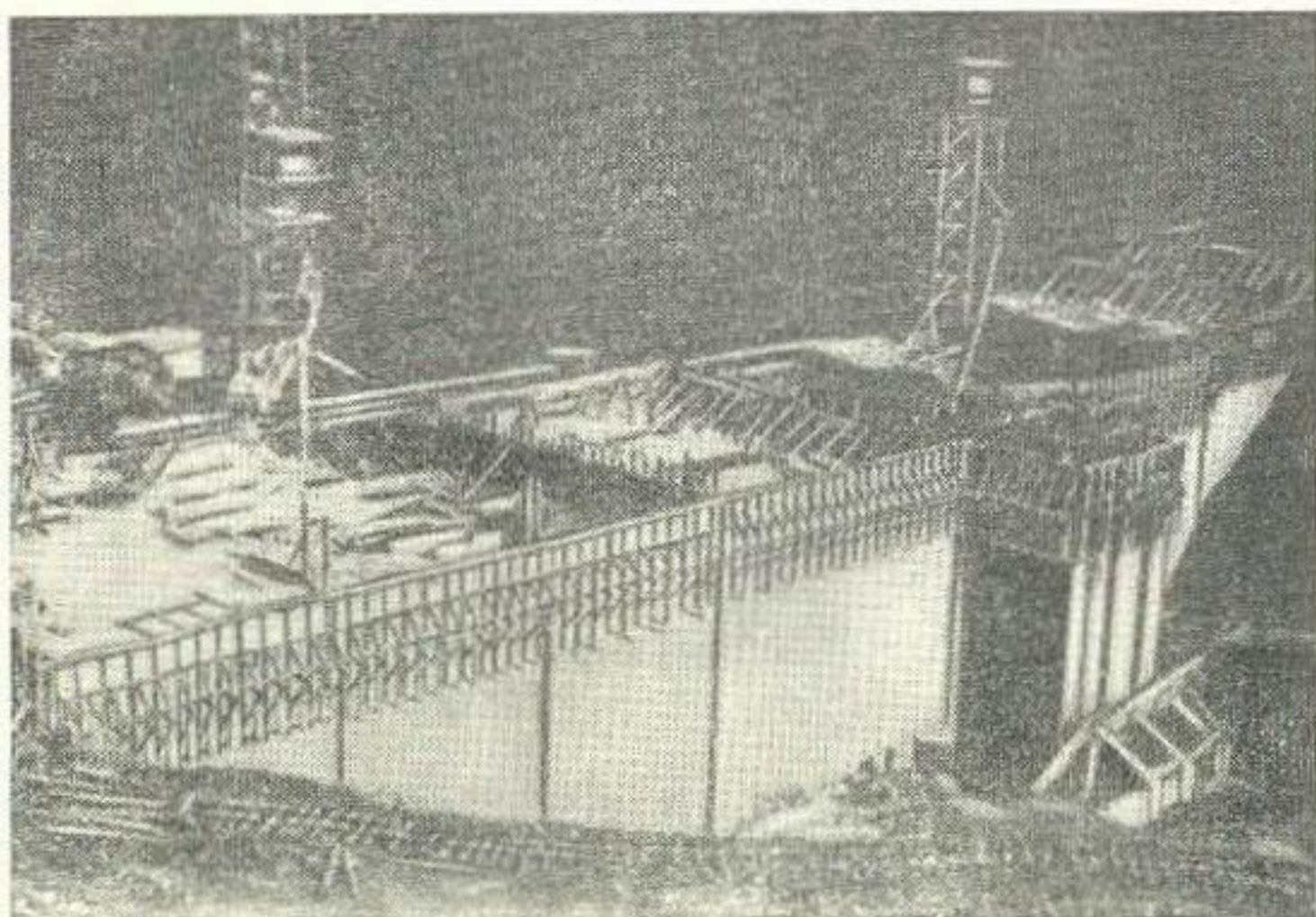


Рис. 21. Строительство плотины Экер

это дает кратчайшую длину между точками. В качестве наиболее выгодной формы поперечного сечения в настоящее время всеобщее признание нашел профиль треугольника (рис. 9) [8], который в сочетании с прямолинейной трассировкой приводит к плоским наружным поверхностям (рис. 21). Чтобы обеспечить возможность изменения объема в результате экзотермии и температурных колебаний, бетонная плотина разбивается швами перпендикулярно к оси ее на ряд призматических блоков (рис. 21), длина которых в соответствии с имеющимся опытом, не должна быть более 15 м при водоцементном отношении порядка 0,60. В будущем в плотинах, построенных с помощью мощных вибраторов, расстояние между швами может быть увеличено до 20 м, если водоцементное отношение не выходит за пределы 0,45. При использовании сульфатного цемента в качестве вяжущего можно при одинаковых про-

чих условиях увеличить расстояние между швами до 25 м. Швы целесообразно устраивать в форме плоских поверхностей, т. е. без зубчатого сцепления, так как последнее может передавать гидростатическое давление от середины в сторону склонов, в результате чего снижается устойчивость.

Устройство дренажа в плотинах близко к напорной грани оказалось излишним, если не вредным, так как это затрудняет производство работ и вместе с тем оказывает отрицательное действие на качество бетона. Напротив того, чрезвычайно полезными следует считать устройство смотровых галерей, так как они при непредвиденных обстоятельствах, например при землетрясении, делают возможным тщательное обследование плотины. В соответствии с этим в современных гравитационных плотинах число смотровых галерей значительно увеличено.

Благодаря тщательным наблюдениям и измерениям, которые во многих местах были проведены на гравитационных плотинах, в настоящее время у нас имеется более ясное представление о собственных и добавочных напряжениях в гравитационных плотинах и об образовании в результате этого трещин. Значительный вклад в эти исследования сделала Швейцарская комиссия водохранилищных плотин [2], опубликовав собранные за 26 лет данные наблюдений и измерений, произведенных на швейцарских плотинах. Так, например, тщательные наблюдения над бетонной плотинкой «Ин ден Шлаген» (In den Schlagen) толщиной 24 м выявили ясно выраженную прямую трещину в $\frac{2}{3}$ мм шириной (рис. 22). Наблюдатели предполагают, что продольная трещина распространилась до скалы основания в направлении, указанном пунктиром. Еще одна возможность удлинения трещины существует в направлении вверх до смотровой галереи. Как видно из расположения блока бетонирования (рис. 22), трещина появилась не в результате зубчатого соединения блоков, а по причине применения пластичного бетона. Уложенный пластичный бетон на портландцементе разрывается в массивных гравитационных плотинах также и в поперечном направлении, если толщина плотины превышает 20 м. Такое положение могло бы значительно улучшиться при укладке с помощью вибратора «Маммут» бетона с водоцементным отношением 0,45 и при использовании в качестве вяжущего вещества сульфатного цемента.

В непосредственной близости к основанию состояние на-

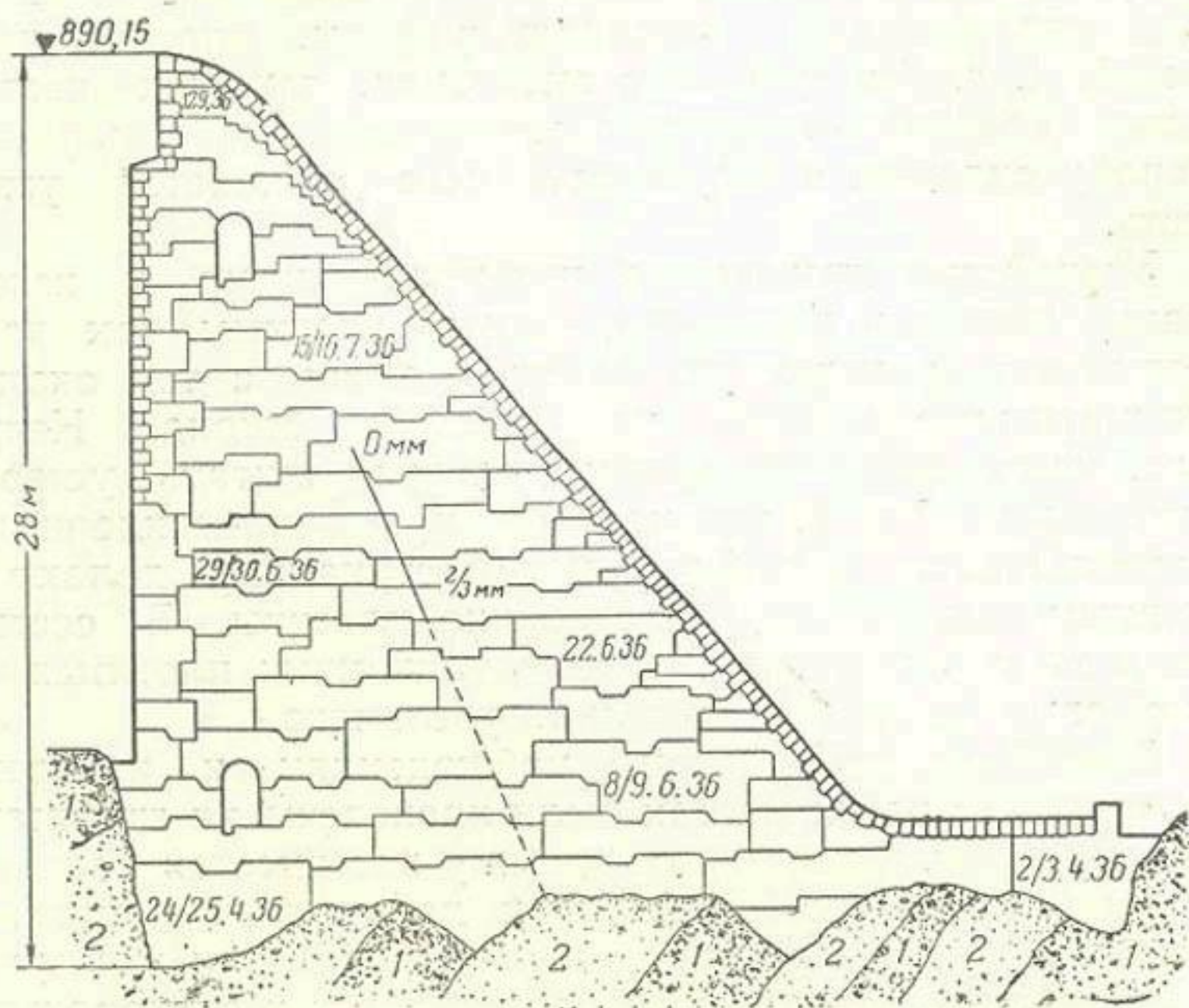


Рис. 22. Гравитационная плотина „Ин ден Шлаген“ (Швейцария). Наблюдаемая продольная трещина

1—мергель; 2—песчаник

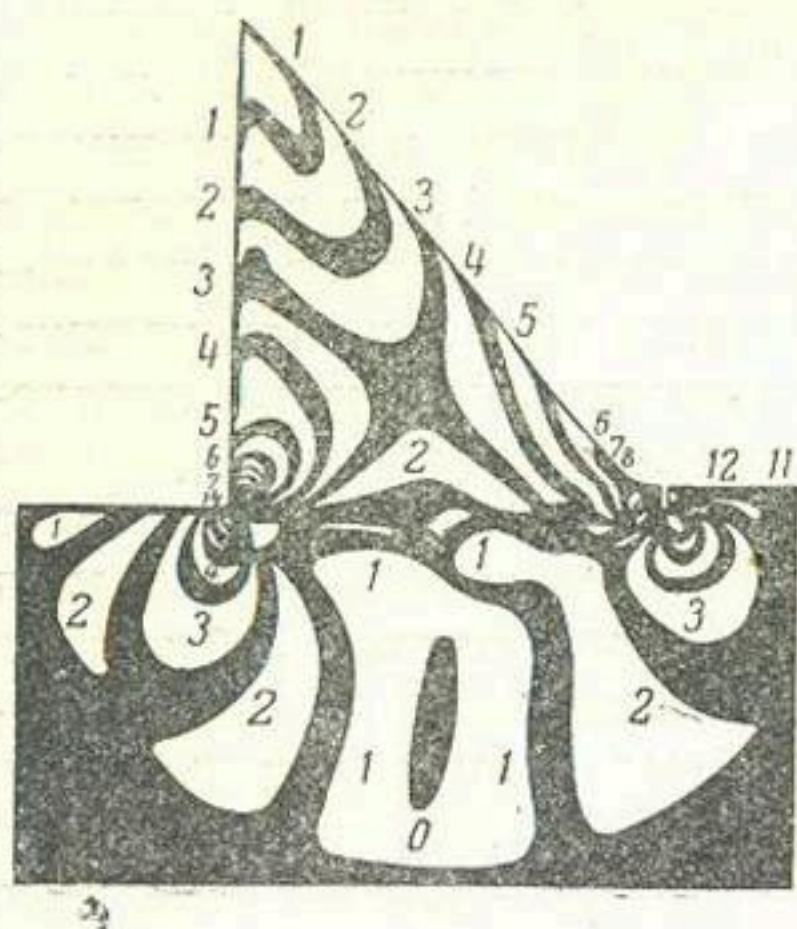


Рис. 23. Исследование напряжения плотины „Ин ден Шлаген“ оптическим методом

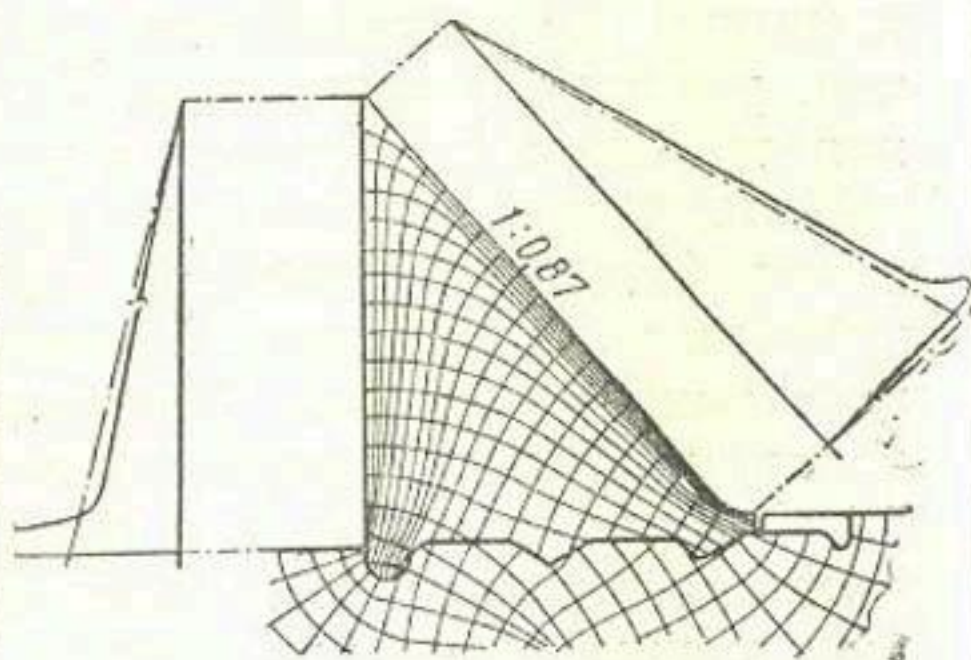


Рис. 24. Траектории главных нормальных напряжений (по изоклинам, найденным оптическим методом)

пряжения в массивной гравитационной плотине значительно отличается от прямолинейного распределения напряжения, как это теоретически показал автор еще много лет тому назад [8]. Это положение нашло убедительное подтверждение при оптическом исследовании напряжения, которое было проведено на упомянутой выше плотине «Ин ден Шлаген» (рис. 23 и 24) [2], на которой модуль упругости бетона в 2,2 раза больше, чем модуль упругости скалы, что было учтено в модели. Подсчеты по изохромам и изоклинам показали, что на напорной грани растягивающие напряжения от гидростатического давления более чем в 3 раза превышают напряжения, высчитанные по правилу трапеции.

В соответствии с применяемым в Германии методом расчета отношение ширины основания к высоте плотины треугольного профиля или тангенс острого угла при вертикальной напорной грани β определяется по формуле

$$\frac{b}{h} = \operatorname{tg} \beta = \sqrt{\frac{1}{\frac{\gamma_b}{\gamma} - \alpha}} \quad (1)$$

где γ — объемный вес воды;

γ_b — объемный вес бетона;

α — коэффициент между 0 и 1, учитывающий давление воды на подошву плотины, который принимается обычно равным 0,5.

При расчете по формуле (1), исходя из линейного распределения напряжений, в массивной гравитационной плотине нигде не появляются растягивающие напряжения. Главные нормальные напряжения, траектории которых показаны на рис. 24, также являются всюду сжимающими напряжениями вплоть до напорной грани плотины, где они при допущенных значениях противодействия на подошву становятся равными нулю. Главное сжимающее напряжение у подошвы плотины со стороны нижнего бьефа будет:

$$\sigma_{\max} = \gamma_b h \frac{1 + \frac{\gamma_b}{\gamma} - \alpha}{\frac{\gamma_b}{\gamma} - \alpha}.$$

В применении к массивной гравитационной плотине высотой $h = 200$ м, с объемным весом $\gamma_b = 2,5$ т/м³ получает-

ся при $\gamma = 1,0 \text{ т/м}^3$ и коэффициенте противодействия воды на подошву $\alpha = 0,5$

$$\sigma_{\max} = 2,5 \cdot 200 \cdot \frac{1+2,5-0,5}{2,5-0,5} = 750 \text{ т/м}^2 = 75 \text{ кг/см}^2.$$

В соответствии с этим в очень высоких гравитационных плотинах, которые, например, были построены в западных штатах США, появляются по расчету значительные напряжения. Если еще учесть влияние основания, то напряжения, полученные расчетом, увеличатся еще в среднем на 30%, в результате чего в выбранном нами примере мы приходим к максимальному сжимающему напряжению в 100 кг/см^2 , которое предъявляет значительные требования к качеству бетона.

2. Арочно-гравитационные бетонные плотины

Гравитационные массивные плотины с толщиной стен порядка от 140 до 200 м, как американские плотины Грэнд-Кули (Grand Coulee), Шаста (Shasta) и Гувер (Hoover) (рис. 25), имеют так много неопределенностей в отношении ожидаемых, но ускользающих от наблюдения продольных трещин, что становится совершенно понятным, почему в Америке снова начинают уделять все больше и больше внимания изучению надежности арочно-гравитационных плотин [3].

Плотина Хангри Хорс (Hungry Horse), построенная совсем недавно и имеющая водохранилище емкостью 4,8 млрд. м^3 , является арочно-гравита-

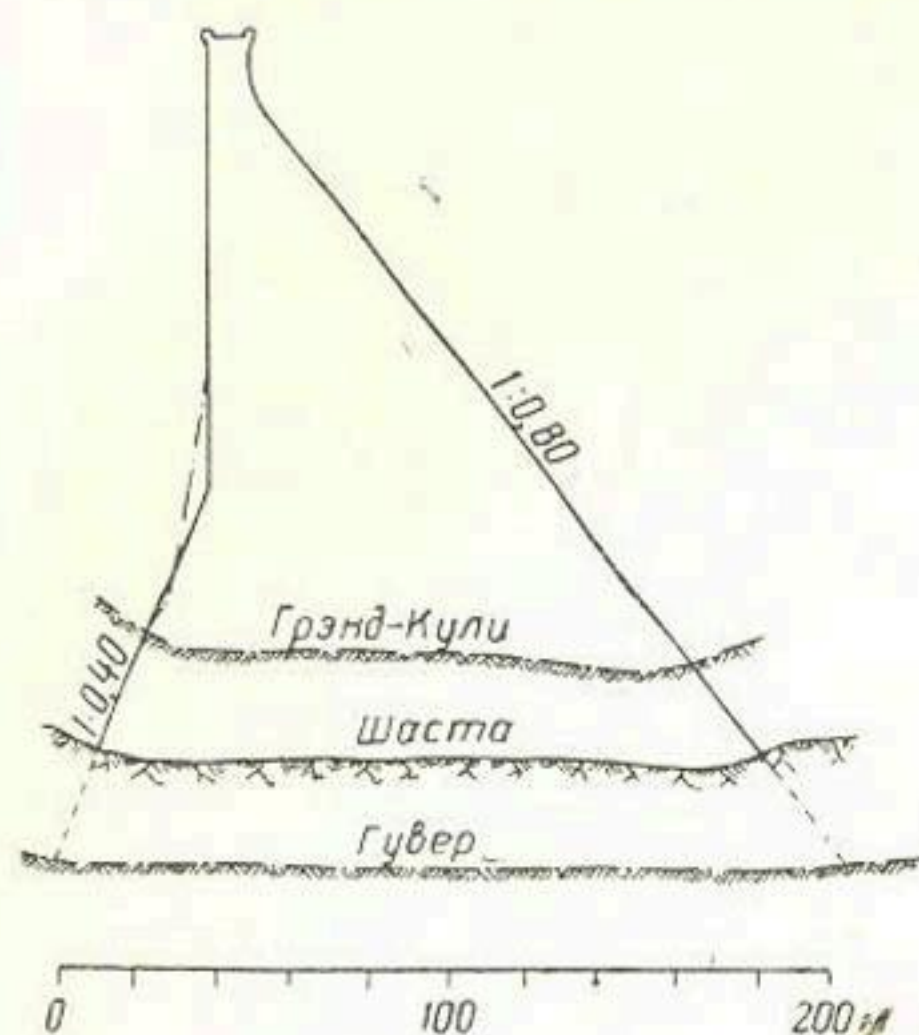


Рис. 25. Американские гравитационные плотины

ционной плотиной (рис. 26). Если бы бетонная плотина Хангри Хорс (Hungry Horse) была сконструирована, как гравитационная плотина по рис. 25, то она была бы третьей

по величине плотиной в мире с объемом бетона 3,5 млн. м^3 , тогда как, согласно проекту, она дает экономию бетона в размере 1 млн. м^3 и, кроме того, значительно повышается устойчивость плотины.

Перекрытие долины, имеющей ширину 520 м, с помощью арочно-гравитационной плотины радиусом 370 м и высотой 150 м является несомненно смелым мероприятием, которое было бы безусловно немыслимым, если бы не боль-

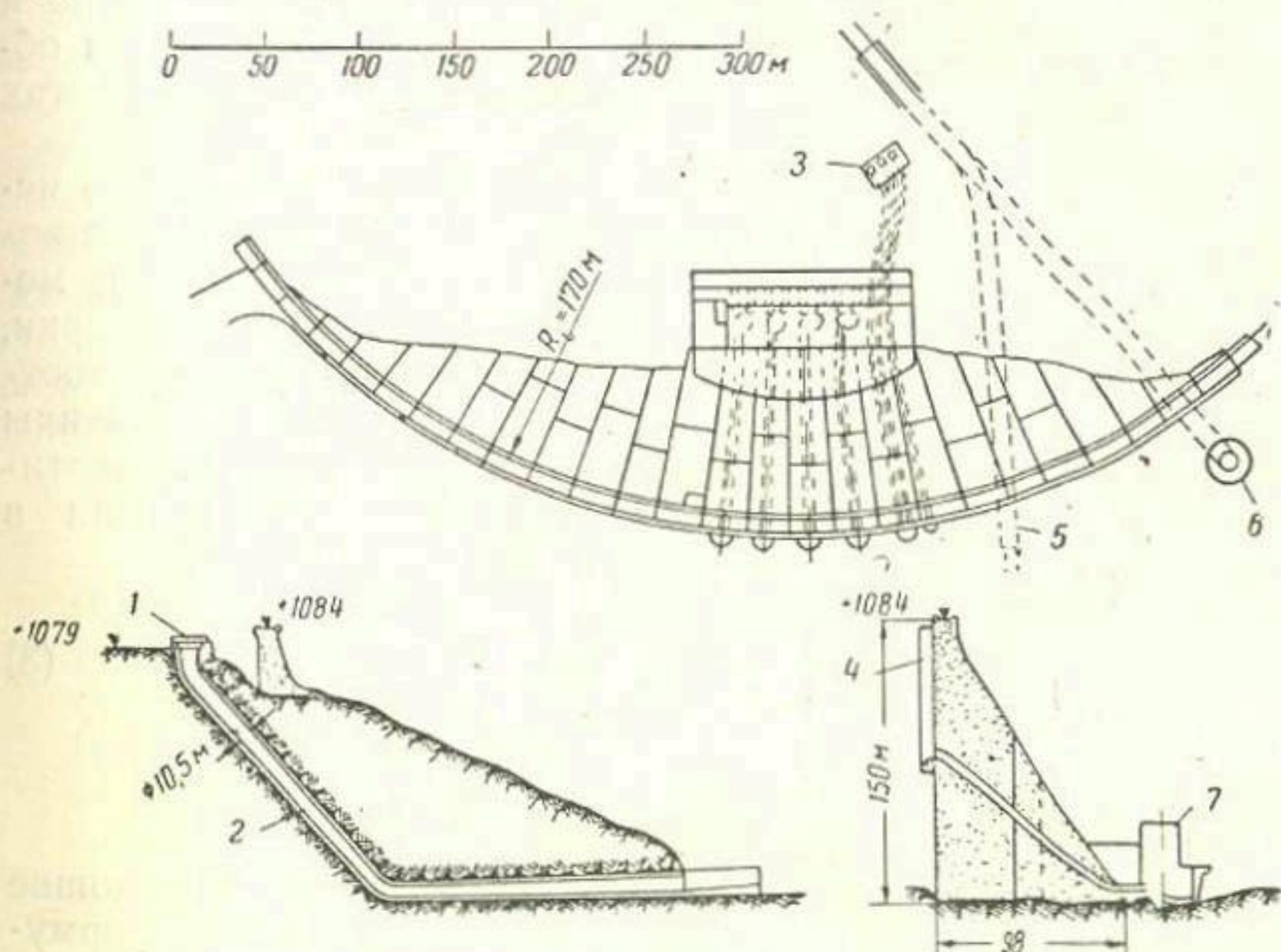


Рис. 26. Арочно-гравитационная плотина Хангри Хорс

1—цилиндрический затвор диаметром 20 м; 2—штольня для сброса паводка; 3—дополнительный водосброс в случае катастрофического паводка; 4—водоприемник для ГЭС; 5—строительный тоннель; 6—шахтный водосброс на 1 530 $\text{м}^3/\text{сек}$; 7—здание ГЭС

шие успехи, достигнутые за последние 10 лет в области техники приготовления и укладки бетона. Как уже было рассмотрено выше, теперь и для очень больших сооружений научились получать высокую прочность бетона с меньшим расходом цемента. Этого достигли благодаря успехам в технике вибрирования, когда стало возможным укладывать бетон значительно более жестким, чем это имело место раньше. Кроме того, применение вакуумной опалубки позволило укладывать на внешних поверхностях такой плотный бетон, что на его стойкость не могут оказать влияние климатические условия.

Арочно-гравитационная плотина отличается от обычной гравитационной плотины, с одной стороны, изогнутой осью в плане и, с другой стороны, тем, что швы между блоками уплотняются нагнетанием цементного раствора после полного рассеяния теплоты схватывания бетона (что часто бывает возможно только благодаря искусственному охлаждению) и при возможно более низкой температуре воздуха. В результате этого устойчивость плотины основывается не только на действии ее веса, но в дополнение к этому и на работе арки, которая, естественно, главным образом будет сказываться в более тонких, верхних частях плотины.

При определении размеров сечения плотины можно исходить из предположения, что действие противодействия воды на подошву, уменьшающее устойчивость плотины, может быть по крайней мере уравновешено действием арки, повышающим устойчивость. В соответствии с этим соотношение между шириной основания и высотой плотины треугольного профиля, или тангенс острого угла при вертикальной напорной грани, может быть получено, если в уравнение (1) поставить $\alpha = 0$, т. е.

$$\frac{b}{h} = \operatorname{tg} \beta = \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_b}}, \quad (3)$$

где γ — объемный вес воды;
 γ_b — объемный вес бетона.

Для максимальных главных напряжений в подошве плотины со стороны нижнего бьефа при $\alpha = 0$ из формулы (2) вытекает, что

$$\sigma_{\max} = \gamma_b h \frac{1 + \frac{\gamma_b}{\gamma}}{\frac{\gamma_b}{\gamma}}.$$

В примере аочно-гравитационной плотины Хангри Хорс, где $h = 150$ м, $\gamma_b = 2,5$ т/м³, и $\gamma = 1,0$ т/м³, получаем

$$\sigma_{\max} = 2,5 \cdot 150 \frac{1+2,5}{2,5} = 525 \text{ т/м}^2 = 52,5 \text{ кг/см}^2.$$

Если учесть влияние основания по-прежнему в 30%, то в плотине Хангри Хорс мы приходим к максимальному сжимающему напряжению, округленно равному 70 кг/см².

3. Арочные плотины

С тех пор как огромное значение плотин с большими водохранилищами стало общепризнанным для гидроэнергетического строительства, объем работ на плотине и сроки строительства стали решающими факторами для экономичности крупных гидроэлектростанций. Под давлением этих обстоятельств совершилась вначале мало заметная, а в настоящее время уже довольно четкая полная перемена установки в строительстве водохранилищных плотин, а именно: переход от излюбленных в свое время гравитационных или арочно-гравитационных плотин к значительно более экономичным и вообще более устойчивым арочным плотинам; по крайней мере, это относится к строительству плотин в Европе. Как непрерывно прогрессирует развитие в данном направлении, в особенности, как растет ширина долины (на уровне гребня), перекрываемой арочной плотиной, показывает следующее сопоставление, приведенное последовательно по времени.

	Ширина долины в м	Высота плотины в м
Плотина Росс (США) (сооружена)	276	164
Плотина Россан (Швейцария) (сооружена)	285	81
Плотина Лимберг (Австрия) (сооружена)	302	120
Плотина Сильвенштейн (Германия) (спроектирована)	370	187
Плотина Монфорте (Португалия) (подготавливается к строительству)	450	110

Нет никакого сомнения в том, что еще 20 лет назад ширина долины 450 м (считая по отметке гребня) считалась совершенно неприемлемой. В настоящее время ширина долины представляет собой лишь функцию допустимого напряжения бетона. Если для последнего допускаются напряжения до 80 кг/см^2 , как это имело место в бетонной плотине Росс, то долина шириной 450 м (у гребня) может быть успешно перекрыта арочной плотиной, если соединение с основанием осуществляется надлежащим образом и если профилю стены придается соответствующая форма свода.

Арочные плотины становятся тем более экономичными, чем тоньше могут быть получены их стенки. Практика настоящего времени класть в основу расчета допустимые

напряжения в бетоне на сжатие от 40 до 50 кг/см^2 не учитывает крупных достижений в технике приготовления и укладки бетона. Если в основу расчета положить допустимые напряжения от 80 до 100 кг/см^2 , то в результате можно получить такие тонкие поперечные сечения арочной плотины, что может быть без труда решена и проблема температурных напряжений. Благодаря этому удастся избежать также и естественного снижения прочности сооружения в результате образования трещин и отрыва от скалы основания, что всегда является следствием слишком толстых поперечных сечений стен и что обуславливает понижение допускаемых напряжений. Какая польза от максимального напряжения в 40 кг/см^2 , получаемого в результате статического расчета, если позже вследствие образования трещин появляются не 40, а 80 кг/см^2 ? Разве не будет рациональнее заранее принимать в расчет такие факты и класть в основу более высокое допустимое напряжение? Благодаря этому не только достигается экономия в кубатуре бетона и в сроках строительства, но в то же время предпосылки теории упругости приводятся в такое соответствие с действительностью, что высчитанные напряжения фактически соответствуют напряжениям, появляющимся в сооружении.

Франция, которая своими успехами в области строительства мостов из железобетона обязана в большой степени установлению больших допустимых напряжений, начала под руководством инж. Койне широкие работы также в области строительства водохранилищных плотин. Только с 1945 г. в этой стране были воздвигнуты или приступлено к строительству 15 крупных арочных плотин, тонкие поперечные сечения которых (расположенные по высоте плотин) иллюстрируются на рис. 27 [17]. Особый интерес в этом сопоставлении заслуживает плотина Тинь высотой 180 м и толщиной 45 м. Если бы эта плотина была возведена гравитационной массивной, то она имела бы толщину по крайней мере 145 м. Таким образом, в результате уменьшения кубатуры бетона с 2,0 млн. м^3 до 0,7 млн. м^3 в строительстве была достигнута экономия в среднем в 100 млн. немецких марок. Плотина Тинь (Tignes), представляющая собой круглоцилиндрическую арочную плотину с радиусом в 150 м, могла бы выдержать максимальное напряжение примерно в 70 кг/см^2 .

Поучительный пример экономичности тонких арочных бетонных плотин дает сравнение объема плотин с полез-

ным объемом водохранилища. Так, у бетонных плотин Дустр (Doustre) и Кастильон (Castillon) на каждый кг бетона приходится 1 000 кг полезной воды в водохранилище. Эти цифры являются убедительным доказательством экономичности арочных плотин, тем более потому, что в обоих случаях речь идет о круглоцилиндрических арочных плотинах с вертикальной напорной гранью, постройка которых яв-

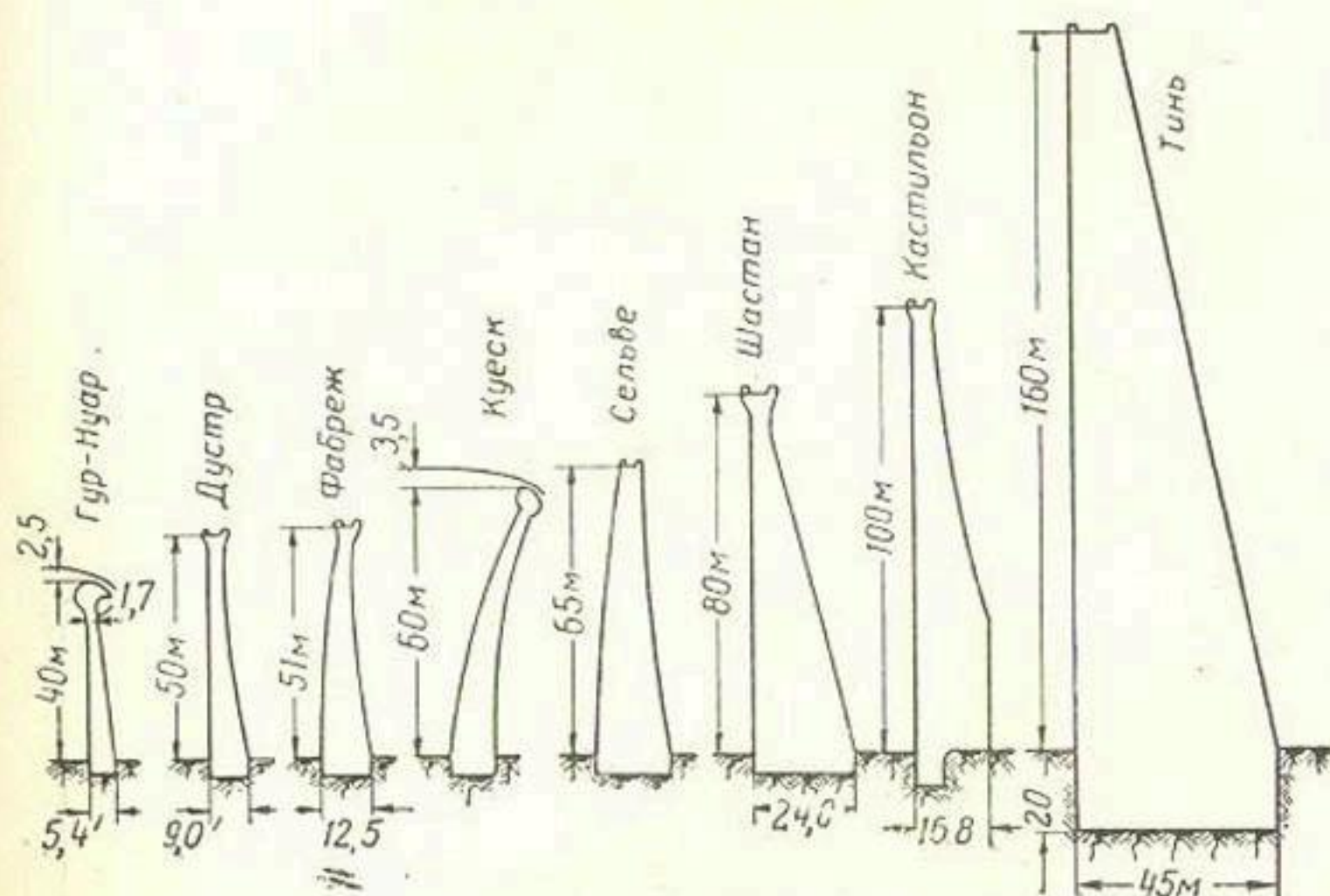


Рис. 27. Поперечные разрезы арочных плотин, построенных в последние годы или строящихся во Франции

ляется не более трудной, чем постройка гравитационных массивных плотин.

Единственным в своем роде сооружением с точки зрения экономичности является арочная плотина Росс (Ross) у американского города Сиетл (рис. 28) [16]. На этой плотине на 0,5 млн. m^3 бетона приходится 1,72 млрд. m^3 объема водохранилища, т. е. на 1 кг бетона приходится 3 400 кг полезной воды водохранилища. Эта плотина «с постоянным центральным углом арок», строительство которой началось еще в 1919 г., была позже надстроена два раза, причем ее высота была доведена в конечном итоге до 164 м. В ближайшее время она будет надстроена еще третий раз и ее высота будет доведена до 205 м. Благодаря этому ее экономичность увеличится еще больше. На кубатуру бетона 1,0 млн. m^3 будет приходиться в этом случае объем водохранилища 4,2 млрд. m^3 , или на 1 кг бетона будут при-

ходиться 4 200 кг полезной воды водохранилища. Таким образом, арочные плотины открывают чрезвычайно широкие возможности для рационального использования водной энергии.

При третьей надстройке стена плотины Росс должна быть одновременно утолщена по типу арочно-гравитацион-

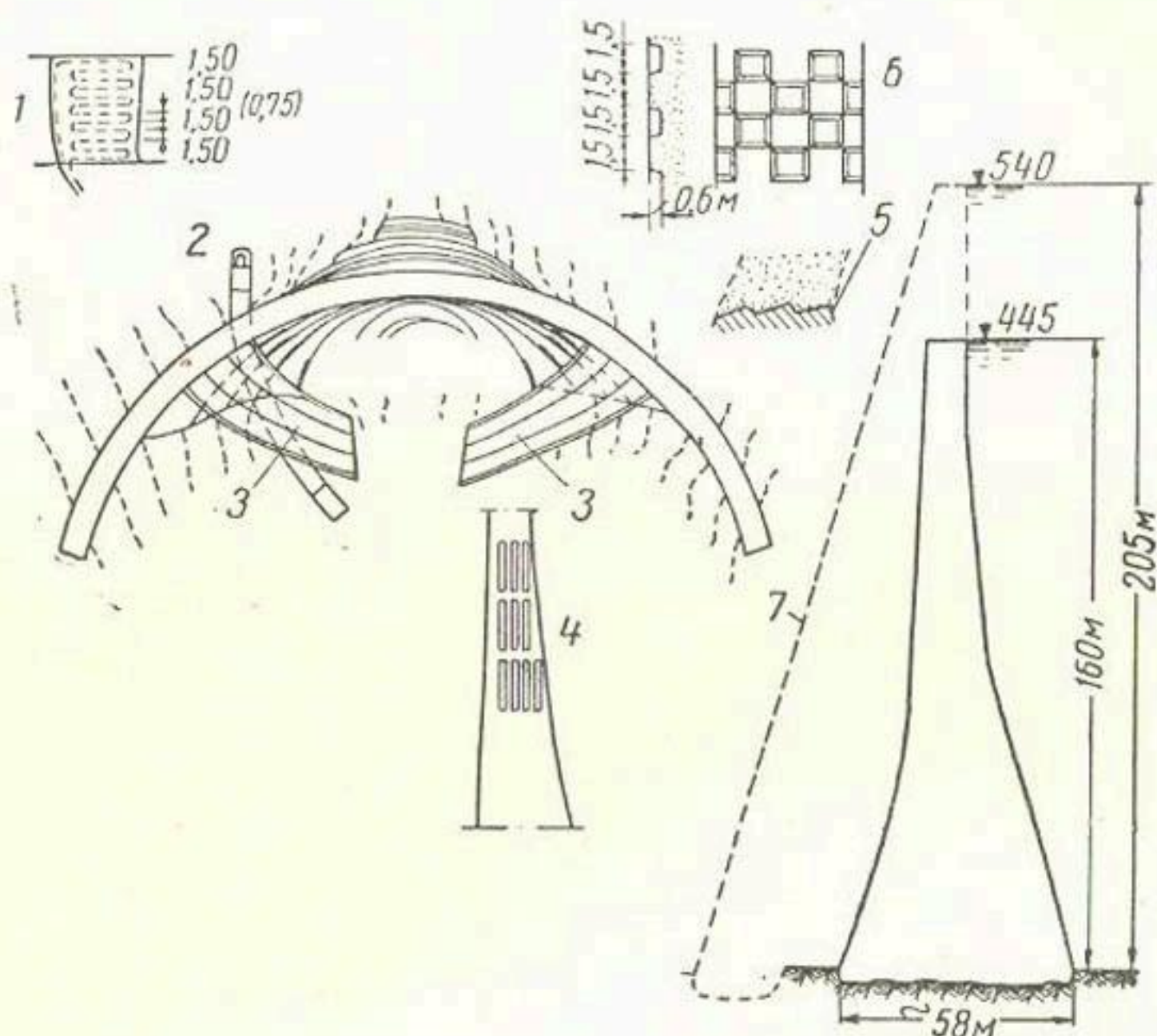


Рис. 28. Плотина Росс

1—размещение охлаждающих труб; 2—отводной строительный тоннель; 3—водосброс; 4—зубчатое сцепление швов; 5—продольный шов; 6—рифленая поверхность со стороны нижнего бьефа; 7—четвертая надстройка

ной плотины. Сейчас пришли к убеждению, что увеличение толщины, обозначенное на рис. 28 пунктиром, будет достаточным. Возможно, в дальнейшем окажется, что вообще можно обойтись без утолщения.

После утолщения и надстройки до высоты 205 м плотина Росс потеряет свой первоначальный характер плотины «с постоянным центральным углом» и будет представлять собой круглоцилиндрическую или круглую конусообразную плотину с трапециoidalным поперечным сечением. Такая форма плотины отличается большой прос-

тотой сооружения и расчетов и поэтому в настоящее время ей отдается предпочтение. Однако отношение между длиной гребня и высотой плотин не должно быть слишком большим, так как в этом случае влияние арочности сильно уменьшится в направлении к дну долины. В соответствии с этим открывается возможность применения высоких плотин такого типа. Дальнейшими примерами могут служить упомянутая уже плотина Тинь высотой 180 м (рис. 27) и только что построенная португальская арочная плотина Кастело до Бодэ, имеющая высоту 110 м при радиусе 150 м (рис. 1 и 2).

При увеличении отношения ширины долины к высоте плотины часто оказывается выгодным увеличить кривизну арок в направлении сверху вниз. Примером арочной плотины с незначительной переменной кривизной может служить очень удачная бетонная плотина Россан (Rossens) в Швейцарии [18] (рис. 29)*. Еще большую переменную кривизну имеет также упомянутая бетонная плотина Лимберг в Австрии [19], которая расположена в Высоких Альпах и представляет собой во многих отношениях замечательную бетонную плотину (рис. 30). Чтобы предупредить ожидаемое образование продольных трещин в плотине, имеющей толщину до 35 м и высоту 120 м при относительно большой длине, в нижней части плотины Лимберг был предусмотрен сплошной продольный шов. При расположении таких продольных швов очень существенно избежать всякого штрабления. Как, например, расположен такой шов в поперечном сечении бетонной долины Россан, видно из рис. 29.

Формой плотины с максимальной переменной кривизной является тип плотины «с постоянным центральным углом» (рис. 31). Этот тип арочной плотины, разработанный Джергенсоном несколько десятилетий назад, был очень благоприятно встречен в западных штатах США и нашел там блестящее применение. Плотины там рассчитывались

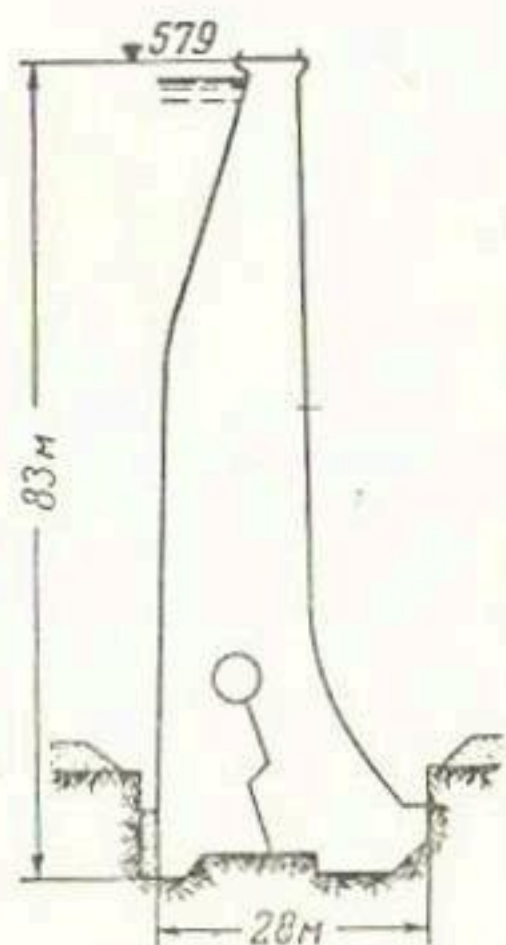


Рис. 29. Плотина Россан (в Швейцарии)

* Показанный на поперечном сечении продольный шов со штольней не является частью сооружения.

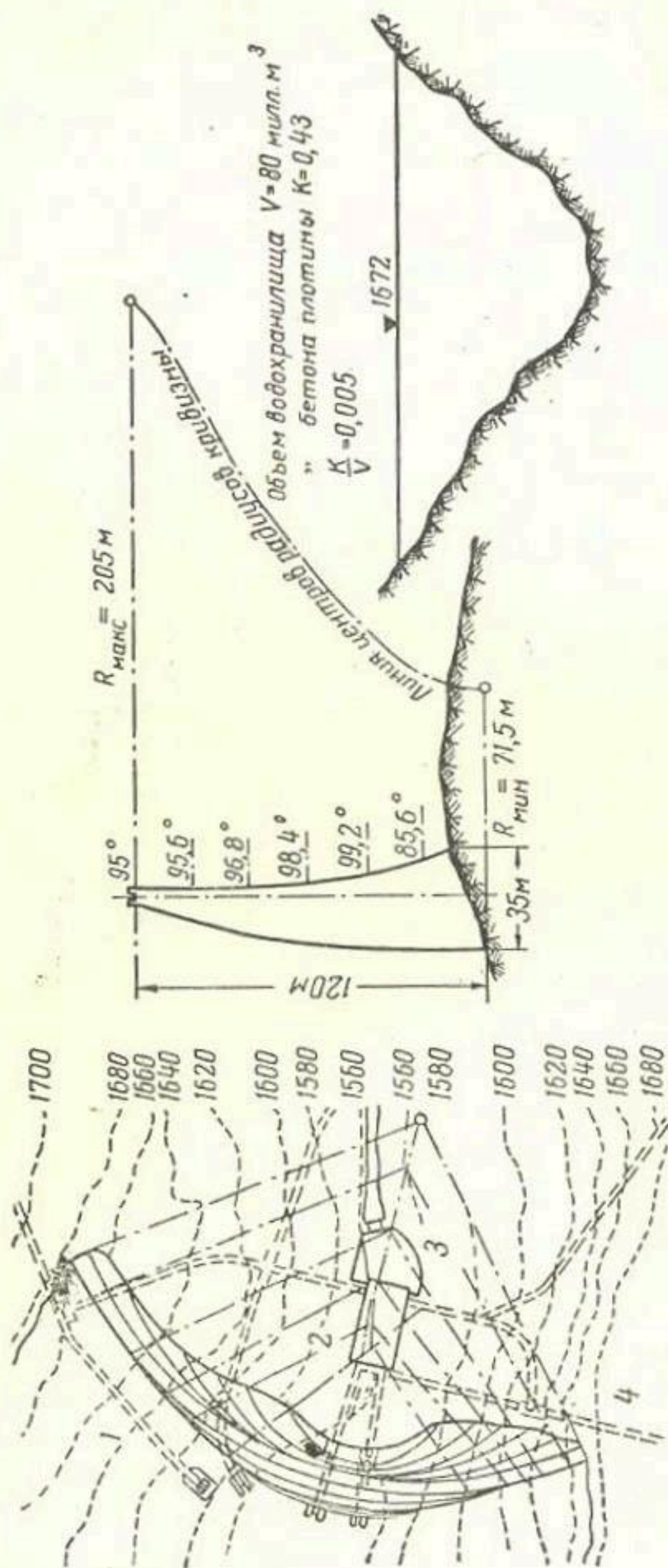


Рис. 30. Плотина Лимберг (Австрия)

1—штольня гидросиловой установки; 2—здание ГЭС и насосной станции; 3—нижний бассейн; 4—напорная шахта верхней ступени

простейшим способом путем деления их на ряд горизонтальных арок, которые считались как замкнутые кольца. Со временем более точный метод пробных нагрузок сменил этот примитивный способ расчета. Находящаяся в строительстве арочная плотина Мовуазен (Mauvoisin) высотой

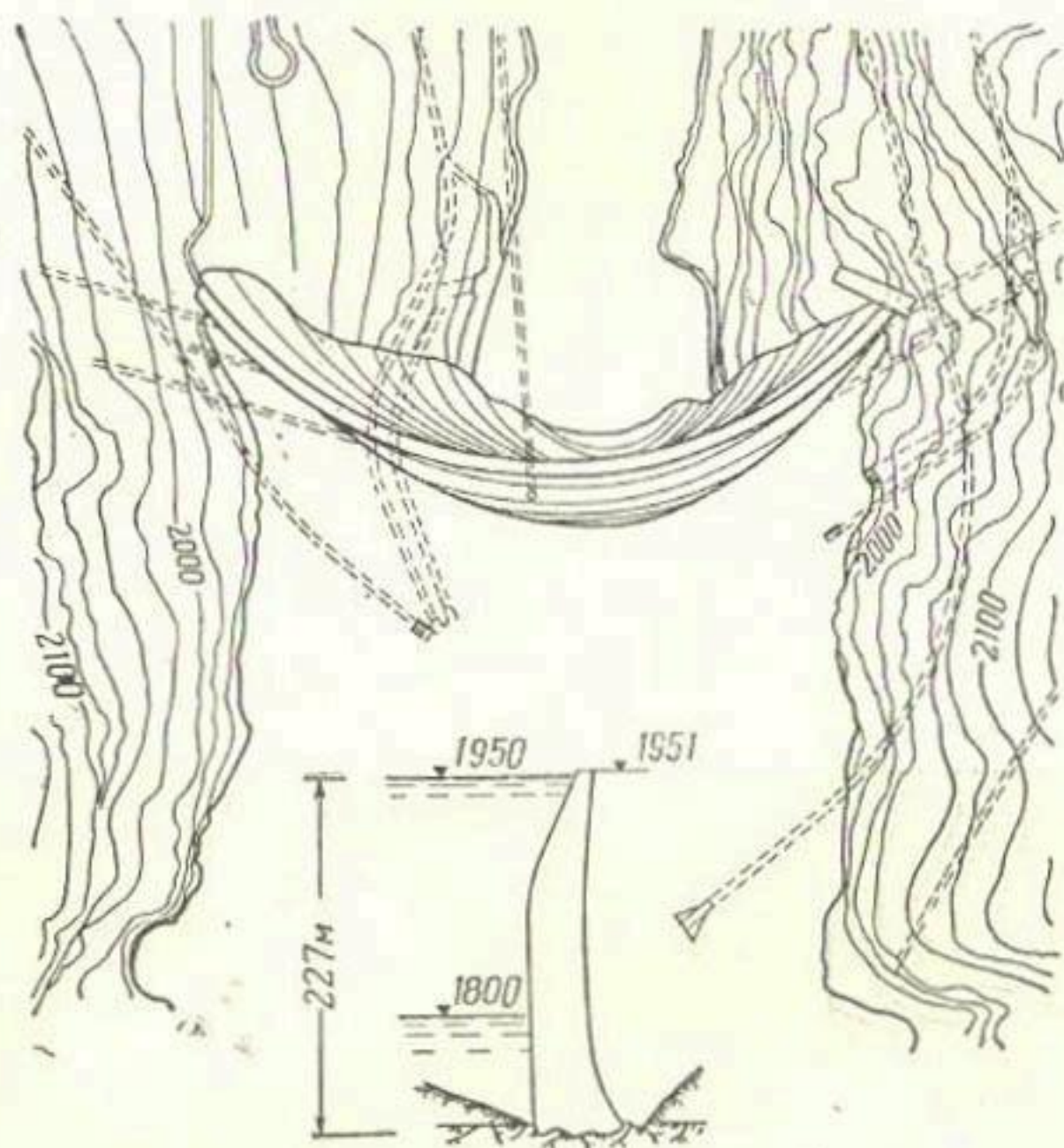


Рис. 31. Арочная плотина Мовуазен (Швейцария)

207 м (рис. 31) представляет собой самое значительное сооружение этого типа в настоящее время. Более 50 арочных плотин сконструированы по принципу постоянного центрального угла. Они прекрасно оправдали себя за 25 лет своего существования [21].

В последнее время теоретические основы расчета арочных плотин были еще больше усовершенствованы. В частности, научились использовать при расчете достижения в области теории оболочек. Однако размеры этой книги не позволяют заняться этим вопросом ближе [8].

Само собой разумеется, исследования теории сферических оболочек должны были оказать влияние и на характер конструкции, что привело к разработке новой конструкции — купольной арочной плотины. Замечательными куполь-

ными арочными плотинами являются плотины: Куеск (Couesque) высотой 60 м (рис. 27) [17], Овильо (Oviglio) высотой 75 м (рис. 32) [4], Маррон с сильно изменяющейся

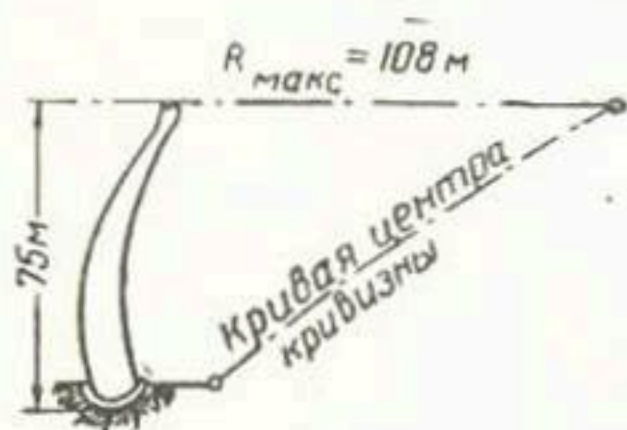


Рис. 32. Плотина Овильо (Италия)

кривизной (рис. 33) [22], Люмиси высотой 136 м (рис. 6) [4] и подготавливаемая к строительству плотина Вайонт высотой 257 м (рис. 34). Почти все эти плотины расположены в долинах треугольного профиля или с крутыми склонами (рис. 6).

Разработка купольных плотин в Италии, связанная с именами Оберти [23] и Семенца [4], является одним из наиболее выдающихся достижений в области современных плотин. Замечательным в этих конструкциях является, во-первых, небольшая толщина стен — у плотины Вайонт, например, максимальная толщина 23,3 м при высоте пло-

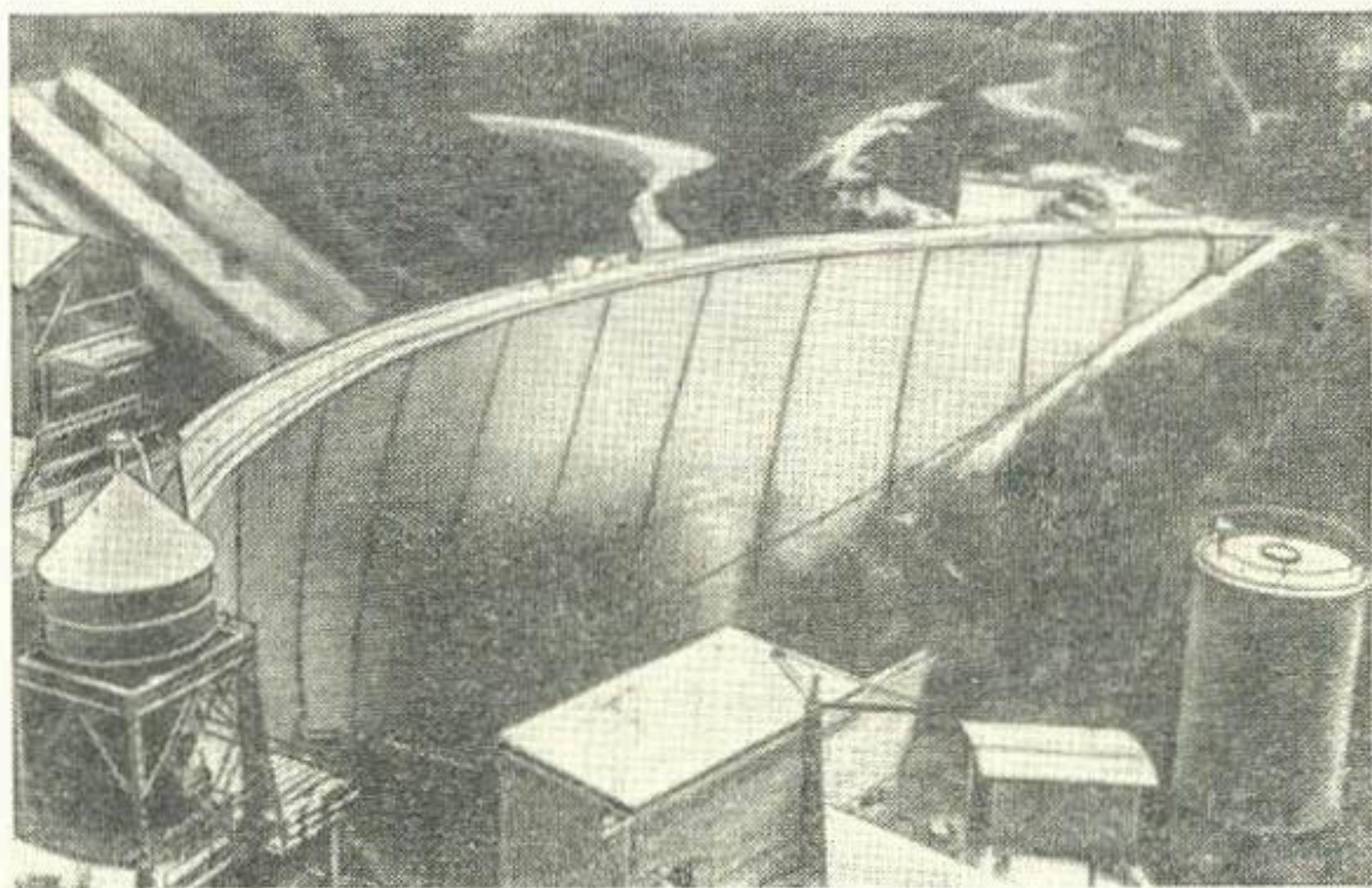


Рис. 33. Арочная плотина Маронн

тины 257 м — и, во-вторых, сплошной, гладкий, периферийный шов вблизи основания. Благодаря последнему свод получает возможность освободиться от растягивающих напряжений в месте заделки. Сокращения свода в результате экзотермии, усадки и ползучести бетона могут быть уравни-

вешены опрокидывающим моментом свода. В процессе постепенного наполнения водохранилища сила, уравнивающая изменения в объеме бетона плотины, действует соответственно, выравнивая все сокращения объема бетона. Факт, что в бетонной плотине Гувера, несмотря на цементацию всех швов, были установлены значительные деформации

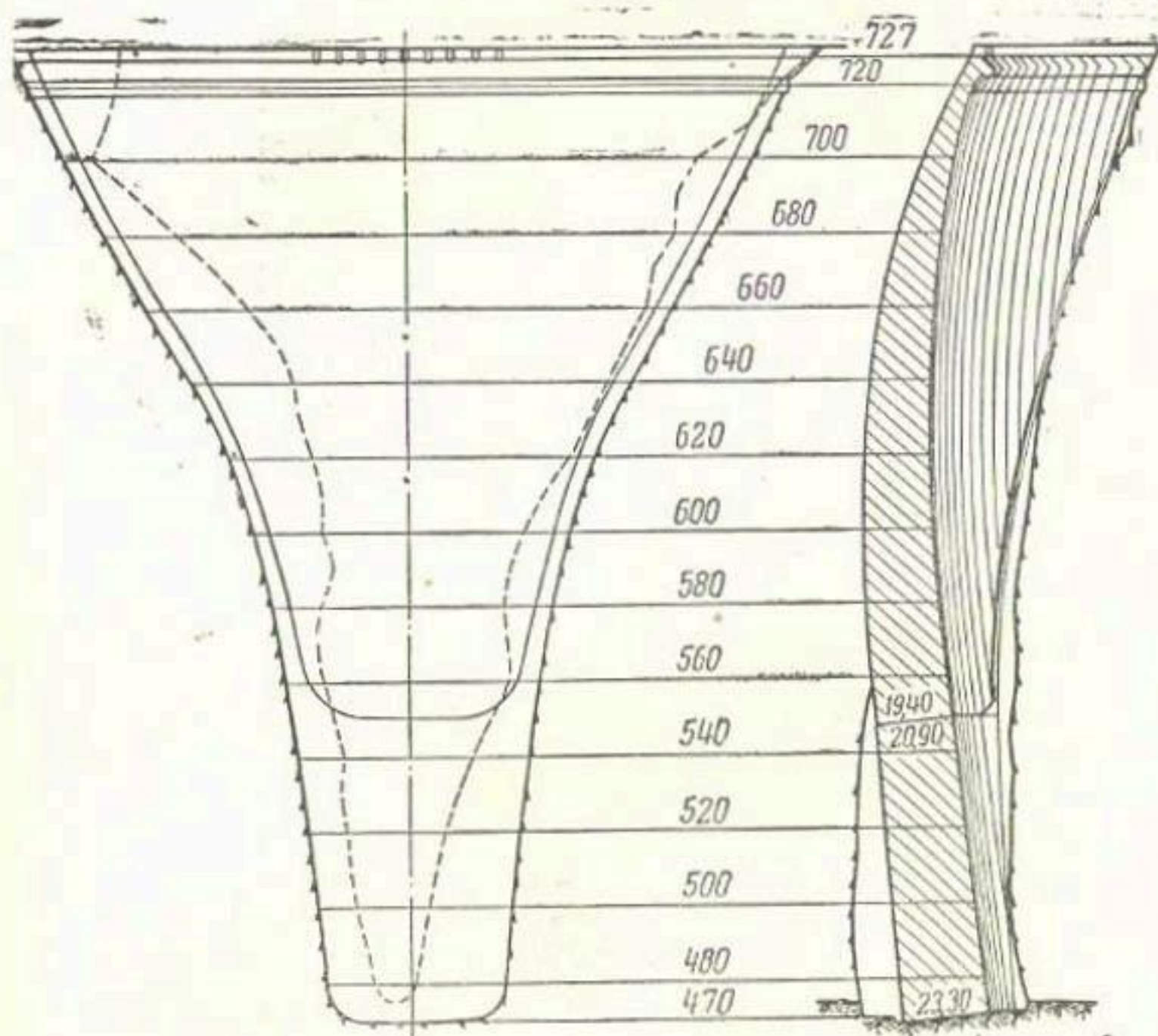


Рис. 34. Арочная плотина Вайонт (Италия)

ции блоков, убедительно говорит за то, что задача, поставленная периферийным швам, будет реализоваться в верхних и средних частях плотины полностью, а в нижних — по крайней мере частично.

Дальнейший успех в области строительства купольных плотин представляет собой спроектированная Коинном португальская двухарочная плотина Санта Лучия (Santa Luzia), имеющая высоту 70 м и радиус 60 м при толщине свода на гребне 2,5 м, в основании 12 м; смелость и красота ее встретили всеобщее восхищение (рис. 35) [24].

Для арочных плотин очень существенно, чтобы к моменту уплотнения швов теплоотдача бетона закончилась и чтобы бетон плотины уже принял свою минимальную

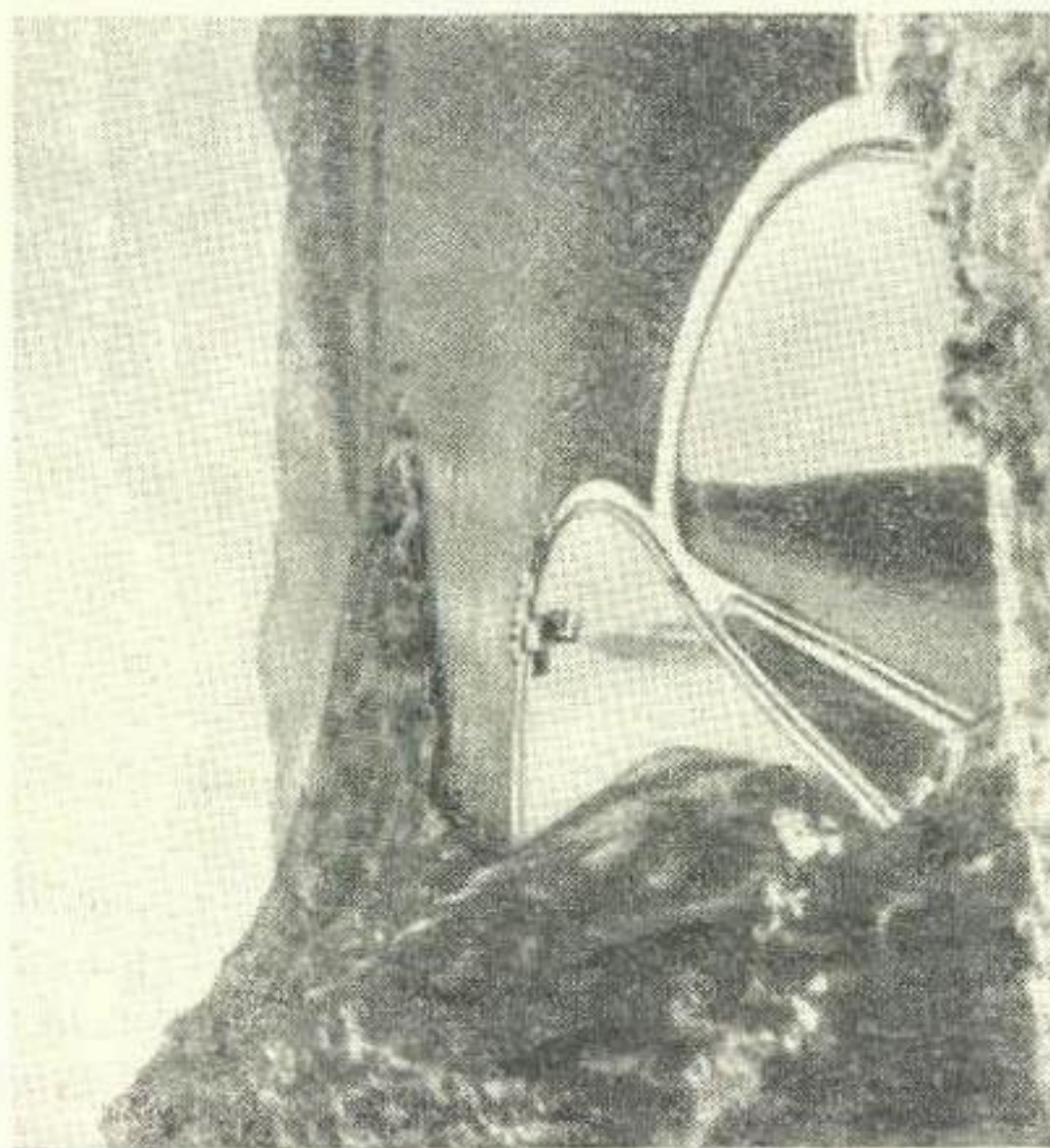


Рис. 35. Двухарочная плотина Санта Лучия
(Португалия)

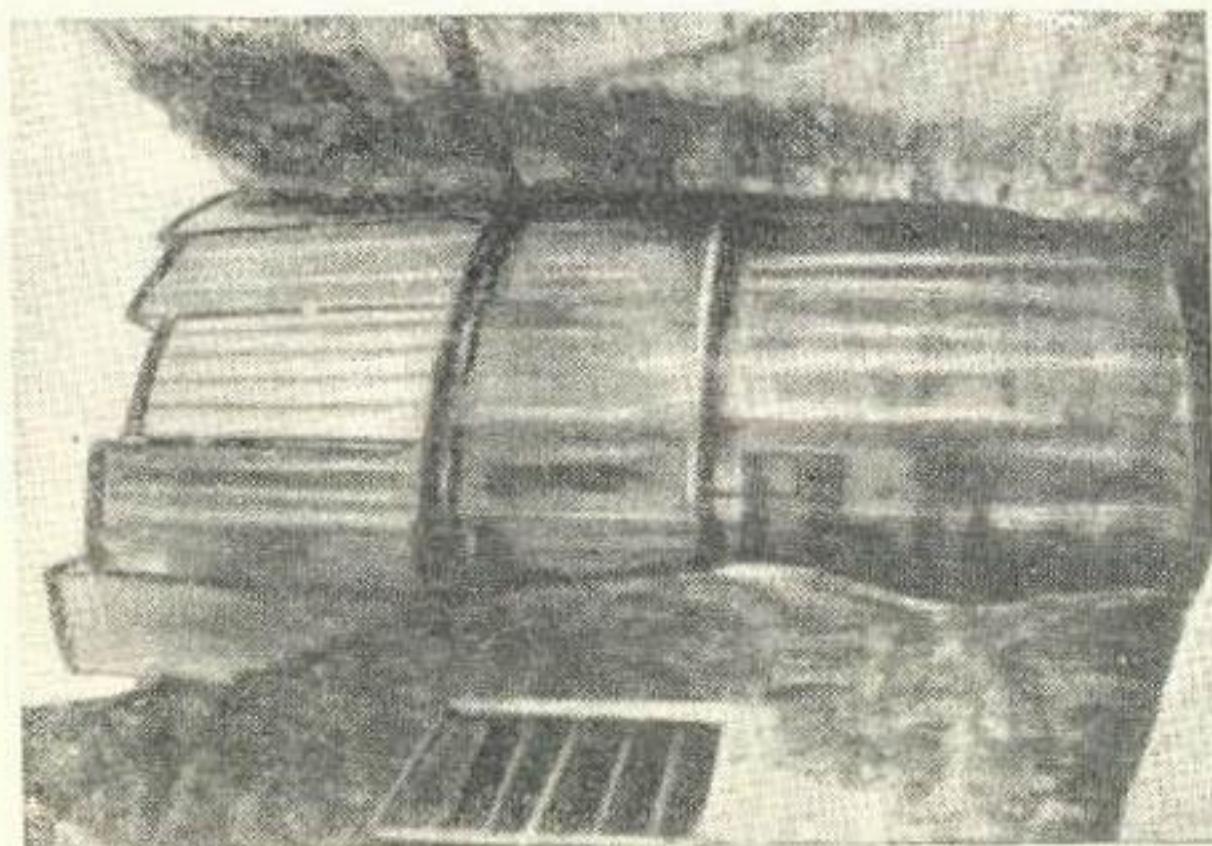


Рис. 36. Арочная плотина Санта
Джиустина. Вид со стороны верх-
него бьефа. Состояние строи-
тельства на июль 1949 г.

температуру. В Америке отвод теплоты схватывания производится в основном при помощи охлаждающих труб (рис. 28), которые размещаются на расстоянии 1,5 м друг от друга. В Европе большей частью отдают предпочтение применению широких швов для охлаждения бетона, как, например, на итальянской плотине Санта Джиустина, имеющей высоту 153 м (рис. 36) [25].

На плотине Россан широкие швы для охлаждения бетона держались открытыми почти 1½ года [18]. После окончания строительства плотины нижняя треть швов была уплотнена незадолго до начала зимы, в то время как две верхние трети были закрыты полгода спустя в период самой низкой температуры плотины. Кроме швов, в середине каждого блока выводилась вверх еще шахта для охлаждения, в которой имелись примерно такие же условия, как в дымовой трубе. Стены этих шахт поддерживались влажными. В то время как бетонирование швов для охлаждения происходило нормально, заполнение охлаждающих шахт выполнялось методом отдельного бетонирования.

Метод отдельного бетонирования состоит в том, что чисто вымытый гравий или щебень, величина зерен которого ограничивается нижним пределом от 6 до 9 мм, вводится при вибрации в опалубленный блок или шахту, и затем снизу подается жидкий цементный раствор, который, равномерно поднимаясь, заполняет все пустоты. В целях предварительного охлаждения гравия или щебня шахту можно заполнить водой. Накачиваемый цементный раствор постепенно вытесняет воду, и между цементным раствором и водой всегда имеется налицо отчетливая поверхность раздела. Этот цементный раствор специального состава должен содержать при использовании его в арочных плотинах примерно 40% цемента, 13% альфезила, 0,5% вспомогательного вещества и 46% песка, который в основном должен быть мельче, чем 1,5 мм, и ни в коем случае не должен быть крупнее, чем 3 мм. Альфезил представляет собой мелкий порошок, содержащий кремний, имеющий удельную поверхность, в 2—3 раза большую, чем цемент, благодаря чему он предупреждает образование комьев из частичек цемента и устраняет склонность к отделению воды. Так называемое вспомогательное вещество производит разжижающее действие, поддерживая твердые частицы в состоянии суспензии и препятствуя преждевременному сгущению смеси.

Метод раздельного бетонирования, применение которого при бетонировании охлаждающих шахт бетонной плотины Россан можно назвать очень ценным и удачным опытом, открыл самые широкие возможности для охлаждения арочных плотин и в особенности высоких арочных плотин. Коэффициент теплопроводности насыщенного водой бетона, составляющий, как известно, $3 \text{ ккал/м час } ^\circ\text{C}$ на 100% больше, чем коэффициент сухого бетона, откуда следует, что водное охлаждение является во много раз более эффективным, чем воздушное охлаждение. Имеющиеся здесь возможности могут быть особенно выгодно реализованы в сочетании с методом раздельного бетонирования. Швы для охлаждения со стороны напорной и низовой грани отгораживаются с помощью бетонных плит, которые с обеих сторон имеют уплотнения в виде медных листов для обеспечения водонепроницаемости, затем они заполняются промытым гравием или щебнем, подвергаются вибрации и затопляются. При трудных условиях охлаждения можно дополнительно все время вводить в воду куски льда, в результате чего охлаждаемое пространство становится огромным ледяным термометром, температура которого всегда ниже 4° и который представляет собой наиболее эффективную установку для охлаждения, какую только можно себе представить.

После бетонирования швы должны быть еще уплотнены цементацией. Для плотины Россан с этой целью разработан остроумный и простой метод (рис. 37). Здесь на каждой поверхности зуба соответственно зубчатой форме швов в горизонтальном и вертикальном направлениях предусмотрен горизонтальный паз, имеющий форму трапеции, причем все эти пазы защищены от проникновения в них бетона клапаном из листового железа, плотно закрепленного сверху и упирающегося снизу. Расположенные вертикально друг над другом поверхности зубцов уплотняются за один рабочий цикл при помощи вертикальных инъекционных труб с горизонтальными штуцерами.

В описанной уже кратко главе 8 арочной плотине Монфорте от охлаждающих швов отказались совсем. Вместо этого в каждом блоке поместили по две шахты для охлаждения 1,5 м диаметром на расстоянии 7,5 м друг от друга, которые полностью отвечают требованиям охлаждения. Цементация швов будет производиться по скважинам, пробуриваемым из шахт. Этот метод прекрасно оправдал себя при восстановлении бетонной плотины Мёне (Möhne).

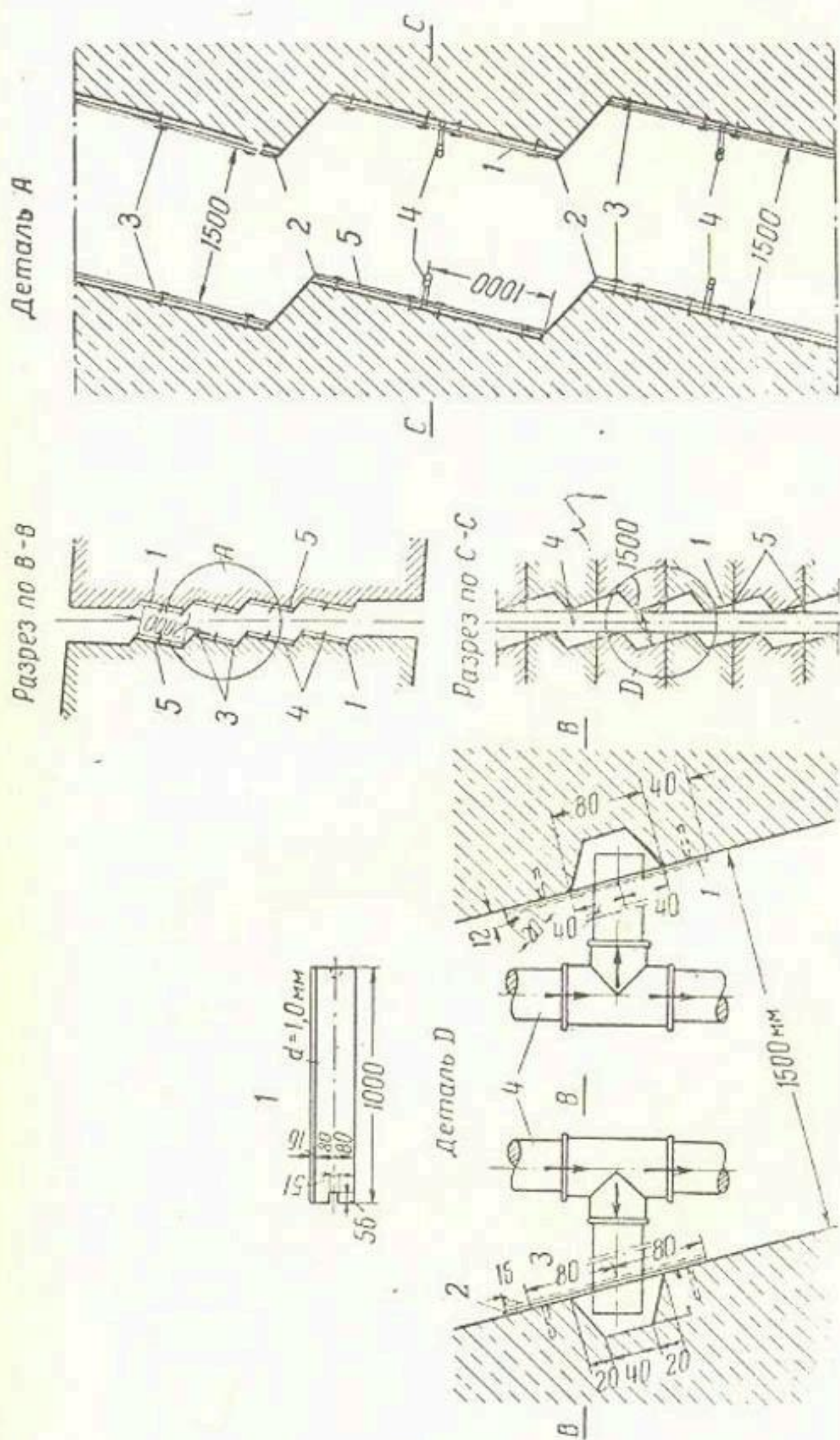


Рис. 37. Плотина Россан (Швейцария). Детали цементации швов

1 — пластинка толщиной 1 мм для перекрытия инъекционных желобков (общий вид); 2 — цементный раствор;
3 — анкерные винты диаметром 4,5 мм; 4 — трубки для инъекции цемента $1\frac{1}{2}$ " ; 5 — желобки для инъекции

4. Арочные плотины с контрфорсами

Область применения арочных плотин, которая в нормальных условиях имеет естественные пределы в определенных соотношениях длины к высоте плотины, может быть значительно расширена, если арочная плотина конструируется с мощным упором в основании. Этот упор может быть массивным, как это показано на рис. 29, или контрфорсным, как это имеет место в случае уже неоднократно упоминавшейся бетонной плотины Монфорте (рис. 38). Цель этого устройства в обоих случаях заключается в том, чтобы ограничить работу арки верхней частью плотины, которая является достаточно эластичной для этого, и чтобы обеспечить постепенный переход от работы арки к работе подпорной стенки, что и выполняет упор (контрфорс). Чем больше отношение между длиной и высотой плотины, тем более мощным становится соответственно и контрфорс; где-то и для такого метода строительства должен быть предел длины плотины. Если учитывать немецкие тектонические условия, то не будет преувеличением утверждать, что особое значение здесь приобретают как раз арочные плотины с контрфорсной нижней частью.

Чтобы дать картину действия сил, на рис. 38 изображено положение линии давления на плотине Монфорте при пустом и наполненном водохранилище, распределение гидростатического давления между аркой и подпорной стенкой, ход напряжений от арочного действия и ход вертикальных напряжений от изгиба при пустом и наполненном водохранилище.

Вертикальные растягивающие напряжения от изгиба на низовой грани при наполненном водохранилище являются характерными не только для этой особой конструкции, но вообще для всех высоких арочных бетонных плотин. Этих напряжений можно избежать, если придавать арочным плотинам купольную форму. Благодаря этому в данном примере стало возможным уменьшить максимальные напряжения на изгиб со стороны низовой грани до 10 кг/см^2 , хотя можно предполагать, что хороший бетон плотин может надежно противостоять таким растягивающим напряжениям на изгиб. Напряжения на растяжение полностью воспринимаются арматурой. Как видно из рис. 38, арматура размещена в вертикальных ребрах шириной 70 см, которые размещаются на расстоянии 7,5 м друг от друга.

Эти ребра служат в верхних частях плотины одновременно как разделяющие стенки сифонных труб.

Линии давления при пустом и наполненном водохранилище позволяют очень наглядно видеть действие контрфорсов. В первом случае давление производится главным образом на арку (свод), во втором случае—на контрфорс.

Существенной конструктивной особенностью плотины Монфорте является сплошной продольный шов между сводом и контрфорсами (рис. 17). Так как свод воздвигается независимо от контрфорсов, он сохраняет высокие упругие свойства, характеризуемые отношением максимальной толщины 8 м к среднему радиусу свода 230 м. Существует только немного арочных плотин, которые имеют такую высокую степень упругости. Это оказывает особо благоприятное действие на температурные напряжения, которые в плотине Монфорте являются необычайно низкими. Дополнительные моменты, создаваемые периферийными напряжениями у краев, также удерживаются благодаря этому в допустимых пределах.

5. Контрфорсные плотины

Из числа водохранилищных контрфорсных плотин только две системы получили большое развитие, а именно—многоарочные и массивно-контрфорсные плотины¹ (ячеистые).

Многоарочные плотины воздвигаются уже редко, так как экономия в кубатуре этих плотин связана со значительно большей стоимостью строительства по сравнению с массивно-контрфорсными плотинами. Тем не менее имеются случаи, когда экономия в кубатуре имеет гораздо большее значение, чем более высокая стоимость работ, как, например, при строительстве в весьма отдаленных или трудно доступных местностях, где подвоз цемента или доставка песка могут обходиться очень дорого. Благодаря этим случаям многоарочные плотины сохранили, хотя и ограниченную, область применения. В качестве примера приведем здесь бетонную плотину Жиротт, расположенную на высоте 1 700 м во Французских Альпах, для которой весь бетон понадобилось доставить из долины по канатной дороге, причем в общей сложности понадобилось 120 000 м³ бетона. По сравнению с массивно-контрфорсной плотиной здесь пред-

¹ Автор называет массивно-контрфорсные плотины ячеистыми, у нас этот термин обозначает «плотины с ячейками, засыпаемыми балластом». (Ред.)

ставилось возможным сэкономить 40 000 м³ бетона, что вполне оправдывало выбор данной конструкции плотины. Форма поперечного сечения плотины иллюстрируется на рис. 39 [20].

Массивно-контрфорсная плотина, которая все в большей и большей степени превращается в экономичный вариант гравитационной массивной плотины, которая впервые была предложена Нетцли в виде плотины с контрфорсами, имеющими круглые оголовки [8]. Последние образовывали

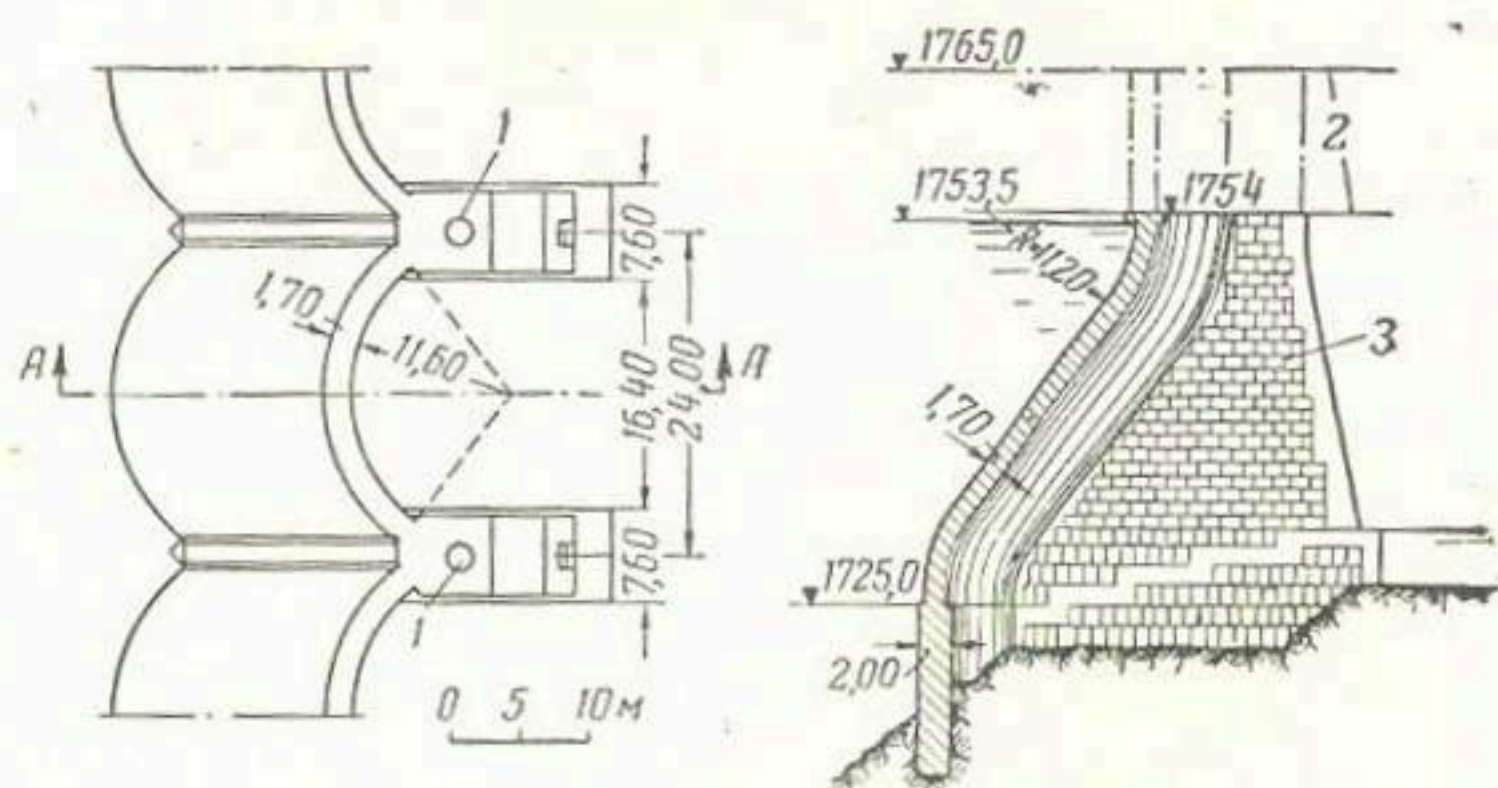


Рис. 39. Многоарочная плотина Жиротт (La Girotte) (Франция)

1 — шахты для анкеров при повышении плотины в будущем; 2 — проектируемое будущее повышение плотины; 3 — облицовочные плиты

напорную грань плотины, швы между ними уплотнялись листами из меди. В свое время в Америке был воздвигнут целый ряд таких плотин. Самая известная из них — это спроектированная Людином бетонная плотина Рио-Негро (Rio-Negro) в Уругвае.

Стукки внес существенное улучшение в контрфорсную плотину Нетцли, видоизменив ее в плотину с полыми контрфорсами. В Швейцарии воздвигнут целый ряд таких ячеистых плотин. Самая известная из них — это плотина Диксанс, имеющая высоту больше 86 м (рис. 3), сооружение которой было смелым предприятием, если учесть состояние плотиностроения в то время. Прекрасное состояние плотины Диксанс [2], по-видимому, в свое время побудило Гренга и Лауфера спроектировать бетонную плотину Лимберг первоначально как массивно-контрфорсную с полыми контрфорсами (она была на 50% выше, чем плотина Диксанс), но, как уже упоминалось, она была все же построена потом как арочная плотина.

Приходится горько сожалеть, что условия того времени, а не конструктивные соображения помешали строительству такой гигантской массивно-контрфорсной плотины высотой 120 м.

Рис. 40 показывает построенную Марчелло бетонную плотину Трона (Тропа) [25], [27] высотой 60 м и длиной

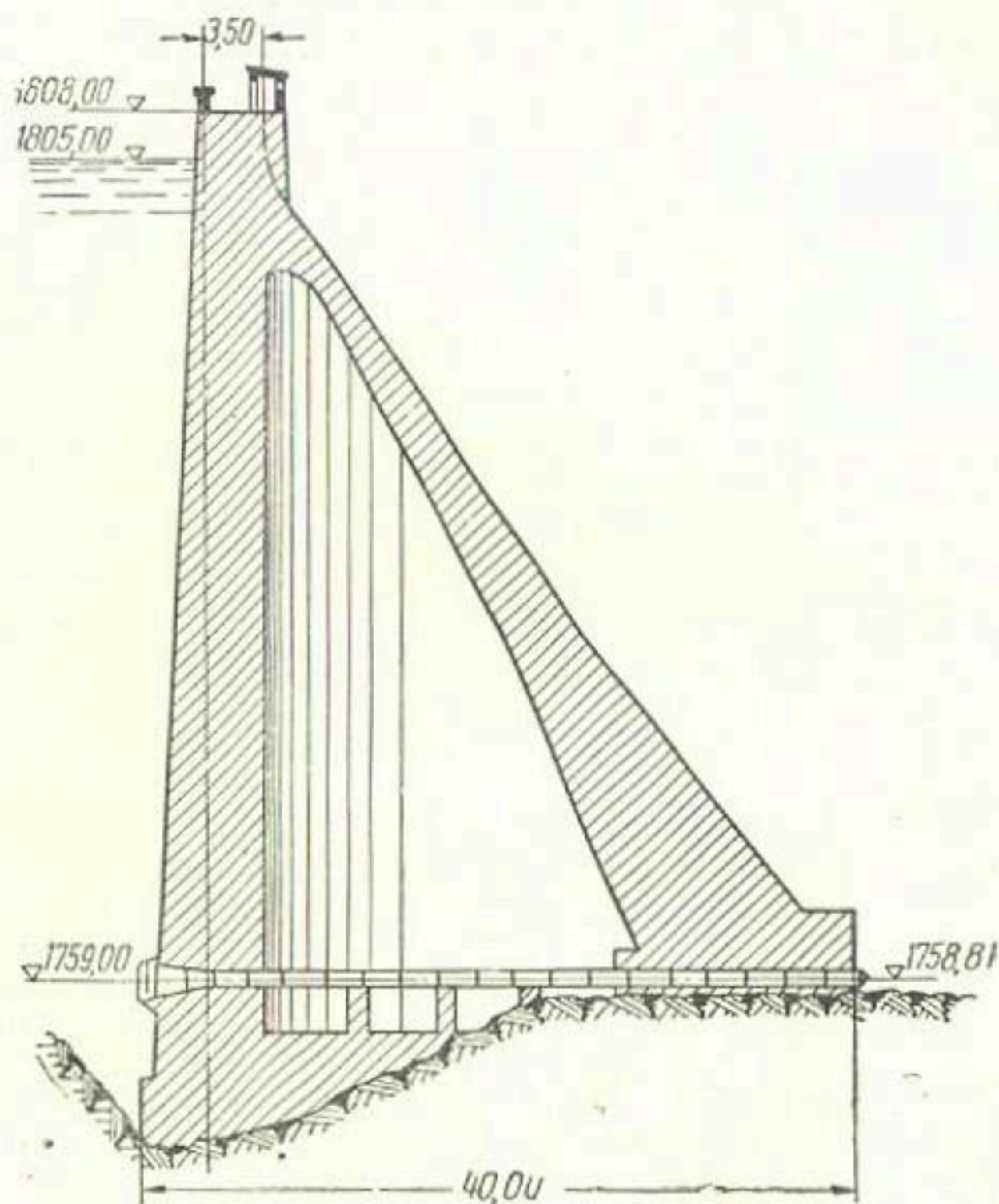


Рис. 40. Плотина Трона гидроэлектростанции Битто. Поперечный разрез

182 м, в нее уложено $87\,500\text{ м}^3$ бетона. Экономия в кубатуре бетона по сравнению с массивной гравитационной плотиной составляет 27,5%, а экономия в затратах 24%. Удельные стоимости работ были превышены при строительстве этой плотины против гравитационной только на 2—5%. Если учесть одновременное высотное положение створа плотины (на высоте 1800 м в Альпах), то необходимо будет принять в расчет экономию не только в стоимости, но и во времени.

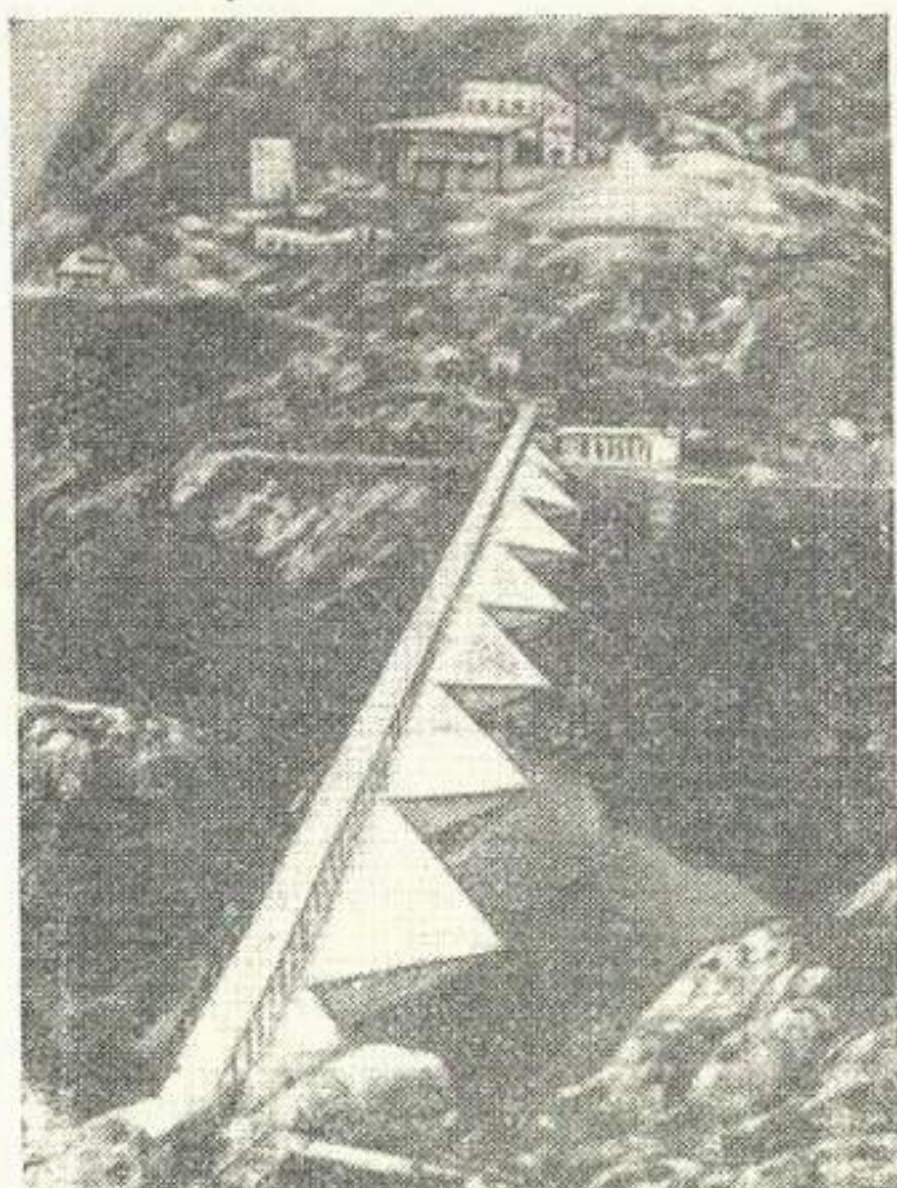


Рис. 41. Общий вид плотины (по гребню) и водохранилища Инферно

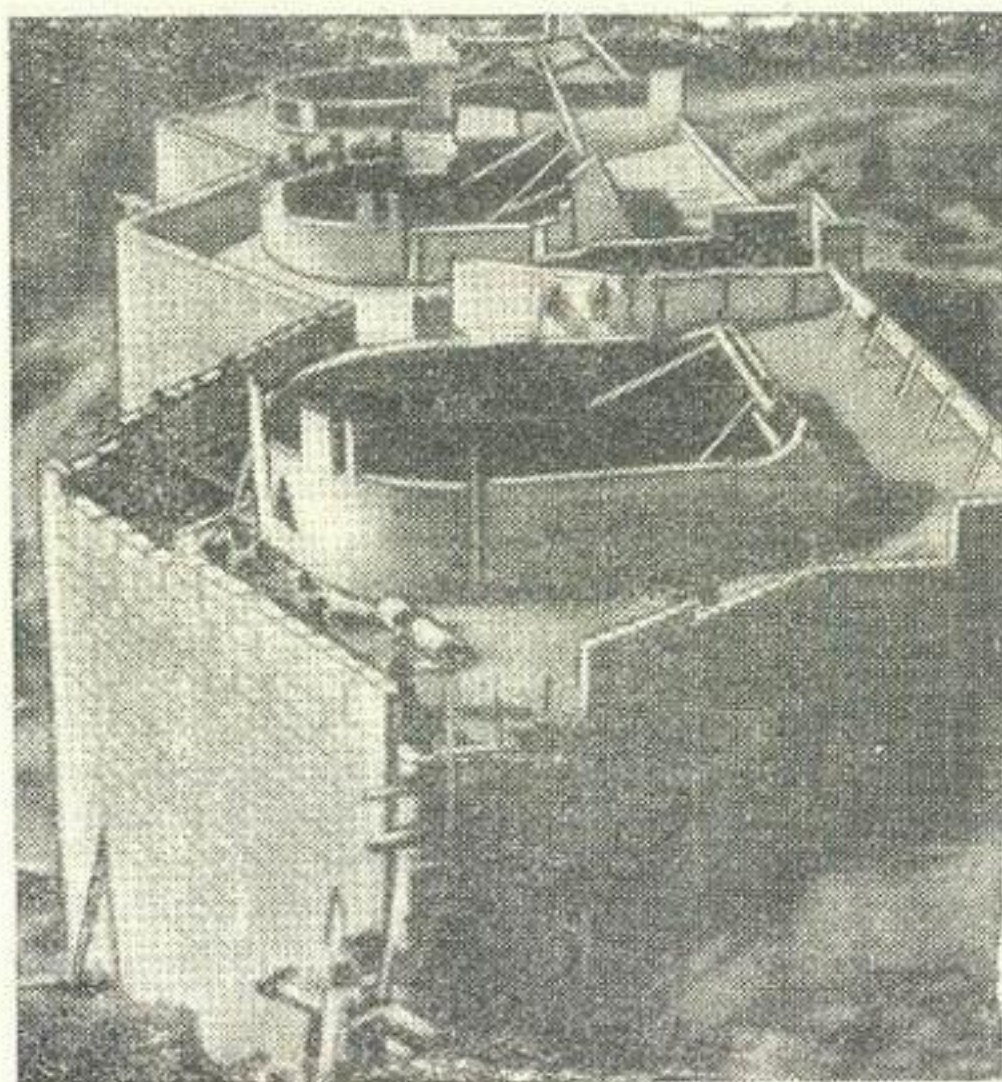


Рис. 42. Плотина Инферно по состоянию строительства на октябрь 1942 г.

Очень красивой плотиной является и бетонная плотина Инферно (Inferno), построенная также Марчелло (рис. 41 и 42), которая при высоте в 41 м и длине 150 м имеет кубатуру уложенного бетона 36 400 м³.

Строительством бетонной плотины Муджерис (Muggeris) в Сардинии Марчелло добился нового большого прогресса в конструкции массивно-контрфорсных плотин с полыми

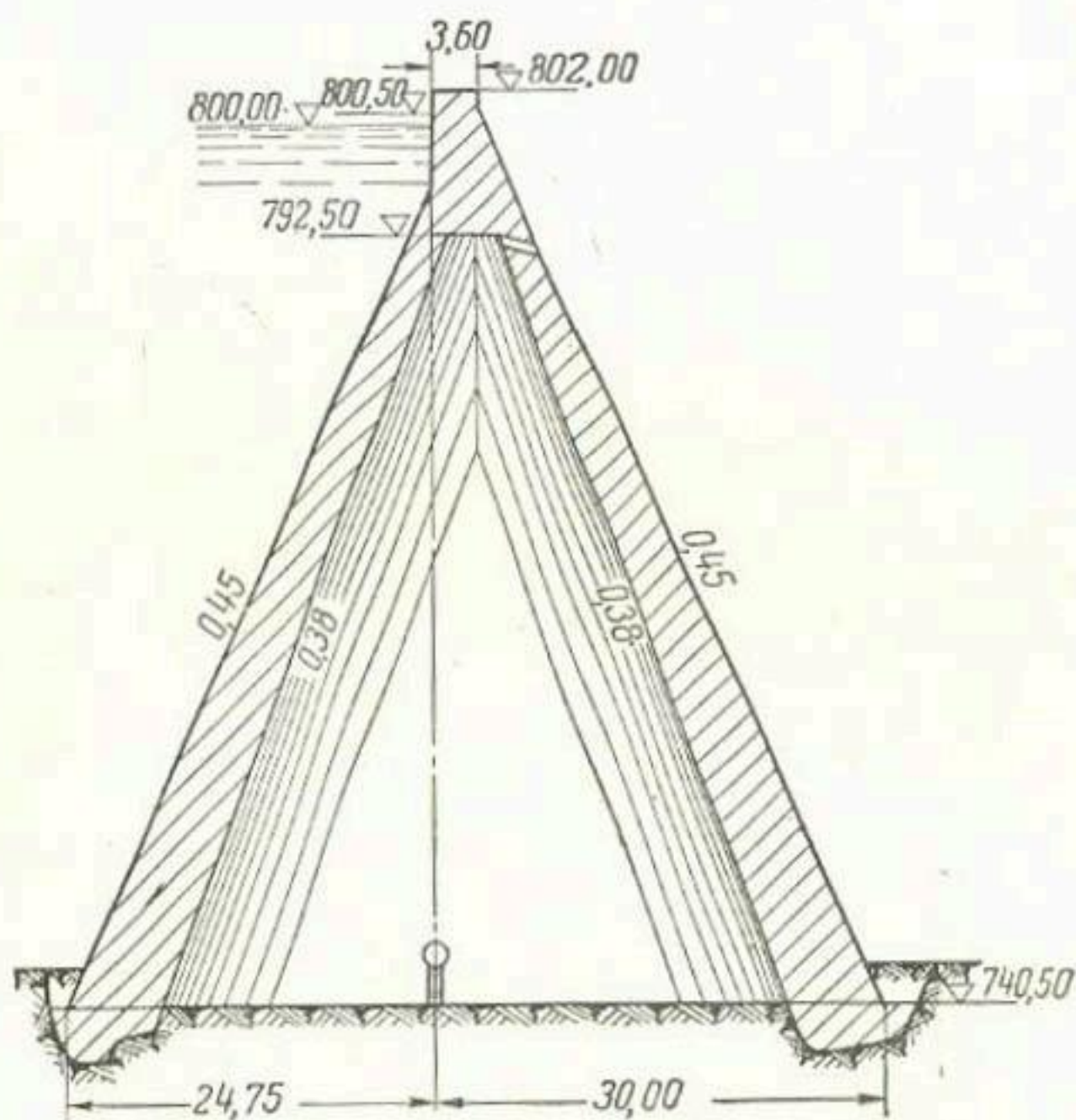


Рис. 43. Поперечный разрез контрфорсной плотины Муджерис

контрфорсами. Эта плотина (рис. 43 и 44) построена совершенно симметричным профилем с углом наклона обеих граней 0,45:1. Плотина имеет высоту 62 м и длину 240 м; ширина секций составляет 22 м. Кубатуре плотины 135 000 м³ соответствует полезный объем водохранилища 60 млн. м³. Экономия в объеме бетона по сравнению с гравитационной массивной плотиной составляет здесь 40%, экономия в стоимости — 35%.

В Сицилии в настоящее время строится плотина Анчипа высотой 105 м, которая была тоже спроектирована Марчелло.

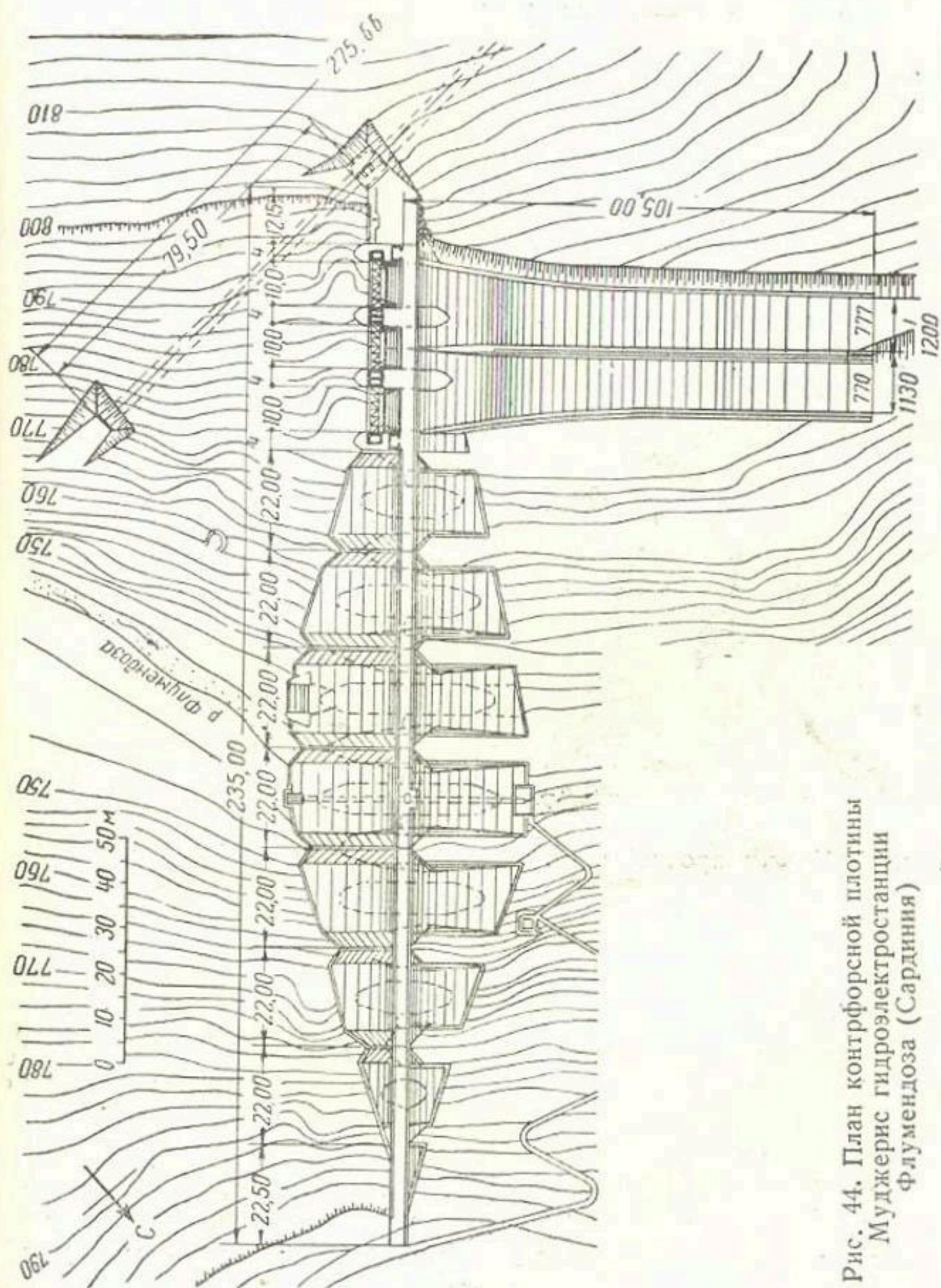


Рис. 44. План контрфорсной плотины
Муджерис гидроэлектростанции
Флумендоза (Сардиния)

ИССЛЕДОВАНИЯ НА МОДЕЛЯХ И ИЗМЕРЕНИЯ В НАТУРЕ

При проектировании бетонных плотин очень часто приходится выполнять обширные и очень сложные расчеты на основе теории упругости. Однако расчеты по теории упругости, позволяющие дать правильную игру сил в пространственной системе, встречают большие трудности.

В этих целях оказалось более целесообразным и надежным определять взаимодействия сил в сооружении путем испытаний на модели.

В соответствии с этим были созданы лаборатории для исследования плотин, как, например, при Бюро мелиорации в США или лаборатория Оберти в Бергамо, или лаборатория при высшей технической школе в Лиссабоне, в которых бетонные плотины испытывались на моделях.

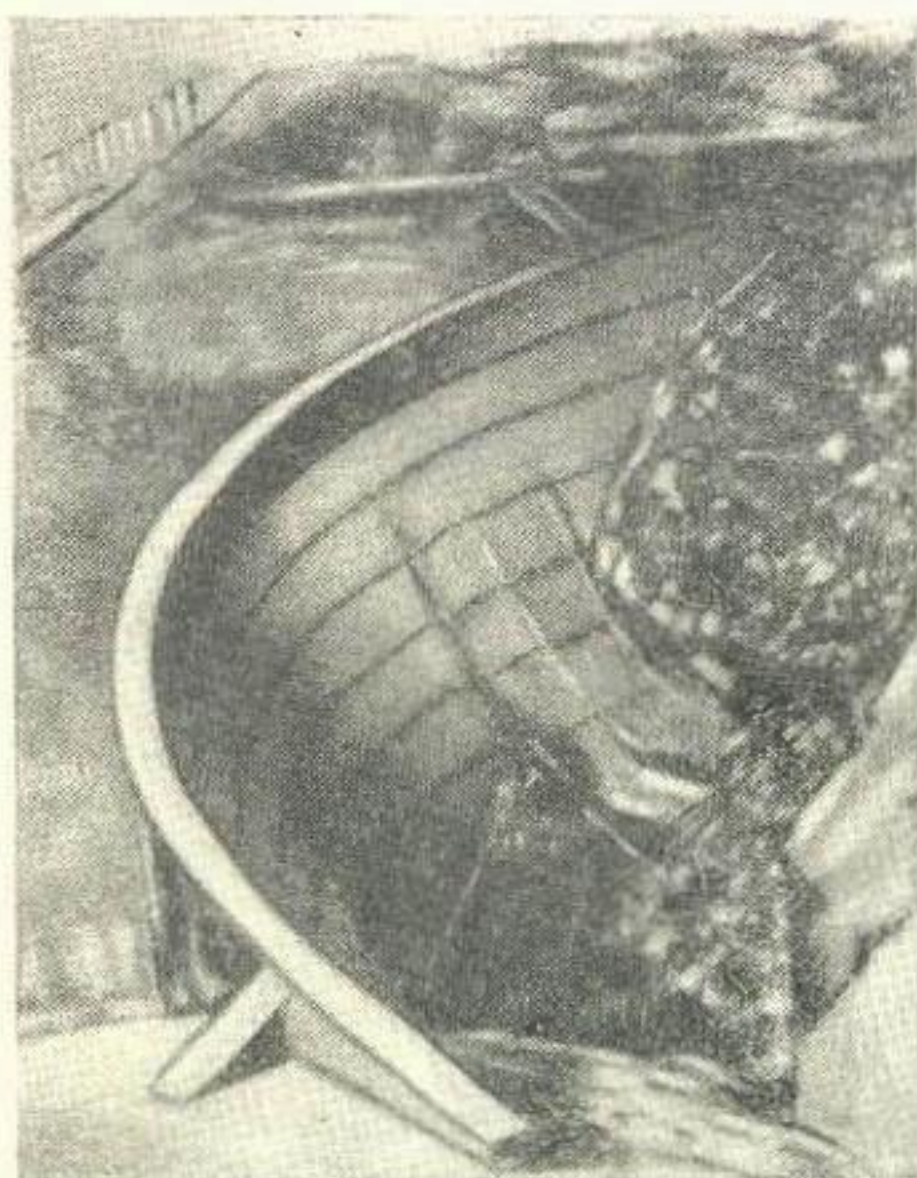


Рис. 45. Модель арочной плотины из гипса-кизельгура

Всеобщее распространение получили модели из гипса-кизельгура, в которых требуемые упругие свойства — соотношение модуля E для плотины и основания ее или коэффициент поперечного сжатия — получаются путем добавления различных количеств воды. Схватывание гипса растягивается до 15 мин. путем добавления 0,65% натрия фосфата ($\text{PO}_4\text{HNa}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$). Устройство как основания, так и самой модели, выполняется путем постепенного наслаивания (рис. 45)*, причем для

* Рис. 45, 46 и 47 были любезно предоставлены в наше распоряжение лабораторией водохранилищных плотин при Высшей технической школе в Лиссабоне.

поддержания постоянного гипсо-водного отношения каждый слой должен быть водонепроницаемо замкнут, чтобы следующие слои не могли абсорбировать воду из только что уложенного предыдущего слоя. Для этой цели рекомендуется двукратное смазывание шеллаком с последующим покрытием олифой. Сцепление между этой водонепроницаемой прослойкой и материалом модели является достаточно большим, чтобы наверняка не допустить образования трещин. Модель должна высыхать три недели, чтобы

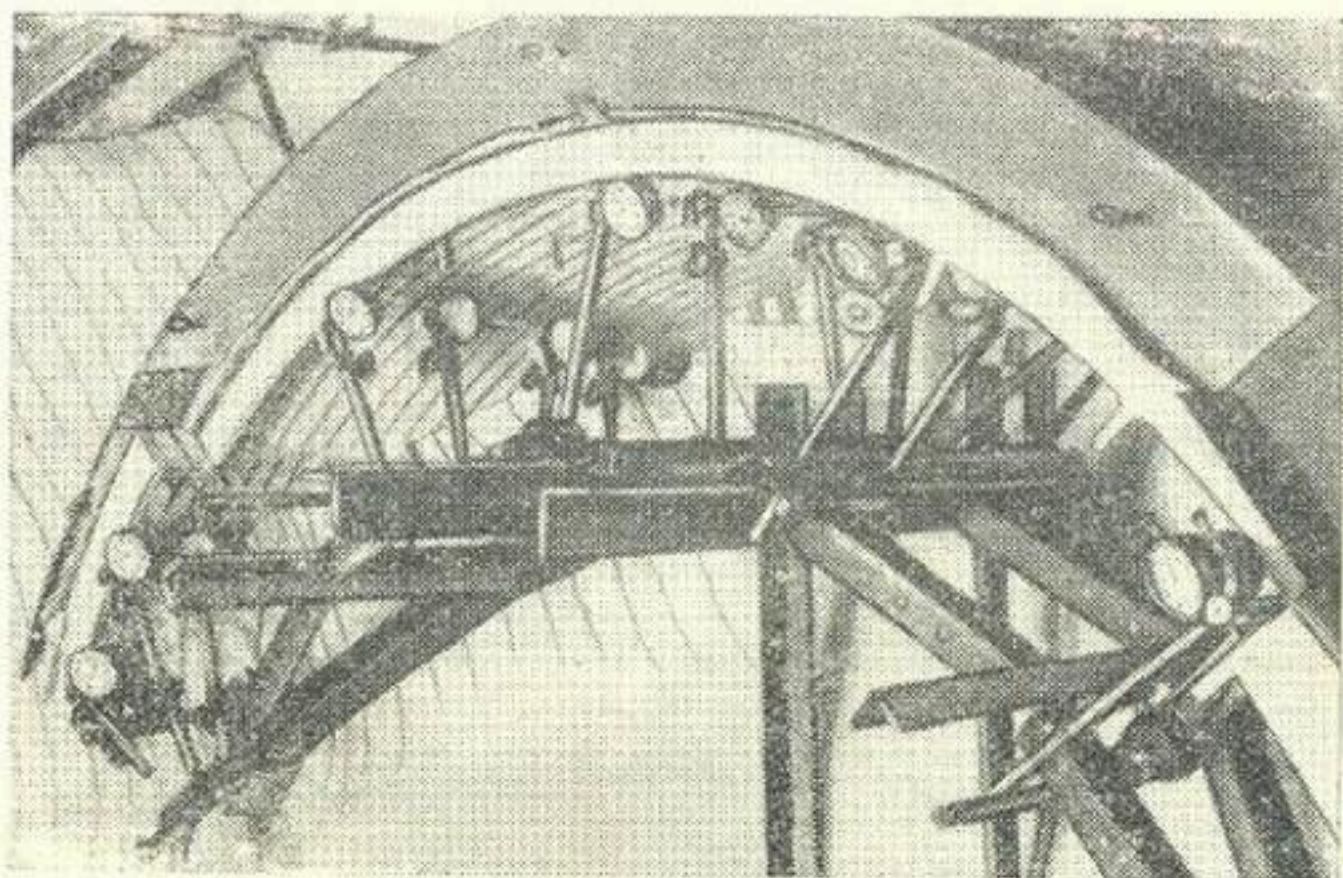


Рис. 46. Ртутная нагрузка модели

объемный вес и модуль E приняли постоянное значение. Оправдавшие себя значения модуля E составляют $10\,000\text{ кг/см}^2$ для модели основания и $20\,000\text{ кг/см}^2$ для модели плотины. Коэффициент поперечного сжатия получается примерно равным 0,22.

Нагрузка осуществляется в большинстве случаев с помощью мешков, которые наполнены ртутью и поддерживаются установленной для этой цели опалубкой (рис. 46). Оберти производит нагрузку с помощью гидравлических прессов. Относительно просто измеряются прогибы с помощью мессур, которые монтируются на подмостях нормально низовой грани модели (рис. 46). Для измерения деформаций растяжения прекрасно оправдали себя, по данным лиссабонской лаборатории плотин, электроакустические измерители Майхака. Для измерений со стороны напорной грани могут применяться только электро-

акустические измерители, так как мешок с ртутью мешает непосредственному отсчету показаний. Рис. 47 иллюстрирует процесс измерения их деформаций на модели упомянутой уже выше арочной плотины Кастело до Бодэ.

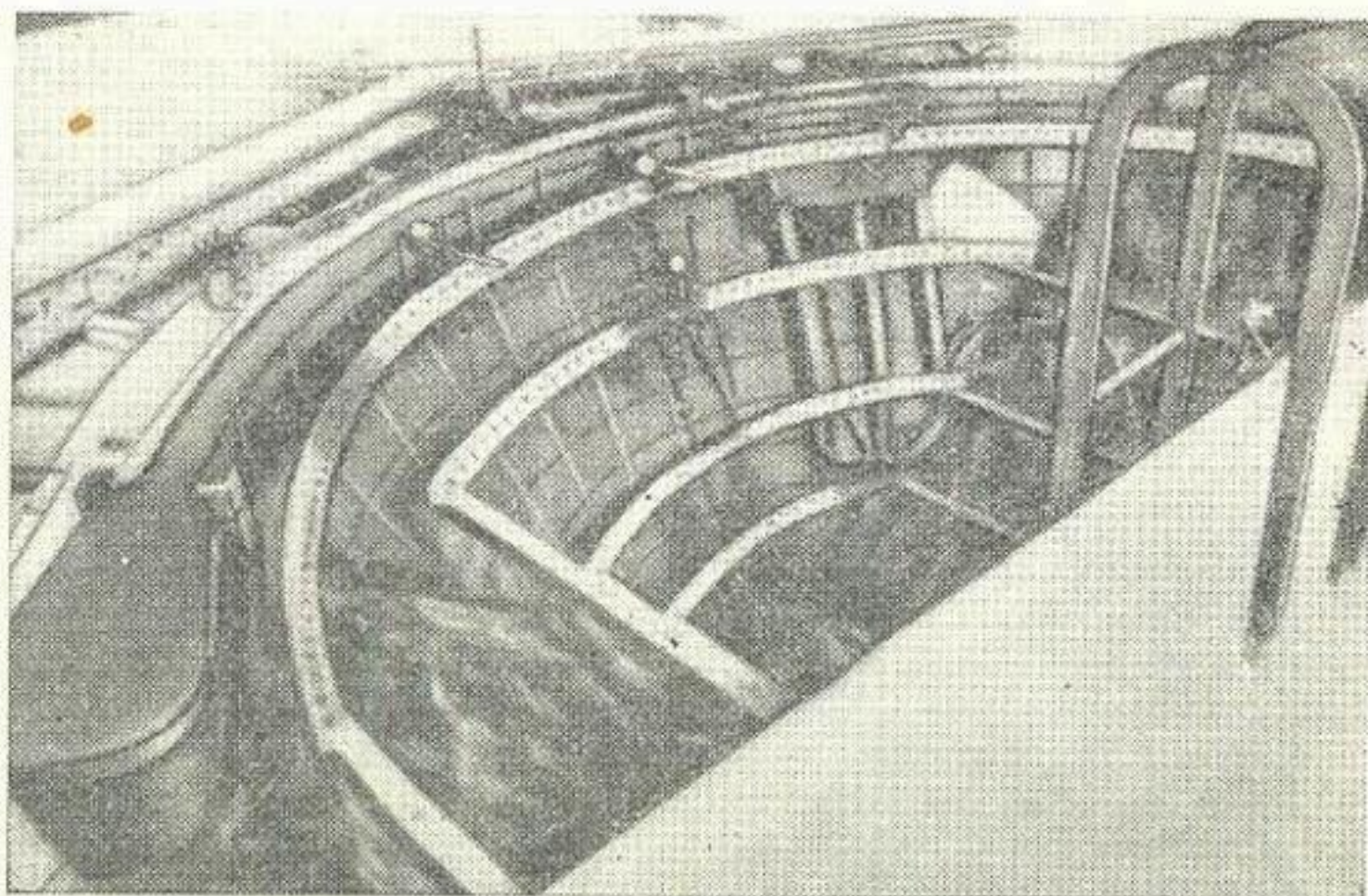


Рис. 47. Модель плотины Кастело до Бодэ

Электроакустическая измерительная установка Майхака состоит из датчика и приемника. Датчики устанавливаются на модель и изготовляются для измерений

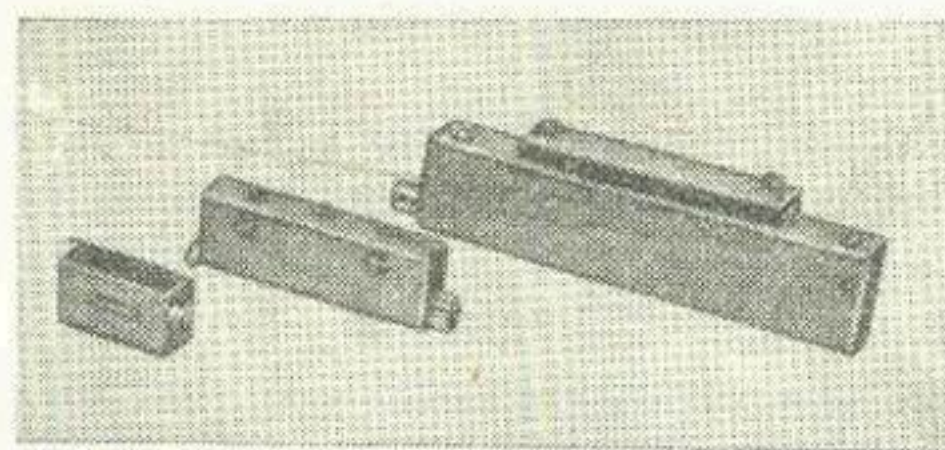


Рис. 48. Датчики Майхака для 20, 50 и 100 мм

для измерений длины в 20, 50 и 100 мм (рис. 48). Все датчики подключаются к приемной установке (рис. 49), причем линейный искатель обеспечивает регулировку датчика, с которого можно отсчитывать показания непосредственно. Если нужно присоединить более 10 датчиков, то соеди-

нение происходит с помощью вспомогательных линейных искателей.

Принцип измерения крайне прост. Каждый датчик содержит в себе натянутую стальную струну, в которой

при нажатии на ключ приемника можно вызвать затухающие колебательные движения. Колебание струны вызывается при помощи магнита, расположенного перед струной. Квадрат частоты колебаний струны пропорционален растяжению или, соответственно, напряжению струны. На приемнике находится струна для сравнения, частотность которой может быть настроена с помощью ключа на частотность измерительной струны, связанной с линейным искателем. Изменение частотности отсчитывается по шкале, и с помощью тарировки и учета масштаба модели производится непосредственный пересчет на напряжения. Так как сравниваются частотности, то ошибки в результате отсчетов электрических колебаний невозможны.

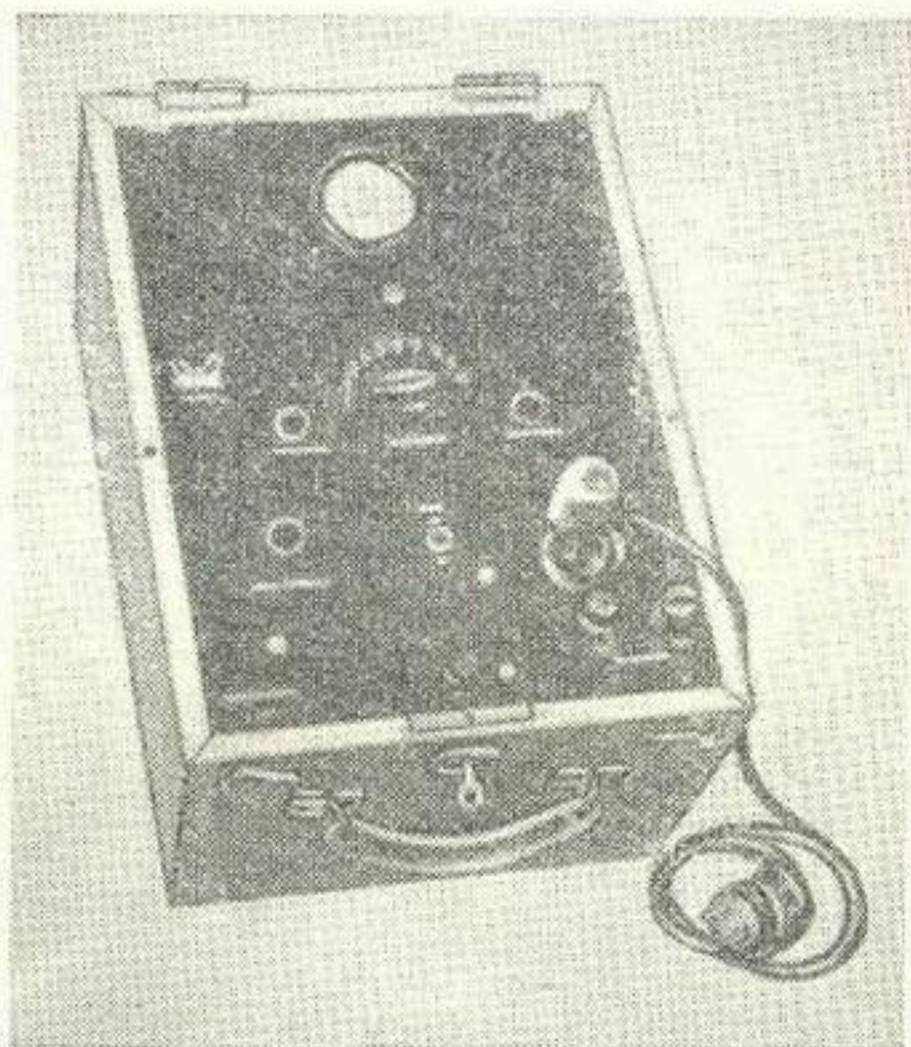


Рис. 49. Приемник Майхака

Не всегда многие имеют правильное представление об объеме работы, связанной с исследованиями на моделях. На модели упомянутой выше португальской двухарочной плотины Санта Лючия были определены, например, деформации в 15 точках низовой грани и в 23 точках напорной грани, причем каждый раз в 4 направлениях (в вертикальном, горизонтальном, 2 раза в направлении под углом в 60°) и для трех различных уровней воды в водохранилище. Всего получилось в результате «только» 456 отсчетов. Эти отсчеты должны повторяться для контроля несколько раз, что приводит очень быстро к тысячам отсчетов. На модели плотины Санта Лючия для этого потребовались примерно 300 нагружений модели, так как из-за недостатка места измерения не могли быть произведены одновременно во всех точках и во всех направлениях модели [29].

В некоторых случаях измерение может быть очень упрощено благодаря применению на модели оптического метода изучения напряжений, например для блоков мас-

сивных гравитационных плотин (рис. 23) или для контрфорсов контрфорсных плотин. Таким способом можно исследовать также напряженное состояние «чистых» арок.

Не менее важными являются измерения на самой плотине, в натуре, причем речь идет не столько об измере-



Рис. 50. Плотина Шаста. Монтаж тензометра

ниях прогибов, которые лишь редко позволяют анализировать замеренные величины в зависимости от причин, их вызвавших (нагрузка, температура, усадка, разбухание), сколько о температурных измерениях и измерениях деформаций внутри бетона. Очень часто такого рода измерения не приводили к желательным результатам вследствие неудачного применения измерительных приборов. Поэтому следует указать, что аппараты Майхака для измерений деформаций внутри бетона (в настоящее время поставляются отдельно для измерения температуры и деформаций) в последние годы

были весьма усовершенствованы и вполне гарантируют успех. Рис. 50 иллюстрирует американский измеритель внутренних деформаций в процессе монтажа.

ГЛАВА II

КАМЕННО-НАБРОСНЫЕ ПЛОТИНЫ

Благодаря большим успехам в области уплотнения каменной наброски каменно-набросные плотины, которые раньше имели ограниченное применение, в настоящее время становятся все в большей и большей степени достойным конкурентом бетонных плотин. Это вполне понятно, так как если бы удалось уплотнить набросную плотину в такой

степени, чтобы добиться образования как бы монолитной связи между камнями, то под действием давления воды верхнего бьефа набросная плотина воспринимала бы эту нагрузку как упругое тело, и проблема предотвращения появления растягивающих усилий в плотине свелась бы к разрешению вопроса о размерах плотины. Правда, мы еще не разрешили полностью данной проблемы, но развитие идет именно в этом направлении.

В противоположность земляным плотинам у набросных плотин устойчивость никогда не была проблемой, так как просачивающаяся вода благодаря большим пустотам между камнями всегда могла фильтровать безопасно, т. е. без образования давления воды в порах. Если плотина недостаточно водонепроницаема вследствие значительных деформаций, уплотняющих устройств, которые местами трескаются и ломаются, то это может, правда, стать серьезной экономической проблемой, но тем не менее устойчивость набросной плотины от этого не страдает.

1. Набросные плотины с бетонными экранами

Самыми дешевыми каменно-набросными плотинами являются плотины с экраном на напорном откосе. Экран может быть выполнен или из бетона, или из асфальта. С точки зрения способа производства работ различают плотины: из сухой каменной кладки, из наброски с вибрированием и из наброски вообще. Плотина из каменной сухой кладки (рис. 51), представляющая собой типичный итальянский метод строительства, превосходно оправдала себя при высоте до 40 м [30]. Плотины из сухой кладки строятся с откосами в обе стороны, имеющими заложение от 1 : 0,7 до 1 : 0,9. К сожалению, стоимость 1 м³ сухой каменной кладки очень высока.

Каменно-набросные плотины с вибрированием наброски неоднократно строились в Алжире и при этом имели значительную высоту; каменная плотина Гриб (Ghrîb), например, имеет высоту 72 м (рис. 52) [8]. Эти плотины имеют заложение напорного откоса от 1 : 0,9 до 1 : 1, а низового 1 : 1,25. Более крутой напорный откос оправдывается тем, что здесь предусмотрена каменная сухая кладка 6 м толщины.

Набросные плотины без вибрирования камня [8], представляющие собой типичный американский метод строительства, достигают высоты 100 м (рис. 53); они имеют заложение напорного откоса 1 : 1,3, низового 1 : 1,4. У всех

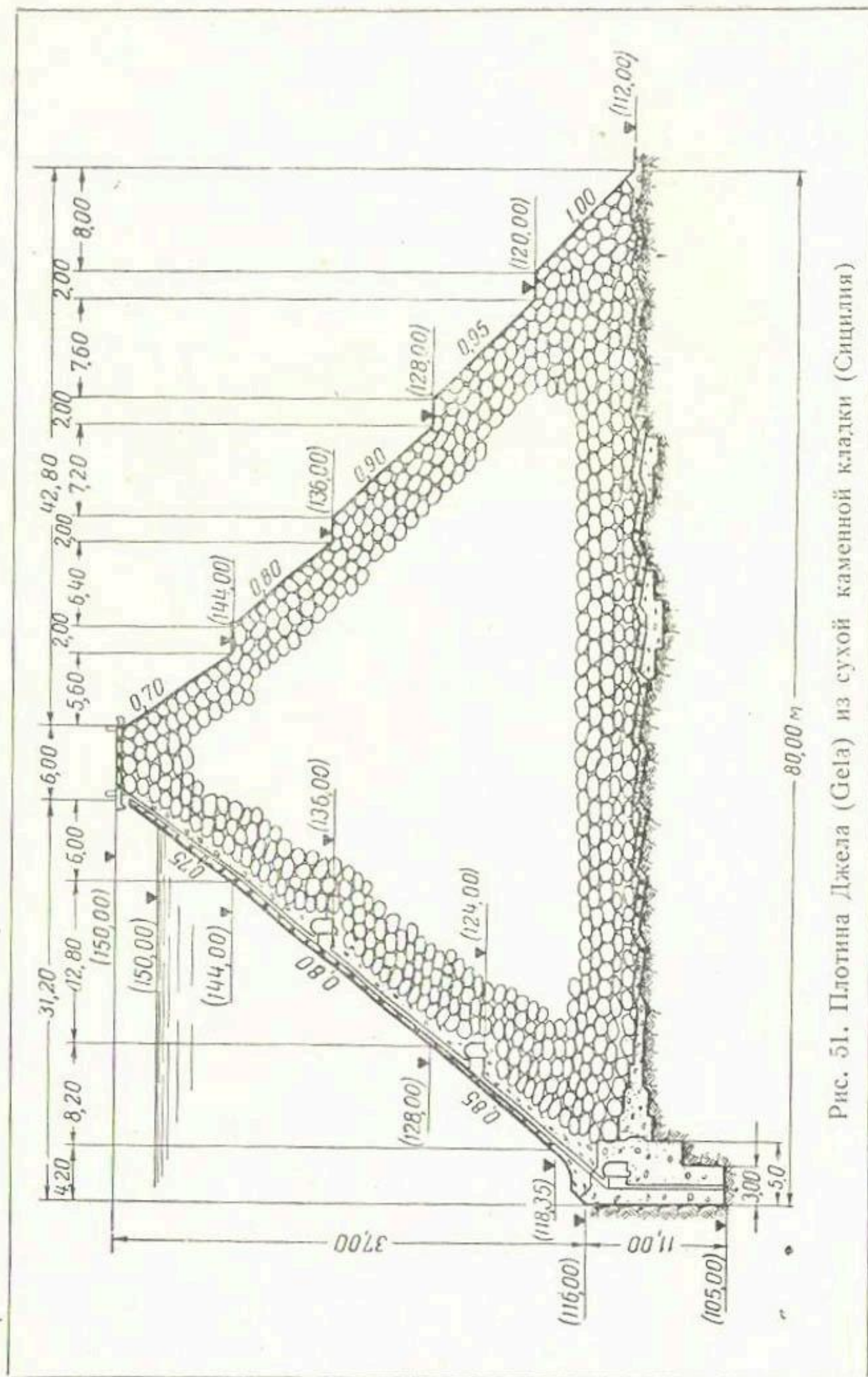


Рис. 51. Плотина Джела (Gela) из сухой каменной кладки (Сицилия)

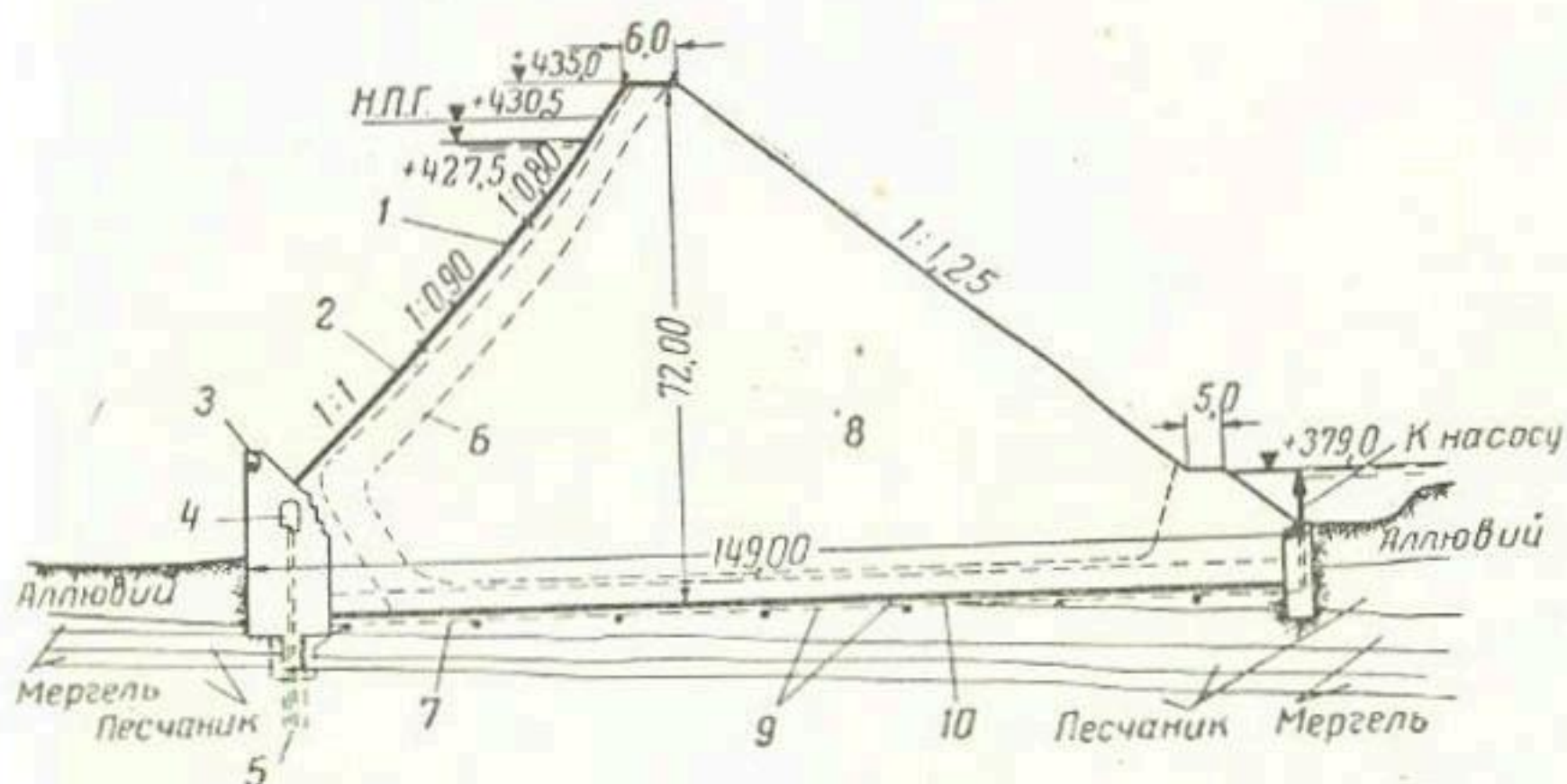


Рис. 52. Поперечный разрез плотины Гриб (Алжир)

1 — железобетонный экран; 2 — подготовка под экран из крупных камней, втиснутых в бетон; 3 — бетонная стенка-перегородка для осушения строительного котлована; 4 — смотровая и дренажная галерея, которая может быть использована в будущем и для цементации; 5 — цементационная завеса; 6 — сухая кладка из отобранных и тщательно уложенных камней; 7 — поперечные сборные галереи для дренажа основания; 8 — каменная наброска, уплотненная вибрацией по слоям; 9 — дренажные трубы для осушения основания; 10 — железобетонное покрытие

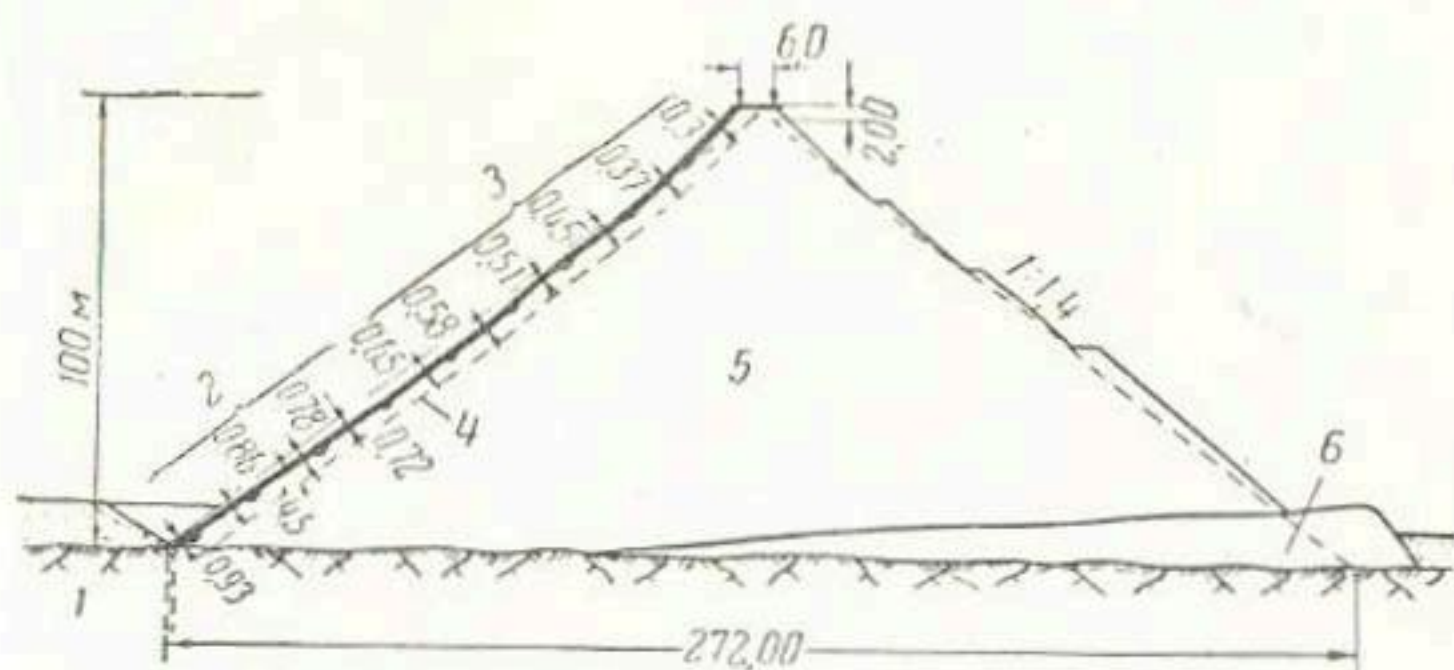


Рис. 53. Каменно-набросная плотина Солт-Лейк (Salt-Lake) (США) с экраном из железобетонных плит

1 — цементационная завеса на глубину 15 м, скважины через 1,5 м друг от друга; 2 — двойная арматурная сетка с расстояниями 22×38 см; 3 — простая арматурная сетка с расстояниями 20×33 см; 4 — сухая каменная кладка; 5 — каменная наброска средним объемным весом 2,3 т/м³; 6 — упорная призма из больших блоков

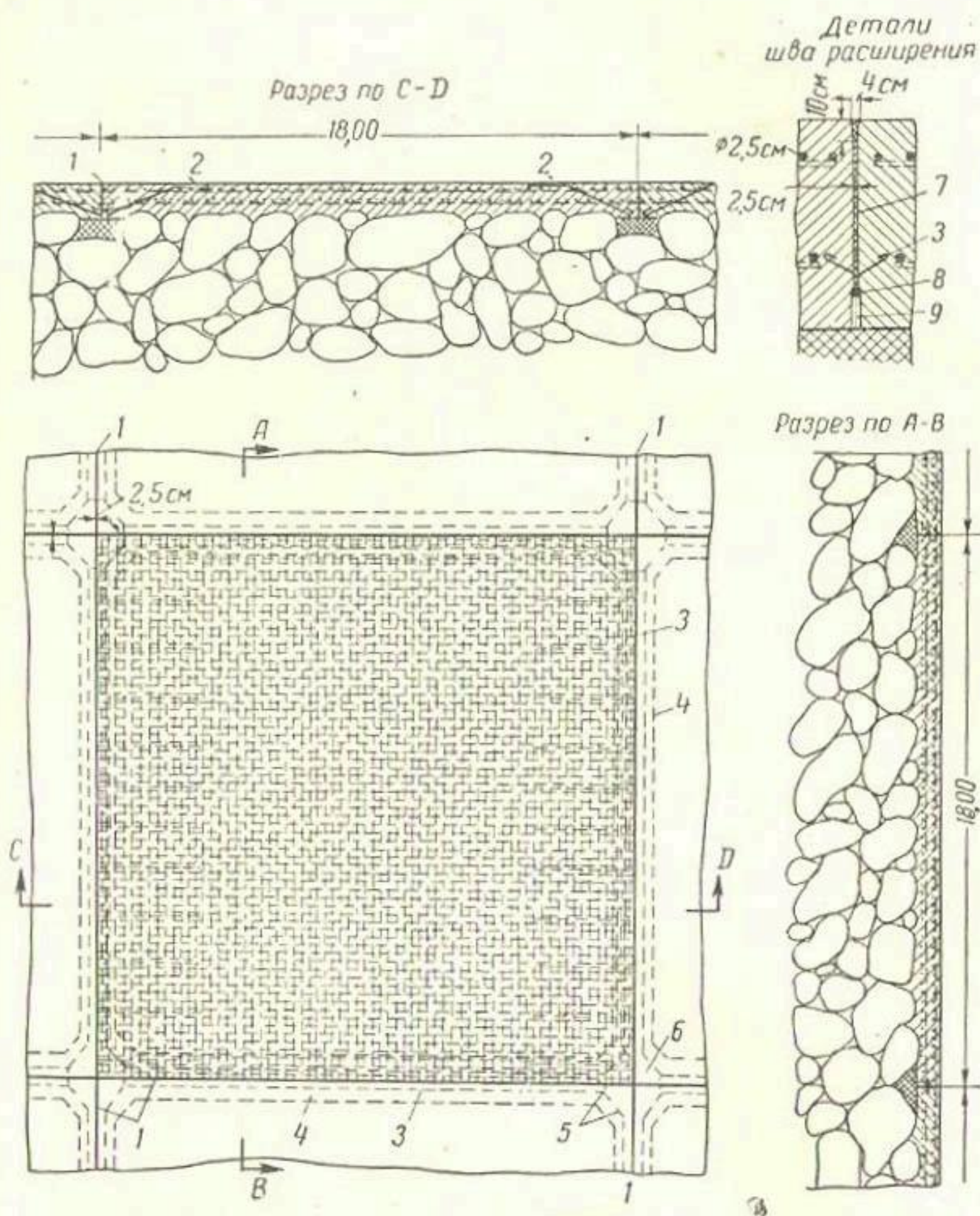


Рис. 54. Плотина Солт-Лейк из каменной наброски с гибким железобетонным экраном

1 — шов расширения; 2 — круглое железо диаметром 25 мм; 3 — медные листы 2 мм; 4 — бетонная подготовка; 5 — сварные швы; 6 — соединительный медный лист; 7 — асфальтовая заливка; 8 — крозельный картон; 9 — волнистый картон

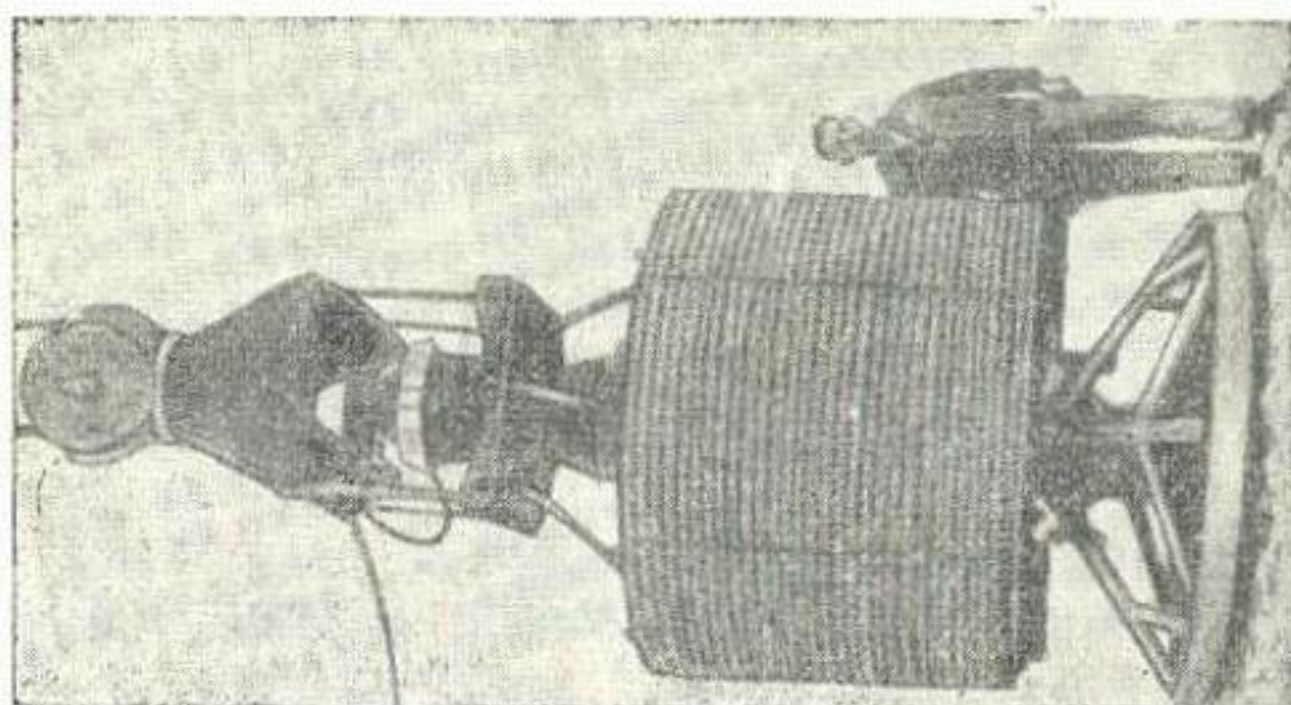


Рис. 55. Вибратор „Маммут“
весом 20 т

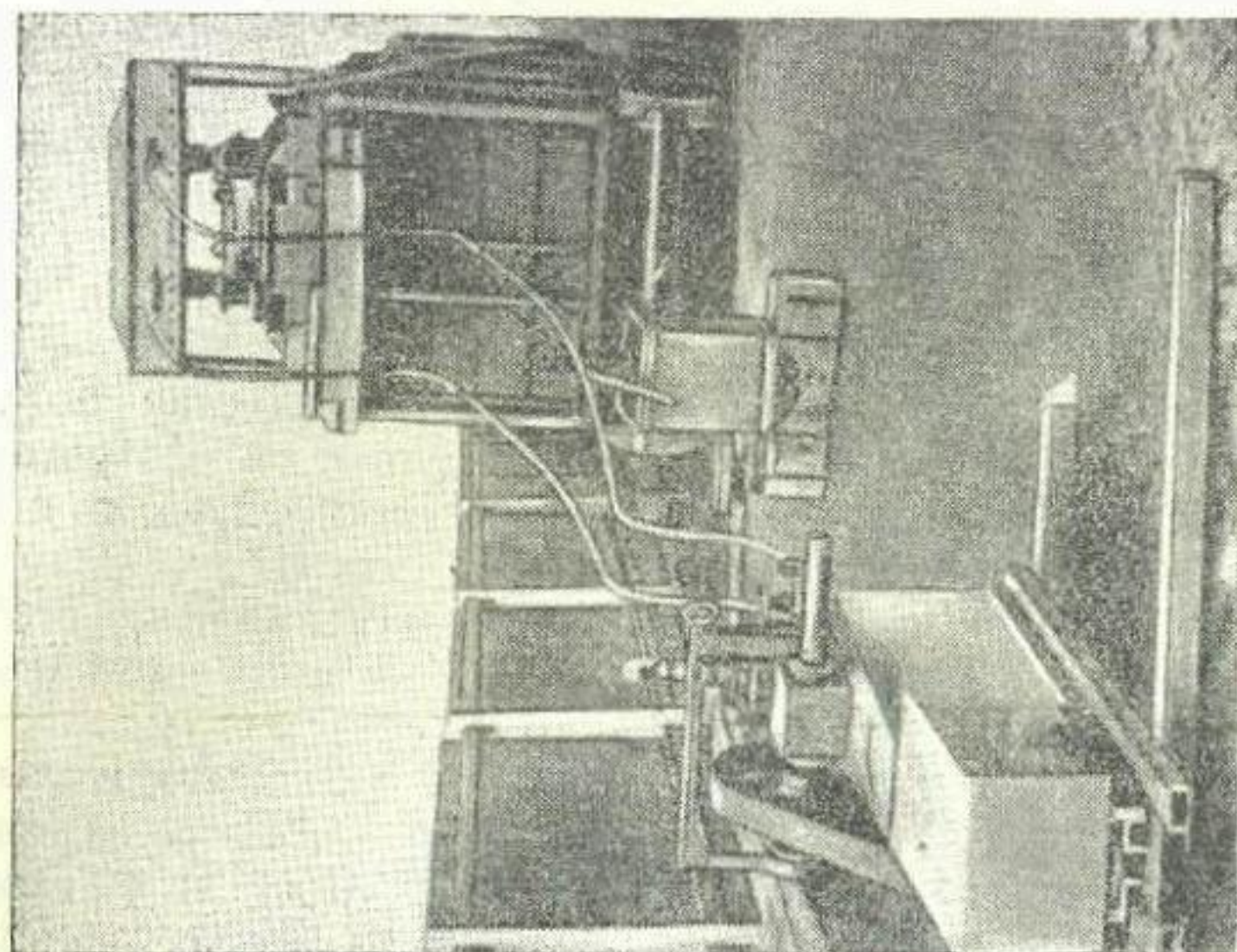


Рис. 56. Передвижной аппарат для измерения
срезающего усилия

этих плотин противофильтрационное устройство состоит из бетонного экрана в виде железобетонных плит, которые герметически соединены между собой медными листами (рис. 54). В то время как плотины из сухой кладки и с вибрированием оправдали себя наилучшим образом, опыт обычных набросных плотин является менее утешительным. Так, например, железобетонные плиты экрана плотины Солт-Лейк понадобилось несколько раз ремонтировать, так как вследствие значительной осадки плотины под действием напора воды экраны ломались и делались водопроницаемыми.

Проблема возведения каменно-набросных плотин с бетонными экранами заключается в уплотнении наброски до такой степени, чтобы уже в период строительства получить наименьшие возможные размеры пустот, в соответствии с величиной камней. Если это будет достигнуто, то под влиянием давления подпертого бьефа могут возникнуть только незначительные сдвиги, которые, как видно из опыта итальянских и алжирских плотин, не могут вызвать повреждения железобетонного экрана.

Имеется мнение, что разработанные Келлером тяжелые плоские вибраторы дадут новый толчок развитию строительства набросных плотин с железобетонными экранами. Рис. 55 показывает самый тяжелый в настоящее время вибратор «Маммут» весом в 20 т. Для проверки достигнутого в результате вибрации сопротивления на сдвиг служит передвижной аппарат этой же фирмы, применяемый на строительных площадках и изображенный на рис. 56.

2. Каменно-набросные плотины с экранами битумными или из искусственного материала

Недостатки жестких железобетонных противофильтрационных экранов несомненно устраняются, если вместо цементного раствора применить битумный раствор. Выполненные таким образом асфальтовые экраны содержат примерно 10% битума, а в остальной части известковую муку и песок. У небольшой набросной плотины Шевелинг (Scheweling) в бассейне Вуппер такой асфальтовый экран оправдывает себя уже на протяжении многих лет. В каменно-набросной плотине Генкель (Genkel) (бассейн Аггера) [31] предусмотрен двойной асфальтовый экран: верхний экран толщиной 5 см и нижний толщиной 7 см. Между обоими экранами находится фильтрующий слой из отсорти-

рованного каменного материала, имеющий толщину примерно 12 см, необходимый в первую очередь для контроля. Плотина Генкель имеет высоту 45 м и заслуживает очень большого внимания. Имеются случаи применения асфальтовых противофильтрационных экранов на более крутых откосах плотин, как, например, на плотине Бу-Ханифия (Bou Hanifia), имеющей 54 м высоты, где такой экран прекрасно себя оправдал.

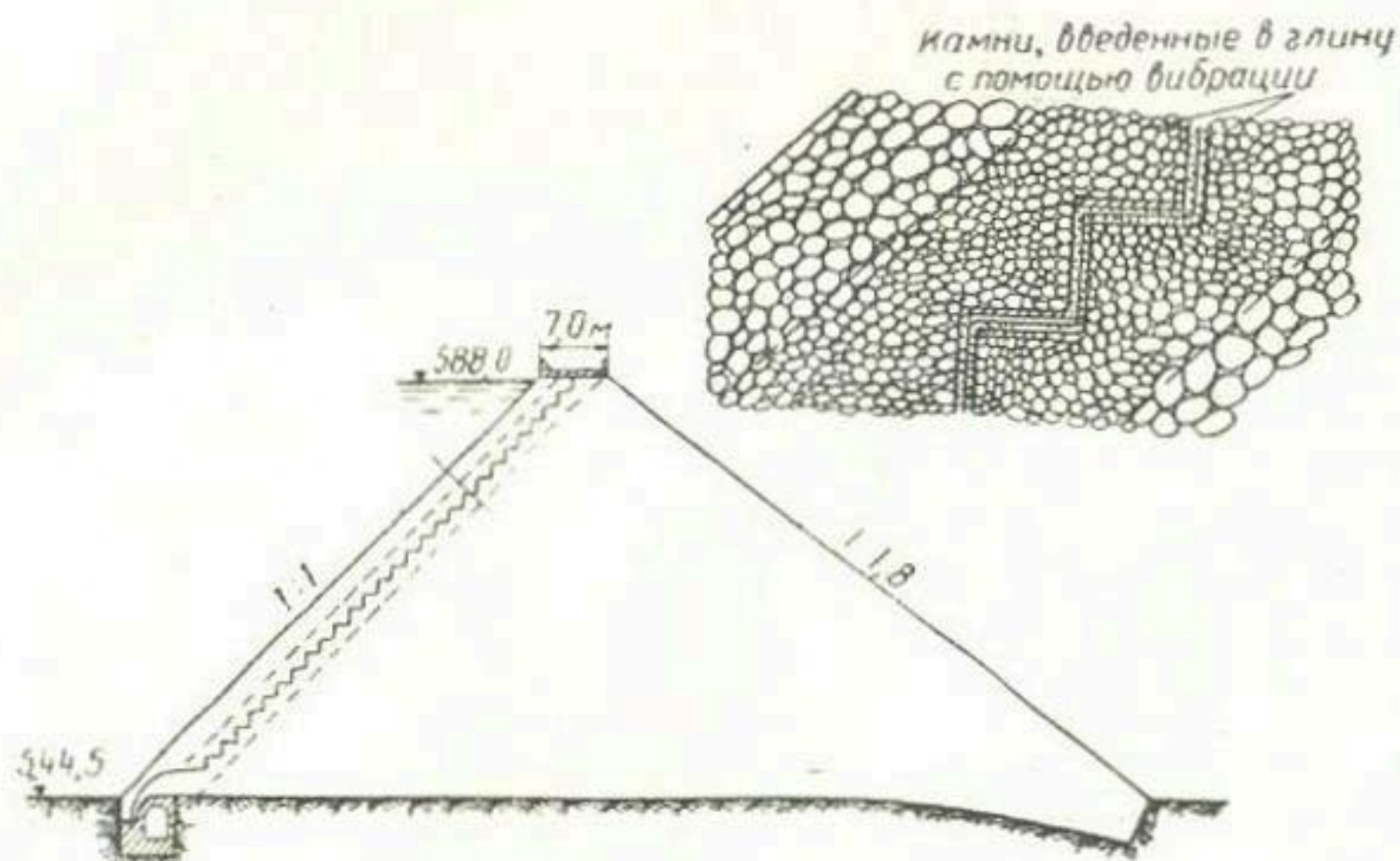


Рис. 57. Плотина с экраном из пластмассы

Для устройства экранов каменно-набросных плотин представляют интерес искусственные вещества — пластмассы, в особенности созданные на полиэтиленовой основе, которые можно получить на рынке под названием фольги Оппанол Б—А или фольги Динаген (Dypagen-Folie) в зависимости от поставляющих предприятий. В соответствии с характером применяемых здесь основных составных частей эти пластмассы бывают безгранично стойкими, в особенности если они — как это имеет место в проекте плотины, показанной на рис. 57, — с обеих сторон плотно обложены песчаными слоями толщиной 10 см. Для лучшей защиты пластмассы с обеих сторон расположены еще слои глинобетона, имеющие толщину 1 м, в котором камни вдавлены в глину при помощи вибраторов. Благодаря вибрированию каменной наброски ее монолитность обеспечивается. Разрыву пластмассы препятствует ее способность к удлинению в 3 раза.

3. Каменно-набросные плотины с диафрагмами

Набросные плотины с диафрагмами, будь это полая железобетонная диафрагма (рис. 58) [8] или массивная



Рис. 58. Каменная плотина Уед-Кебир (L. Qued-Kebir), Тунис (Северная Африка)

1 — дополнительная пригрузка (впоследствии); 2 — план железобетонной диафрагмы; 3 — трамбованный бетон; 4 — железобетонные арки с торкретной штукатуркой; 5 — полая железобетонная диафрагма; 6 — железобетонная стенка диафрагмы; 7 — сглаженная поверхность откоса; 8 — бетонная опорная стена; 9 — дополнительная пригрузка (впоследствии)

(рис. 59) [8] не оправдали возлагаемых на них надежд. Диафрагма слишком жестка, чтобы следовать за деформациями упорной призмы низового откоса, и слишком

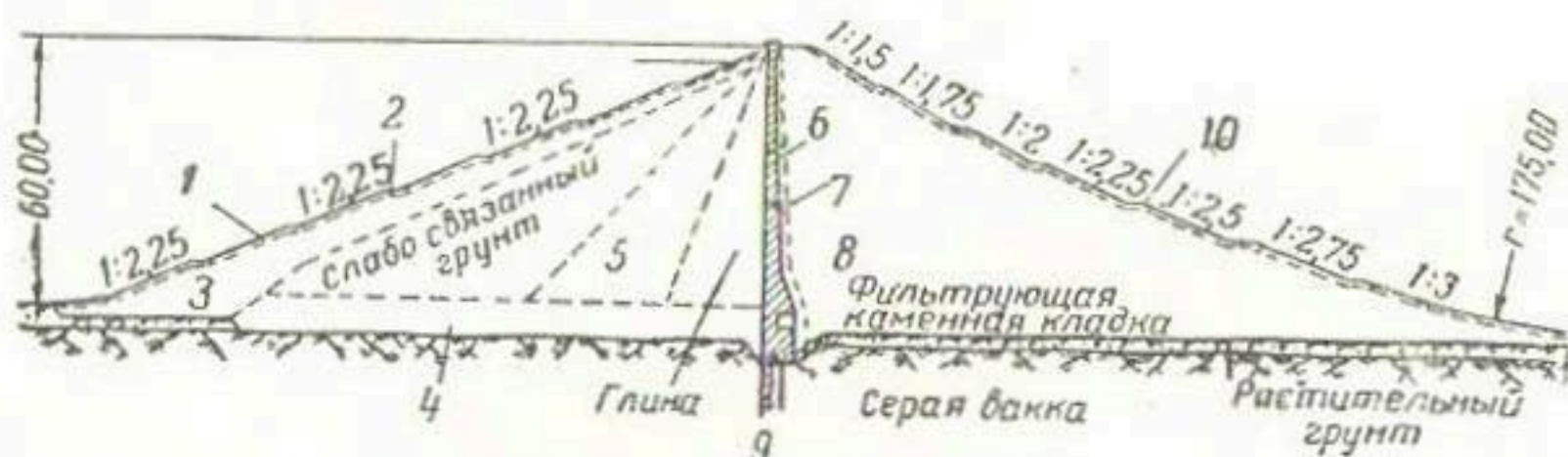


Рис. 59. Поперечное сечение плотины Зорпе (Sorpe) с диафрагмой

1 — мостовая на щебне; 2 — берма 2 м шириной; 3 — наброска из крупного камня; 4 — плотный укатанный суглинок и глина; 5 — суглинок с гравием (укатанный); 6 — бетонная диафрагма; 7 — каменный дренажный слой; 8 — наброска со значительным содержанием гравия, гальки и карьерных отходов (укатанная); 9 — 3 ряда скважин для цементации; 10 — дерн

слаба, чтобы противостоять давлению подпора со стороны верхового откоса.

Для улучшения работы диафрагмы, как показано на рис. 59, со стороны напорного откоса укладывается грунт

по типу фильтра, а со стороны низового откоса обеспечивается свободный отвод фильтрующейся воды.

Нежелательные деформации, которые происходили в этой плотине, не имели существенного значения. Гораздо большего внимания заслуживает то, что строительство плотины с ядром является неэкономичным, и от строительства такого типа плотин в настоящее время отказываются.

При большом прогрессе, который был достигнут в последнее время в области бетонных плотин, плотины с диафрагмами уже никогда больше не смогут конкурировать с ними.

4. Набросные плотины с вибрированным ядром из камня и глины

Очень популярным видом набросной плотины является также плотина с глиняным ядром.

На рис. 60 показана плотина Ватауга (Watauga) с глиняным ядром. Она построена в долине Теннесси (США) и имеет напор 90 м. Такого типа плотины достигают значительной высоты.

В соответствии с предложением Г. В. Кенига, которое основывается на опытах, проведенных на строительстве плотин в Рурской области, при устройстве глиняной диафрагмы плотины в глину вводили изюм из камня при помощи вибраторов. В этом случае получают монолитное ядро, в котором глина надежно заполняет все пустоты между камнями. В противоположность бетонному ядру, ядро из камня и глины получается пластичным. Кроме того, оно будет намного дешевле.

Глину или суглинок часто трудно достать в горных районах. При устройстве ядра из камня и глины потребность в глине уменьшается больше чем наполовину и это делает возможным применение такого типа плотины в горных районах.

5. Перспективы развития каменно-набросных плотин

С созданием мощных высокопроизводительных вибраторов для уплотнения каменной наброски перед конструкторами каменно-набросных плотин встают совершенно новые задачи, в результате решения которых возникнут новые формы плотин, которые, возможно, поведут каменные плотины по пути непредвиденного развития.

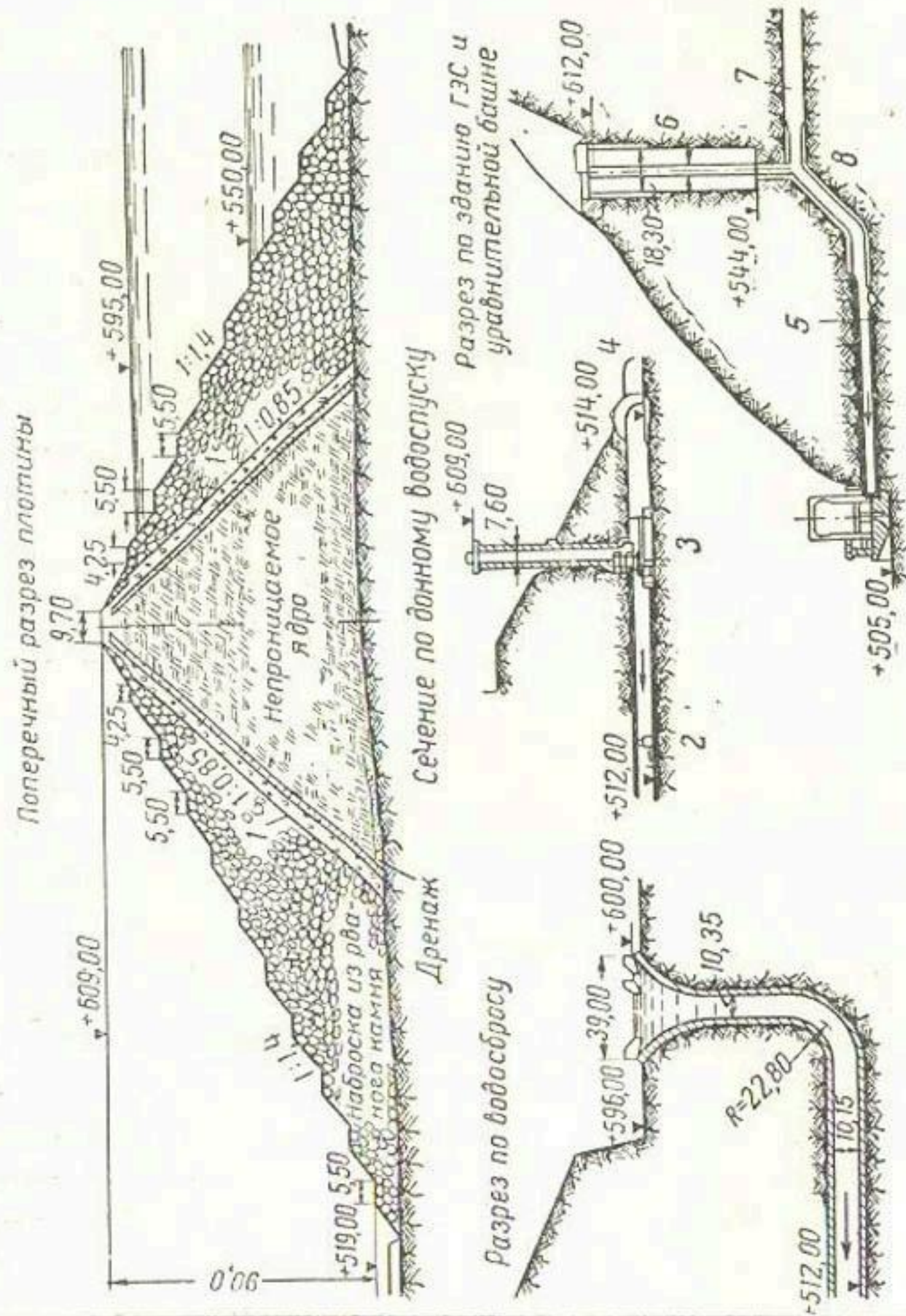


Рис. 60. Поперечное сечение и детали плотины Ватауга

ЗЕМЛЯНЫЕ ПЛОТИНЫ

Под земляными должны пониматься такие плотины, которые состоят в основном из связных или сыпучих грунтов и в которых камень находит применение только для защиты напорного откоса и укрепления подножия низового откоса. Из более чем 300 аварий крупных плотин, зарегистрированных в истории плотин мира, почти все происходили с земляными плотинами и среди последних значительная часть падает на намывные и полунамывные плотины.

Строительство намывных и полунамывных плотин в течение десятилетий приняло широкий размах в Америке.

В Европе, а также в Германии дело не пошло дальше начальных попыток — намыва части плотины Зорпе (см. рис. 59) [8], однако это было вскоре снова забыто. А после катастрофы на плотине Форт-Пек (Fort-Peck) в 1939 г. от намывных и полунамывных плотин, по-видимому, отказываются также и в Америке.¹

Плотина Форт-Пек образует водохранилище с объемом воды 24 млрд. м³. Эта плотина имеет обычную конструкцию полунамывной плотины: насыпные наружные призмы и между ними намывное водонепроницаемое ядро, которое уплотняется только через несколько лет и давление воды в порах которого часто во много раз превышает давление воды, образующееся впоследствии. При высоте плотины 76 м и при длине гребня 6,1 км плотина Форт-Пек имеет объем 100 млн. м³; она является гигантом среди земляных плотин мира. Плотные коренные породы в основании в виде глинистого сланца находились у левого берега на глубине 46 м и у правого на глубине 38 м, и строители были настолько смелы, что решили обеспечить сопряжение с коренными породами с помощью стальной шпунтовой стенки глубиной в 47 м. Сооружение шпунтовой стенки было проведено таким образом: сперва забивали с подмывом легкую шпунтовую стенку на глубину 22—25 м и к этой последней приваривали более тяжелый шпунт при помощи пластин длиной 3 м, после этого шпунтовая стенка забивалась копром.

¹ В СССР, наоборот, намывные плотины, главным образом песчаные и супесчаные, получили большое развитие за последние 20 лет. (Ред.)

Катастрофа произошла незадолго до окончания строительства плотины. По описанию Левина, она была вызвана тем, что уже подпертый верхний бьеф был очень быстро опорожнен, прежде чем была закончена защитная отсыпь грунта. В результате этого в плотине, в зоне напорного откоса, образовалось неуравновешенное давление воды в порах, и масса грунта в 10 млн. m^3 сдвинулась в сторону воды, поставив под угрозу всю плотину. Движение грунта удалось остановить только в результате искусственного замораживания. Много лет тому назад аналогичное явление было причиной катастрофы плотины Калаверас (Calaveras) в Калифорнии.

Укатанная земляная плотина (см. рис. 7) с поперечным сечением, напоминающим форму фильтра,— непроницаемые массы грунта *a* в средней трети сечения, примыкающие к ним полупроницаемые *b* и водопроницаемые массы грунта *c*, затем каменная наброска для крепления напорного откоса и каменная отсыпь на длинном гравийном тюфяке со стороны низового откоса. Это единственный тип плотины (с центральной водонепроницаемой частью), который оправдал себя во всех отношениях и в настоящее время, признается во всем мире как правильный тип земляной плотины [7].

У самого последнего по времени и одновременно самого значительного представителя этого типа строительства, у плотины Андерсон-Рэнч, имеющей высоту 138 м (см. рис. 7 и 8), водонепроницаемое ядро состояло из песчаной глины с наибольшей крупностью частиц 6 мм и из 16% глины (крупность частиц меньше, чем 0,005 мм). Оно было укатано шиповым катком при влажности 12,5%; после укатки объемный вес составлял 2,18 t/m^3 . Коэффициент фильтрации укатанного материала составлял 0,015 м в год. В полупроницаемой отсыпи 44% грунта имели крупность зерен больше, чем 6 мм; она была укатана при влажности в 10,5% и имела после укатки удельный вес 2,3 t/m^3 . Коэффициент фильтрации доходил до 6 м в год. Проницаемая часть профиля плотины состояла главным образом из песка и гравия; 64% последнего имели крупность зерен больше, чем 6 мм, объемный вес составлял 1,8 t/m^3 и коэффициент фильтрации — 240 м в год.

Непроницаемый и полупроницаемый грунты после соответствующего увлажнения укладывались слоями 20 см и укатывались. Катки весом 20 т (рис. 61) проходили 12 раз по каждому слою. Хорошее сцепление слоев

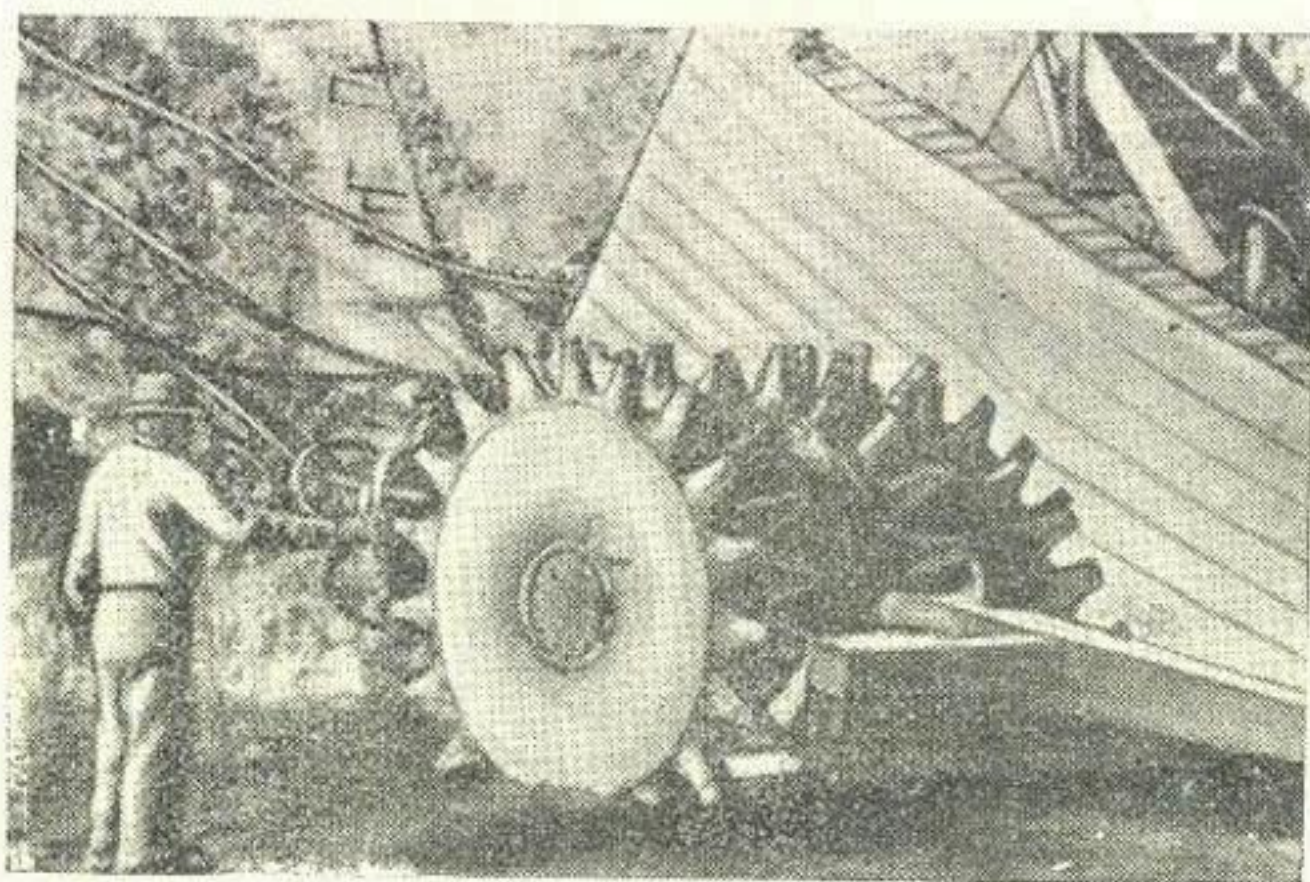


Рис. 61. Шиповой каток 20 т

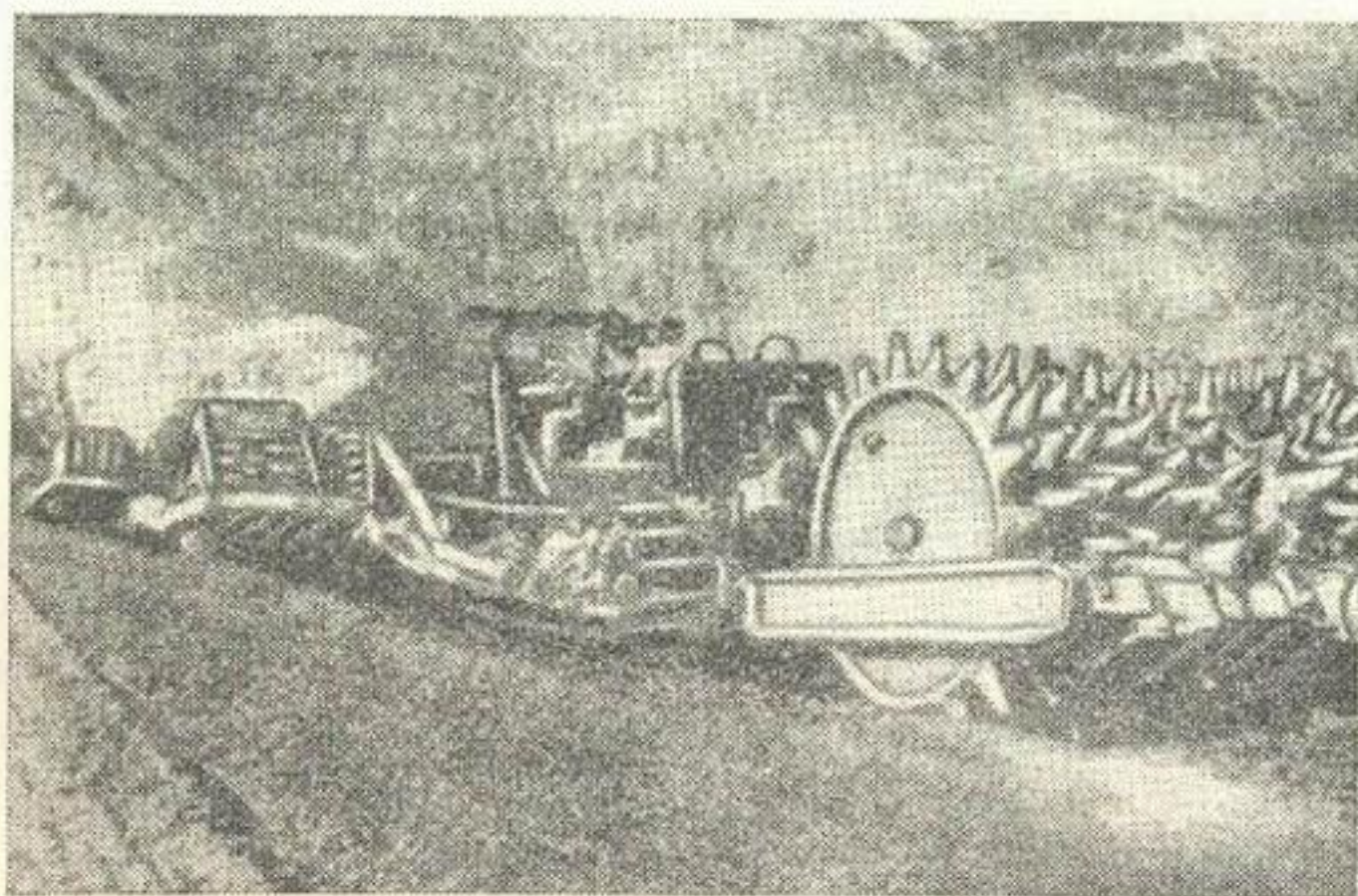


Рис. 62. Специальные шиповые катки в работе при устройстве ядра плотины

достигалось путем рыхления поверхности и смачивания нижнего слоя и затем укатки грунта. При устройстве зуба применялись специальные шиповые катки (рис. 62), которые делали возможной укатку непосредственно у бетонных стенок. В месте сопряжения плотины со скалой, последняя тщательно очищалась ручным способом, обмывалась струей воды и продувалась сжатым воздухом, прежде чем производилась отсыпка грунта.

Водопроницаемый грунт из гравия и песка укладывался слоями 30 см и уплотнялся посредством увлажнения и укатки. Наброску камня на низовом откосе производили слоями толщиной 1 м, а верхний слой толщиной 60 см выполнялся из тяжелых рваных камней. Основание под каменной наброской тщательно выравнивалось и укатывалось, затем укладывался фильтр из гравелистого песка толщиной в 1½ м, который насыпался точно так же, как и водопроницаемая наброска. Каменная наброска на напорном откосе толщиной 1 м состояла из тяжелых камней весом от 100 до 1 000 кг.

Весь водонепроницаемый грунт плотины объемом примерно в 3 млн. м³ доставлялся конвейером длиной 3 км и 90 см шириной. В карьере грунт для насыпи захватывался двумя ковшовыми экскаваторами с объемом ковша 6 м³ и доставлялся к бункеру ленточного транспортера; отсюда он передавался на ленту конвейера. Длина ленточного транспортера составляла примерно 60 м. Производительность конвейера доходила до 1 100 м³ грунта в 1 час при скорости движения ленты 19 м в 1 мин.

Наряду с расположением фильтрующих материалов в большинстве случаев симметрично вокруг ядра плотины иногда встречается в плотинах также одностороннее расположение фильтров с наиболее непроницаемым материалом на напорном откосе и водопроницаемым на низовом откосе. Самым известным примером этого типа плотины является не очень высокая, но имеющая длину 6½ км, земляная плотина Оттмахау (Ottmachau) (рис. 63) [8], у которой плотный грунт укладывался со стороны напорного откоса и дополнялся еще наклонным глиняным ядром. Однако такую конструкцию не следует рекомендовать. Наклонное ядро из глины частично оползло уже во время строительных работ, хотя укладка глины в него производилась с чрезвычайной тщательностью.

Если в распоряжении имеется достаточно водонепроницаемый грунт, то устройство плотины с ядром и филь-

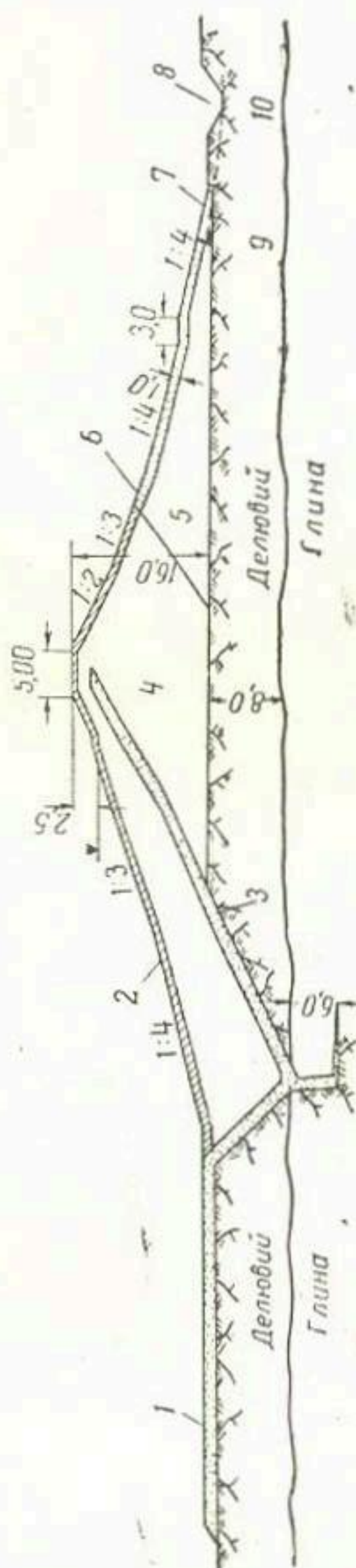


Рис. 63. Поперечное сечение земляной плотины Оттмахау

1 — глиняный понур; 2 — каменное покрытие; 3 — наклонный экран из глины; 4 — нормальный грунт для плотины, укатанный слоями по 50 см; 5 — упорная призма из камня; 6 — дерн; 7 — каменная пригрузка; 8 — дренажная канава; 9 — продольный дренаж из гончарных труб; 10 — сборные трубы

рами становится ненужным. В этом случае можно построить однородную плотину, напорный откос которой укрепляется каменной наброской, а низовой — каменной отсыпкой и каменным упором. У таких плотин откосы делаются в общем более пологими; средние значения откосов выражаются в следующих средних цифрах: напорного $1 : 3\frac{1}{2}$ и низовой $1 : 4^*$. Дополнительные затраты в связи с увеличением объема плотины в большинстве случаев уравниваются в результате упрощения методов производства работ. У самых последних представителей этого типа — плотин Мерриман (Merriman), Неверсинк (Never-sink) и Даунсвилль (Downsville), имеющих примерно 61 м высоты и в среднем 800 м длины и обеспечивающих водоснабжение Нью-Йорка, — грунт из котлованов был вынут экскаваторами с ковшами емкостью 10 м^3 , затем грунт погружался в специальные вагонетки (Евклид) объемом 18 м^3 , освобождался в сортировке от камней диаметром больше 10 см, высыпался в бункеры, забирался снова в вагонетки Евклида и со скоростью 40 км/час направлялся к месту строительства плотины. Разгрузка вагонеток происходила на ходу при скорости от 15 до 25 км/час в течение 1 мин. путем опорожнения вагонетки через дно, причем материал засыпки выпадал слоем, имеющим желательную толщину 15 см. Грунт разравнивался бульдозерами и укатывался типовыми катками, которые 4 раза проходили по насыпанному слою грунта, создавая поверхностное давление в 68 кг/см^2 . Таким способом достигается средний объемный вес уплотненного грунта $2,5 \text{ т/м}^2$.

Оценка и применение связных грунтов в строительстве плотин в настоящее время производится не только на основе инженерной интуиции, но и на основе физико-механических исследований грунтов. Для строительства плотины важнейшими свойствами грунта являются: водонепроницаемость, стойкость грунта в отношении суффозии (вымыва мелких частиц водой, протекающей через грунт), гидростатическое давление в порах или поровое давление, влажность и влагоемкость, величина разбухания и усадки, изменение пластичности при изменении влажности, прочность на сдвиг, размеры осадок и скорость оседания при нагрузке. Само собой разумеется, что здесь мы не имеем возможности детально коснуться методов геотехнического исследования и контроля.

* В нашей практике обычно $1 : 3—1 : 3,5$ (Ред.)

НАРАЩИВАНИЕ И УСИЛЕНИЕ ПЛОТИН

С ростом водохозяйственных и энергетических задач мы все чаще сталкиваемся со случаями, когда объем эксплуатируемого водохранилища становится уже недостаточным, чтобы удовлетворить возросшие требования к нему. В этом случае встает вопрос, строить ли новую плотину или можно обеспечить необходимый объем водохранилища путем повышения и усиления старой плотины? При наличии больших технических возможностей, которыми мы располагаем в настоящее время, этот вопрос решается все чаще и чаще в пользу наращивания водохранилищной плотины.

Проще всего осуществляется повышение каменно-набросной плотины с бетонным или асфальтовым экраном. Здесь наращивание может быть проведено без ущерба для эксплуатации водохранилищной плотины. Требуется только поднять противофильтрационный экран до новой отметки гребня и дополнить наброску камня до образования нового поперечного профиля.

У плотин с диафрагмой из бетонной кладки, с ядром из глинистого материала, у земляных плотин с симметричным расположением материалов (в форме фильтра) наращивание и усиление практически исключено. Напротив того, очень благоприятные условия для наращивания имеются у земляных плотин из однородного материала. Они могут без ущерба для эксплуатации повышаться и усиливаться как угодно часто.

Учитывая условия финансирования, оплату процентов и амортизацию, в настоящее время нередко ставится вопрос о строительстве подпорного сооружения по этапам. Для такого рода строительства каменно-набросные плотины с экраном и земляные плотины из однородного уплотненного насыпного материала представляются наиболее подходящими.

Наращивание гравитационных бетонных плотин может производиться двумя путями, а именно: или строительством новой гравитационной массивной плотины, в которой старая плотина представит собой низовую часть новой плотины, или наращивание старой плотины с устройством контрфорсов со стороны низовой грани. Первый способ является более дешевым; однако он требует приостановки эксплуатации сооружения на значительную часть времени.

В случае наращивания плотины со стороны верхней грани, как это показано на рис. 64, напорная грань старой плотины обрабатывается в виде ступеней и тщательно промывается водой для получения хорошего сцепления старого и нового бетона.

Строители плотины Маршал-Форд (Marshall-Ford), повышенной до 105 м (рис. 64), дорого заплатились за то, что

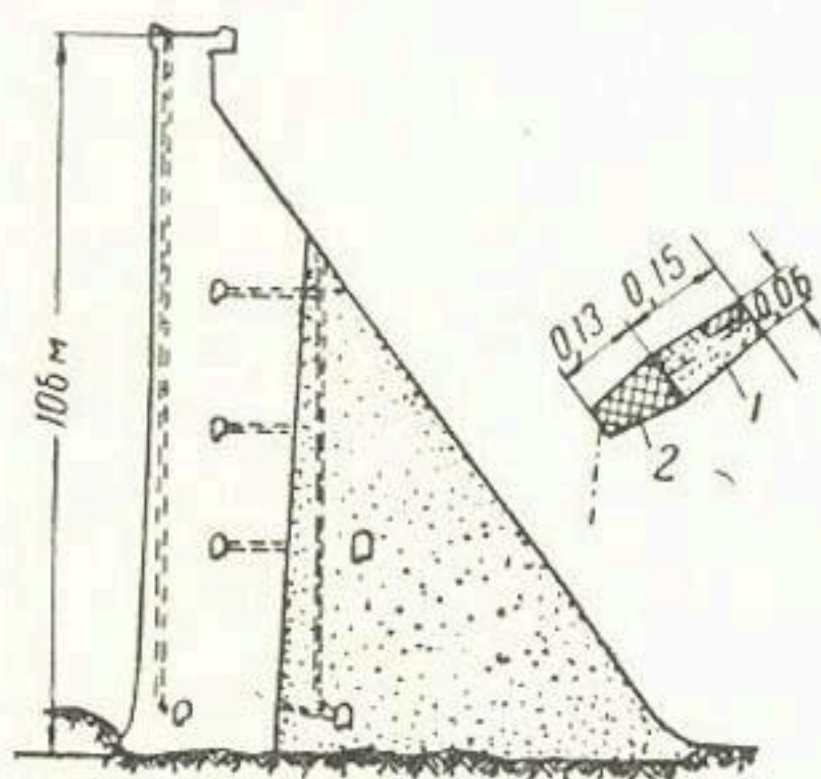


Рис. 64. Повышение плотины Маршал-Форд

1 — сухой раствор; 2 — пластичный материал

пренебрегли этим мероприятием. Через гладкий контактный шов дождевые воды и воды паводкового водослива проникли в таком количестве, что установленное в галереях оборудование не могло эксплуатироваться и полностью заржавело. Чтобы прекратить доступ воды, пришлось, как видно из рис. 64, продольный шов зацементировать из трех штолен и на низовой грани в месте выхода шва устроить специальное уплотнение.

Второй способ усиления старой плотины с помощью контрфорсов блестяще оправдал себя на знаменитой бетонной Ассуанской плотине (Assuan) в Египте в процессе 20-летней ее эксплуатации.

Не менее выразительным примером является бетонная плотина Лажес (Lages) в Бразилии [32], которая в условиях эксплуатации ее за 8-летний период с 1940 до 1948 гг. была повышена на 28 м. При этом объем водохранилища был доведен с 182 млн. м^3 до 1 052 млн. м^3 и в результате установки новых агрегатов выработка ГЭС повышена с 113 до 738 млн. кВт-ч. На рис. 65 показана старая массивная гравитационная плотина, наращенная и усиленная, которая полностью потеряла свой первоначальный характер и содержит в себе существенные черты контрфорсной плотины.

Следует особенно отметить большую тщательность, с которой производилось зубчатое (штрабное) соединение нового бетона со старым. Большого внимания заслуживает также дополнительная связь обеих частей плотины с помощью многочисленных анкеров.

В целях снижения объемных деформаций бетона была установлена дозировка портландцемента 150 кг на 1 м³. Благодаря этому была достигнута при слабо пластичной консистенции прочность бетона в возрасте 28 дней 150 кг/см². Дозировка цемента для напорной грани была принята 183 кг на 1 м³. Учитывая незначительную дозировку цемента и расчлененную структуру плотины (контрфорсы), от искусственных мероприятий по охлаждению бетона можно было отказаться. Экономия в 42 000 м³ бетона, достигнутая в результате применения контрфорсной конструкции, составляет 35% кубатуры соответствующей массивной гравитационной плотины.

Существует целый ряд криволинейных в плане гравитационных плотин с незацементированными швами, которые можно повысить до определенной отметки и без усиления. В этом случае необходимо лишь зацементировать швы: такие плотины будут работать как арочно-гравитационные бетонные плотины.

Повышение чисто арочных плотин очень часто может быть осуществлено без всякого дополнительного усиления, если его сочетать с дополнительной цементацией швов. Как известно, прочность бетона значительно увеличивается с течением времени.

Как уже упоминалось, арочная плотина Росс в США наращивалась уже два раза без ее утолщения. Для третьей надстройки этой арочной плотины до высоты 205 м, которая сейчас готовится (см. рис. 28), предусмотрено утолщение плотины со стороны напорной грани, в результате которого нынешнее поперечное сечение стены примерно удвоится. Надо отметить, что возможность такого утолщения учитывалась уже в проекте плотины. Во-первых, низовая грань, как это видно из рисунка, сделана рифленой («вафельной»), и, во-вторых, плотина имеет зубчатое сопряжение с основанием. Благодаря этому надеются обеспечить безупречную прочность на срез между обеими будущими частями плотины.

Согласно опыту, полученному при бетонировании временных водоспускных отверстий, не легко обеспечить полную связь старого и нового бетона. Причина этого заключается в совершенно различной усадке и ползучести частей плотины, выполняемых с длительными перерывами. Поэтому при утолщении решающее значение имеет то, что новый бетон укладывается таким жестким, как это только возможно, чтобы сократить его объемные деформации и иметь

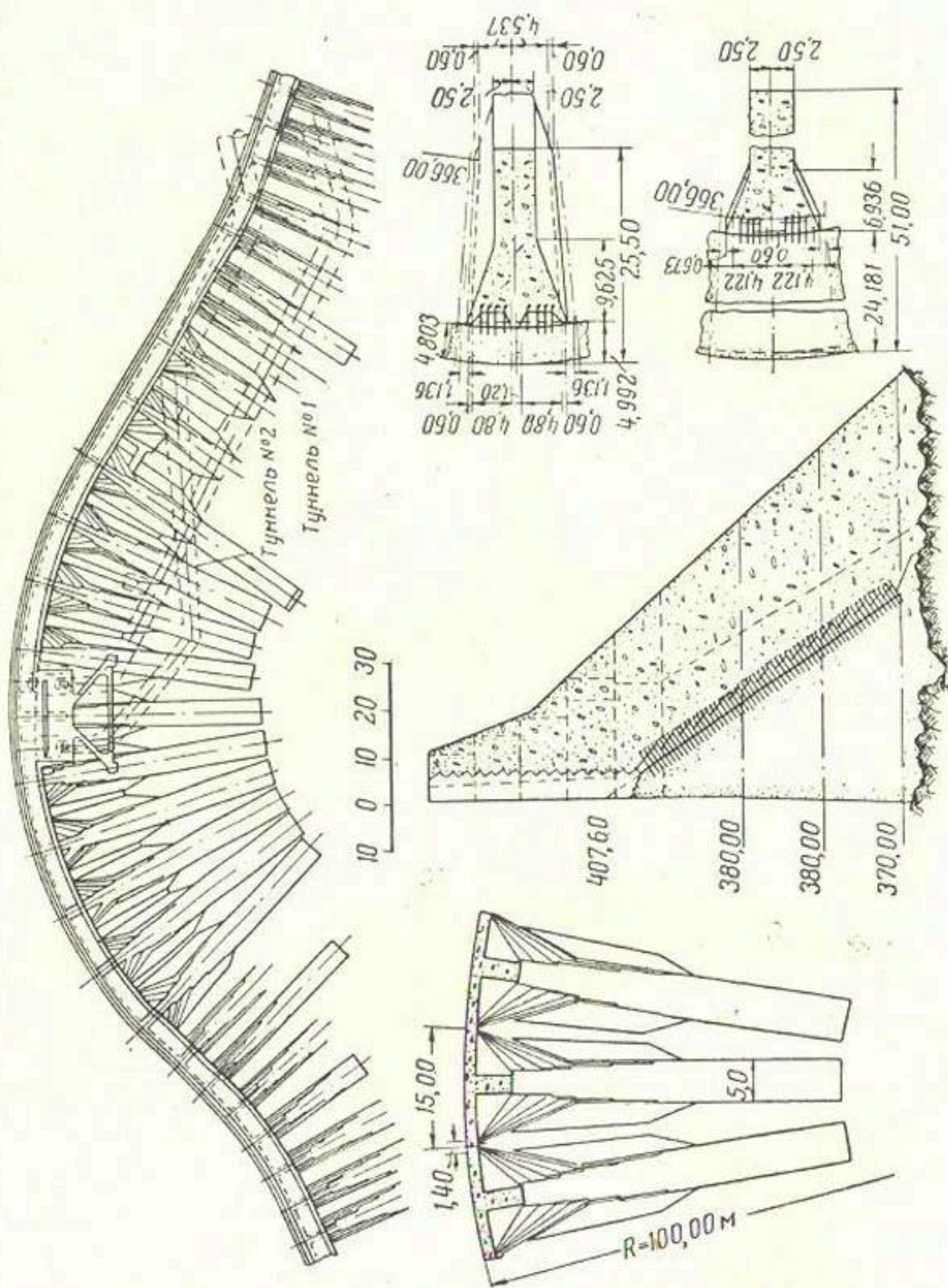


Рис. 65. Гравитационная плотина, повышенная и усиленная контрфорсами

возможность сэкономить при этом на цементе. Использование новых мощных вибраторов могло бы оказать в этом отношении существенную помощь и позволило бы надеяться на значительное повышение монолитности работы старых и новых частей бетона.

ГЛАВА 14

ВОДОСБРОСЫ ВОДОХРАНИЛИЩНЫХ ПЛОТИН

У трех самых больших бетонных плотин в мире: Грэнд-Кули (напором 155 м с объемом бетона 7,7 млн. м^3), Ша-ста (напором 183 м с объемом бетона 4,1 млн. м^3) и Гувер (напором 221 м с объемом бетона 3,4 млн. м^3), которые находятся в западных штатах США (см. рис. 25), сооружение водосбросов стоило столько же или даже больше, чем сама плотина.

Уже из этого факта можно создать себе представление об огромном значении водосбросов в системе современных водохранилищных плотин. Водосброс плотины Грэнд-Кули рассчитан, например, для пропуска расхода воды в 37 000 $\text{м}^3/\text{сек}$, что в 7 раз превышает паводок Рейна у Базеля. Еще более мощный водосброс плотины Форт Рандаль (Fort Randall), он оснащен 29 сегментными затворами (12,2 м ширины и 8,8 м высоты) и может пропустить паводок 60 000 $\text{м}^3/\text{сек}$ [34].

Само собой разумеется, что мы далеко вышли бы за пределы этой книги, если бы стали рассматривать все виды водосбросов. Здесь мы вынуждены ограничиться тем, что только перечислим факторы, абсолютно необходимые при проектировании подпорных сооружений.

Водосбросы водохранилищной плотины бывают двух родов: временные, которые служат для отвода воды от стройплощадки в период строительства, и постоянные, эксплуатационные. Часто отдельные части временного водосброса представляется возможным использовать затем при устройстве эксплуатационного водосброса плотины, как это будет детальнее рассмотрено ниже.

1. Отвод воды в период строительства

Отвод воды в период строительства требует возведения верховой и низовой перемычки и отводящего трубопровода или штольни (тоннеля). В случае каменно-набросных и зем-

ляных плотин перемычка может быть выгодно включена в поперечное сечение плотины (см. рис. 7), в то время как у бетонных плотин низовая бетонная перемычка может быть использована как водослив или водобойная стенка колодца (рис. 66). При бетонных плотинах перемычки могут иногда иметь конструкцию типа арочной плотины.

Отвод воды производится в большинстве случаев через отводные штольни или тоннели. На рис. 26 показана такая

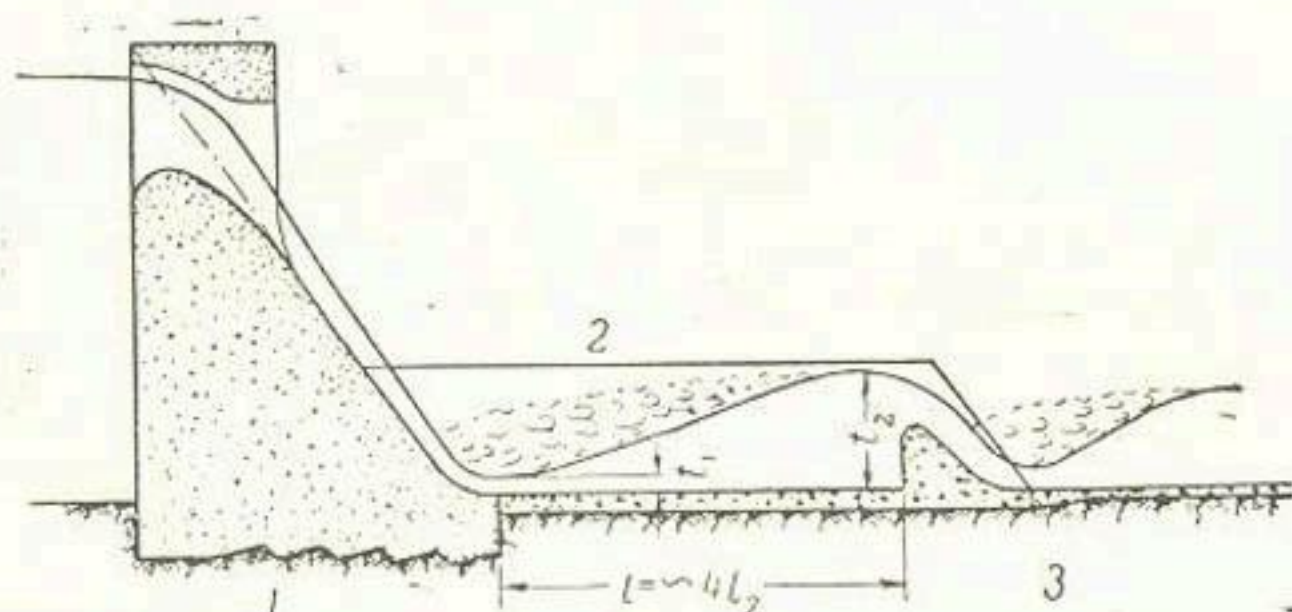


Рис. 66. Водобойный колодец

1 — плотина; 2 — боковые стенки; 3 — водобойная стенка

штольня у плотины Хангри Хорс [35], низовая часть которой использована для постоянного отвода воды. У отводных штолен плотины Инферно верховая часть служит в настоящее время в качестве подводящего водовода гидросиловой установки. У плотины Монфорте паводки в период строительства отводятся не через отводные штольни, а через трубы будущих донных водоспусков. При этом верховая перемычка сконструирована здесь как арочная плотина и является одновременно водоприемным сооружением для донных водоспусков и для отвода строительного паводка. Чтобы иметь возможность использовать трубы для обеих задач, в период строительства было необходимо проложить трубы донного водоспуска дальше через водобойный колодец и водобойную стенку, которая также служит в качестве перемычки. Трубы в пределах водобойного колодца впоследствии разбираются. Во всяком случае из этого примера видно, что обводные штольни ни в коем случае не являются универсальным средством для пропуска строительных расходов воды, и мощным донным водоспускам в настоящее время придается большее внимание, чем раньше. Как уже упоми-

налось, при очень больших паводках может быть удобным отвести весь поток (см. рис. 5) в сторону от стройплощадки и проводить работы под защитой шпунтовых или ячеистых перемычек.

2. Пропуск паводка через гребень плотины

Для пропуска паводков в период эксплуатации сооружения имеются две возможности: пропускать паводок или через самое подпорное сооружение, или через водосброс вне плотины. Пропуск воды через подпорное сооружение возможен только при бетонных плотинах. В гравитационных, арочно-гравитационных и контрфорсных плотинах гребень их для этой цели на водосливной части делается соответственно ниже и получает обтекаемую форму.

Благодаря не очень крутому наклону низовой грани гравитационные плотины паводок пропускается безопасно через отверстия водослива, ограниченного направляющими стенками.

У арочных плотин наклон низовой грани слишком крутой, для того чтобы переливающаяся вода могла двигаться по низовой грани. Чтобы поток примыкал здесь к бетонной поверхности, требуются дополнительные конструктивные мероприятия. Так, в пределах водосливной части плотины можно пристроить тело водослива с менее крутым наклоном. Примером этому служит арочная плотина Кастело до Бодэ, имеющая высоту 110 м (см. рис. 1). У арочной плотины Монфорте (см. рис. 38) для примыкания переливающегося потока сконструирован сифонный водослив с выпускной трубой вдоль низовой грани плотины.

Примерами водосливов со свободно падающей струей через арочную плотину могут служить водослив Гур-Нуаф с расходом $1\,000\text{ м}^3/\text{сек}$ и водослив плотины Куеск с расходом $2\,700\text{ м}^3/\text{сек}$ (см. рис. 27). Для таких водосливов необходимо, чтобы носок водослива имел гидравлически правильную форму и чтобы поток воды разрывался достаточно большим числом промежуточных бычков для возможности проникновения в поток достаточного количества воздуха и предотвращения образования вакуума под струей. Кроме того, глубина воды в водобойном колодце должна быть достаточно большой, чтобы сделать безопасным удар воды на дно водобойного колодца. Насколько ужасными могут быть действия падающей струи, показывает водослив Калдервуд, где вода падала с высоты 60 м

и образовала в основании вымоину глубиной до 50 м. О некоторых французских водосливах со свободной струей сообщают, что в результате искусственных мероприятий там удалось создать полную дисперсию струи водослива и довести ее до распыления в водяное облако, прежде чем она достигнет водобойного колодца.

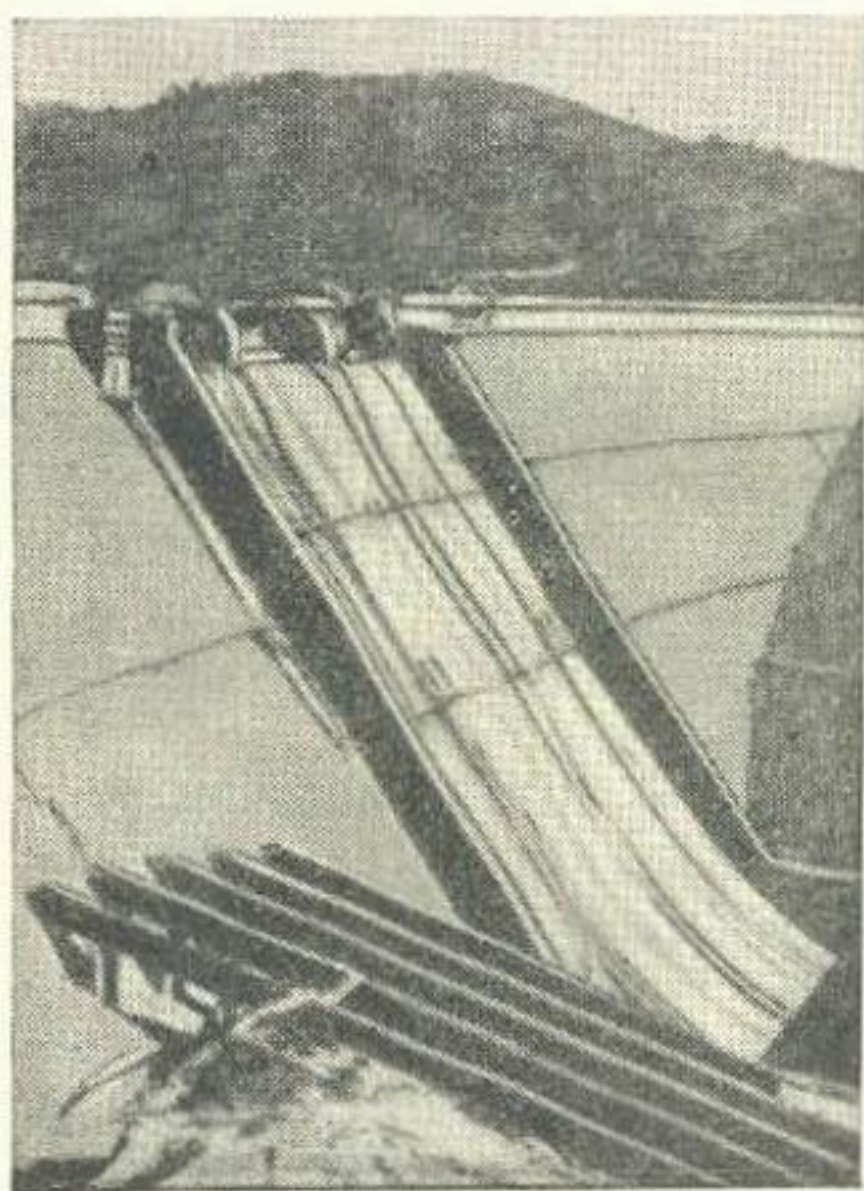


Рис. 67. Общий вид водохранилищной плотины Шаста

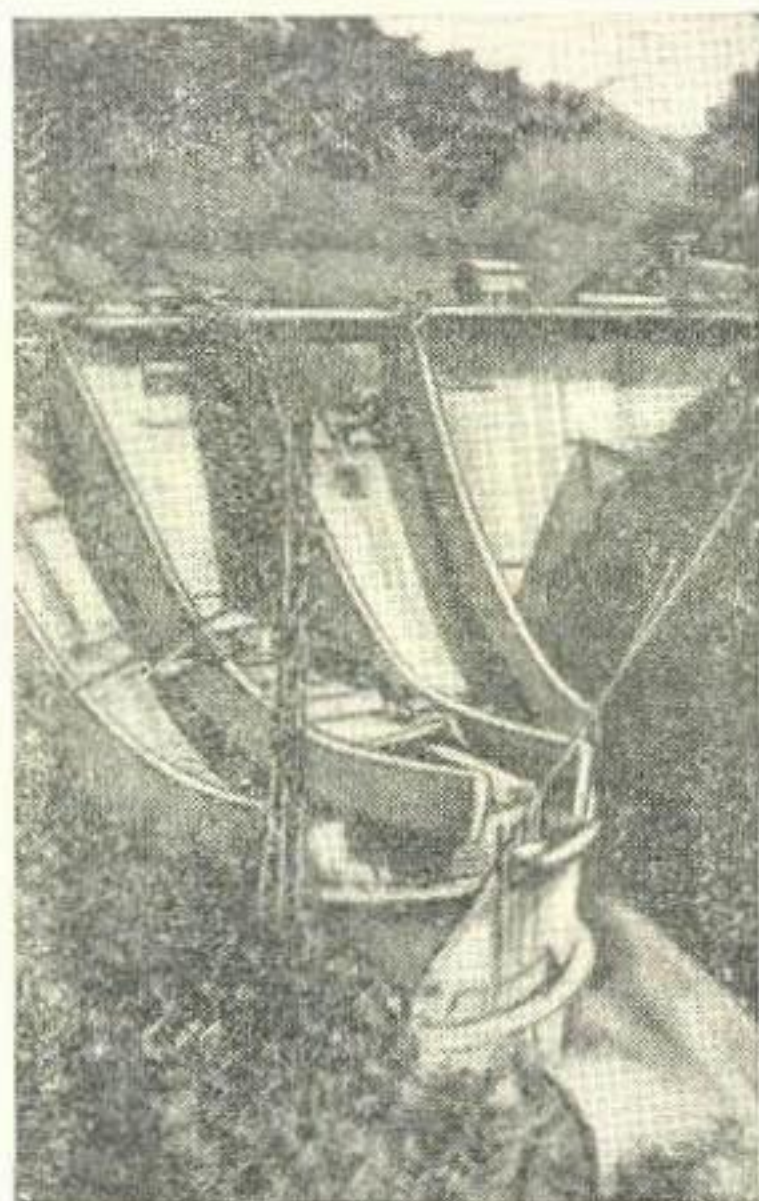


Рис. 68. Водохранилищная плотина и гидроэлектростанция Эгль. Водосброс рассчитан на пропуск 4 000 м³/сек

У арочной плотины Эгль, представляющей собой круглоцилиндрическую стену с радиусом 105 м, шириной по основанию 47 м и высотой 95 м, у которой, как и в случае Кастело до Бодэ (см. рис. 1, 2), гидроэлектростанция пристроена к плотине, нашла применение новая форма водослива по типу лыжного трамплина. Как видно из рис. 68, здесь в арочной плотине устроено два водосливных лотка, рассчитанных на расход 2 000 м³/сек каждый, которые проходят горизонтально над электростанцией; в конце длинного трамплина струи разделяются и поток воды распыляется. Как видно из рис. 69, на котором показан водослив в действии, ожидаемый эффект фактически был достигнут.

В то время как еще 10 лет тому назад высота плотины от 100 до 120 м рассматривалась как высший предел для пропуска паводка через гребень плотины, в настоящее время уже не боятся и самых больших высот плотины, как это показывает пример водослива плотины Шаста, которая имеет высоту 183 м (рис. 67). Для таких высоких водосливов, в которых образуются скорости до 60 м/сек, нормаль-

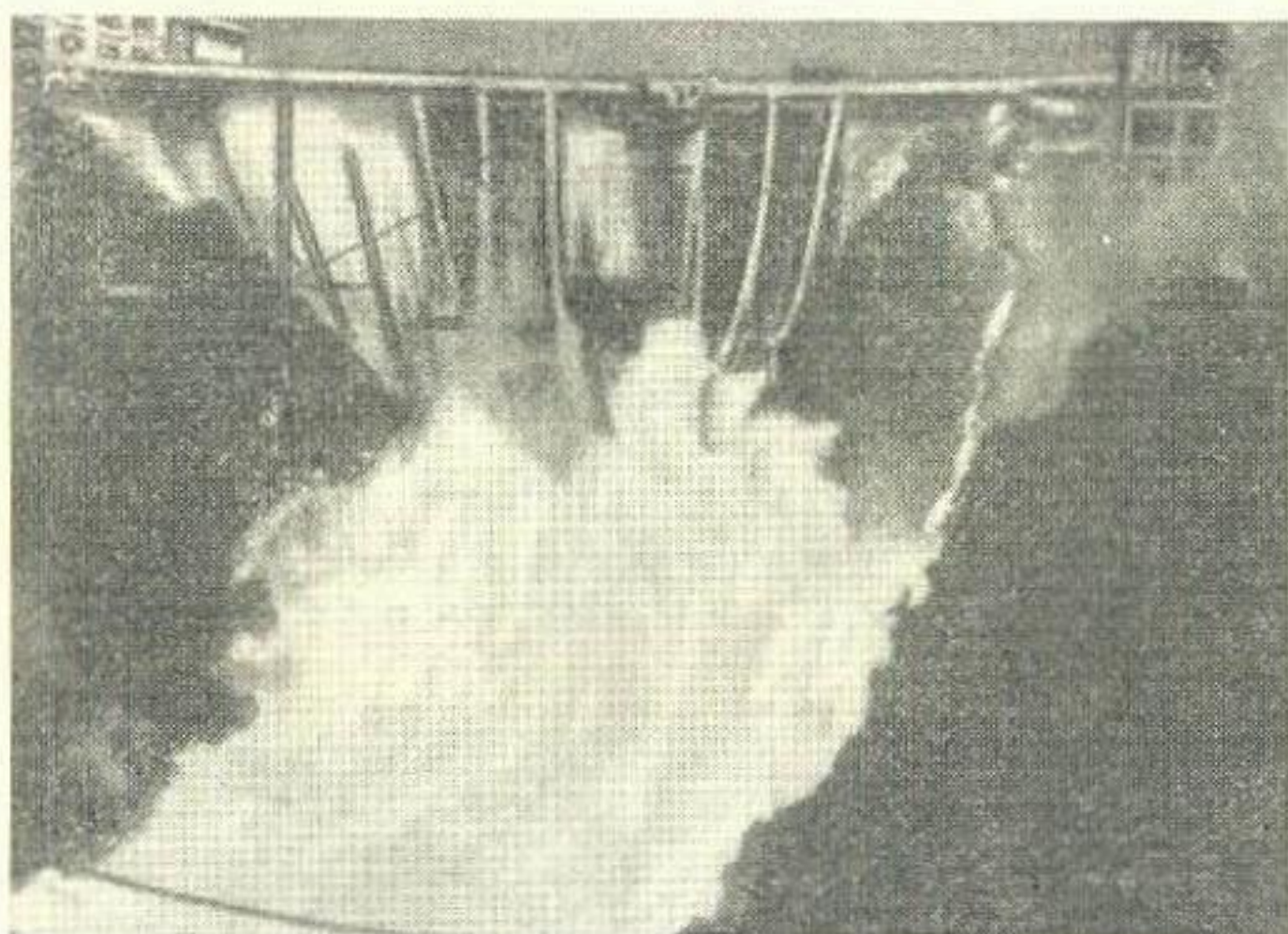


Рис. 69. Гидроэлектростанция и плотина Эгль.
Водосброс в действии

ные методы затирки бетонных поверхностей не являются больше достаточными. Как показал опыт водослива Грэнд-Кули, имеющего высоту 167 м, неровности бетонной поверхности при очень высоких скоростях приводят к явлениям кавитации, которые требуют продолжительных ремонтных работ у подошвы плотины, а также в водобойном колодце. Эти трудности были устранены только с помощью вакуумирования, благодаря которому достигается такая гладкая внешняя поверхность бетона, что она выглядит, как эмалированная, и является практически устойчивой в отношении кавитации.

Вакуумная опалубка представляет собой опалубку с двумя стенками. Со стороны бетона она состоит из водонепроницаемой пленки, которая натянута на проволоочную сетку или на перфорированную пластинку. За ней расположен

герметически закупоренный ящик. После укладки бетона присоединенным к ящику вакуумным насосом создают постепенно увеличивающийся вакуум. Благодаря этому избыточная вода из бетона вытесняется через пленку в ящик без вымыва частиц цемента; вследствие атмосферного давления на внешнюю опалубку, опирающуюся на внутреннюю опалубку, последняя крепко прижимается к бетону, в результате чего выжимание избыточной воды происходит еще в большей степени и бетон уплотняется. В результате мы имеем похожую на эмаль гладкую и плотную внешнюю поверхность бетона. Когда бетон достаточно затвердевает, вакуум снимается путем введения наружного воздуха, и опалубка освобождается от бетона.

3. Водосбросы вне тела плотины

Если водослив строится отдельно от плотины, что бывает необходимо при наличии земляной или набросной плотины, а иногда и при бетонных плотинах, то в этом случае строят

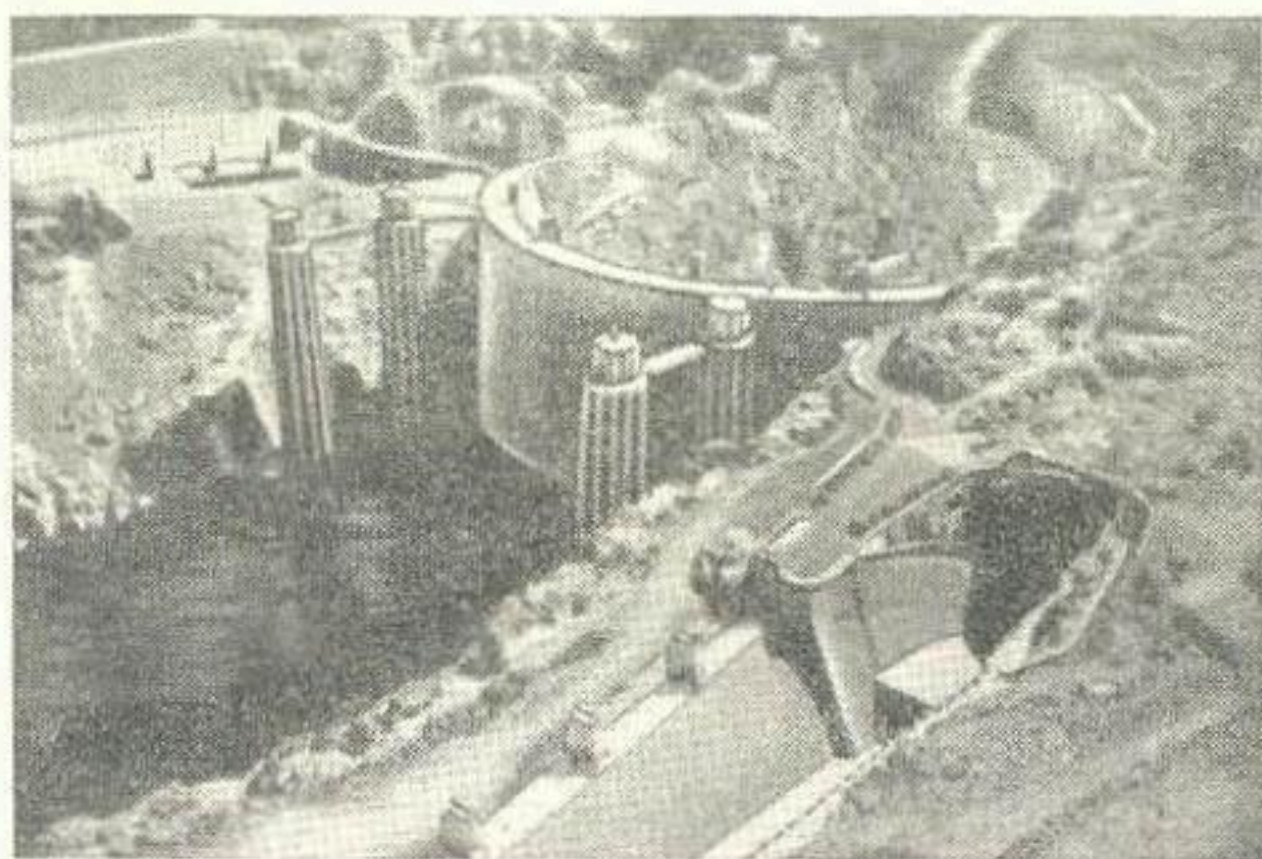


Рис. 70. Водосбросы плотины Гувера

соответствующие водосливные пороги с отводящими каналами или галереями. Самым ярким примером являются сооружения для пропуска паводка у водохранилищной плотины Гувер высотой 221 м (рис. 70) [36], где на каждом берегу расположены 2 водослива пропускной способностью $6\,000\text{ м}^3/\text{сек}$. Отвод воды из водосливного канала

производится через тоннели диаметром 15 м и длиной 2 000 м. Отдельные части этих тоннелей служили для отвода воды в период строительства.

Наряду с прямолинейными водосливами, показанными на рис. 70, могут быть еще кольцевые водосбросы, как это имеет место на водохранилищной плотине Хангри Хорс (см. рис. 26), а также на водохранилищной плотине Ватауга (см. рис. 60) [37].

4. Водобойные колодцы

Для гашения энергии воды, переливающейся через плотину или водосброс, служит так называемый водобойный колодец, который (см. рис. 66) ограничивается стеной бетонной плотины, водобойной стенкой и двумя боковыми ведущими стенами. Если толщину струи и скорость в момент поступления ее в водобойный колодец обозначить соответственно через t_1 и v_1 , то мы получим для глубины t_2 (сопряженной глубины) по ту сторону прыжка воды

$$t_2 = -\frac{1}{2} t_1 + \sqrt{\frac{1}{4} t_1^2 + \frac{2}{g} t_1 v_1^2}.$$

Водобойная стенка должна быть построена такой высоты, чтобы в водобойном колодце могла установиться глубина воды не меньше t_2 .

Для длины водобойного колодца следует выбирать по крайней мере 4-кратное значение глубины воды t_2 . Эти данные могут рассматриваться как первый отправной пункт. Окончательные размеры и форма водобойного колодца должны быть установлены на основании опытов на моделях.

ГЛАВА 15

ДОННЫЕ ВОДОСПУСКИ И ВОДОЗАБОРНЫЕ ТРУБЫ

Донные водоспуски и водозаборные трубы устраиваются при земляных плотинах обычно отдельно от плотины, а при бетонных плотинах—в теле плотины. Обслуживание затворов производится непосредственно с плотины или через башни управления или соответственно водоприемные башни. Если имеются обводные тоннели, которые служат для отвода во-

ды в период строительства, то эти последние почти всегда могут быть использованы как донные водоспуски или водозаборные водоводы.

По сравнению с прошлым, пропускная способность современных донных водоспусков значительно выше, так что теперь не меньше четверти самого большого паводка может быть сброшена через донные водоспуски. Естественно, что в результате этого значительно повышены требования и к системе затворов водоспусков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hidroelétrica do Zêzere: Escalão do Castelo do Bode. Lisboa 1951. E. Schnitter: Staumauer und Kraftwerk Castelo do Bode. „Schweizerische Bauzeitung“ 1951, S. 127 bis 132 und 137—142.
2. Schweizerische Talsperrenkommission: Messungen, Beobachtungen und Versuche an schweizerischen Talsperren. Bern 1946.
3. F. Tölke. Der wasserwirtschaftliche und energiewirtschaftliche Planausbau in den Weststaaten der USA. „Bauingenieur“ 1950, S. 375—378.
- 3'. O. Henninger und J. Dorer. Das Schluchseewerk. „Die Wasserwirtschaft“ 1951, S. 231—239, 259—268.
4. C. Semenza. Die Staumauer der Societa Adriatica di Eletticità in Venetien. „Schweizerische Bauzeitung“ 1951, S. 16—22 und 29—36.
- Reg.—Bmstr. H. Link. Neuere Talsperrenbauten in Italien. „Bau-technik“ 1951, S. 216—221 und S. 274—279.
5. Edward B. Burwell. Foundation Engineering for Large Concrete Dams. Troisième Congrès des Grands Barrages. Stockholm 1948. Vol. I. Bericht C6.
6. Calyx Core Drills. Druckschrift 4047 Ingersoll Rand. Zu beziehen über Ingersoll Rand Company New York oder Vertretung Deutschland, Wiesbaden, Kaiserstr. 7.
7. F. Tölke. Der Anderson Range Dam, der derzeitig höchste Erddamm der Welt. „Bauingenieur“ 1950, S. 60 bis 62.
8. F. Tölke. Talsperren. Zweite Hälfte, Teil 1 der Wasserkraftanlagen von A. Ludin. Berlin 1938.
9. G. Mussnug in „Wasserwirtschaft“ 42. Jahrgang 1951/52, Heft 4.
10. A. Hummel. Das Beton ABC. 1. Aufl. Berlin 1950.
11. C. Rappert in „Wasserwirtschaft“ 42. Jahrg. 1951/52, Heft 4.
12. H. W. Koenig in „Wasserwirtschaft“ 42. Jahrg. 1951/52, Heft 4.
13. Karlsruher Dissertationen.
14. B. Widmann. Der Rüttelgrobbletton, ein Weg zum optimal dichten Beton geringen Zementgehalts. Berlin 1944. Charlottenburger Dissertation. 1950.
15. A. Coyne. Le barrage de L'Aigle. „Travaux“. März.
16. M. R. Ros. „Schweizerische Technische Rundschau“ 1947.
17. Zusammengestellt nach zahlreichen Aufsätzen in der Zeitschrift „Travaux“ 1949 und 1950.

18. G. Sch n i t t e r. Der Bau der Staumauer Rossens. „Schweizerische Bauzeitung“ 1948, S. 641—644, S. 657 bis 661 und S. 687—691.
 - J. F. B r u t t i n. L'Aménagement hydroélectrique de Rossens-Hauterive après deux ans d'expérience. „Bulletin Technique de la Suisse Romande“ 1951, S. 69—85.
 - H. L i n k. Neuere Talsperrenbauten in der Schweiz. „Bautechnik“ 1950 und 1951.
 19. Tauernkraftwerk Glockner—Kaprun. 3. Aufl. Zell am See, 1950.
 20. Forces motrices de Mauvoisin. „Bulletin technique de la Suisse Romande“ 1951, S. 332—334.
 21. J. J. P o l i v k a. Large savings estimated from constant angle arch dam design. „Civil Engineering“ 1950, S. 727.
 22. M. M a r y und L. I v a n o f f. Aménagement de la chute d'Enchanet sur la Maronne. „Travaux“ 1951, S. 97—99.
 23. G. O b e r t i. Diga del Lumiei. Criteri di progetto e studi sperimentali „L'Energia Elettrica“ 1948, Heft 9.
 24. Industria Portuguesa. Lisboa 1949.
 25. The Edison Group. Mailand 1951.
 26. F. T ö l k e. Die Girotte—Staumaur. „Bauingenieur“ 1949, S. 316—317.
 - F. T ö l k e. Die Herstellung der La Girotte—Gewölbereihenstaumauer. „Bauingenieur“ 1951, S. 30.
 27. Cl. M a r c e l l o. Moderner Talsperrenbau in Italien. „Schweizerische Bauzeitung“ 1950, S. 446—451, S. 455 bis 457 und S. 476—480.
 28. Cl. M a r c e l l o. La diga di Bau Muggeris sull'Alto Corso del Flumendoso. „L'Energia Elettrica“ 1951, S. 301 bis 327.
 29. Ministerio das Obras Publicas. Laboratorio de Engenharia Civil. Manuel Rocha and J. Laghina Serafim: Model tests of Santa Luzia Dam. Lisboa 1948.
 30. F. C o n t e s s i n i. La diga di Gela in muratura di pietrame a secco. „L'Energia Elettrica“ 1951, S. 61—86.
 31. R. S c h u s t e r. Asphalt—Wasserbau. Ausführungen des In—und Auslandes. Teil II (Schluss). „Bitumen“ 1951, S. 7—16.
 32. Heightening the Lages Dam, Rio de Janeiro. „Engineering“, 1. und 8. Juli 1949.
 33. F. T ö l k e. Die Entwicklung der Bogenmauer zur beherrschenden Bauform für den Ausbau der mitteleuropäischen Wasserkräfte. „Bauingenieur“ 1950, S. 33—39, S. 115—120, S. 170—174.
 34. J. D. L e w i n. Zehn Jahre Talsperrenbau in den Vereinigten Staaten. „Die Wasserwirtschaft“. Wasserkrafttagung München 1949. Sonderheft und erweiterter Sonderdruck.
 35. L. G. P u l s and C. F. P a l m e t i e r. Hungry—Horse—Dam. Largest single Contract of USBR now in force. „Civil Engineering“ 1950, S. 764—770.
 36. US Department of the Interior. Boulder Canyon Project, final reports. Part VI, hydraulic investigations. Bulletin 1 und 2.
 37. F. O r t h. Der Bau der Watauga—Talsperre. „Bautechnik“ 1950, S. 197 und 198.
 38. H. D e h n e r t. Verkehrswasserbau, 3 Bände. (Sammlung Cöschel Nr. 585, 597, 1152). I. Entwurfsgrundlagen, Flussregelungen. II. Flusskanalisierungen und Schiffahrtskanäle. III. Schleusen und Hebewerke. Berlin 1950.
 39. H. D e h n e r t. Wehr—und Stauanlagen. (Sammlung Cöschel Nr. 1044). Berlin 1952.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. Общие сведения	5
Глава 2. Предварительные геологические и геотехнические исследования	10
Глава 3. Устройство оснований	12
Глава 4. Борьба с фильтрацией в основании плотин	17
Глава 5. Выбор цемента	26
Глава 6. Сульфатный цемент	30
Глава 7. Полное уплотнение свежего бетона	32
Глава 8. Вибробетон с крупным заполнителем	33
Глава 9. Бетонные плотины	43
1. Гравитационные (массивные) бетонные плотины	44
2. Арочно-гравитационные бетонные плотины	48
3. Арочные плотины	51
4. Арочные плотины с контрфорсами	64
5. Контрфорсные плотины	66
Глава 10. Исследования на моделях и измерения в натуре	72
Глава 11. Каменно-набросные плотины	76
1. Набросные плотины с бетонными экранами	77
2. Каменно-набросные плотины с экранами битумными или из искусственного материала	82
3. Каменно-набросные плотины с диафрагмами	84
4. Набросные плотины с вибрированным ядром из камня и глины	85
5. Перспективы развития каменно-набросных плотин	—
Глава 12. Земляные плотины	87
Глава 13. Нарращивание и усиление плотин	93
Глава 14. Водосбросы водохранилищных плотин	97
1. Отвод воды в период строительства	—
2. Пропуск паводка через гребень плотины	99
3. Водосбросы вне тела плотины	102
4. Водобойные колодцы	103
Глава 15. Донные водоспуски и водозаборные трубы	—
Список литературы	105

