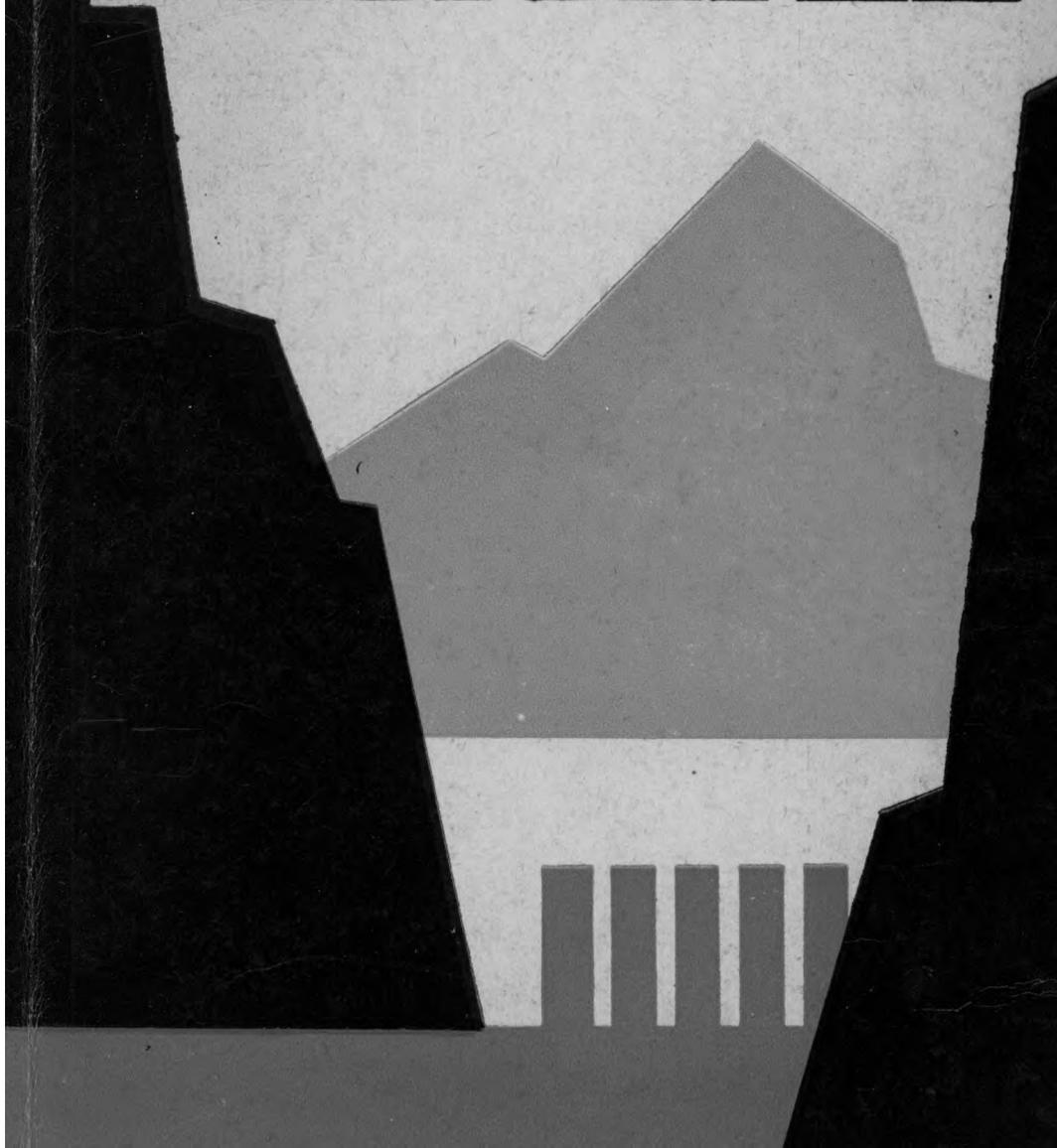


**ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ
СТРОИТЕЛЬСТВО
В НОРВЕГИИ**



МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГИДРОТЕХНИКИ имени Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

Е. П. ПЕРОВСКАЯ
П. В. САМОСТРЕЛОВ

ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО В НОРВЕГИИ

„ЭНЕРГИЯ”
Ленинградское отделение
1967

В брошюре приведены сведения о развитии энергетического хозяйства в Норвегии, роли гидроэнергии в общем балансе, об использовании водных ресурсов, потреблении гидроэнергии на душу населения (по этому показателю Норвегия занимает первое место в мире); дано описание схем использования водной энергии основных речных бассейнов, показана роль и значение для страны регулирования речного стока. Приведены примеры строительства подземных гидростанций, железобетонных плотин, плотин из местных материалов.

I. ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ НОРВЕГИИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

После второй мировой войны в Норвегии развернулось интенсивное строительство гидроэлектростанций. Если в 1946 году установленная мощность ГЭС в стране составляла 2500 *мвт*, то в 1964 году она равнялась 8400 *мвт*, причем в это же время произошло качественное изменение промышленности по производству электроэнергии — концентрация производства, увеличение числа мощных ГЭС, объединение энергосистем и т. д. По удельным показателям Норвегия продолжает занимать первое место в мире: в 1964 году на душу населения было выработано 11830 *квт · ч* электроэнергии, установленная мощность составила 2,3 *квт*.

Производство электроэнергии на тепловых электростанциях не превышает одного процента, так как Норвегия не имеет собственного минерального топлива и торфа. Для покрытия графика потребления без теплового резерва проведена большая работа по регулированию стока рек и созданию водохранилищ многолетнего регулирования.

В обзоре рассмотрены основные вопросы гидроэнергетического строительства Норвегии: запасы водной энергии и их использование, принципиальные схемы отдельных гидроузлов, подземные ГЭС, конструкции плотин и особенности производства работ.

1. Краткая физико-географическая и экономическая справка

Норвегия занимает западную часть Скандинавского полуострова. Территория ее, вытянутая в виде узкой полосы с северо-востока на юго-запад, составляет 324,2 тыс. *км²*. Население 3650 тыс. человек.

В целом Норвегия — гористая страна. Низменности занимают лишь узкую приморскую полосу и небольшие участки на юге страны. Преобладающая высота горных массивов 700—1000 *м* над уровнем моря, однако, отдельные вершины гор,

сложенных из кристаллических пород, достигают значительной высоты: гора Лудальскопа 2083 м, Снехетта — 2286 м и Гальхепигген 2468 м (высшая точка Скандинавского полуострова). На запад в сторону моря горы обрываются крутыми, часто отвесными уступами высотой от 600 до 1000 м (рис. 1).

Климат на большей части территории суровый и лишь в отдельных районах умеренный, океанический. Положение северной части страны в полярных широтах обуславливает здесь очень низкие температуры воздуха в зимнее время. В самой северной области Финмарк отмечен абсолютный минимум температуры -51° . Устойчивый снеговой покров держится до 7 месяцев в году, а в горах до 9—10 месяцев.



Рис. 1. Поперечный профиль территории Норвегии в направлении с запада на восток.

Наибольшее количество осадков выпадает на западных склонах Скандинавских гор: от 1000 мм на севере до 3000 мм на юге. Во внутренних районах Норвегии годовое количество осадков составляет 500—800 мм; в Финмарке — 250—300 мм.

До конца XIX века Норвегия была чисто аграрной страной, в настоящее время это индустриально-аграрная страна с относительно высоким уровнем развития капитализма. Ведущее место в экономике принадлежит отраслям тяжелой и лесной промышленности, которые работают главным образом на внешний рынок ($\frac{3}{4}$ норвежского экспорта). Сельское хозяйство играет подчиненную роль.

2. Роль гидроэнергетики в общем энергобалансе страны

Норвегия — страна высоких гор, глубоких долин и обильных осадков — исключительно богата гидроэнергоресурсами. 60% исследованных створов имеет падение около 300 м. В то же время торфа и нефти в стране совсем нет, а запасы угля очень ограничены. Добыча угля производится лишь на острове Шпицберген и составляет 500 тыс. т в год. Естественно, что тепловая энергетика развивается в основном на привозном топливе (нефть — из США, каменный уголь — из Англии и Польской Народной Республики) и часть ее в энергобалансе стра-

ны незначительна. Основную долю в общем энергобалансе составляет гидроэнергетика (табл. 1).

Таблица 1

**Производство, потребление и импорт энергоресурсов
в переводе на условное топливо**

Производство энергоресурсов, млн. т у. т.					Чистый импорт, млн. т у. т.	Потребление энергоресурсов, млн. т у. т.					На душу насе- ления, кг у. т.
всего	каменный и бурый угли	сырая нефть	природный газ	гидроэнер- гия		всего	твердое топливо	жидкое топливо	газ	гидро- энергия	
4,56	0,36	—	—	4,20	6,09	10,36	1,16	5,01	—	4,20	2870

Данными табл. 2 также подтверждается не только исклю-
чительная роль гидроэнергетики в стране, но и неуклонный рост

из года в год установленных мощностей прежде всего на гидроэлектростанциях. Даже в 1962 году, несмотря на неблагоприятные условия, дополнительно введенные мощности обеспечили заметный рост выработки электроэнергии ГЭС.

В последние годы установленные мощности ТЭС и ГЭС составляют отношение 1 :99, что говорит о самом интенсивном использовании гидроэнергоресурсов страны.

Таблица 2

**Рост установленной мощности
электростанций Норвегии**

Годы	Установленная мощность		
	тыс. квт	доля ГЭС, %	доля ТЭС, %
1937	1949	94,0	6,0
1950	3015	96,5	3,5
1955	4307	97,0	3,0
1960	5400	97,0	3,0
1961	6500	97,0	3,0
1962	7300	98,0	2,0
1963	7900	99,0	1,0
1964	8400	99,0	1,0

**3. Запасы гидроресурсов и распределение их
по районам**

По запасам гидроэнергоресурсов Норвегия занимает первое место в Европе.

Реки, стекающие с западных склонов Скандинавских гор, очень короткие, но имеют большое падение и не замерзают

зимой. Это реки типично горного характера, наиболее значительные из них Намсен, Ран-Эльв, Сальт-Эльв, Окла. Реки, стекающие с восточных склонов гор, длиннее, с менее резким падением, замерзают на 3—4 месяца в году. Наиболее крупные: Гломма и Нумедальс-Логен. Гломма—самая значительная река Норвегии, ее длина составляет около 600 км и водосборная площадь — около 40 000 км². Реки северной провинции Финмарк: Тана-Эльв и Альта-Эльв принадлежат бассейну Баренцова моря и замерзают на 5—7 месяцев.

Потенциальные запасы водных ресурсов Норвегии оцениваются в 12,5 млн. *квт*. Однако до настоящего времени они изучены еще не полностью, особенно в северо-восточных районах страны. В связи с этим можно ожидать изменения размера гидроэнергетического потенциала в сторону увеличения. Уже сейчас по некоторым оценкам гидроэнергоресурсы страны определяются в 16 млн. *квт*.

Размещение гидроресурсов Норвегии по районам и бассейнам рек может быть охарактеризовано следующим образом. Большая, и лучшая их часть (около 50%) сосредоточена в юго-западных районах. Эта часть страны представляет собой плато, поднятое на 900—1200 м над уровнем моря, с большим количеством озер, суммарная площадь которых свыше 13 000 км². Как правило, водосборные площади отдельных бассейнов не велики, но напоры, создаваемые плотинами, могут достигать 1000 м; количество осадков в отдельных районах, как уже отмечалось, составляет 3000 мм в год. Все это позволяет создавать здесь крупные водохранилища многолетнего регулирования. Вдоль восточного побережья водосборные площади бассейнов значительно крупнее, но напоры, которые можно получить на ГЭС, невелики, и количество осадков составляет 300—1200 мм, поэтому ГЭС работают либо на бытовом стоке, либо имеют водохранилища сезонного регулирования.

Большие емкости водохранилищ (до 14,7 млрд. м³) на основных реках позволяют сохранять значительную часть воды для использования в зимнее время. Характерен в этом отношении график выработки электроэнергии с июля 1962 по июнь 1963 года (рис. 2). График показывает, что в этот период около 50% общей выработки электроэнергии было обеспечено за счет зарегулированного объема воды.

Самыми большими запасами гидроэнергоресурсов обладает в Норвегии бассейн р. Скиен. Водосборная площадь этой реки включает в себя район Рьюкан и долину р. Бандах. К настоящему времени в районе Рьюкан построено пять сравнительно крупных станций мощностью около 200 *мвт*. В долине

р. Вандак совсем недавно вступил в строй гидроузел Туке установленной мощностью 820 мвт. Выработка всей системы Туке после завершения составит 10% от общегодовой выработки страны. Здесь же заканчивается строительство ГЭС Бруке мощностью 350 мвт.

В 1964 году выработка электроэнергии на ГЭС составила почти 44 млрд. кет · ч или 31% от общего запаса гидроэнергоресурсов (130 млрд. кет · ч). Таким образом, страна располагает огромными еще не использованными запасами водной энергии. Однако степень использования их возрастает очень быстро. При сохранении существующих темпов развития гидроэнергетики полный, экономически целесообразный и технически доступный гидроэнергетический потенциал страны будет исчерпан к 1986 году.

Использование гидроэнергоресурсов осуществляется, с одной стороны, государственными организациями: Норвежской комиссией по гидроресурсам и энергетике и государственными железными дорогами (в 1958 году им принадлежало 25,2% общей установленной мощности), с другой стороны, муниципалитетами и частными компаниями (соответственно 44,3 % и 30,5 %) -

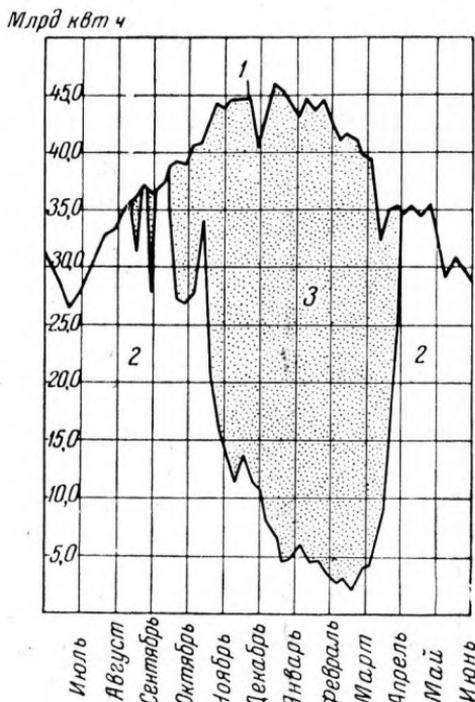


Рис. 2. Выработка электроэнергии в 1962-1963 гг.

1—общая выработка; 2—выработка на ГЭС без водохранилищ; 3—выработка на ГЭС с водохранилищами.

Норвежская комиссия отпускает электроэнергию по системам общего пользования крупным промышленным предприятиям. Муниципальные электростанции покрывают свыше 90% бытового потребления. Частные электростанции около 20% электроэнергии отпускают в системы общего пользования, а остальную расходуют на покрытие нужд своих промышленных предприятий.

4. Рост установленной мощности и выработки электроэнергии

Как уже отмечалось, общая установленная мощность всех электростанций Норвегии из года в год возрастает. Вместе с ней неуклонно увеличивается и общая выработка электроэнергии (табл. 3).

Как видно из табл. 3, после войны 1939—1945 гг. освоение гидроресурсов осуществляется исключительно высокими темпами, особенно в последние годы. Установленная мощность к 1960 году удвоилась, а к 1964 —

Таблица 3

Рост установленной мощности и выработки электроэнергии на электростанциях Норвегии

Годы	Установленная мощность, тыс. <i>квт</i>	Выработка нетто, млрд. <i>квт-ч</i>
1937	1949	8,96
1946	2500	11,60
1950	3015	17,76
1955	4307	22,88
1960	5400	31,00
1961	6500	33,00
1962	7300	37,50
1963	7900	39,50
1964	8400	44,00

утроилась по сравнению с послевоенным 1946 годом. Причиной интенсивного строительства электростанций можно считать как высокое развитие промышленности и широкую электрификацию железнодорожного транспорта, так и самое широкое использование электроэнергии для бытовых нужд.

Соответственно быстро возрастает и выработка гидроэнергии. Если в 1939 году в Норвегии вырабатывалось 10 млрд. *квт-ч*, то в 1964 году выработка гидроэнергии достигла уже 44 млрд. *квт-ч*. Предполагается к 1980 году достичь выработки 50 млрд. *квт-ч*. Если же использовать и такие запасы гидроэнергии, которые в любой другой стране Европы считались бы дешевыми, а в Норвегии считаются дорогими, то выработка электроэнергии может достичь к тому же времени 100—120 млрд. *квт-ч*.

По подсчетам при существующих темпах роста установленной мощности (рис. 3) выработка 50 млрд. *квт-ч* к 1980 году будет достигнута сравнительно легко. Значительную роль в производстве электроэнергии играют электростанции промышленных предприятий. В 1962 году на их долю в Норвегии приходилось 40% общей выработки. Они и в настоящее время

удовлетворяют потребность промышленности в электроэнергии примерно на 75%.

Несмотря на то, что в последнее десятилетие производство электроэнергии на душу населения во всех развитых странах резко возросло, Норвегия продолжает занимать по этому показателю первое место в мире. В 1958 году выра-

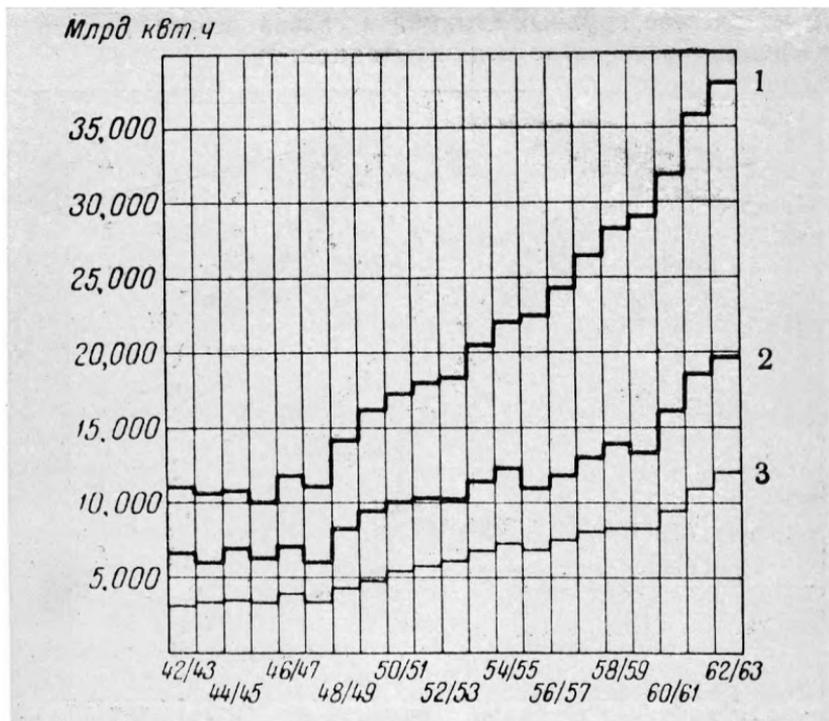


Рис. 3. Динамика роста выработки электроэнергии по годам

1—общая выработка; 2—промышленное потребление; 3—бытовое потребление.

ботка электроэнергии на душу населения составила 7500 *квт·ч* (в три раза больше, чем в Швеции, и в пять раз больше, чем в Англии); в 1960 году она равнялась 7700 *квт·ч*, а в 1964 году достигла уже 11 830 *квт·ч*.

Строительство мелких гидроэлектростанций было начато еще в конце XIX века на равнинных реках восточных и центральных районов страны. Первая из них 'появилась в 1885 году. Сравнительно крупная ГЭС была построена на р. Гломма в самом начале XX века.

До 1939 года широко велось строительство низконапорных ГЭС в легко доступных и наиболее удобных створах. В резуль-

тате в 1943 году в Норвегии действовало 1818 гидроэлектростанций мощностью менее 1000 квт и только десять станций имели мощность свыше 50 000 квт; 52,5% общей мощности ГЭС падало на станции средней мощности (1000—50 000 квт).

В последующие годы в развитии норвежской гидроэнергетики четко наметились две тенденции:

1. Концентрация производства электроэнергии на небольшом количестве крупных станций и связанное с этим расширение средних и закрытие мелких станций.

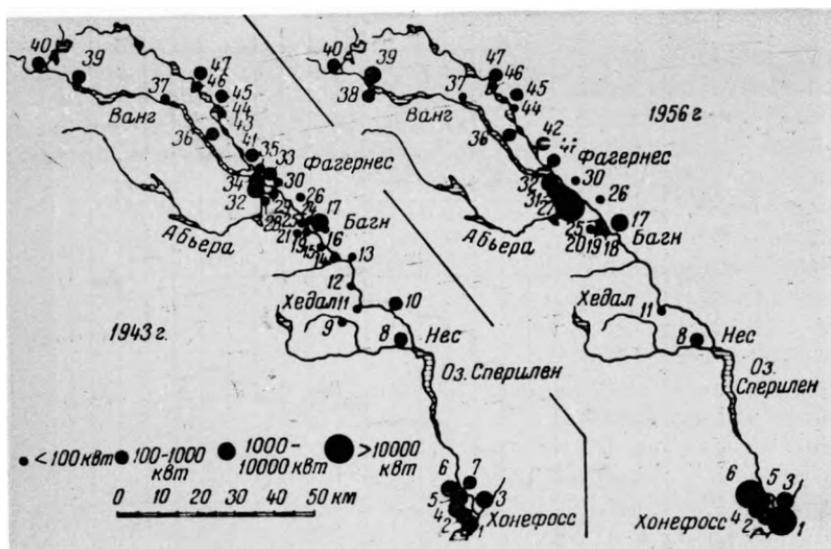


Рис. 4. Схема размещения ГЭС в долине р. Багн в 1943 г. (слева) и в 1956 г. (справа).

Примером может служить использование бассейна р. Багн. К 1943 году здесь действовало 39 ГЭС. За 13 следующих лет было построено несколько крупных ГЭС (в том числе ГЭС Абельера мощностью 81,6 мвт), проведено расширение и модернизация семи действующих станций, мощность которых увеличилась с 16 мвт до 40 мвт, и закрыто 17 мелких станций.

В результате общая установленная мощность ГЭС в этом районе возросла с 28,5 мвт в 1943 году до 132,6 мвт в 1956 году, несмотря на уменьшение общего количества станций (рис. 4).

Строительство крупных электростанций взамен мелких характерно и для других районов Норвегии. К 1964 году число крупных ГЭС в стране выросло до 20, резко возросло число станций средней мощности и значительно уменьшилось количество мелких.

2. Кооперирование в эксплуатации гидроэлектростанций, позволяющее избыток гидроресурсов одного района использовать для выработки и передачи электроэнергии в другой район и обеспечивающее тем самым наиболее экономичное использование ресурсов и распределение выработанной электроэнергии по территории всей страны. Примером успешного кооперирования может служить деятельность самой крупной специальной организации Самкьоринген.

Обе тенденции нашли особенно яркое подтверждение в последние годы, так как гидростроительство в это время ведется исключительно широко. В стадии строительства находится 70 ГЭС, в том числе 12 подземных. Ожидается, что установленная мощность вновь построенных ГЭС составит 3000 *мвт* (общая установленная мощность в стране будет доведена тем самым до 11000 *мвт*). При этом 85% мощности будут иметь крупные ГЭС (свыше 50 *мвт*), 10% — ГЭС средней мощности и только 5% — мелкие.

Объем еще не использованных ресурсов позволяет планировать увеличение мощности в будущем еще на 10 000 *мвт*, при этом основной объем неиспользованных гидроресурсов находится в западной Норвегии. Кроме того, объем вырабатываемой в стране электроэнергии может быть увеличен за счет гидроресурсов Швеции, расположенных вдоль норвежской границы.

Дальнейшее использование гидроэнергоресурсов внутри страны зависит от ряда факторов, в том числе от темпов роста потребления электроэнергии в промышленности и в быту, от способности страны финансировать гидростроительство своим или иностранным капиталом и т. д.

Соответственно росту установленных мощностей в Норвегии планируется доведение выработки электроэнергии с 44 млрд. *квт-ч* в 1964 году до 60 млрд. *квт-ч* в 1975 году; таким образом до 1975 года средний процент годового прироста составит 5%, т. е. 150 *мвт* в год.

5. Объем капиталовложений, стоимость отдельных ГЭС и вырабатываемой электроэнергии

До 1960 года капиталовложения в развитие энергетики **раiв**нялись в среднем 400 млн. крон ¹ в год, что составляло примерно 25% всех капиталовложений в промышленность Норвегии. В 1963 году объем капиталовложений в гидростроительство был доведен до 500 млн. крон (без стоимости ЛЭП).

Что касается стоимости строительства, то нужно заметить,

¹ 100 крон = 12 руб. 59 коп.

что стоимость гидроэнергетических установок и производство электроэнергии в Норвегии, как правило, значительно ниже, чем во многих других странах. До 1939 года стоимость 1 *квт* была 20 английских фунтов стерлингов. В последнее время средняя стоимость 1 *квт* была 50—45 фунтов стерлингов при минимуме 38 фунтов. Стоимость, например, законченных крупных гидроузлов Аура, Рессога, и Туке была соответственно 48,2; 47,3 и 47,5 фунтов стерлингов за 1 *квт* установленной мощности.

Средняя себестоимость электроэнергии колеблется от 0,25—0,30 пенса¹ за 1 *квт · ч* — это самая низкая стоимость в Европе и Северной Америке. Так стоимость энергии, которая вырабатывается на станции Туке, 0,25 пенса за 1 *квт · ч*. Еще много лет гидроэлектроэнергия в Норвегии будет дешевле любого другого вида энергии.

Растущая промышленность требует быстрого освоения не использованных еще ресурсов. Однако собственных средств на это Норвегия не имеет и вынуждена прибегать к иностранным займам.

6. Рост потребления электроэнергии и развитие линий электропередач

До 1960 года суммарное годовое потребление Норвегии составляло 27—29 млрд. *квт · ч*. За 1962 год потребление электроэнергии составило 33 млрд. *квт · ч*, в том числе промышленностью—свыше 20 млрд. *квт · ч* и в коммунально-бытовых целях— около 11 млрд. *квт · ч*. В последние годы наблюдается тенденция к дальнейшему значительному увеличению потребления. При этом важно отметить, что потребности страны в электроэнергии будут удовлетворяться главным образом за счет гидроресурсов.

Расходная часть энергобаланса Норвегии характеризуется очень высоким удельным весом промышленного потребления. Промышленность расходует 64% всей выработанной в стране энергии. В 1958 году потребление энергии промышленными предприятиями составляло 17 млрд. *квт · ч*. В 1965 г. оно возросло до 36 млрд. *квт · ч*. Особенно заметный рост потребления наблюдается в таких отраслях промышленности, как черная и цветная металлургия, металлообработка и химическая промышленность. Для удовлетворения возрастающих потребностей, установленная мощность должна ежегодно возрастать на 400 *мвт*.

¹ 1 английский фунт стерлингов по курсу на 1/IV 1966 г. — 2,5 рубля, 1 пенс — 1/240 фунта стерлинга.

В Норвегии расход электроэнергии на одного человека, занятого в промышленности, почти в семь раз больше, чем в Швеции. Это объясняется тем, что в Норвегии значительно развито производство алюминия, ферросплавов, карбида, азота и его производных.

Сопоставление данных о (потреблении электроэнергии показывает, что процент прироста потребления электроэнергии непромышленным сектором Норвегии больше, чем промышленным сектором.

Расход электроэнергии на бытовые нужды составляет на душу населения 1530 *квт-ч*. Это в два с половиной раза выше, чем в США, Швейцарии, Швеции и в четыре раза выше, чем в Англии. 36% общей выработки используется именно для бытовых нужд. Заметим, что электроэнергией снабжается 99,2% населения страны.

Исключительно широко используется электроэнергия для отопления жилых зданий, приготовления пищи, освещения и т. д. Почти все дома, построенные в Осло после войны, имеют электроотопление. Отопление квартир электричеством, широкое внедрение электробытовых приборов поощряется путем снижения отпускных цен на электроэнергию. Этим государство стремится уменьшить свою зависимость от ввоза дорогостоящего топлива.

Объединение станций одной компании в общую энергосистему имело место еще 50 лет назад. Станции, принадлежавшие различным компаниям, начали связываться линиями электропередач в начале 20-х годов. Сначала это были только ЛЭП напряжением 60 *кв*. Первая ЛЭП напряжением 130 *кв* была введена в эксплуатацию в 1928 году, а напряжением 220 *кв* — в 1949 году. В настоящее время общая длина ЛЭП высокого напряжения превышает 3000 *км*. Вся юго-восточная Норвегия, так называемый Естланд, связана такими ЛЭП и представляет собой самый важный энергетический район. Таких районов, как крупных, так и мелких, в стране много, постепенно они расширяются, объединяются, и в будущем планируется создание единой энергетической системы. Из этой системы, очевидно, выпадут лишь труднодоступные и отдельные северные районы, где считается более экономичным строить мелкие, не связанные между собой станции.

Крупнейшей организацией по эксплуатации ГЭС и распределению энергии является объединение Самкьоринген. В ее состав входит большое число частных и государственных энергетических компаний. Организация объединяет 80 ГЭС с общей мощностью 4259 *мвт*, 52% электроэнергии, выработанной в 1963 году в стране, были распределены через Самкьоринген.

Центр организации находится в г. Осло, откуда повседневно контролируется работа ГЭС, объединенных линиями электропередач в крупные и мелкие энергетические системы.

Целью деятельности Самкьоринген является рациональное использование и распределение гидроэнергоресурсов в густонаселенном восточном районе Норвегии — Естланде, где проживает около 50% населения. В восточной части Естланда запасы гидроресурсов значительно больше, чем в западной, но Самкьоринген обеспечивает равномерное распределение выработанной энергии, выравнивая нагрузку на ГЭС по линиям электропередач. Успешная деятельность организации подтверждает те огромные преимущества, какие дает объединение ГЭС в систему. Не исключено, что именно в Самкьоринген будет входить ЛЭП, которая соединит Норвегию с другими странами.

Проблема обмена электроэнергией с соседними странами — в первую очередь с Финляндией, Швецией и Данией — уже давно стоит перед норвежским энергохозяйством. Условия для внутрискандинавского обмена благоприятны, так как потребление электроэнергии в трех указанных странах весьма различно. Финляндия может с успехом сохранять излишки гидроресурсов летом и тепловой энергии — зимой. Швеция располагает избытком гидроэнергии летом, зато зимой она нуждается в дополнительной дешевой энергии. Норвегия может весь год давать избыточную электроэнергию и, кроме того, она располагает еще большими запасами мощности.

Обмен электроэнергией был бы выгоден для всех стран, в том числе и для Норвегии, которая могла бы значительно расширить экспорт электроэнергии особенно в летнее время. В то же время расширение производства электроэнергии на экспорт требует строительства специальных ЛЭП, которые еще очень нужны Норвегии для переброски электроэнергии внутри страны, «кроме того, это вызывает необходимость импортировать в страну не только обычное, но и специальное оборудование. Эти и целый ряд других причин задерживают достижение договоренности о создании общей энергетической системы Скандинавского полуострова, несмотря на длительные переговоры.

Имеются определенные условия для сотрудничества Норвегии с Данией. В будущем экспорт электроэнергии из Норвегии в Данию может составить примерно 58 млрд. *квт-ч* в год. Развитие связей с Данией дало бы возможность в дальнейшем соединиться через нее с ЛЭП ФРГ и с другими рынками сбыта в Европе. (Считается, что такой обмен можно было бы осуществить по подводным кабелям, проложенным через проливы). Хотя еще больших готовых проектов межгосу-

дарственной связи нет, некоторая работа в этом направлении проводится.

От эксплуатации существующих в настоящее время нескольких небольших ЛЭП между Норвегией и Швецией (в районе Рана длиной 60 км и напряжением 130 кВ, в районе Нарвика и др.) скандинавские страны переходят к сооружению более мощных межгосударственных линий электропередач. Такова введенная в эксплуатацию в 1960 году ЛЭП напряжением 220 кВ между норвежской ГЭС Ни и шведской ГЭС Ярпстеммен.

Кроме того разрабатывается целый ряд проектов по строительству гидроэлектростанций на пограничных реках Норвегии и соседних государств. Так сейчас в стадии рассмотрения находятся три варианта проекта по использованию ресурсов рек Турне-Эльв и Каликс-Эльв, впадающих в Ботнический залив. В осуществлении проекта должны принять участие три страны: Норвегия, Швеция и Финляндия.

В стадии выполнения находится проект по совместному использованию гидроресурсов р. Пасвик, низовья которой являются государственной границей между Норвегией и СССР.

7. Сотрудничество между Норвегией и СССР по использованию гидроэнергоресурсов

По соглашению между СССР и Норвегией на р. Пасвик, впадающей в Баренцево море, а точнее на пограничном участке ее длиной 113 км, начиная от устья, осуществляется строительство пяти ГЭС в каскаде.

Две станции должны быть построены Советским Союзом для Норвегии и три станции — Норвегией для СССР. В счет трех последних Норвегия в 1963 году закончила строительство Борисоглебской ГЭС близ устья реки, а в начале 1965 года была пущена в эксплуатацию построенная Норвегией ГЭС Скугфосс. Строительство каскада успешно продолжается несмотря на отдаленность района и исключительно суровые климатические условия.

Сотрудничество между Норвегией и СССР является примером того, как при согласованности действий и взаимном уважении к правам государств-соседей можно достичь больших успехов по максимальному использованию гидроэнергоресурсов той или иной пограничной реки. Строго говоря, соглашение между Норвегией и СССР учитывает интересы и третьего государства — Финляндии, поскольку оз. Энаре, из которого берет начало р. Пасвик, располагается на ее территории.

Однако этот факт не вызывает осложнений, поскольку энергостроительство на р. Пасвик осуществляется с учетом ин-

тересов всех заинтересованных сторон в обстановке дружбы и взаимопонимания.

II. СХЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ

Выше уже говорилось о том, что вплоть до второй мировой войны в Норвегии велось в основном строительство низконапорных гидроэлектростанций в легко доступных и наиболее удобных створах. В качестве примера можно привести целый ряд таких станций: ГЭС Раанаасфосс на р. Гломма с напором 14 м, ГЭС Бюгдин на р. Логен с напором 9,15 м, ГЭС Скьёфгадфосс с напором 10,5 м и другие.

Типичной низконапорной станцией можно считать ГЭС Флагенфосс на р. Нелауг. Водосборная площадь здесь всего около 306 км², среднегодовой расход 52,5 м³/сек. Средний напор на ГЭС составляет 10,5 м. Напорный фронт создается невысокой плотиной, представляющей собой каменную стенку с железобетонным покрытием толщиной 15 см, и русловой гидроэлектростанцией, расположенной слева от плотины. При строительстве ГЭС такого типа возникают две проблемы: необходимо обеспечить, во-первых, пропуск паводковых расходов и, во-вторых, сплав леса по реке весной и в начале лета.

Для пропуска паводков на гребне плотины Флагенфосс устроен открытый водослив длиной 210 м; сплав леса осуществляется по специальному лесосплавному лотку, расположенному у правого примыкания плотины.

Машинный зал станции оборудован одним агрегатом мощностью 5,6 мвт. Мощность турбины Френсиса 4600 квт при напоре 10,5 м и 150 об/мин. Гарантированный к. п. д. 84% при расходе 58 м³/сек. Годовая выработка 36 млн. квт-ч. Работа станции регулируется автоматически.

В 1908 году была построена первая в Норвегии высоконапорная ГЭС Тюссе (напор 415 м). Это была вторая по напору станция в Европе после ГЭС Брусно в Швейцарии, законченной на несколько месяцев раньше.

Позже было построено несколько высоконапорных станций. Как правило, все они деривационные, при этом многие из них подземные. В последнее время строительству таких крупных высоконапорных станций отдается предпочтение.

Примером высоконапорной станции является ГЭС Аура в бассейнах рек Аура и Лилледал (центральная часть Норвегии). Станция построена в 1949—1956 гг. Напор на ГЭС равен 785 м (брутто), и создается падением реки от оз. Холбуванн

(НПУ водохранилища 792 м) до отводящего туннеля подземной ГЭС у фьорда Зунндаль (отметка нижнего бьефа 7,0 м). Водосборная площадь равна 856 км² и включает в себя бассейны двух рек: р. Аура—567 км² и р. Лилледал —289 км² (рис. 5). Суммарный среднегодовой расход обеих рек равен 43 м³/сек. Водосборная площадь включает еще несколько небольших рек и естественных озер, зарегулированных с по-

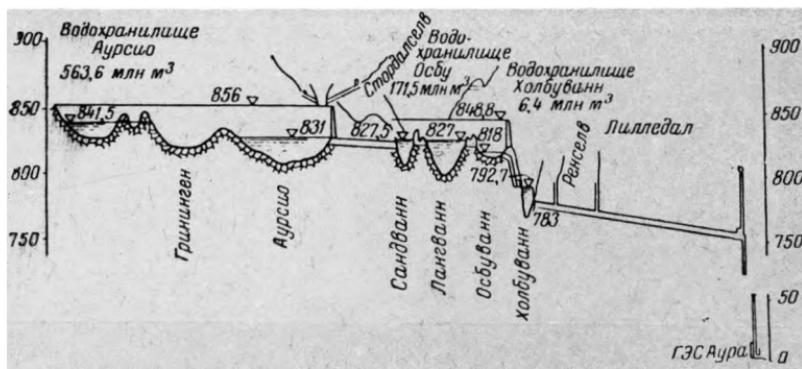


Рис. 5. Схематический продольный разрез по водохранилищам, подводящим и деривационным трактам ГЭС Аура.

мощью плотин и соединенных друг с другом туннелями и каналами. Объем водохранилища 563,6 млн. м³ с возможностью увеличения в будущем до 705 млн. м³. Водоохранилище создано на трех естественных озерах с помощью каменнонабросной плотины Аурсйо 970 м длины и 37,5 м высоты. На верхнюю грань плотины уложен бетонный экран на бутовой подэкрановой кладке, защищенный деревянным покрытием. Вода из водохранилища поступает по туннелю длиной 5 км с площадью поперечного сечения 32 м² в систему озер, а оттуда по подводящему напорному туннелю на ГЭС. Подводящий туннель подковообразного сечения площадью 27 м² имеет длину 15,9 км. Перед зданием ГЭС трубопровод переходит в четыре нитки металлического напорного водовода; нитки уложены в два необлицованных туннеля подковообразного сечения, наклоненные под углом 45° к горизонту.

Подземное здание ГЭС находится на глубине 300 м под поверхностью земли; в нем установлено семь агрегатов со сдвоенными струйно-ковшовыми турбинами общей мощностью 300 мвт. Агрегаты размещены в двух параллельно расположенных машинных залах (четыре агрегата в одном машинном зале и три — в другом). К каждому машинному залу подходит по одному туннелю с двумя нитками трубопроводов.

В помещении затворов, расположенном перед зданием ГЭС, для четырех ниток трубопроводов установлены дисковые затворы: по одному рабочему и одному ремонтному в каждом трубопроводе.

Отводящий туннель — общий для обоих залов — длиной 575 м и сечением 29 м² оканчивается отводящим каналом длиной 190 м. Повысительные трансформаторы расположены в подземной камере рядом с машинным залом.

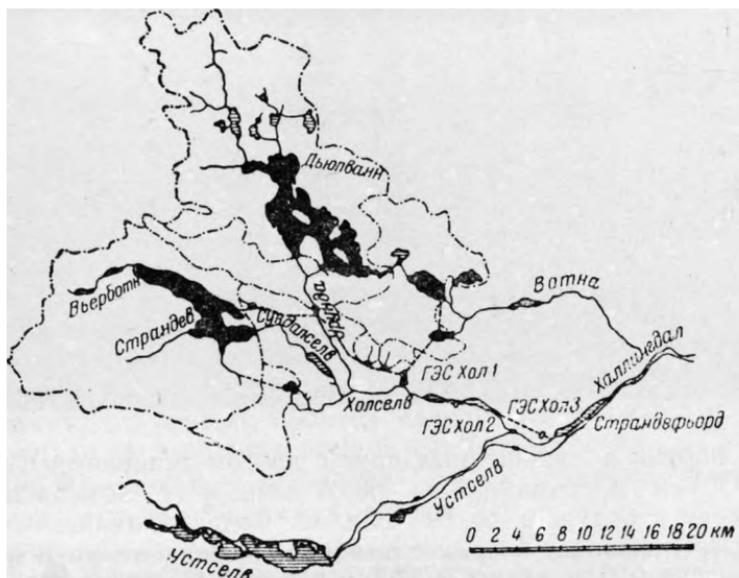


Рис. 6. Схема расположения водохранилищ, соединительных водных трактов и ГЭС на притоках р. Халлингдал.

Годовая выработка электроэнергии на ГЭС Аура в средний по водности год составляет 1,6 млрд. квт-ч. Это самый крупный гидроузел в Норвегии, в состав которого входит только одна ГЭС.

Однако, стремясь к более полному использованию гидро-ресурсов, норвежские инженеры все чаще обращаются к созданию энергетических систем, включающих не одну станцию, а каскад станций. При этом для повышения энергетического потенциала района вода из одного источника перебрасывается в другой, озера, отстоящие друг от друга на значительном расстоянии, соединяются каналами или туннелями, таким образом все водные источники района подводятся к основному потоку.

Примером может служить каскад трех станций: Хол 1, Хол 2, Хол 3 в бассейне р. Халлингдал (рис. 6). Хол 1 (иногда

ее называют Рууд) — одна из крупных ГЭС Норвегии (установленная мощность 190 *мвт*). Строительство ее закончено в 1956 году. Ниже этой станции расположены ГЭС Хол 2 (мощностью 27 *мвт*) и Хол 3 (мощностью 60 *мвт*). Суммарная выработка станций равна 980 млн. *квт-ч* (Хол 1 — 670 млн. *квт-ч*, Хол 2—100 млн. *квт-ч* и Хол 3 — 210 млн. *квт-ч*). Благодаря наличию в системе больших регулирующих емкостей свыше 90% энергии Хол 1 и 70% — Хол 2 и Хол 3 вырабатывается в течение семи месяцев (с 15 октября по 15 мая), чем и покрывается весь график потребления электроэнергии в зимнее время в данном районе.

Водосборная площадь ГЭС Хол 1 — 725 *км²*, средний сток 36 *л/сек* с 1 *км²*. Годовое количество атмосферных осадков в районе станции ИЗО *мм*.

В машинном зале ГЭС установлено четыре агрегата. Вода из специальных распределительных бассейнов подводится к ним по двум напорным трубопроводам длиной 840 *м* и 800 *м*. По одному из трубопроводов к агрегатам № 1 и 2 подводится сток р. Вотна (приток Халлингдал) с напором 407 *м*, по другому — к агрегатам № 3 и 4 подводится сток р. Хол и ее притоков Урунда и Хивью с напором 376 *м*. Таким образом агрегаты станции работают при двух различных напорах. Уравнительные шахты, расположенные непосредственно над помещением ГЭС, имеют соединение, поэтому агрегаты № 1 и 2, предназначенные для более высокого напора, могут работать и при втором, более низком напоре. На станции установлены радиально-осевые турбины. Несмотря на большой напор, этим турбинам отдано предпочтение перед струйно-ковшовыми турбинами, так как стоимость струйно-ковшовых турбин была бы на 25% выше.

С водосборной площади р. Вотна (595 *км²*) вода подается к уравнительной шахте станции из водохранилища Варальдсетватн (отметка 999—1005 *м*) по туннелю длиной 4520 *м* с площадью поперечного сечения 18 *м²* (рис. 7). Расход при полной нагрузке составляет 27 *м³/сек*. Водоохранилище Варальдсетватн связано туннелем длиной 3000 *м* сечением 13 *м²* с озером Редунген (отметки 1011 — 1022 *м*), куда частично по туннелю, частично по открытому каналу поступает сток озера Бергсио (отметки 1079—1081,5 *м*).

Водосборная площадь р. Хол составляет 130 *км²*, вода подается к станции также из нескольких водохранилищ. Главное водохранилище Страндеванн имеет полезный объем 460 млн. *м³*. В будущем предполагается с небольшими затратами отвести в него сток с водосборных площадей рек Аурланд и Хивью и тем самым увеличить объем водохранилища до

554 млн. m^3 , благодаря чему выработка ГЭС Хол 1 возрастет до 900 млн. $kвт-ч$.

От водоприемника Страндеванн вода идет по туннелю до долины р. Урунда, где осуществляется 'подпитка туннеля через боковой водоприемник из водохранилища (отметка 1091 м) с площадью зеркала 35,8 $км^2$ и объемом 219 млн. m^3 , созданного на месте 16 озер двумя водосливными и одной глухой плотиной. При необходимости из общего объема этого водохрани-

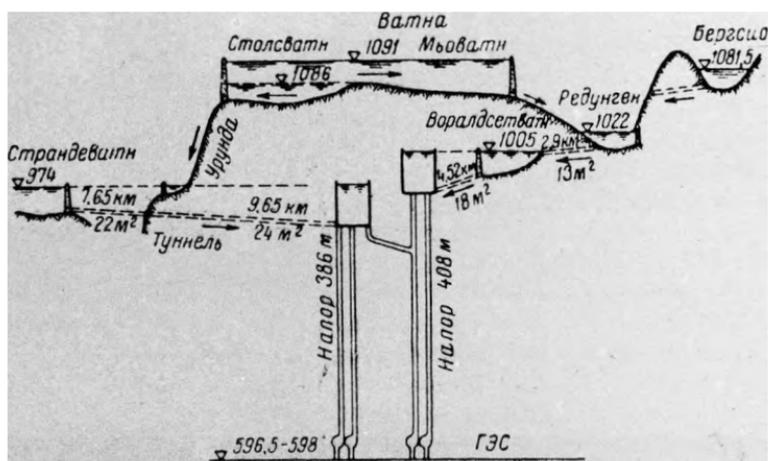


Рис. 7. Схема гидроэнергетической системы Хол 1.

лища можно сбрасывать до 153 млн. m^3 через плотину Мьоватн в оз. Редунген, но обычно этот объем поступает через плотину Столсватн и по руслу р. Урунда в туннель Страндеванн—Хол 1. На первом участке туннеля длиной 7,65 км сечение его составляет 22 m^2 , на втором участке длиной 9,65 км — 24 m^2 .

В состав системы входят девять плотин. Пять из них контрфорсного типа с плоской напорной плитой, что характерно для Норвегии, в числе остальных — многоарочная плотина Столоватн высотой 18 м и длиной 740 м и самая крупная в Норвегии плотина из местных материалов Страндеванн (рис. 8). Длина плотины Страндеванн 350 м, высота 13 м. Ядро возведено из морены. В плотину уложено 130 000 m^3 земляного грунта и 180 000 m^3 камня, вынутого при проходке туннеля. Под плотиной устроен зуб и цементационная завеса.

Общая длина всех туннелей, включая отводящие туннели и туннели, в которые уложены напорные трубопроводы ГЭС, составляет 30 км. Скала по трассам туннелей была хорошего

качества, поэтому, пользуясь новейшими методами проходки, норвежские строители везде добивались довольно гладкой поверхности стенок туннелей, не требовавшей ни зачистки, ни тем более облицовки. Обычный темп проходки был 35—40 м на забой в неделю, рекордной цифрой была проходка 51 м в неделю.

Большой объем скальных и земляных работ был выполнен при строительстве здания ГЭС, из котлована которой было вынуто 47 000 м³ земляного и 23 000 м² скального грунта.

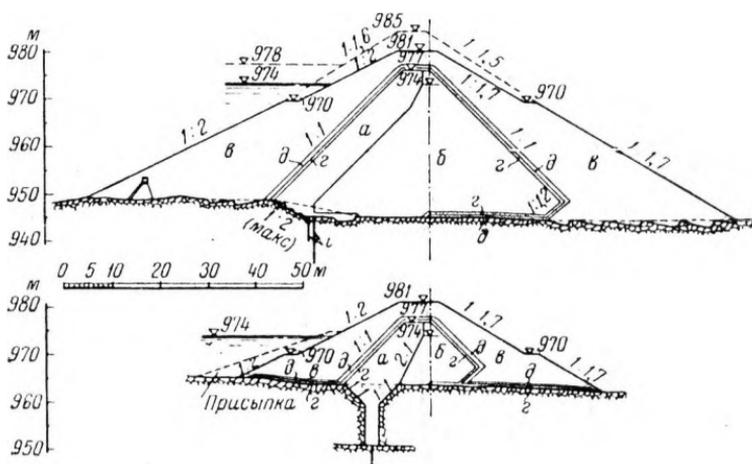


Рис. 8. Каменнонабросная плотина Страндеванн. Поперечный разрез

а — водонепроницаемый экран из морены; *б* — ядро из морены с включением крупного камня; *в* — каменная наброска (выработка из туннеля); *г* — гравий и мягкий грунт; *о* — крупный камень в фильтре.

Зарегулированный расход на ГЭС Хол 1 составляет 30 м³/сек, напор — 97 м. Ниже станции имеется несколько незарегулированных небольших притоков, что позволило рассчитать подземную ГЭС Хол 2 на максимальный расход 70 м³/сек при напоре 48 м. Гидроузел Хол 2 состоит из невысокой плотины, создающей бассейн суточного регулирования с площадью зеркала 1 км², деривационного туннеля длиной 400 м и сечением 50 м², напорного турбинного водовода и подземной ГЭС. В машинном зале станции установлен один агрегат с радиально-осевой турбиной. Непосредственно за машинным залом находится уравнивательная камера, от которой отходит необлицованный отводящий туннель длиной 600 м и открытый Канал 450 м, сбрасывающий воду в реку.

Работа ГЭС Хол 2 регулируется автоматически с пульта управления ГЭС Хол 1 с помощью телевизионной установки.

Такую же схему имеет и третья ГЭС каскада — Хол 3, отстоящая от Хол 2 на 4 км. ГЭС рассчитана на максимальный расход $75 \text{ м}^3/\text{сек}$, средний зарегулированный расход — $31 \text{ м}^3/\text{сек}$, остальной расход должны обеспечить выпадающие между Хол 1 и Хол 3 незарегулированные притоки.

Здесь также создано водохранилище суточного регулирования. Общая длина необлицованного подводящего туннеля и двух облицованных напорных шахт 5 км. В машинном зале установлено два агрегата с радиально-осевыми турбинами. Отводящий туннель 760 м и открытый канал 500 м направляют воду снова в русло реки.

Энергия, вырабатываемая каскадом станций Хол, передается в г. Осло по ЛЭП длиной 187 км. Эта линия явилась первой в стране линией с напряжением 220 кв.

Характерным для системы Хол является то, что почти весь напор использован на одной станции с большой установленной мощностью, а последующие значительно менее мощные станции каскада используют лишь остатки этого напора.

Однако иногда норвежские инженеры останавливают свой выбор на принципиально другой схеме каскада, при которой общий напор по возможности равномерно используется на ряде станций. Обычно при наличии нескольких крупных естественных озер, расположенных на разных отметках, такая схема, не требующая сооружения высоких плотин, проходки туннелей и каналов значительной длины, является более экономичной. По такой схеме в верховьях р. Намсен построен каскад трех ГЭС с общей установленной мощностью 193 мвт. Расходы р. Намсен на участке длиной 70 км зарегулированы и отводятся в систему трех соединенных между собой озер, при этом каждое озеро является водохранилищем для одной из ГЭС. Водосборная площадь той части реки, которая используется системой, составляет 2148 км^2 . Самая верхняя ГЭС построена на перепаде в 30 м между озерами Вектерен и Лиминген, и выработка ее составляет 70 млн. квт-ч/год. Вторая ГЭС расположена между озерами Лиминген и Тюннше, где перепад — 54 м. Установленная мощность ГЭС — 23 мвт, выработка — 116 млн. квт-ч/год. Третья ГЭС мощностью 145 мвт использует перепад в 230 м между озерами Тюннше и руслом р. Намсен и обеспечивает выработку 725 млн. /сет · ч/год. Нужно сказать, что самое большое зарегулированное оз. Лиминген имеет сток через государственную границу в Швецию. По специальному соглашению Швеция получила возможность использовать призму сработки 6 м, за что Норвегия получает от Швеции еще 100 млн. квт - ч/год.

В состав сооружений системы входит деривационный туннель длиной 3,53 км и сечением до 40 м², три здания ГЭС и большое число невысоких плотин, дамб и открытых каналов. Как правило, плотины этой системы — контрфорсные с плоской напорной плитой и теплоизолирующей стенкой. Строительные работы на р. Намсен были начаты в июле 1959 года и завершены осенью 1963 года.



Рис. 9. Схема гидроэнергетической системы Туке.

Нельзя не обратить внимание на то, что в последние годы норвежские инженеры стремятся к проектированию все более крупных и более сложных гидроэнергетических систем. Это объясняется, очевидно, успешной эксплуатацией уже существующих систем, с одной стороны, и желанием использовать менее удобные и считавшиеся ранее неэкономичными створы, с другой.

Самой крупной и сложной гидроэнергетической системой является в настоящее время система Туке. Когда строительство ее будет полностью завершено, семь станций с общей установленной мощностью 936 мвт будут вырабатывать ежегодно 4180 млрд. квт-ч, что составляет почти 10% от выработки электроэнергии в стране в настоящее время.

Система использует сток рек Винье и Туке, водосборная площадь которых равна 2000 км² и среднегодовой сток — 2456 млн. м³. Обе реки берут начало на юго-западе возвышенности Хардангервидда, текут в направлении к юго-востоку, пересекая большое количество озер и сливаются в 20 км от г. Дален (рис. 9).

Интересно, что если на р. Туке много удобных мест для создания водохранилищ и створов с большими падениями, то на р. Винье этого нет. Поэтому в основу технической схемы использования стока этих двух рек была положена идея создания крупных водохранилищ на р. Туке и переброска воды из верхней части бассейна р. Винье к местам максимально возможных напоров в бассейне р. Туке.

Для этого построено большое число туннелей, плотин, открытых каналов и др. (табл. 4). Как уже упоминалось, система включает семь ГЭС.

Таблица 4

Характеристика ГЭС энергосистемы Туке

Название ГЭС	Название реки	Год пуска в эксплуатацию	Установленная мощность, мвт	Выработка, млн. квт·ч	Объем водохранилища, млн. м ³	Стоимость гидроузла, млн. норв. крон
Туке 1	Туке	1964	400	2145	1660	377
Туке 2	Винье	1964	300	900	1619	202
Туке 3	Сонга	1964	120	500	717	122
Туке 4	Кьела	—	50	200	501	81
Туке 5	Бьерте	1968	20	110	52	23
Туке 6	Лио	1968	40	280	126	59
Туке 7	Хаукели	1957	6	45	31	—
Итого		—	936	4180	4706	—

Из табл. 4 видно, что три наиболее крупных станции, общая мощность которых составляет 820 мвт, уже находятся в эксплуатации. На самой мощной ГЭС системы Туке 1 создан напор 377 м. Гидроузел включает в себя бетонную водосливную плотину высотой 30 м и длиной 53 м, подводный туннель сечением 75 м², длиной 17 км и подземное здание ГЭС с четырьмя агрегатами по 100 мвт с радиально-осевыми турбинами.

Водосливная часть плотины выполнена в виде тонкой арки с переливом через гребень. Водосливное отверстие пролетом 15 м и высотой 5 м перекрыто сегментным затвором. Водоприемник ГЭС, выполненный в виде полуциркулярной перемишки, имеет 14 отверстий, расположенных на двух уровнях; отверстия перекрываются шандорами. Уравнительный резервуар состоит из двух камер: нижней и верхней. Камеры соединены вертикальной шахтой высотой 47 м. Нижняя камера, образо-

ванная путем увеличения высоты туннеля, перекрывается Катковым затвором, за которым идут под углом 45° две напорные шахты длиной по 510 м с металлической облицовкой и бетонной отделкой. Спираль турбины выполнена открытой на бетонных опорах.

Вторая ступень каскада создана тремя плотинами (две из которых незначительны по объему), туннелями общей длиной 17 км и подземной ГЭС мощностью 300 мвт. Основная каменнонабросная плотина Венемо имеет высоту 64 м и длину 235 м. Часть плотины — каменнонабросная, часть — насыпная, выполненная слоями по 1,0—1,5 м. Это — первая в Норвегии каменнонабросная плотина с асфальтовым экраном. Толщина экрана 15 см, площадь 12 000 м².

Водоприемник ГЭС оборудован тремя катковыми затворами. Подводящий туннель длиной 2850 м, сечением 90 м² имеет уравнительную шахту и делится за ней на три напорных трубопровода, облицованных стальными листами.

На станции установлены три радиально-осевые турбины по 104,3 мвт. Годовая выработка ГЭС составляет 0,9 млрд. квт-ч. Первый опыт эксплуатации ГЭС показал, что станция с успехом может покрывать пиковые нагрузки. Поэтому станция будет работать лишь 3100 часа в год. ГЭС Туке 3 на р. Сонга получает воду из водохранилища, создаваемого самой большой по объему каменнонабросной плотинной высотой 42 м и длиной 1030 м с ядром из моренных грунтов. Подводящий туннель ГЭС имеет сечение 39 м² и длину 8630 м.

В здании ГЭС Туке 3 установлен один агрегат 120 мвт с радиально-осевой турбиной при расчетном напоре 264 м. Турбинный водовод выполнен в виде напорной шахты диаметром 3,1 м с металлической облицовкой и бетонной отделкой.

Из-за суровых климатических условий строительство самой северной ГЭС Туке 3 проводилось лишь в течение 4—5 месяцев в году. Однако благодаря использованию самого современного оборудования основной объем работы был выполнен здесь в три года. Таковы три основные ступени каскада Туке.

Строительство здания ГЭС Туке 4 пока отложено. Несколько контрфорсных плотин высотой 9—25 м, регулирующих сток, а также основная плотина высотой 41 м и вспомогательная высотой 24 м уже возведены.

В 1965 году начато сооружение еще двух ГЭС: Туке 5 и Туке 6. Ввод их в эксплуатацию намечен на 1968 год. Что касается ГЭС Туке 7, то она была построена для электроснабжения строительства ГЭС Туке 1 и находится в эксплуатации уже несколько лет. Строительство этой системы предусматривает прокладку большого числа линий электропередач и сооружение нескольких подстанций.

Система Туке, которая должна полностью вступить в строй в 1971 году, имеет исключительно большой объем работ по проходке туннелей и строительству плотин. В целом система будет самой крупной гидроэнергетической системой Норвегии. Она будет включать более 30 плотин и 100 км туннелей. Рекордными для страны являются ГЭС Туке 1 (по мощности), каменно-набросная плотина Сонга (по объему), подводный туннель ГЭС Туке 1 (по длине).

Широкое проектирование и строительство гидроэнергетических объектов в Норвегии продолжается особенно в юго-западной части страны. В 1968—1969 гг. здесь будет закончено строительство энергетического комплекса Рельдаль—Сулдаль, включающий несколько плотин, три туннеля значительной длины, большое количество коротких туннелей и пять ГЭС общей установленной мощностью 450 мвт с годовой выработкой 2,2 млрд. квт-ч. В период 1975—1980 гг. должны быть построены ГЭС Улла-Ферре, Флом, Лердаль и ряд ЛЭП напряжением 400 кв.

В эти же годы должны быть закончены все четыре этапа строительства схемы Сира-Квина, полностью использующей гидроресурсы двух рек и включающей десять водохранилищ, плотины, туннели и десять ГЭС общей мощностью 1360 мвт. Таким образом, в энергетическом строительстве Норвегии четко прослеживается тенденция использования гидроэнергоресурсов в объединенных системах с помощью соединительных туннелей и каналов, крупных регулирующих верховых и низовых водохранилищ и строительства большого количества подземных ГЭС.

III. ПОДЗЕМНЫЕ ГЭС НОРВЕГИИ

Строительство подземных ГЭС, начатое еще 40 лет назад, ведется так же интенсивно, как и в соседней Швеции. Особенно широко развернулось оно в последнее время; примерно половина ГЭС, построенных в стране после войны, подземные. В настоящее время находится в эксплуатации уже более 30 сравнительно крупных подземных ГЭС общей мощностью 1500 мвт, строится еще 12 подземных ГЭС мощностью 900 мвт. Список крупных ГЭС и их основные характеристики приведены в табл. 5.

Широкое строительство гидроэлектростанций подземного типа объясняется, в первую очередь, хорошими геологическими условиями и соображениями экономического порядка, а затем уже военного. Опыт строительства и эксплуатации подземных ГЭС как в Норвегии, так и в других странах показал их зна-

чительные преимущества в сравнении с наземными ГЭС, особенно в северных районах. К основным преимуществам подземных ГЭС следует отнести:

1. Спокойные условия эксплуатации гидростанций в зимнее время (забор воды в напорные водоводы из-под поверхностного льда, отсутствие льда и шуги в отводящем туннеле, постоянство температурных условий для затворов и трубопроводов).

2. Уменьшение капиталовложений в строительство гидроузла за счет сокращения общих сроков строительства благодаря круглогодичному производству работ во всех подземных сооружениях и возможности использования горных выработок на строительстве наземных сооружений.

3. Долговечность подземных сооружений, снижающая расходы на эксплуатацию и ремонтные работы.

4. Защищенность водопроводящих сооружений и самой гидроэлектростанции от камнепадов, снежных лавин и обвалов.

5. Защищенность ГЭС в военное время.

Наличие в большинстве случаев в районах строительства прочной скалы, что позволяет прибегать к облицовке стенок и свода туннелей только в исключительных случаях, и возможность использования вынутого при горных выработках камня на строительстве плотин обеспечивают в условиях Норвегии значительно большую экономию средств и сокращение сроков строительства на подземных ГЭС в сравнении со стоимостью и сроками строительства аналогичных сооружений в других странах. Это справедливо даже в том случае, когда в стоимость подземной ГЭС включается стоимость вентиляционной системы и увеличенные транспортные расходы по доставке оборудования.

Основным типом подземной ГЭС, получившим распространение в Норвегии, в отличие от подобных сооружений, например, в Швеции, является ГЭС со значительным по длине деривационным трактом и сравнительно коротким отводящим туннелем. По такому типу построены наиболее крупные станции: ГЭС Мор — подводный туннель 17,5 км сечением 22 м², ГЭС Аура (16 км, 22 м²), Рессага (8 км, 64 м²) и другие, а также гидроузел Винстра (23,7 км, 30 м²), который можно считать наиболее типовым примером подземной ГЭС Норвегии.

Гидроузел расположен на р. Випстра вблизи слияния ее с р. Лаки, в 260 км к северу от г. Осло и состоит из двух подземных ГЭС.

Водосборная площадь р. Винстра (1290 км²) включает в себя несколько естественных озер, три из которых, подпертые не-

высокими и простыми по конструкции плотинами, образуют водохранилища общей емкостью 625 млн. м³. Озеро Ольстаппен

Таблица 5

Подземные гидроэлектростанции
(мощность больше 30 тыс. квт)

Год пуска	Название ГЭС	Мощность,	Напор, м
1953 } 1956 }	Аура	128 } 168 }	778
1958	Балми	36	155
1960	Багн	44	89
1951	Диньянфосс	33	80
1946	Фискумфосс	39	34
1960	Фортун	108	997
1959	Хемсил 1	59	538
1959	Хемсил 2	76	368
1958	Яртдола	104	587
1957	Хол 3	60	97
1957	Хаверстад	70	82
1960	Иннсет	90	177
1950	Канефосс	64	70
1951	Люсе 1	90	632
1959	Люсе 2	80	632
1954	Мор	180	821
1955	Матре	{ 96 86	{ 520 465
1960	Неа	140	374
1957	Рьюкан 4	35	49
1955	Рессага Нижняя	120	243
1961	Рессага Верхняя	150	131
1957	Стейнфоссен	46	58
1958	Свелгфосс	90	68
1952	Тафьорд 2	42	398
1955	Тинфос 1	38	40
1963	Тукс 1	400	377
1945	Тюин	168	1064
1955	Винстра Нижняя	200	448
1959	Винстра Верхняя	140	328
1951	Абьера	91	429

емкостью 300 млн. м³ является водоприемным. Оно перекрыто контрфорсной плотиной с плоской напорной плитой (рис. 10). Строительство этой плотины было закончено в начале 1955 года. Высота плотины 15 м, длина по гребню 165 м. На плотине устроен водослив для пропуска паводковых расходов и спе

циальная секция, перекрытая секторными затворами, для сплава леса. При полной зарегулированности стока и максимальной нагрузке расход на первой ГЭС Нижняя Винстра составляет $56 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Вода из водохранилища Ольстаппен направляется к зданию этой подземной ГЭС по длинному подводящему туннелю, за-

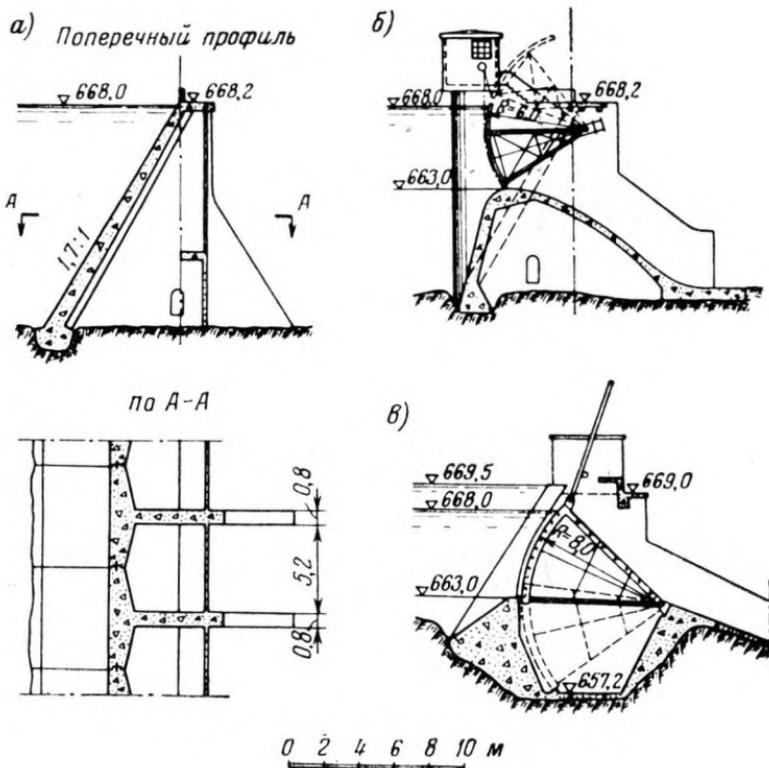


Рис. 10. Плотина Ольстаппен

а—контрфорсная секция; б— водосливная секция; в— лесосплавная секция.

канчивающемуся в уравнительном резервуаре. Резервуар включает нижнюю распределительную камеру, две вертикальные шахты, облицованные железобетоном, длиной по 72 м и верхнюю открытую камеру, расположенную на склоне горы. Максимальный объем нижней камеры 500 м^3 , объем открытой верхней камеры 8000 м^3 .

От уравнительной шахты отходят два трубопровода, вход в которые перекрыт сороочистительными решетками. Каждый

трубопровод, кроме двух решеток, снабжен двумя дроссельными затворами, рассчитанными на напор 55 м.

Длина туннеля для трубопроводов от камеры затворов до подземной ГЭС — 710 м (рис. 11). Верхняя половина туннеля имеет уклон 1:2, нижняя — 1:1. Диаметр и толщина стенок трубопроводов также меняется. Если диаметр верхнего конца трубопровода равен 2,6 м, а толщина стенок 10 мм, то у нижнего конца — 2,0 м и 45 мм. Непосредственно перед ка-

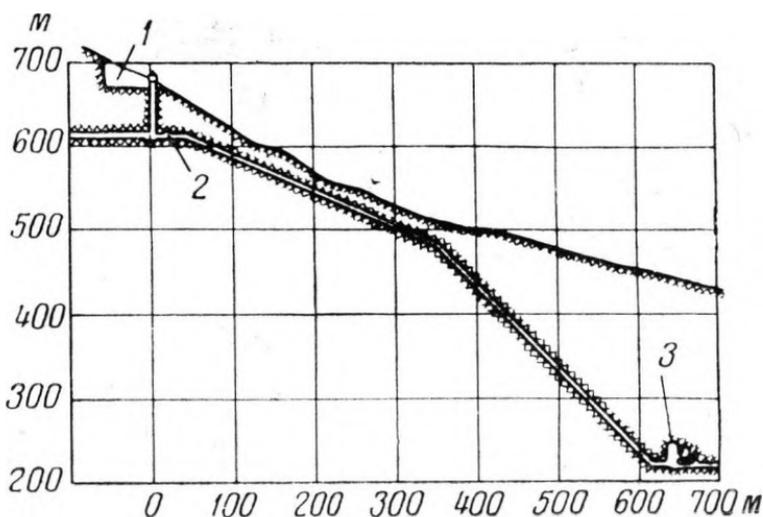


Рис. 11. Продольный профиль напорного трубопровода ГЭС Нижняя Винстра

1—уравнительный резервуар; 2—камера затворов; 3— подземный машинный зал.

мерой ГЭС каждый трубопровод разветвляется на две подводящие трубы диаметром по 1,3 м каждая. Машинный зал ГЭС Нижняя Винстра находится на значительной глубине от поверхности земли. Обычно толщина слоя от свода подземной камеры до дневной поверхности должна в два раза превышать высоту выработки для камеры ГЭС. Здесь эта толщина более 300 м.

По экономическим соображениям подземная камера ГЭС Нижняя Винстра на 1 км вдвинута в скалу (если смотреть справа налево, со стороны отводящих сооружений). Это объясняется тем, что склон горы у подножья очень пологий и при меньшей длине отводящего туннеля возникала необходимость увеличить подводящий туннель, что кроме дополнительных по-

ть напора повлекло бы за собой и дополнительные расходы. Машинный зал станции имеет длину 80 м, ширину 14 м и высоту 25 м.

ГЭС Нижняя Винстра имеет общую установленную мощность агрегатов, равную 200 мвт. Радиально-осевые турбины, установленные на станции, рассчитаны на напор 420 м. Это максимальный в Норвегии напор таких турбин.

При полной нагрузке турбины ГЭС имеют 500 об/мин, что на 3—4% больше, чем скорость, которую при той же нагрузке и напоре имеют струйно-ковшовые турбины. Поэтому к. п. д. высоконапорных радиально-осевых турбин на 2—3% выше к. п. д. струйно-ковшовых турбин. Это успешно использовано на ГЭС Аура, где напор 390 м. Эксплуатация ГЭС Винстра в течение трех лет показала, что радиально-осевые турбины хорошо работают и при напоре до 420 м.

В зале установлен также небольшой агрегат с горизонтальной струйно-ковшовой турбиной для покрытия собственных нужд станции.

Потолок машинного зала — обычного для Норвегии типа: бетонная арка с ребрами жесткости, отстоящая на 1 м от скалы и поддерживаемая вертикальными опорами, расположенными вдоль стен машинного зала. Между опорами возведены легкие кирпичные стенки с проемами.

Пульт управления станции находится в одном из концов машинного зала. Через его стеклянные окна и двери хорошо виден весь зал.

От станции, кроме отводящего туннеля длиной 1000 м и сечением 30 м², отходят транспортный туннель таких же параметров и туннель для электрокабеля. Туннель для кабеля длиной 1200 м, сечением 9,5 ж² направлен под углом к двум первым и выходит на поверхность к подстанции, откуда начинается линия электропередачи.

Как и на многих других подземных ГЭС, построенных в Норвегии в последние годы, трансформаторный зал ГЭС Нижняя Винстра расположен параллельно машинному залу в подземной камере. В результате каждый генератор соединяется с трансформатором кабелем незначительной длины, что, кроме экономии кабеля, дает и лучшие условия эксплуатации.

Вентиляционная установка обеспечивает подачу свежего воздуха через транспортный туннель во все подземные помещения ГЭС в объеме 50 000 м³/ч.

ГЭС Нижняя Винстра была пущена в эксплуатацию на полную мощность в 1958 г. Среднегодовая выработка электро-

энергии составляет 1000 млн. *квт-ч* при работе 5400 *ч/год*. Однако после пуска станции более 300 м падения реки в верхнем течении оставались еще не использованными. Поэтому сразу же после Нижней Винстры было закончено строительство второй подземной ГЭС — Верхняя Винстра, общий объем водохранилищ которой составляет около 620 млн. m^3 . Деривация ГЭС включает бетонный водовод длиной 110 м сечением 25 m^2 , железобетонный водоприемник, облицованную напорную вертикальную шахту глубиной 20 м и напорный деривационный туннель длиной 7,5 км, сечением 32 m^2 , облицованный только на отдельных участках (300 м). Последние 2 км туннеля по геологическим условиям выполнены в виде дюкера, заглубленного на 50 м и заканчивающегося уравнильной шахтой сечением 19 m^2 , которая имеет верхнюю и нижнюю камеры.

В Норвегии насчитывается уже более 10 станций, где пройденные в крепкой скале и предназначенные для напоров до 140—150 м и выше напорные шахты успешно работают без облицовки. Следует заметить, что в последние годы бетонная облицовка напорных шахт выполняется лишь при низких напорах и там, где встречается слабая, трещиноватая скала.

Необлицованная напорная шахта ГЭС Верхняя Винстра длиной 520 м и сечением 7,1 m^2 ведет к подземному машинному залу размерами 49X14X31 м, где установлено два вертикальных агрегата общей мощностью 130 *мвт* с радиально-осевыми турбинами, работающими под напором 320 м и имеющими мощность по 68 тыс. *квт* — самую высокую для Норвегии.

От машинного зала отходят отводящий туннель длиной 897 м, сечением 40 m^2 и транспортный туннель такой же длины сечением 27,6 m^2 , в котором проходят также кабели для подстанции, находящейся на поверхности. Помещение для трансформаторов, как и на ГЭС Нижняя Винстра, расположено в подземной камере рядом с машинным залом.

Такова одна из энергетических систем Норвегии, общей установленной мощностью 310 *мвт*.

В состав гидроузла Нижняя Винстра входит один из самых длинных энергетических туннелей в Европе длиной 23,7 км. Его проходка, так же как и проходка многих других крупных туннелей в стране осуществлялась по так называемому шведскому методу. Метод предусматривает проходку сначала передовых забоев высотой 2,5 м в нижней части, а затем ступенями разработку подсводчатой части туннеля (рис. 12).

Проходка туннеля ГЭС Нижняя Винстра (1959 г.) осуществлялась из десяти забоев, устроенных в пяти промежуточных

штольнях и из двух торцевых забоев в три смены бригадами, состоящими из пяти рабочих и одного бригадира.

Цикличность работ по проходке была следующей: в первую смену рабочие облегченными бурами с платформы на пневмоходу бурили скважины длиной 2 м в передовом забое и длиной 4 м в подсводчатой части. Во вторую и третью смены проводилась отвалка, погрузка и вывозка породы. Погрузка производилась специальными погрузчиками в вагонетки емкостью

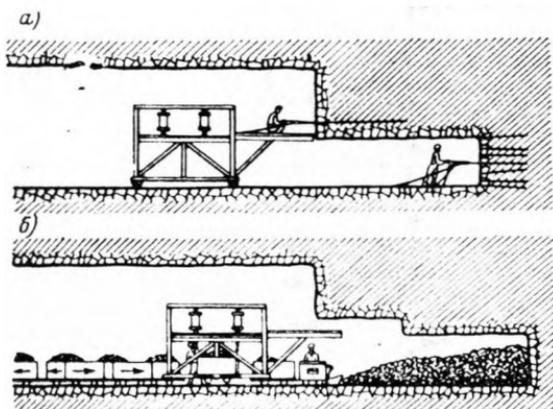


Рис. 12. Схема проходки туннеля по шведскому методу

а—бурение шпуров; б—взрывание и вывозка породы.

1,8 м³. С помощью несложного подъемного устройства заполненная вагонетка перемещалась с одного пути на другой (рис. 13), по которому локомотив вывозил состав вагонеток на поверхность. Всего из туннеля было вынута 721 тыс. м³ скальной породы. Средняя проходка на забой составила 25 м в неделю.

6% от общей длины туннеля было пройдено в слабой скале. Стенки туннеля на этих слабых участках были укреплены железобетонной облицовкой. Нужно отметить, что в отдельных случаях вместо облицовки слабые участки туннелей крепятся в последнее время специальными болтами, вцементированными в скалу, что дает значительную экономию средств.

По завершению проходки туннеля все штольни были отделены от него бетонными заглушками. В одну из заглушек вставлена короткая труба диаметром 1,8 м, закрытая крышкой. При необходимости труба может быть использована для доступа в туннель с целью осмотра и ремонта его.

При проектировании и строительстве подводящих трактов особое внимание уделяется вопросу снижения гидравлических потерь; этому служит прежде всего сокращение общей длины трубопроводов. Кроме того, тщательно рассчитывается расположение и глубина скважин в забое, количество взрывчатки и последовательность взрывов. Качественное выполнение взрывных работ стимулируется тем, что по новым правилам подрядчик получает на «длинных туннелях» премию пропорциональ-

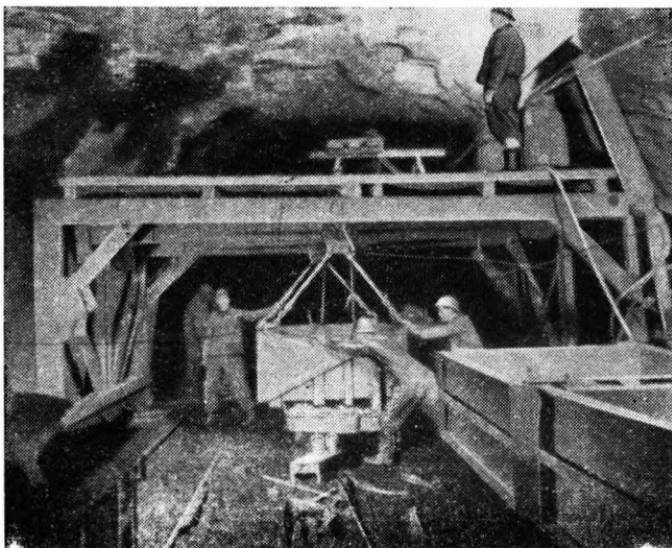


Рис. 13. Общий вид платформы.

но уменьшению гидравлических потерь. Все это приводит к тому, что стенки будущего туннеля после каждого взрыва получаются обычно достаточно гладкими, не требующими никакой зачистки и облицовки.

Обратный свод туннеля часто имеет бетонное или асфальтовое покрытие для движущегося по туннелю во время строительства транспорта, что также способствует впоследствии снижению гидравлических потерь в туннеле.

Шведский метод проходки туннелей, предусматривающий использование легкого бурового оборудования с ручным управлением, нашел в условиях Норвегии (твердая и однородная скала: гнейсы, граниты, кварциты, иногда сланцы) очень широкое применение благодаря тому, что он обеспечивает высокие темпы проходки и дает значительную экономию.

Для равномерной и полной загрузки всех рабочих каждый из них должен участвовать во всех операциях: бурении, зарядке шпуров, взрывных работах, вентиляции, уборке и транспортировке породы.

С этой целью рабочий осваивает не одну, а все специальности, связанные с проходкой туннеля, что безусловно повышает его квалификацию. Это в свою очередь повышает затраты на рабочего. В результате в настоящее время затраты на одного рабочего в этих работах составляют около 50 000 норвежских крон в год (сюда входит заработная плата, содержание административного аппарата и социальные расходы).

Таким образом, шведский метод требует высококвалифицированной рабочей силы и в этом заключается один из его недостатков. Кроме того, он становится со временем все более и более дорогим по мере продвижения строительства гидростанций в отдаленные северные и малонаселенные районы страны и по мере роста заработной платы рабочих.

Вот почему уже целый ряд крупных туннелей строится по новому методу, разработанному норвежскими инженерами, предусматривающему проходку туннелей с помощью тяжелого бурового оборудования. Под тяжелым оборудованием имеются в виду буровые станки с диаметром буровой коронки 10—12 см, смонтированные на вылете специальной стрелы-консоли с гидравлическим приводом, передвигающейся либо на колесной тележке, либо на гусеничном шасси (рис. 14).

Практика показывает, что проходка туннелей тяжелым буровым оборудованием обеспечивает большую экономичность и более быстрые темпы проходки. Установлено, что объем работ, выполняемый по шведскому методу двенадцатью рабочими с довольно сложных буровых платформ на пневматическом ходу, оборудованных 10—12 облегченными буровыми станками, может быть выполнен по новому методу за тот же срок тремя рабочими с помощью четырех тяжелых буровых аппаратов. (Следует оговориться, что метод предусматривает передачу работ по транспортировке взорванной породы другой организации).

Новый метод был успешно использован на строительстве подводящего туннеля ГЭС Рельдаль длиной 12 км, площадью поперечного сечения 40 м². Здесь неоднократно превышались рекорды скандинавских строителей по скорости проходки несмотря на то, что проходка шла в исключительно твердом граните. Средняя недельная проходка составляла 70 м, максимальная недельная проходка — 86,5 м. Скорость бурения, отнесенная к буровой единице, была 20 см/ч.

Число человеко-часов, затраченных на 1 м³ выемки туннеля для рабочих, работающих под землей —0,18 (или 0,44, если сюда включить персонал мастерских и подсобных рабочих на почасовой оплате). Общее число человеко-часов на 1 погонный метр туннеля составило 17,8.

Такие хорошие результаты стали возможны лишь благодаря мощному надежному оборудованию и хорошей организации труда. О хорошей организации труда говорит хотя бы тот факт,

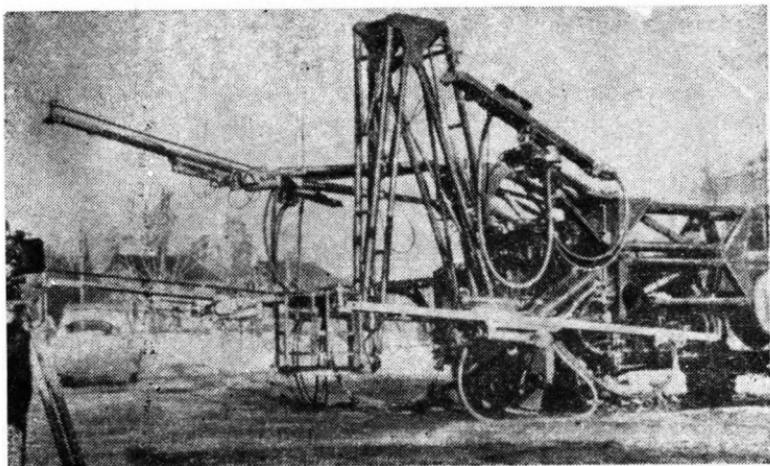


Рис. 14. Буровая установка для проходки туннелей по методу, разработанному норвежскими инженерами.

что время простоя оборудования составило меньше 2%, а для бурового оборудования — менее 1%. Проходка осуществлялась в три смены при двух сменах в субботний день.

Этот метод, однако, не лишен недостатков. Во-первых, передача работ по транспортировке породы другой транспортной организации ставит строителей в некоторую зависимость от этой организации. Во-вторых, при этом методе очень трудно добиться более или менее гладких стен и свода туннеля. Вот почему пока еще приходится комбинировать использование тяжелого бурового оборудования с использованием облегченных буровых аппаратов.

Работа над совершенствованием метода продолжается, поскольку норвежские инженеры считают его весьма перспективным.

IV. ПЛОТИНЫ НОРВЕГИИ

Характер современного плотиностроения Норвегии сложился под воздействием ряда специфических особенностей, таких как краткая продолжительность строительного сезона, низкие температуры окружающего воздуха в течение зимы, большое количество удобных створов, наличие прочной скалы, высокая агрессивность воды, транспортные трудности и др. Эти особенности определяются главным образом топографическими, климатическими и геологическими условиями страны.

Действительно, больше чем полгода (с октября по май) на территории страны преобладает морозная погода. Температура во внутренних районах страны неделями держится -20°C , а иногда опускается до -40°C .

В прибрежных районах Северного моря не так холодно, но здесь наблюдаются более резкие колебания температур: от -30°C до 0°C на возвышенных участках и от -20°C до $+10^{\circ}\text{C}$ в понижениях.

Горный рельеф Норвегии с узкими каньонами различной глубины и формы является очень благоприятным для возведения плотин, особенно если учесть, что горы сложены из прочной скалы. Однако, с другой стороны, вследствие такого рельефа страна располагает очень слабо развитой сетью грунтовых и железных дорог, что весьма затрудняет транспортирование стройматериалов и оборудования.

Вода практически во всех реках и озерах минерализована, т. е. имеет высокое содержание кислот (величина рН 5,6—6,5).

Относительно широкое строительство плотин в Норвегии началось с 1900 г. В 1905—1925 гг. было построено много массивных бетонных плотин, в том числе довольно высокие: Брекке (40 м), Рингедал (35 м), Сольбергфос (45,5 м), Тунховд (40 м). На строительстве таких плотин применялся очень тощий бетон, технология приготовления которого была достаточно примитивной. В результате агрессивность воды и суровые климатические условия вызвали их серьезные повреждения, а иногда и полное разрушение. Так случилось с гравитационной плотиной Месватн, построенной в 1903—1906 гг. Вследствие низкого качества бетона плотина в течение короткого времени разрушилась, и уже в 1908 г. в том же створе пришлось строить новую плотину.

В условиях сурового климата и значительной агрессивности воды необходимо было применять жирный бетон с высоким содержанием цемента. Однако укладка такого бетона в массивную гравитационную плотину, как известно, сопровождается чрезвычайно нежелательным резким подъемом температуры

в бетоне. Кроме того, зональная укладка бетона в сравнительно низких массивных плотинах оказалась неэкономичной. Все это сделало тип массивных гравитационных плотин неприемлемым для Норвегии.

Вот почему здесь получили большое распространение легкие железобетонные плотины: контрфорсные и арочные. И те и другие характеризуются высоким содержанием цемента в бетоне, большой степенью армирования, наличием с нижней стороны теплоизолирующей стенки для защиты от мороза и для снижения температурных напряжений в бетоне.

В широких створах обычно строятся контрфорсные плотины высотой до 20—25 м. Для плотин, превышающих 20—25 м, применяют типы арочных и многоарочных плотин.

Строительство арочных и контрфорсных плотин отличается от строительства плотин других типов большим объемом опалубочных работ и слабой механизацией основных строительных операций. Поскольку древесина в Норвегии — сравнительно дешевый материал, здесь повсеместно используется деревянная опалубка. Однако в последние годы наблюдается повышение цен на стройматериалы и древесину. Именно поэтому норвежские инженеры работают в настоящее время над совершенствованием конструкций плотин и разработкой новых методов строительства, о чем подробнее будет сказано ниже.

8. Контрфорсные плотины с плоской напорной плитой

Самым распространенным типом плотин в Норвегии являются контрфорсные плотины с плоской напорной плитой (рис. 15, 16). Они строятся на скальных основаниях в широких

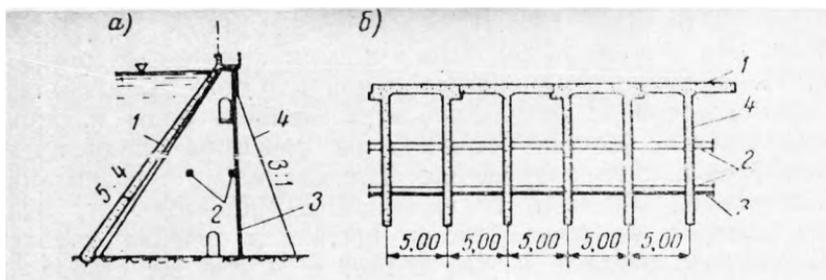


Рис. 15. Типовая конструкция норвежской контрфорсной плотины

η — поперечный разрез; б — горизонтальный разрез;
1 — напорная наклонная плита; 2 — продольные балки-связи; 3 — теплоизолирующая стенка; 4 — контрфорс.

створах незначительной глубины. Первая такая плотина Фьерген была построена в 1916 году.

Железобетон как строительный материал был тогда еще новым, технология его приготовления была весьма несовершенной, тем не менее плотина до сих пор находится в хорошем со-

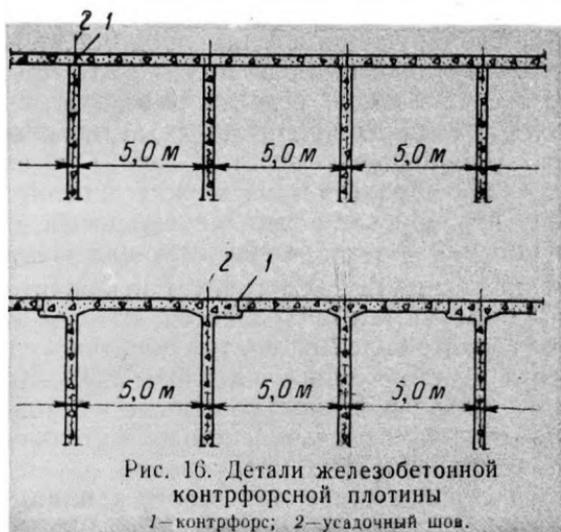


Рис. 16. Детали железобетонной контрфорсной плиты
1—контрфорс; 2—усадочный шов.

стоянии. Поэтому неудивительно, что строительство контрфорсных плотин с плоской напорной плитой развернулось в последние годы очень широко.

В большинстве случаев плотины с плоской напорной плитой имеют высоту до 25—30 м и длину по гребню 200—300 м. Расстояние между контрфорсами обычно 5 м, толщина у гребня 30 см. Толщина напорной плиты увеличивается вниз по вертикали на 3 см на каждый метр. Контрфорсы заглубляются в основание не более, чем на 0,3—0,5 м, лишь в отдельных случаях возникает необходимость заглублять основание больше. В основании контрфорса всегда устраиваются штрабы для того, чтобы лучше передать усилие скале. В исключительных случаях в основании контрфорса проводится цементация.

Плита бетонируется как монолит от основания до гребня и жестко соединяется с верхней стороной контрфорсов. Уклон плиты обычно принимается равным 5:4.

Верхняя часть плиты переходит у гребня в вертикальный парапет, рассчитанный на восприятие ледовой нагрузки, которая бывает весьма значительной.

Суровые зимние условия Норвегии вызывают необходимость в теплоизолирующей стенке, защищающей низовую грань плотины. Назначение ее заключается в том, чтобы создавать воз-

душную прослойку между низовой гранью и окружающим воздухом и обеспечивать на низовой грани плотины температуру выше 0°C при наполненном водохранилище. Иногда в этом воздушном пространстве устанавливаются электрические обогреватели или подается горячий воздух от генераторов ГЭС.

Как правило, изолирующая стенка представляет собой железобетонную конструкцию, которая может быть массивной или сборной из отдельных блоков. Иногда вместо железобетонной стенки возводится стенка из пропитанных антисептиками деревянных брусьев. Небольшие отверстия (окна) в стенке обеспечивают вентиляцию пространства между плитой и стенкой в жаркую погоду и пропускают свет, необходимый для осмотра низовой грани плотины и внутренней стороны стенки.

Повышенная кислотность воды требует исключительно прочного бетона, именно этим и объясняется высокое содержание цемента в бетоне контрфорсных плотин. Обычно удельное содержание цемента в бетоне напорной плиты 350—400 кг; в бетоне контрфорса— 300 кг и несколько меньше в бетоне теплоизолирующей стенки. Из-за небольшой продолжительности строительного сезона и транспортных затруднений объем бетона на каждой отдельной стройке стремятся свести к минимуму. В результате, если сравнить количество бетона, необходимого для строительства массивной плотины и контрфорсной с плоской напорной плитой, то при высоте до 15 м для контрфорсной плотины требуется $\frac{1}{3}$ того объема бетона, который был бы необходим для возведения массивной плотины (рис. 17). При высоте свыше 15 м это соотношение несколько уменьшится.

Расчет плоской напорной плиты сравнительно прост. Плита рассчитывается как неразрезная. Швы расположены в местах стыков плит различной толщины. В тех случаях, когда у основания плиты возникают растягивающие напряжения, нижние участки плиты армируются.

Небольшие растягивающие напряжения могут возникнуть в плите и у гребня. Здесь также можно применить арматуру. Арматура укладывается также для того, чтобы она смогла воспринять все напряжения, возникающие в результате колебаний температуры окружающего воздуха, и усадочные усилия на гранях. Верхняя часть плиты, как отмечалось ранее, рассчитывается с учетом давления льда, это имеет немаловажное значение в определении толщины плиты. Величина давления льда принимается 5 т на погонный метр.

В контрфорсах допускаются небольшие растягивающие напряжения. Сжимающие напряжения не должны превышать 15 кг/см^2 .

Благодаря наличию теплоизолирующей стенки температура в контрфорсе меняется по направлению от верховой грани к низовой, так как низовая грань контрфорса подвергается воздействию мороза в зимнее время. По этой причине на низовой грани контрфорса возникают растягивающие усилия и могут образоваться трещины.

При расчете контрфорсных плотин с плоской напорной плитой противодавление обычно не учитывается. В отдельных слу-

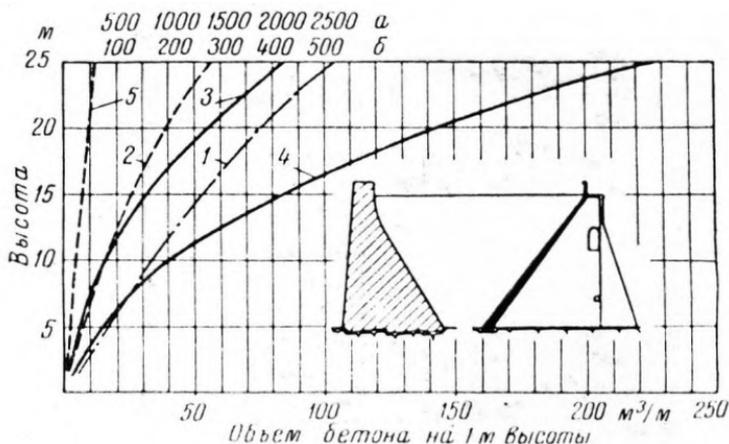


Рис. 17. Сравнение объемов бетона, количества арматуры и опалубки в гравитационной и контрфорсной плотинах

a — количество арматуры, т/м; b — количество опалубки, м²/м;
контрфорсная плотина: 1 — арматура; 2 — опалубка; 3 — бетон;
гравитационная плотина: 4 — бетон; 5 — опалубка.

чаях, когда скала в основании имеет трещины и возникает значительное противодавление, последнее необходимо принимать во внимание.

9. Арочные и многоарочные плотины

Начиная с 30-х годов створы для арочных плотин выбирают в узких глубоких каньонах, где отношение ширины к высоте плотины равно 3—4, в исключительных случаях — не более 7. Это дало возможность строить легкие железобетонные арочные плотины 50 м и выше. Створы для таких плотин можно подразделить на четыре категории:

1. Створ U-образной формы, крутые склоны которого служат береговыми устоями плотины на всю ее высоту.

2. Створ U-образной формы, в основании которого река вымыла слабую породу. При сооружении плотины в таком створе эта размывная часть, как правило, заполняется бетоном, тем

самым создается цоколь (седло) арки. Если на участке створа обнаружен сброс, то в таких случаях в грунт забивается шпунт. Проводится также укрепительная цементация.

3. Створ V-образной формы, резко расширяющийся в верхней части. В этом случае в центральной части створа возводится арочная плотина, сопряжение ее со склонами долины с обеих сторон (в некоторых случаях с одной) осуществляется

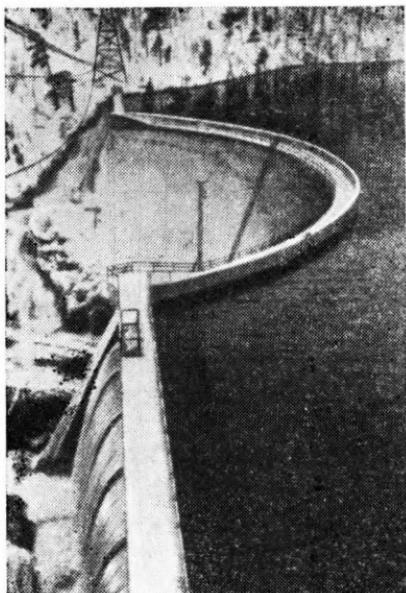


Рис. 18. Общий вид плотины Ватнедал.

либо контрфорсной плотиной, либо земляной плотиной, в отдельных случаях — массивной гравитационной стенкой. Такая комбинация плотин в одном створе безусловно усложняет строительство, но зато создает хорошие условия для работы арки. Отказ от длинной относительно пологой арки и замена ее несколькими плотинами позволяет использовать преимущества арки с малым радиусом: арка может быть значительно тоньше и легче. Примером такой комбинации является плотина Ватнедал (рис. 18).

4. Широкий створ с отлогими стенками, удобный для сооружений многоарочных плотин.

Практика эксплуатации железобетонных арочных плотин позволяет утверждать, что при соответствующем створе арочная плотина — это наиболее удачное решение по сравнению со всеми другими типами плотин как с точки зрения запаса прочности сооружения, так и с точки зрения распределения напряжений в нем.

Примером арочных плотин Норвегии могут служить плотины Юванн и Слеттедален. Они имеют следующие основные характеристики:

	Юванн Слеттедален	
Максимальная высота, м.....	47	70
Длина плотины по гребню, м.....	120	180
Радиус кривизны арки у гребня,	53	68
Радиус кривизны арки у основания, м	27	19
Толщина арки (от гребня к основанию), м 1,2—3,6		1,4—4,3
Объем бетона в теле арки, м ³	14000	25000

Заметим, что в то время как арка плотины Слеттедален опирается непосредственно в скальные берега реки, арка плотины Юванн сопрягается с берегами с помощью контрфорсных открьлков. Со стороны нижнего бьефа обе плотины защищены теплоизолирующей стенкой из сборных бетонных плит. Теплоизолирующая стенка на контрфорсной плотине опирается на контрфорсы, в арочных плотинах для этой цели служат специальные опоры, поставленные на низовую грань плотины на

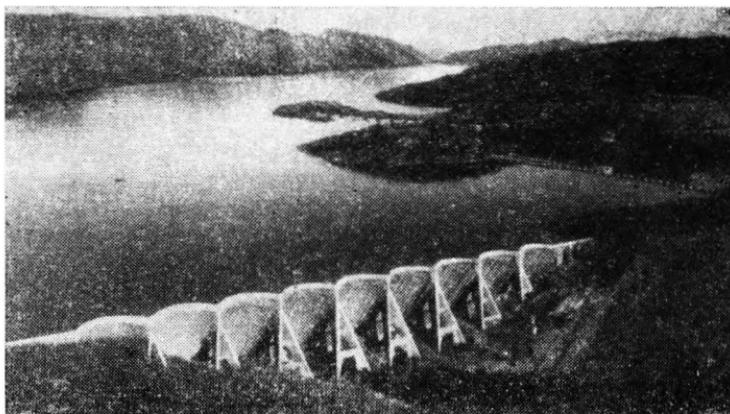


Рис.. 19. Общий вид плотины Нованн.

расстоянии 4—5 м одна от другой по горизонтали и вертикали. На этих опорах часто устраивается смотровой мостик. На плотине Юванн стенка возведена из плит размерами 1,5х5 м.

В качестве примера многоарочной плотины приведем плотину Нованн, максимальная высота которой 28 м и длина по гребню 162 м. Наклон напорной грани арки — 5:4. Контрфорсы плотины имеют толщину 75 см и отстоят друг от друга на 18 м. Ниже оголовка контрфорсы расходятся под углом на две стенки, благодаря чему они могут воспринимать значительные боковые усилия (рис. 19). Напорный фронт плотины не имеет ни вертикальных, ни горизонтальных усадочных швов, так как упругость арок обеспечивает распределение напряжений по всей длине плотины. В каждом же контрфорсе имеется вертикальный усадочный шов. Со стороны низовой грани плотина защищена деревянной теплоизолирующей стенкой. Между стенкой и низовой гранью плотины проходят два смотровых мостика с проходами через стенки контрфорсов (рис. 20).

Как правило, арочные плотины возводятся вертикальными блоками, длина которых по верховой грани равна обычно 8,5 м. Блоки отделяются один от другого зубчатыми усадочными швами шириной 1,5 м. Каждый блок бетонируется непрерывно от основания до гребня, за исключением тех блоков, высота которых превышает 22,5 м и в которых устраивается горизонтальный шов. Перед укладкой нового слоя бетона поверхность предыдущего тщательно насекается и промывается.

Подбору состава бетона для тонкостенных арочных и многоарочных плотин, особенно тех, которые находятся в тяжелых климатических условиях и подвергаются воздействию агрессивной воды, уделяется большое внимание. Допускаемая минимальная прочность бетонного цилиндра на сжатие в возрасте 28 дней 230 кг/см^2 .

Удельное содержание цемента в бетоне норвежских арочных плотин обычно равно 350—400 кг. Столь высокое содержание цемента обуславливает высокую экзотермию бетона в процессе его твердения в блоках бетонирования.

Несмотря на это в Норвегии не применяют на строительстве плотин искусственного охлаждения бетона. Для быстрого рассеивания в блоке тепла, кроме применения низко-термичного цемента ограничивают скорость укладки бетонной смеси (по нормам скорость укладки слоя 30—50 см в час) и разрезают тело плотины широкими усадочными швами (до 1,5 м). Все это в значительной степени уменьшает опасность образования в бетоне плотины трещин. Применение же различных воздухововлекающих добавок (3—4% от объема бетона) повышает морозостойкость бетона.

Большое значение придается правильному подбору песка и точному его рассеиванию, как средству, повышающему морозостойкость бетона. Стандартный фракционный состав песка, при-

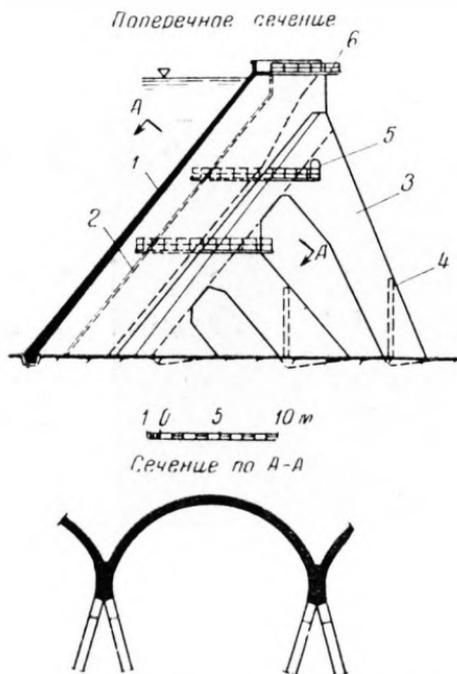


Рис. 20. Типовая конструкция железобетонной многоарочной плотины

1—арка; 2—теплоизолирующая стенка; 3—контрфорс; 4—крепление контрфорса; 5—смотровая галерея; 6—пешеходный мостик.

быстрого рассеивания в блоке тепла, кроме применения низко-термичного цемента ограничивают скорость укладки бетонной смеси (по нормам скорость укладки слоя 30—50 см в час) и разрезают тело плотины широкими усадочными швами (до 1,5 м). Все это в значительной степени уменьшает опасность образования в бетоне плотины трещин. Применение же различных воздухововлекающих добавок (3—4% от объема бетона) повышает морозостойкость бетона.

Большое значение придается правильному подбору песка и точному его рассеиванию, как средству, повышающему морозостойкость бетона. Стандартный фракционный состав песка, при-

меняемого на строительстве гидротехнических сооружений приведен на рис. 21.

В качестве заполнителя для бетона арочных как, впрочем, и для других типов плотин, используется преимущественно естественная гравийно-песчаная смесь, конечно, когда карьеры этого материала находятся вблизи строительной площадки. В случае отсутствия естественной смеси заполнитель готовится на дробильных установках. И естественная смесь и искусственный заполнитель подвергаются тщательной сортировке и фракционированию.

Широкие усадочные швы уплотняются после того, как температура бетона в блоке приблизится к температуре окружающего воздуха. Скорость заполнения шва бетоном не превышает обычно 30 см/ч.

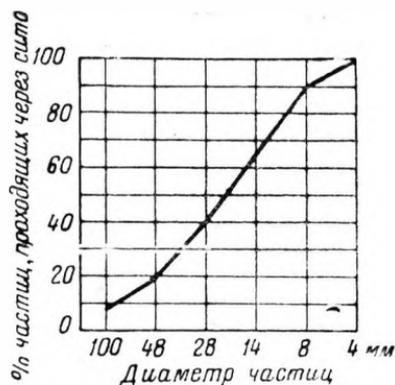


Рис. 21. Типовая кривая гранулометрического состава песка для бетона арочных плотин.

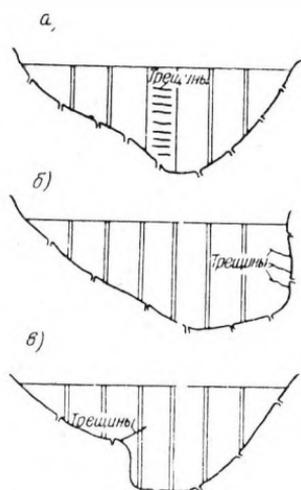


Рис. 22. Три случая возникновения трещин в бетоне блоков

а — трещины при редком расположении усадочных швов; *б* — трещины на контакте бетона со скалой; *в* — трещины при неплановом очертании скалы на контакте с бетоном.

Трещины в бетоне могут появиться при укладке бетонной смеси в плотину без усадочных швов или при редком их расположении (рис. 22, а), на контакте бетонного блока со скалой по всей его высоте (рис. 22, б), а также в том случае, когда очертание скалы в основании плотины имеет неплановую форму. Поэтому правильному расположению усадочных швов и выравниванию скалы придается большое значение.

Так же как в арочной плотине, объем бетона в многоарочной плотине значительно меньше, чем в гравитационной плотине, построенной в тех же условиях. На рис. 23 приведено сравнение количества опалубки и арматуры, использованных на многоарочной плотине Нованн с теми же показателями для гравитационной плотины. Для плотины высотой 25 м объем бетона в многоарочной плотине составляет лишь $\frac{1}{4}$ от того объема, который необходим для массивной плотины.

Объем бетона, необходимый для контрфорсной плотины с наклонной напорной плитой почти при любой высоте, значительно больше объема бетона для многоарочной плотины той же высоты. Вот почему в последнее время в Норвегии в створах большой ширины строятся преимущественно многоарочные плотины.

Многоарочные плотины (арки и контрфорсы), особенно близ верховой и низовой граней, сильно армируются. Арматура имеет

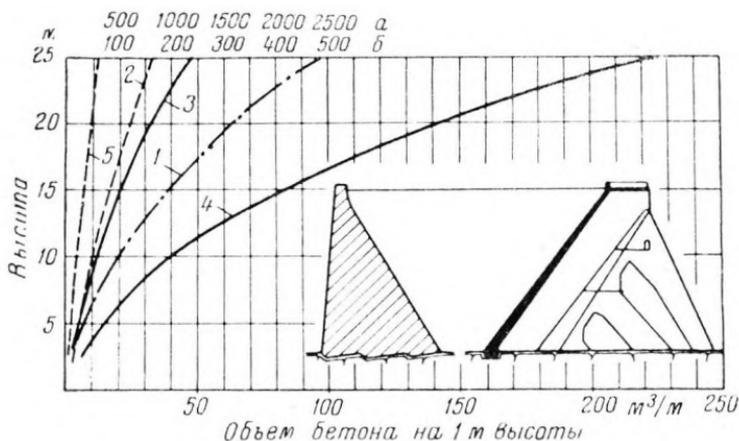


Рис. 23. Сравнение объемов бетона, количества арматуры и опалубки в гравитационной плотине и в многоарочной плотине Нованн для одинаковых условий створа

a — количество арматуры, *т/м*; *б* — количество опалубки, *м²/м*;
 многоарочная плотина: 1 — арматура; 2 — опалубка; 3 — бетон;
 гравитационная плотина: 4 — бетон; 5 — опалубка.

защитный слой бетона на верховой грани не менее 50 мм. При исключительно качественном выполнении бетонных работ коррозия арматуры не появляется даже при толщине защитного слоя 10 мм, но из-за удобства бетонирования толщину этого слоя принимают равной 50 мм.

При строительстве многоарочных плотин проводится ряд мероприятий для получения, по возможности, более высокого коэффициента прочности на сдвиг. Например, на плотине Нованн основание плотины на 2 м заглублено в скалу. С верховой и низовой граней в скалу заложены вертикальные металлические стержни диаметром 32—100 мм. Кроме того, по обе стороны от каждого контрфорса на расстоянии $\frac{1}{3}$ пролета между контрфорсами в скалу на глубину 2,0—2,5 м заложены наклонные стержни под углом 45°. Таким образом плотина имеет достаточно большое сопротивление на сдвиг — $\rho/v = 1$,

Величина $\rho/v = 0,75—0,80$, принимаемая обычно для массивных и контрфорсных плотин с плитой, здесь не достигнута, однако в данном случае в этом не было необходимости.

Из-за высокой кислотности речной воды в Норвегии очень большое внимание уделяется вопросам предупреждения фильтрации. Скала в основании плотин, как правило, очень прочная, но все же иногда требуется цементация основания. Цементация редко проводится предварительно, до возведения плотины. Значительно чаще основание цементируется после того, как плотина закончена. По мере наполнения водохранилища выявляются конкретные места фильтрации, после чего они сразу же цементируются.

Как указано выше, большое внимание уделяется тщательной заделке швов особенно там, где они проходят по легко уязвимым местам, как, например, в контрфорсе многоарочных плотин. Укладка стержней арматуры на всю ширину арки в направлении от верхнего бьефа к нижнему не допускается, так как вдоль стержней возможна фильтрация. Наконец, сведение к минимуму количества швов в плотине также можно рассматривать как одну из мер по предупреждению фильтрации.

В основу расчета небольших арочных плотин положен принцип постоянного радиуса. Большие плотины часто рассчитываются на основе постоянного угла наклона напорной грани и переменного радиуса. Для определения напряжений в небольших арках применяется котельная формула. Для более крупных сооружений обычно применяется метод пробной нагрузки для нескольких горизонтальных арок и лишь одной вертикальной консоли. В особых случаях, когда высота плотины очень значительная, расчет ее ведется по трем вертикальным консолям. Как правило, вертикальная секция не рассматривается закрепленной в основании, так как закрепление вертикальной секции в основании означало бы, что непропорционально большая часть давления воды воспринимается консолью.

Иногда в основании устраивается усадочный шов, но обычно секции арки бетонируются непосредственно на скале, при этом трещин на верховой грани не наблюдается.

Согласно ТУиН Норвежского гидроэнергетического управления, допускаемые напряжения в бетоне на сжатие не должны превышать 50 кг/см^2 , а коэффициент запаса на прочность при растяжении должен быть равен 6—8. При расчете учитываются повышение и понижение температур в бетоне при наполненном и опорожненном водохранилище. При опорожненном водохранилище: от -20°C у гребня до 10°C у основания; при наполненном: от 10°C у гребня до 5°C у основания.

Поскольку заделка швов между блоками производится после окончания работ по возведению плотины, каждый отдельный блок необходимо рассчитывать на сопротивление максимальному давлению ветра.

Контрфорсы многоарочных плотин рассчитываются проще, чем в контрфорсной плотине с напорной плитой. Арки рассчитываются как неразрезные конструкции. Нагрузка увеличивается от середины арки к береговым устоям благодаря наклону. Из-за недостаточной жесткости у основания и пластической деформации контрфорсов в арке могут возникнуть вертикальные растягивающие напряжения.

10. Плотины из местных материалов

Хорошее состояние железобетонных арочных плотин после нескольких лет эксплуатации свидетельствует о том, что такой тип плотин намного превосходит все другие типы бетонных и железобетонных плотин по прочности и экономичности. Однако

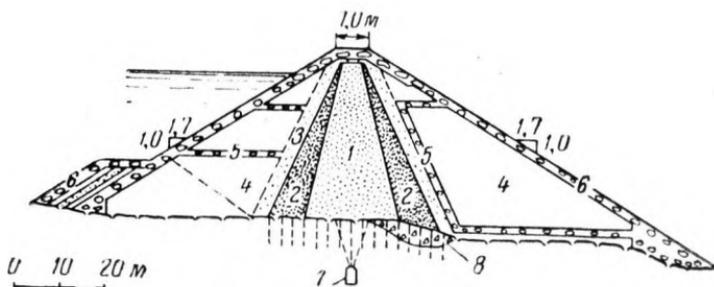


Рис. 24. Поперечный разрез плотины Бордалсватн

1—ядро из морены; 2, «У»-слои фильтра—песок и щебень; 4—каменная наброска; 5, 6—каменная кладка насухо; 7—цементационный туннель; 8—поверхностная цементация.

в определенных условиях нередко приходится отказываться от арочной плотины либо в пользу контрфорсных с наклонной напорной плитой, либо в пользу плотин из местных материалов.

Норвежские плотины из местных материалов характеризуются зональной укладкой грунта и наличием центрального ядра из морены или экрана на верховом откосе из такого же материала. На рис. 24 приведен поперечный разрез каменнонабросной плотины Бордалсватн с центральным ядром из морены.

Плотина имеет длину по гребню 300 м и максимальную высоту 43 м. Общий объем уложенного в плотину материала составляет 300 000 м³. Грунт уложен в несколько зон. Центральная зона представляет собой ядро из морены с высоким со-

держанием мелочи, обеспечивающей большую плотность цилиндра. В переходные зоны фильтра (зоны 2 и 3) уложен крупнозернистый материал, наконец, верховая и низовая призмы выполнены из каменной наброски. Основание под плотину было подготовлено с большой тщательностью: весь верхний слой грунта был снят, трещины в скале зацементированы, площадь основания выровнена. В результате осадка сооружения была значительно уменьшена.

Моренный грунт в ядре плотин из местных материалов уплотняется, как правило, слоями по 15—40 см.

11. Другие типы плотин

Кроме классических бетонных, железобетонных и

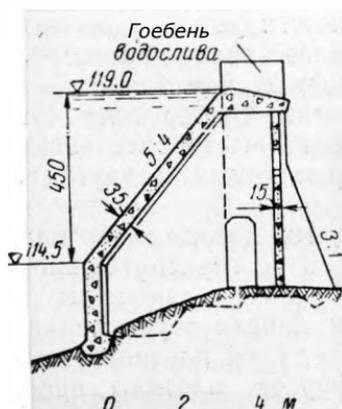


Рис. 26. Плотина Коватн (размеры в см).

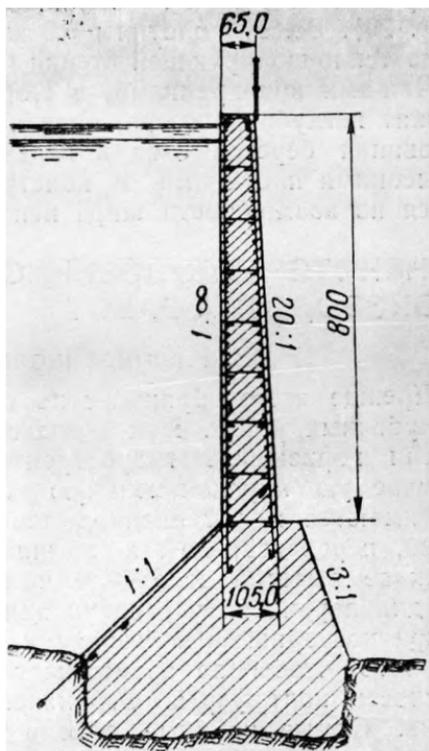


Рис. 25. Плотина Фискелесватн (размеры в см).

обычных плотин из местных материалов в Норвегии построено несколько плотин своеобразной конструкции; например, плотины Фискелесватн или Коватн.

Плотина Фиокелесватн — вертикальная железобетонная консольная стенка, заделанная в бетонный массив (рис. 25). Высота стенки 8,0 м, ширина по верху 0,65 м, ширина по основанию 1,05 м. Верховая грань стенки вертикальная, низовая 1:20.

Плотина Коватн представляет собой рамную железобе-

тонную конструкцию, опирающуюся на береговой устой (рис. 26). Высота плотины 6,5 м, толщина стенок 0,35 м, толщина теплоизолирующей стенки 0,15 м.

Чашами водохранилищ в Норвегии в большинстве случаев служат неглубокие озера, полезный объем создается путем обвалования берегов озер и перекрытия отдельных понижений невысокими плотинами. В конструкции этих сооружений стремятся по возможности шире использовать местные материалы.

V. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ

12. Крупнопанельная опалубка

Прежде всего обращают на себя внимание особые методы опалубочных работ. При возведении контрфорсных и арочных плотин норвежские гидростроители широко используют так называемую крупнопанельную опалубку. Панели опалубки поднимаются и устанавливаются с помощью строительного крана, передвигающегося обычно по специально возведенной эстакаде высотой до 25—30 м (рис. 27). Кран используется как для первичной установки панелей, так и для перемещения ее при повторном использовании. Размеры панелей достаточны для того, чтобы по возможности охватить всю боковую поверхность контрфорса. Ограничением служит лишь мощность крана. Самые крупные панели применялись при возведении контрфорсов плотины Юванн, площадь поверхности каждой панели равнялась 75 м².

Применение крупнопанельной опалубки при возведении железобетонных плотин дает значительную экономию материалов и времени. Что же касается необходимости устанавливать при этом кран, то согласно расчетам любая эстакада, на сооружение которой идут лесоматериалы, дешевле, чем строительные рабочие леса высотой до гребня плотины. Выбор типа крана определяется размерами плотины, сроками строительства и возможностью применять кран на арматурных и других работах.

Панель изготавливается из дюймовых досок, скрепленных по вертикали рейками сечением 2"Хб" и по горизонтали двойными рейками такого же сечения. Рейки располагаются на расстоянии 1,5 м друг от друга. Монтаж панели осуществляется по-разному в зависимости от типа возводимой плотины.

При возведении опалубки контрфорсов плотины прежде всего к скале прианкеривается два-три горизонтальных деревянных бруса на расстоянии, равном толщине будущего контрфорса. Затем по специальной разметке сбивается панель, кото-

рую кран поднимает целиком. В вертикальном положении панель поддерживается либо горизонтальными подпорками, упертыми в грань соседнего контрфорса, либо наклонными подпорками, опирающимися на скалу у основания. После того как в контрфорсе установлена арматура, поднимается до вертикального положения вторая панель опалубки, затем обе панели соединяются между собой сквозными болтами. Болты предварительно обертываются картоном, что позволяет свободно вынимать их из бетона и использовать вторично.

Обычно высота контрфорсов различная, и поэтому для каждого контрфорса разметка панели делается самостоятельно, при этом монтируется и прикрепляется к панели опалубка для смотровых галерей, различных окон, углублений и т. п. Бетонирование ведется, начиная с самого высокого контрфорса, и панель опалубки, изготовленная для него используется затем при возведении более низких контрфорсов. Для этого снимается часть нижних секций панели, которые также находят иногда применение при опалубке фронтальных наклонных частей контрфорса.

Для каждой грани контрфорсов значительной высоты используется две панели, при этом нижняя панель заглубляется в грунт, после чего к ней прикрепляется вторая панель высотой до 10 м.

Общее количество опалубки определяется рабочей программой строительства. Для возведения 80 контрфорсов плотины Юванин было использовано пять комплектов панелей (по две в каждом комплекте). Таким образом максимальная оборачиваемость панелей была 16-кратной при средней оборачиваемости 8,5 раза.

Бетонирование проводилось сразу в двух контрфорсах и шло одновременно с монтажом опалубки для трех последующих контрфорсов.

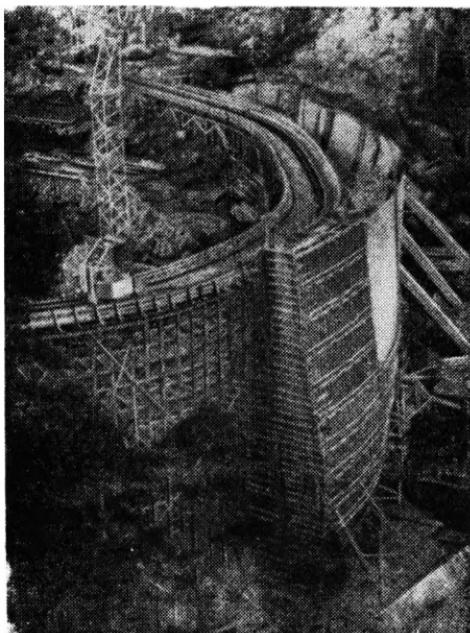


Рис. 27. Эстакада на строительстве арочной плотины Юванин.

Наклонная напорная плита контрфорсов бетонруется также с помощью крупных панелей, хотя размер панелей здесь меньше. Длина панели определяется обычно расстоянием между контрфорсами (т. е. 7, 8, 9 м), высота — 1,0—1,5 м. Панели крепятся верхним краем к стальным поперечным балкам, уложенным на забетонированные в контрфорсы опоры и в ходе бетонирования постепенно перемещаются краном вверх.

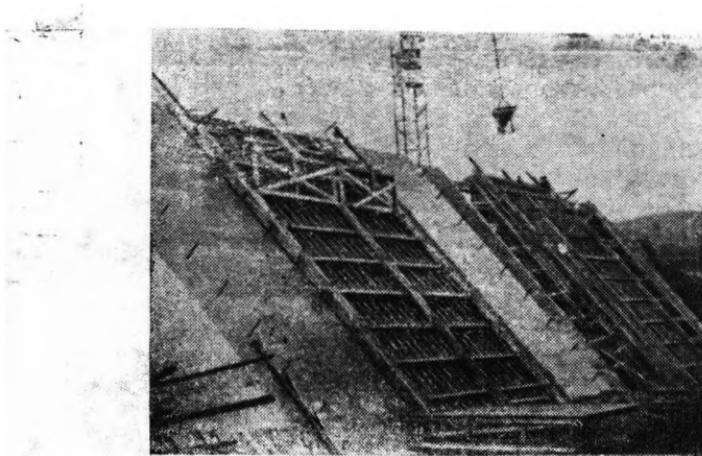


Рис. 28. Опалубка верховой грани плотины. Бетонирование ведется в двух блоках одновременно.

На рис. 28 показаны опалубочные работы на наклонной напорной плите плотины Юванн. Размер панелей 8,0X1,5 м. Работы ведутся посменно бригадой из четырех рабочих: двое рабочих занято на опалубочных работах и двое — на бетонировании.

Крупнопанельная опалубка широко применяется и на строительстве арочных плотин. Панели опалубки для бетонирования арочных плотин сбиваются с помощью вертикальных реек сечением 2"X8" и горизонтальных реек сечением 3"X7". Каждая панель изогнута по горизонтали и может использоваться лишь для арки с определенным радиусом. Ширина панели (10 лг) обычно больше ширины блока плотины, с тем чтобы при необходимости ширину блока можно было увеличить, а также для того, чтобы панели опалубки двух соседних блоков можно было прикрепить одну к другой. Высота панели 2,5 м, таким образом площадь ее стандартна — 25 м². Иногда при возведении

блока арки три таких панели соединяются в одну общей площадью 75 м².

Так же как при бетонировании наклонной напорной плиты, панели при возведении арочной плотины устанавливаются одновременно со стороны верховой и низовой граней и соединяются опалубочными болтами. Болты располагаются вдоль верхнего края каждой панели на расстоянии 1,6 м один от другого.

Опалубочные работы выполняются сменой рабочих (три-четыре человека), включая крановщика. Производительность работы зависит от размеров панели опалубки и формы арки. Опалубка снимается, как только температура бетона в блоке приблизится к средней температуре воздуха. Обычно на это требуется не меньше трех недель.

Как уже упоминалось, на строительстве арочных плотин, так же как и при возведении контрфорсных плотин, применение крупнопанельной опалубки требует строительного крана. На плотине Слеттедален работало одновременно два крана, передвигающихся по металлической эстакаде на бетонных опорах вдоль низовой грани.

Использование крупнопанельной опалубки позволяет заметно уменьшить объем опалубочных работ, повышает ее оборачиваемость и тем самым снижает потребность в лесоматериалах, уменьшает затраты рабочей силы на бетонных работах. Все это дает в результате значительную экономию средств и времени.

13. Уплотнение швов

Вопрос тщательного уплотнения усадочных и строительных швов является важным для любого гидротехнического сооружения. В норвежском плотиностроении он приобретает особое значение, так как фильтрация через недостаточно уплотненный шов в условиях сурового климата и повышенной кислотности воды представляет двойную опасность. Именно этим можно объяснить четко выраженное стремление свести к минимуму количество швов в контрфорсных и арочных плотинах.

Ранее уже отмечалось, что горизонтальные швы устраиваются лишь в плотинах высотой более 23,0 м. В плотинах меньшей высоты блоки бетонируются непрерывно от основания до гребня.

Вопрос о том, на каком максимальном расстоянии должны отстоять один от другого вертикальные строительные и усадочные швы, явился предметом обширных исследований, при этом рассматривалось расстояние от 5 до 20 м. Было установлено, что максимальное расстояние между швами, при котором не наблюдается образования трещин, 10—12 м. Дальнейшее

увеличение длины блоков влечет за собой возникновение в них горизонтальных трещин. Швы имеют зачищенные поверхности и уплотняются иногда медным листом, иногда резиной, но чаще всего полосой из нержавеющей стали.

Как уже упоминалось, вертикальные усадочные швы между блоками норвежских арочных плотин имеют значительную ши-

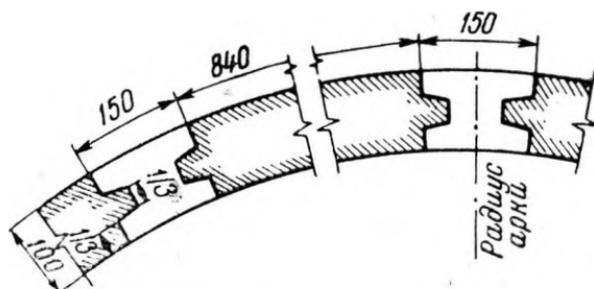


Рис. 29. Зубчатые усадочные швы арочной плотины без изоляционных шпонок.

рину—1,5 м (рис. 29). Они имеют зубчатую поверхность и их оставляют открытыми на срок до трех месяцев, пока усадка бетона в соседних блоках в основном не закончится и температура бетона не снизится до температуры окружающего воздуха. Бетонирование шва начинается при температуре, близкой к 0°C. Когда швы бетонируются при более высокой температуре, у основания плотины нередко появляются трещины (рис. 30).

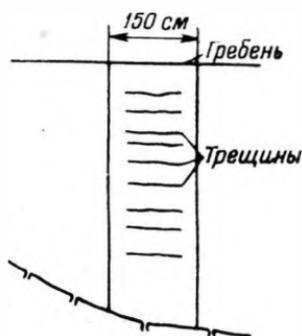


Рис. 30. Горизонтальные трещины в шве, уплотненном с нарушением технологических правил.

Бетонирование при 0°C иногда требует утепления швов с тем, чтобы укладываемая бетонная смесь не соприкасалась с бетоном стенок шва, охлажденным ниже нуля. Обогрев шва в таких случаях проводится до начала бетонирования с помощью электронагревателей. Иногда строительные швы приходится

уплотнять в условиях длительных минусовых температур (—5; —10°C). В таких случаях работы проводятся в специальных тепляках. Высота тепляков, проходящих по всей ширине плотины, 4—5 м. По мере бетонирования тепляки перемещаются вверх. Скорость бетонирования швов 30 см/ч, при этом в тече-

ние часа укладывается три слоя бетона по 10 см. Бетонная смесь в углах и на стыках с боковыми гранями блоков прорабатывается вибраторами. Такой темп и характер бетонирования обеспечивает достаточно уплотненный шов, который обычно не требует никаких специальных уплотняющих полос.

Температура бетона в усадочных швах распределяется неравномерно. В средней части шва температура значительно выше, чем на краях.

При большой толщине плотины или при повышенном темпе бетонирования в средней части шва температура бетона может превышать допустимую. В таких, нечасто встречающихся случаях норвежские строители применяли искусственное охлаждение шва. Для охлаждения используется речная вода с температурой 2—3°С. После использования температура воды повышается до 6—8°С. Охлаждение, с одной стороны, уменьшает растягивающие напряжения в плотине и, с другой стороны, снижает опасность возникновения трещин в швах.

Искусственное охлаждение дает большой положительный эффект в отношении распределения напряжений и сокращения сроков строительства.

Бетонирование швов шириной до 1,5 м проводится с помощью специальной опалубки, панели которой обычно прикрепляются к опалубочным панелям блока. Распалубка производится после того, как температура в шве снизится до средней температуры наружного воздуха. Заполнение водохранилища осуществляется не раньше, чем через три недели после окончания бетонирования швов.

14. Теплоизолирующая стенка из сборных элементов

Выше уже говорилось о том, что суровые условия норвежского климата вызывают необходимость защищать тонкие железобетонные сооружения как от непосредственного воздействия атмосферных осадков на бетон, так и от частых смен положительной и отрицательной температур.

Именно с этой целью все арочные и контрфорсные плотины Норвегии имеют специальную теплоизолирующую стенку со стороны низовой грани плотины. Важно отметить, что на ряде строящихся и недавно законченных плотин гидростроители использовали для возведения теплоизолирующей стенки сборные элементы.

Так теплоизолирующая стенка водосливной контрфорсной плотины Юванн построена из плит, изготовленных в металлической опалубке на специальном полигоне. Размеры каждой плиты следующие: толщина 12 см, высота 1,5 м, длина 4,7 м

(длина плиты равна расстоянию между контрфорсами). Плиты устанавливались на место краном. В основание самой нижней плиты уложен слой бетона толщиной 15 см непосредственно на скалу. Торцы плиты на 4 см заделываются в контрфорс. Между собой плиты соединяются горизонтальными зубчатыми швами.

Железобетонная теплоизолирующая стенка из сборных элементов применяется также и на арочных плотинах. На арч-

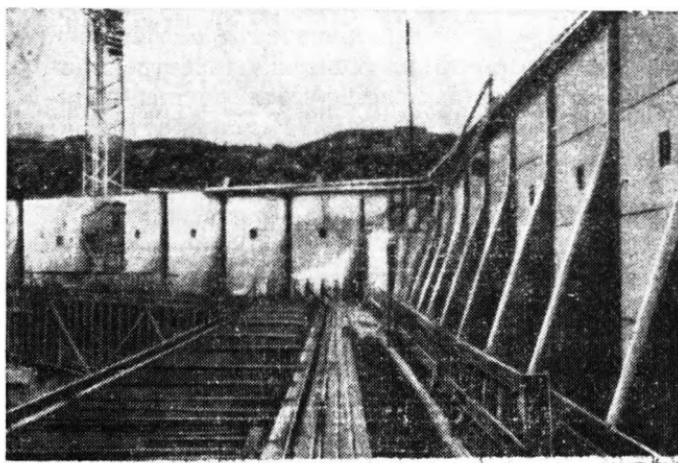


Рис. 31. Теплоизолирующая стенка из сборных элементов на контрфорсной плотине Юванн.

ной плотине Слеттедален изолирующая стенка почти целиком выполняется из таких же предварительно изготовленных плит. Только около контрфорсов они опираются на специальные горизонтальные точечные опоры, прикрепленные к низовой грани плотины.

Теплоизолирующая стенка глухой арочной плотины Юванн возведена из вертикальных плит шириной 1,5 м и высотой 5 м, имеющих небольшие отверстия. Плиты поддерживаются короткими горизонтальными опорами, поставленными на низовую грань плотины. Расстояние между низовой гранью и стенкой, а значит и длина горизонтальных опор обычно равна 80 см. На рис. 31 показана стенка контрфорсной плотины Юванн.

Практика показала, что при незначительных размерах плотины сборная железобетонная теплоизолирующая стенка неэкономична, зато на относительно крупных плотинах сборность стенки дает до 50% экономии.

15. Укладка грунта в земляные плотины слоями значительной толщины

Опираясь на опыт США, гидростроители Норвегии обычно укладывают грунт в земляные плотины слоями толщиной от 15 до 40 см. При такой толщине слоя нетрудно добиться необходимой плотности сухого грунта и его однородности. Однако при этом требуется, чтобы размер отдельных камней в грунте не превышал $\frac{2}{3}$ толщины слоя.

На строительстве каменнонабросной плотины Слотмобергет (рис. 32) на севере Норвегии в первый строительный сезон мо-

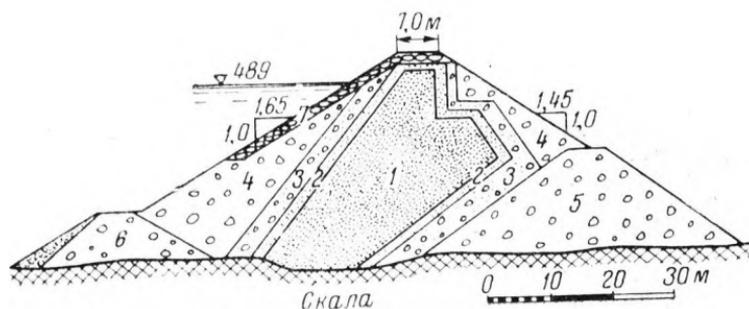


Рис. 32. Поперечное сечение плотины Слотмобергет

1—ядро из морены; 2, 3—слои фильтра; 4—каменная наброска; 5—низовая призма из укатанного грунта с включением крупного камня; 6—перемычка; 7—отсыпка крупного камня.

рена укладывалась в ядро слоями толщиной 40 см. Перед укладкой из нее приходилось удалять все камни диаметром 30—60 см. Камни такого размера составляли по объему 5% от общего объема морены, и удаление их было достаточно трудоемкой работой.

Во второй строительный период было решено не удалять из грунта эти крупные камни, а укладывать грунт слоями до 95 см толщиной. Это значительно упростило производство работ и позволило использовать весь грунт целиком.

Общеизвестно, что отходить от обычных методов целесообразно лишь после широких натуральных исследований. В данном случае важно было предварительно убедиться, что укладка морены слоями такой значительной толщины не снизит прочности сооружения.

В результате проведенных строительством исследований было установлено, что восемь проходов вибрационного катка (170 циклов) весом 8 т при скорости движения 1,5 км/ч обеспечивают необходимую плотность грунта и достаточную его однородность в слое толщиной 95 см.

Только благодаря применению этого нового метода строители сумели успешно завершить возведение плотины, несмотря на низкую среднюю температуру воздуха ($t_{\text{ср}} = +8,5^{\circ} \text{C}$) и большое количество осадков (70 мм в месяц), наблюдавшееся во второй строительный сезон. Применение такого метода обеспечило также значительную экономию средств и сократило сроки работ.

Тот же метод успешно применен и на других строительных объектах.

Брошюра составлена по материалам, опубликованным в норвежских технических журналах

1. Nordisk Betong, 1957 — 1961.
2. Teknisk Ukeblad, 1959 — 1960.
3. Teknisk Tidskrift, 1960 — 1961

и в монографии

4. Norske kraftverker. Teknisk ukeblads forlag—Oslo, 1954.

Кроме того, была использована соответствующая литература на английском, французском и немецком языках.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
I. Гидроэнергетические ресурсы Норвегии и их использование	3
1. Краткая физико-географическая и экономическая справка	3
2. Роль гидроэнергетики в общем энергобалансе страны ...	4
3. Запасы гидроресурсов и распределение их по районам ...	5
4. Рост установленной мощности и выработки электроэнергии	8
5. Объем капиталовложений, стоимость отдельных ГЭС и выработка электроэнергии	11
6. Рост потребления электроэнергии и развитие линий электропередач	12
7. Сотрудничество между Норвегией и СССР по использованию гидроэнергоресурсов	15
II. Схемы использования отдельных бассейнов	16
III. Подземные ГЭС Норвегии.....	26
IV. Плотины Норвегии.....	37
8. Контрфорсные плотины с плоской напорной плитой	38
9. Арочные и многоарочные плотины.....	41
10. Плотины из местных материалов.....	48
11. Другие типы плотин.....	49
V. Некоторые особенности производства работ	50
12. Крупнопанельная опалубка.....	50
13. Уплотнение швов.....	53
14. Теплоизолирующая стенка из сборных элементов	55
15. Укладка грунта в земляные плотины значительной толщины .	57

Цена 26 коп.

