

Министерство образования Российской Федерации
Ивановский государственный энергетический университет

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ

ТРУДЫ ИГЭУ

Выпуск 5

*Под редакцией
доктора техн. наук, профессора В.А. Шуина,
доктора техн. наук, профессора М.Ш. Мисриханова*

Москва
Энергоатомиздат
2002

УДК 621.311

ББК 31.37

П 42

Рецензенты:

*д-р техн. наук, проф. Т.А. Филиппова (Новосибирский
государственный технический университет - НЭТИ);*

д-р техн. наук, проф. В.А. Семенов (СО-ЦДУ ЕЭС России);

д-р техн. наук, проф. Г.И. Ванюрихин (МГУ им. М.В. Ломоносова).

Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 5 /
Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова. – М.: Энергоатомиздат,
2002. – 520 с.

ISBN 5-283-02588-8

Материал сборника включает разделы, посвященные общим проблемами и экономическим аспектам управления функционированием и развитием электроэнергетики России и регионов, вопросам расчета и моделирования установившихся режимов и переходных процессов в электроэнергетических системах и их элементах, эксплуатации, диагностики и производства электрооборудования для электрических станций, подстанций и сетей, релейной защиты, автоматики и противоаварийного управления электроэнергетическими системами, совершенствования оборудования и методов строительства гидроэлектростанций.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся исследованием, разработкой, проектированием и эксплуатацией электроэнергетических систем, электрических станций, подстанций и сетей, комплексов и устройств их автоматического управления.

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. В.Н. Нуждин, д-р техн. наук, проф. М.Ш. Мисриханов,

д-р техн. наук, проф. Б.М. Ларин, д-р техн. наук, проф. А.В. Мошкарин,

д-р техн. наук, проф. В.А. Савельев, д-р техн. наук, проф. В.А. Строев,

д-р техн. наук, проф. С.В. Тарарыкин, д-р техн. наук, проф. В.А. Шуин,

д-р техн. наук, проф. А.В. Шунтов, д-р техн. наук, проф. Ю.Я. Щелькалов,

д-р техн. наук, проф. И.В. Якимец.

ISBN 5-283-02588-8

© Авторы, 2003

УДК 627.824.012.4.023: 693.54: 626

Новая технология возведения арочных плотин

Ю.С. Гунтер, А.С. Данилов, кандидаты техн. наук,

М.Ш. Мисриханов., д-р техн. наук

Введение. В статье приведены результаты анализа причин трещинообразования бетона в бетонных плотинах. Описана новая технология возведения бетонных сооружений, разработанная на основе 30-летнего опыта строительства бетонных плотин в России (в СССР). Обоснованы основные принципы новой технологии, которые значительно отличаются от принятых в мировой практике и в России для традиционных технологий. Приведены результаты освоения новой технологии на строительстве арочной плотины Миатлинской ГЭС в России (1985 – 1987 гг.).

Опыт регулирования температурного режима бетона в России (в СССР). Причины трещинообразования и условия отсутствия трещин. Несмотря на то, что опыт регулирования температурного режима бетона в целях предотвращения трещинообразования хорошо известен, для обоснования новой технологии необходимо кратко повторить основные этапы освоения регулирования, акцентируя внимание на главных причинах трещинообразования и условиях, при которых трещины не возникают.

На основании многолетнего опыта возведения бетонных сооружений в мире разработаны и проверены на практике различные эффективные способы и мероприятия, осуществление которых позволяет либо исключить возможность образования температурных трещин, либо значительно снизить вероятность их возникновения. Главными из мероприятий регулирования температурного режима бетона являются: охлаждение бетонной кладки водой, циркулирующей по заложеным в бетоне змеевикам из труб, применение предварительного охлаждения бетонной смеси, уменьшение расхода цемента и применение низкотермичных цементов, зонирование бетона по сечению плотины, ограничение высоты блоков и регламентирование перерыва в бетонировании блока на предыдущий

блок. Кроме того, в целях уменьшения вероятности трещинообразования ограничивают размеры блоков в плане (в горизонтальных направлениях).

В СССР изучение температурных напряжений в бетоне и трещинообразования было начато в 30-е годы при строительстве плотины Днепровской ГЭС [1] и массивных опор мостов [2]. Была начата разработка методов моделирования температурных полей, расчета температур и напряжений в бетоне, предложен метод формирования благоприятной эпюры температур, соответствующей нулевым напряжениям бетона, выполнен большой объем натурных исследований температур и деформаций в бетоне с помощью закладных дистанционных приборов. Предложен “конус” для измерения свободных температурных деформаций в бетоне. Разность деформаций, измеренных тензометрами, установленными в массиве бетона и в “конусе”, соответствует температурным деформациям, которые не произошли из-за влияния внешних связей и которые пропорциональны температурным напряжениям. Имея значения модуля упругости и меры ползучести бетона, полученные в виде функций времени в результате длительных стендовых испытаний больших образцов бетона, а также измеренные в плотине деформации и температуры, можно, используя метод суперпозиции (наложения), оценивать величину температурных напряжений, возникающих в бетоне плотины.

Особо остро вопросы предотвращения трещинообразования бетона встали в 50-е годы при строительстве высоких бетонных гравитационных плотин (с расширенными швами) Бухтарминской и Братской ГЭС (высотой более 100 м). Обильное трещинообразование бетона в блоках Братской плотины, которая возводилась при классической столбчатой разрезке в суровых климатических условиях (Сибирь), потребовало проведения глубоких исследований термонапряженного состояния бетона, постановки крупномасштабных производственных экспериментов на строящихся плотинах. В проектах новых плотин стали предусматривать комплексы конструктивных и технологических мероприятий, а также дорогостоящие установки, позволяющие регулировать температурный режим бетона.

На строительстве Бухтарминской, а затем и на строительстве Братской ГЭС в экспериментальном порядке отработывался метод “длинных блоков”, основными особенностями которого являлись: бетонирование каждой секции плотины одним блоком от верхнего до нижнего бьефа длиной до 50 - 60 м и высотой 1,25 – 1,50 м; защита бетона от внешних воздействий самоподъемным шатром, обеспечивающим возможность создания искусственного климата для блока как в зимний, так и в любой другой период; ступенчатая укладка жесткого бетона с расходом цемента

160 - 180 кг/м³ слоями 0,4 – 0,5 м, уплотняемыми пакетом вибраторов на специальном механизме, перемещающемся по шатру; использование полива поверхности блоков в качестве основного средства снижения максимальной температуры бетона.

В опытных “длинных блоках” Братской плотины, длинные стороны которых несмотря на теплую опалубку подвергались воздействию колебаний температуры наружного воздуха, трещины образовались из-за быстрого остывания бетона, примыкающего к скальному основанию, и большой неравномерности температур бетона в удаленных от скалы сечениях. В секциях же Бухтарминской плотины, забетонированных “длинными блоками” под общим шатром, предохранявшим длинные грани секций в расширенных швах от воздействия колебаний температуры наружного воздуха и обеспечившим медленное остывание прискального бетона и равномерное температурное поле в удалении от скального основания, трещины не обнаружены [3].

Метод “длинных блоков” не вышел из стадии экспериментов. Главным недостатком метода является противоречие, связанное с тем, что при увеличении скорости роста сооружения за счет увеличения высоты блоков или сокращения интервала между укладкой блока на блок величина разогрева бетона увеличивается, а допустимая максимальная температура с увеличением длины блоков понижается. Поэтому для ускорения возведения сооружения необходимо увеличивать затраты на охлаждение (бетонной смеси, бетона в сооружении). Для сокращения затрат на охлаждение, а главное, для упрощения бетонирования больших по площади “длинных блоков” от ступенчатой схемы укладки бетона перешли к однослойной, т.е. к “послойному” методу [4].

В массивах бетона, уложенных “послойным” методом в гравитационные плотины (без расширенных швов) Токтогульской и Курпсайской ГЭС, при равномерном возведении по всему фронту от берега до берега в жарком климате (Средняя Азия), трещины не обнаружены. Для Токтогульской плотины производили охлаждение песка и крупных заполнителей до 5 °С. Высота блока, состоящего из одного слоя, была сначала 0,50, а потом 0,75 м. На основании успешного токтогульского опыта для Курпсайской плотины были понижены требования к температурному режиму: заполнители бетона не охлаждали, а укладку бетона производили блоками высотой 1,0 м, состоящими из одного слоя.

Необходимо отметить опыт бетонирования массива объемом 22 тысячи кубических метров в одном из пролетов водосливной плотины Бухтарминской ГЭС, в который бетон укладывался блоками длиной более

50 м (от нижнего до верхнего бьефа) и высотой 7-8 м с высокой интенсивностью, практически за один месяц (апрель), на высоту 38 м в распор между ранее забетонированными «бычками». Этот массив выдерживался 1,5 года до полного остывания в теплой опалубке по низовой и верховой граням без применения каких-либо средств охлаждения. При этом в первый период остывания продолжительностью 3 месяца (весна и лето) температура наружного воздуха повышалась. Несмотря на высокие (45-50 °С) максимальные температуры бетона, ни визуальными осмотрами, ни специальными длиннобазовыми тензометрами, установленными в нижней части этого массива, трещины не зарегистрированы [5]. Результаты бетонирования этого пролета, а также опыт бетонирования целых секций одним блоком в Канаде [6] показали, что при достаточно мощной теплозащите граней, обеспечивающей равномерное, медленное, без больших перепадов температуры остывание всего массива, удастся избежать трещинообразования даже при высоких максимальных температурах бетона, уложенного на скальное основание.

Если в первое время трещинообразование в гравитационных плотинах считали недопустимым, то по мере накопления опыта строительства, особенно в суровых климатических условиях, отношение к трещинам стало не столь категоричным. Высказывались мнения о невозможности предотвращения трещинообразования, о допустимости образования неопасных для сооружения трещин, об устройстве в плотине специальных надрезов, организующих трещинообразование только таким образом, чтобы трещины не ухудшали работу сооружения, как единого целого [7].

Можно считать, что в России сложились два основных метода возведения бетонных плотин.

Первый метод может быть назван «*столбчатым*». Для этого метода характерно наличие опережающих и отстающих элементов: столбов в гравитационных плотинах, секций - в арочных, а также большее или меньшее количество трещин.

Братская, Красноярская, Усть-Илимская гравитационные и Саяно-Шушенская арочно-гравитационная плотины бетонировались блоками высотой 3,0 м. Большой объем бетона в этих плотинах уложен высокими (до 24 м) блоками. Чиркейская и Ингурская арочные плотины бетонировались блоками высотой в основном 1,5 м с перепадом между опережающими и отстающими секциями (через одну) 3-6 м и более. В суровых климатических условиях за счет сокращения количества шатров над блоками, уменьшения одновременно перекрываемой шатрами поверхности и обогреваемого объема подшатрового пространства при поочередном бе-

тонировании столбов высокими блоками достигают значительной экономии материалов и энергозатрат.

Второй метод - “*послойный*”, при котором отсутствуют опережающие элементы. В массивах, уложенных “*послойным*” методом, трещины не обнаружены.

Токтогульская и Курпсайская гравитационные плотины построены при последовательном бетонировании секций одним блоком высотой 0,75 – 1,0 м, состоящим из одного слоя, с отделением секции от секции закладной железобетонной опалубкой [4]. “*Послойный*” метод пока применяли в климатических условиях, где теплозащиту поверхности бетона в холодный период возможно осуществлять с помощью облегченного шатра, перекрывающего все сооружение. Зимой, в самое холодное время, воздух в шатре подогревали, летом шатер защищал поверхность от интенсивной солнечной радиации.

Логичным совершенствованием “*послойного*” метода явилось использование особо жестких малоцементных бетонов, укладываемых одним блоком - слоем и уплотняемых укаткой на строительстве гравитационной плотины Ташкумырской ГЭС [8].

Особенности новой технологии возведения бетонных сооружений. При разработке технологии возведения арочной плотины Миатлинской ГЭС обратили внимание на то, что 89% всех температурных трещин, наблюдаемых с поверхности блоков Чиркейской арочной плотины (рис. 1), построенной в аналогичных условиях, зарегистрированы в опережающих секциях [9]. В этих секциях трещины имели 47 % блоков высотой 1,5 м, а в отстающих секциях - с трещинами только 8,6 % блоков. Данные по блокам высотой 0,75, 1,0 и 3,0 м аналогичны. Например, в опережающих секциях с трещинами зарегистрировано 72 % блоков высотой 3,0 м, в отстающих – 8,3 %.

В целях сокращения трещинообразования в опережающих секциях предложено [9] дифференцировать требования к температурному режиму отстающих и опережающих секций - для последних установить более жесткие. Но даже незначительное ужесточение требований привело бы к неадекватному полученному эффекту, очень большому увеличению затрат на их выполнение. Это объясняется тем, что на строительстве Чиркейской плотины были уже использованы практически все возможные методы регулирования:

- в результате охлаждения песка в вакуумной пароежекторной установке до 5⁰С, охлаждения всех фракций крупных заполнителей в специальных бункерах холодным воздухом до 5⁰С, компенсационного (после нагрева при транспортировании из установки на завод) охлаждения

крупных заполнителей в расходных бункерах бетонного завода продувкой холодного воздуха и охлаждения воды затворения температура бетонной смеси в жаркий период достигала 11 °С;

- для понижения максимальной температуры проводили трубное охлаждение бетона при шаге между трубами 1,5х1,5 м, увлажняли поверхности блоков в жару, уменьшали расход цемента и использовали низкотермичный цемент;
- в холодный период производили защиту поверхностей бетона от влияния колебаний температуры воздуха.



Рис. 1. Арочная плотина Чиркейской ГЭС

Учитывая это, в основу технологии возведения Миатлинской арочной плотины были положены другие, изложенные ниже принципы, направленные не на ужесточение требований к температурному режиму бетона, а на их смягчение и упрощение регулирования.

Известно теоретическое положение о том, что в стене, которой практически является арочная плотина, забетонированной мгновенно, на некотором расстоянии от основания изменение среднеобъемной температуры на любую величину и с любой скоростью не вызывает температурных напряжений, а приводит только к изменению линейных размеров пропорционально коэффициенту температурных деформаций. Можно представить, что в реальных условиях величина температурных напряжений зависит от того, насколько в отдельных зонах температура и деформативные характеристики бетона отличаются от среднеобъемных значений, а также от того, какова история образования этих отличий. Натурные исследования показали [10], что сочетание неравномерности температурного поля по вертикальному и горизонтальному направлениям вызывает увеличение напряжений и приводит в некоторых случаях к образованию сквозных трещин.

Поэтому основным средством предотвращения трещин в разрабатываемой технологии выбрано выравнивание температурного поля и деформативных характеристик бетона по всему объему плотины, а именно:

1) выравнивание температурного поля было решено обеспечить за счет следующих мероприятий:

а) по горизонтальному направлению, совпадающему с осью плотины, - за счет поярусного, без опережающих секций бетонирования блоков от берега до берега;

б) по горизонтальному направлению, перпендикулярному оси плотины, - посредством непрерывного трубного охлаждения, в сочетании, при необходимости, с теплозащитой граней в холодный период;

в) по вертикальному направлению - оперативным, гибким регулированием температуры горизонтальной поверхности блока в сочетании с непрерывным трубным охлаждением;

2) для выравнивания деформативных характеристик бетона в новой технологии принято ограничение интервала в бетонировании блока на блок.

При традиционном способе возведения в опережающих секциях Чиркейской плотины температура неравномерная по всем трем направлениям. По направлению, совпадающему с осью плотины, температура начинает выравниваться после бетонирования блоков в отстающих секциях. К этому моменту в блоках опережающих секций происходят температурные деформации и формируются напряжения.

При “послойном” методе равномерность температур вдоль оси плотины (п. 1, а) обеспечена последовательным, равномерным от берега до берега бетонированием блоков, состоящих из одного слоя.

Для разгрузки напряжений, возникающих из-за неравномерности температур в горизонтальном, перпендикулярном оси плотины направлении, на открытых воздействию колебаний температуры наружного воздуха верховой и низовой гранях устраивают швы - надрезы. Возможность устройства надрезов в арочной плотине требует обоснования специальными исследованиями, так как существует мнение, что надрезы могут отрицательно повлиять на работу плотины, как единого целого. Основанием для выбора трубного охлаждения в качестве средства для выравнивания температур (п. 1, б) послужили результаты натуральных исследований [10], показавшие, что при шаге труб 1,5x1,5 м разность температур по сечению не превышает 5 °С. Основным фактором, определяющим эффективность трубного охлаждения, является скорость понижения температуры бетона. В [11] на основании аналитических расчетов показано, что при увеличении интенсивности трубного охлаждения прискального блока длиной 27 м вероятность трещинообразования возрастает, и при шаге труб 1,5x1,5 м непрерывное охлаждение через три недели приводит к нарушению условия трещиностойкости. Но это относится к блокам, уложенным на скалу или на старый бетон.

Как показали наблюдения за трещинообразованием в блоках Чиркейской плотины, удаленных от скального основания, количество трещин уменьшается с увеличением скорости охлаждения от 1,0 до 2,5 °С в сутки [9]. Причем наиболее интенсивное трещинообразование было отмечено при скорости охлаждения 1,0 °С в сутки, которая определена как максимально допустимая в нормативных документах [16]. Как показали натурные наблюдения при “послойном” бетонировании Курпсайской плотины, темп охлаждения 3-4 °С в сутки не вызывает трещинообразование блоков с размерами 30 и более метров.

Натурные исследования теплового баланса на горизонтальной поверхности бетона [8, 12] показали, что, изменяя режим подачи и стока воды на поверхность блока, можно оперативно влиять на температуру поверхности и изменять температурное поле по вертикальному направлению (п. 1, в).

При организации интенсивной подачи и стока воды таким образом, чтобы вода протекала по всей поверхности без образования застойных зон, средняя по горизонтальной поверхности температура

равна среднеарифметическому значению температуры воды, поступающей и стекающей с блока. При увлажнении - в результате интенсивного испарения - температура поверхности ниже температуры воздуха даже при полной солнечной радиации. Температура сухой поверхности выше температуры воздуха, особенно при солнечной радиации. При организации на поверхности блока постоянного слоя воды имеется возможность, изменяя расход подаваемой воды, регулировать температуру поверхности от температуры сухой поверхности до температуры при интенсивном поливе. При необходимости поверхность блока можно укрывать.

Обязательным условием правильного регулирования температуры вертикальных и горизонтальных поверхностей блоков (п. 1, б и 1, в) является наличие на строительстве службы регулирования температурного режима бетона, которая устанавливает в плотину закладные датчики температур, производит измерения, обработку данных измерений и на основе анализа состояния температурного поля и прогноза принимает оперативные решения по регулированию температур. Эта служба должна иметь программу для персонального компьютера, которая на основании результатов измерений температур бетона и климатических данных рассчитывает прогноз температурного режима бетона.

Выравнивание деформативных характеристик бетона (п. 1, б) необходимо главным образом по вертикальному направлению, где на контакте между блоками разность их значений для нижнего и для верхнего блока в основном определяется величиной интервала между бетонированием этих блоков. В [9] было установлено, что средний интервал в бетонировании блока на блок в Чиркейской плотине равен 10,5 суток, при этом 60 % блоков укладывались с интервалов более чем 8 суток. Трещины в основном возникали в блоках, которые бетонировались более чем через 7 суток после укладки нижнего блока. Большое влияние этого фактора на трещинообразование и необходимость назначения интервалов в бетонировании в зависимости от условий бетонирования показаны в [10]. В [11] тоже отмечается, что при перерывах в бетонировании менее 10 суток создается благоприятное термонапряженное состояние.

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие принципы новой технологии [13].

4. Для предотвращения трещинообразования бетона необходимы следующие основные мероприятия:

- интенсивное трубное охлаждение уложенного бетона;

- поярусное бетонирование плотины (без опережающих и отстающих секций);
- соблюдение интервалов при бетонировании блока на блок (определяются сроком подготовки блока к бетонированию, но не должны превышать 7 суток);
- гибкое регулирование температуры горизонтальной поверхности блоков;
- организация на строительстве службы регулирования температурного режима бетона.

5. Если интервал при бетонировании блока на блок превышает 7 суток, к температурному режиму бетона следует предъявлять такие же требования, как при укладке на скалу.

6. Для экстремальных условий рекомендуются следующие дополнительные средства:

- укрытие горизонтальной поверхности блоков;
- теплозащита напорной и низовой граней;
- затенение или увлажнение заполнителей на складах.

7. При выполнении требований пункта 1 не регламентируются:

- температура бетона в момент укладки (специальные установки для предварительного охлаждения бетона и заполнителей не строятся и не применяются);

- величина тепловыделения цемента;
- минимальные интервалы при бетонировании блока на блок.

Результаты освоения новой технологии на строительстве арочной плотины Миатлинской ГЭС. Плотина Миатлинской ГЭС (полная строительная высота 86,5 м) включает пробку, опорную подушку (седло), арку двойкой кривизны кругового очертания в плане (высотой 73 м) и береговые устои. Толщина арки по основанию 11,5 м, по гребню 6,3 м. Среднее расстояние между межсекционными швами 17,0 м. Объем бетона 108900 кубических метров, в том числе в арочной части - 77200 кубических метров. Климатические условия района строительства характеризуются среднегодовой температурой воздуха 12 °С. В году бывает около 40 дней со среднесуточной температурой воздуха ниже нуля, около 100 дней с температурой выше плюс 20 °С и 2 дня с температурой выше плюс 30 °С. Холодный период, в котором возможны отрицательные температуры, составляет 90 дней. В проекте Миатлинской ГЭС была принята традиционная схема возведения плотины с опережающими и отстающими секциями. Уста-

новлены жесткие требования к температурному режиму бетона: температура бетонной смеси в момент укладки не выше 15°C , максимальная температура бетона в блоках - не выше 42°C , разность между температурами в центре и на горизонтальной поверхности блоков - не более 14°C , разность между температурами в центре и на вертикальных гранях блоков - не более 24°C , скорость охлаждения бетона при расстоянии между трубами $1,5 \times 1,5$ м речной водой (с температурой $11-15^{\circ}\text{C}$) в первые 7 дней - не более $1,5^{\circ}\text{C}$ в сутки, скорость охлаждения бетона водой с холодильной станции (плюс 3°C): в первые 2 суток после включения - не более $1,4$, далее - не более $0,9^{\circ}\text{C}$. При строительстве арочной части плотины вместо этих требований были приняты требования новой технологии.

Новая технология была успешно освоена в процессе возведения Миатлинской плотины [14]. С соблюдением разработанных принципов уложено более 75 % объема арочной части плотины. При этом не только достигнуты высокие скорости бетонирования (средний 8 м в месяц), но и обеспечено предотвращение трещинообразования бетона. При регулярных обследованиях горизонтальных поверхностей блоков (100 %), поверхностей межсекционных швов (100 %), напорной и низовой граней (до 90 %) в уложенном с соблюдением положений новой технологии массиве бетона трещины не обнаружены. Это является убедительным подтверждением правильности принципов новой технологии.

Натурные исследования в процессе строительства показали, что главными для предотвращения трещинообразования являются интервалы при бетонировании блока на блок, непрерывность трубного охлаждения и поярусное бетонирование без опережающих секций (рис. 2).

Средней интервал при бетонировании блока на блок в Миатлинской плотине был 5,8 дней, в Чиркейской – 10,5 дней. На рис. 3 сопоставлены кривые обеспеченности интервалов при бетонировании блока на блок (высота 1,5 м) Миатлинской и Чиркейской [9] плотин. Блоки с трещинами на Чиркейской плотине бетонировались с большим интервалом.

На рис. 4 приведены кривые обеспеченности скорости охлаждения блоков Миатлинской и Чиркейской плотин после пика температур. В течение 3-х суток скорость охлаждения $1,5^{\circ}\text{C}$ в сутки на Миатлинской плотине выдержана в 50 % случаев, на Чиркейской плотине [9] скорость была ниже – $1,3^{\circ}\text{C}$ в сутки. Скорость охлаждения в течение 5 суток после пика температур блоков Миатлинской плотины, уложенных летом, значительно выше: в 75 % случаев выше $1,5$, в 20 % - выше $1,8^{\circ}\text{C}$ в сутки. Средняя за весь

период подготовки к омоноличиванию скорость охлаждения на Миатлинской плотине составила 0,3, на Чиркейской – 0,2 °С в сутки.

В результате поярусного бетонирования блоков (без опережающих и отстающих секций) и равномерного одновременного их охлаждения среднее раскрытие межсекционных швов на Миатлинской плотине составило 3,5 мм (максимальное 7,6 мм), что в 1,6 раза превысило среднее раскрытие швов на Чиркейской плотине и обеспечило на Миатлинской плотине значительно лучшие условия для цементации, чем на Чиркейской при традиционном способе возведения.

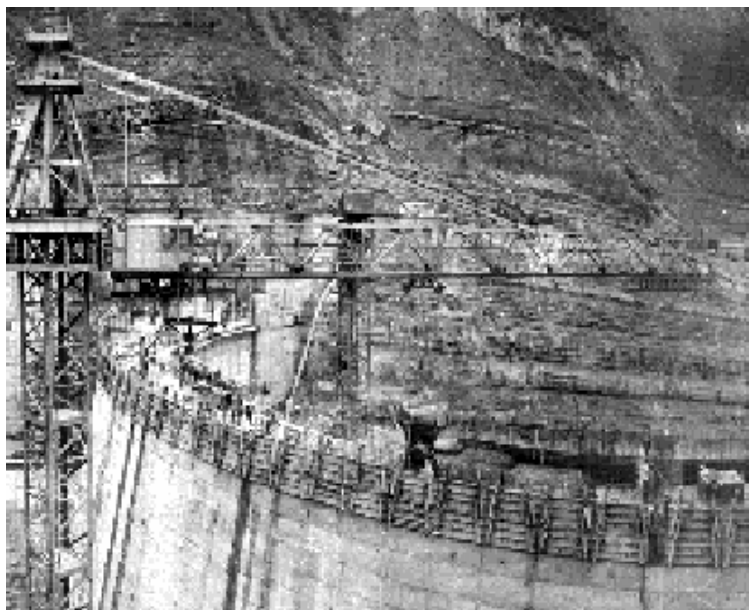


Рис. 2. Арочная плотина Миатлинской ГЭС

В сочетании с непрерывным трубным охлаждением на Миатлинской плотине в холодный период применяли теплозащиту напорной и низовой грани прикрепленным к консольной опалубке брезентом. Сроки использования теплозащиты составили 25 - 30 дней. В результате разность между температурами в центре и на гранях плотины за весь период бетонирования не превысила 24 °С.

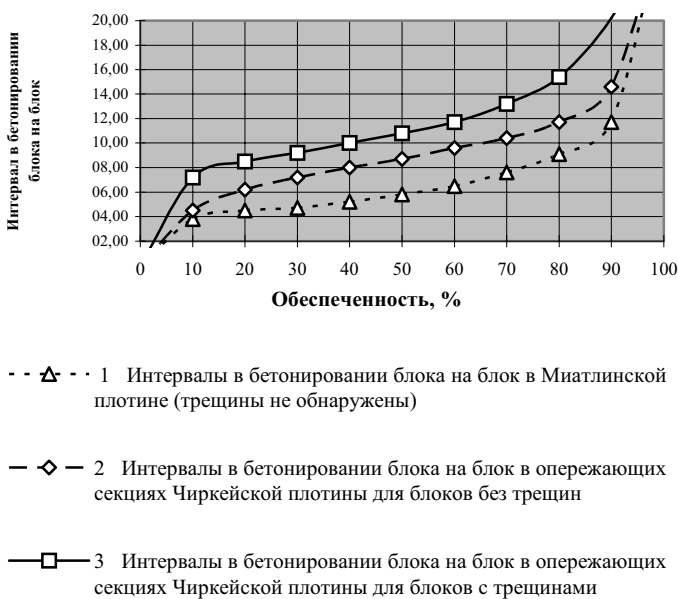
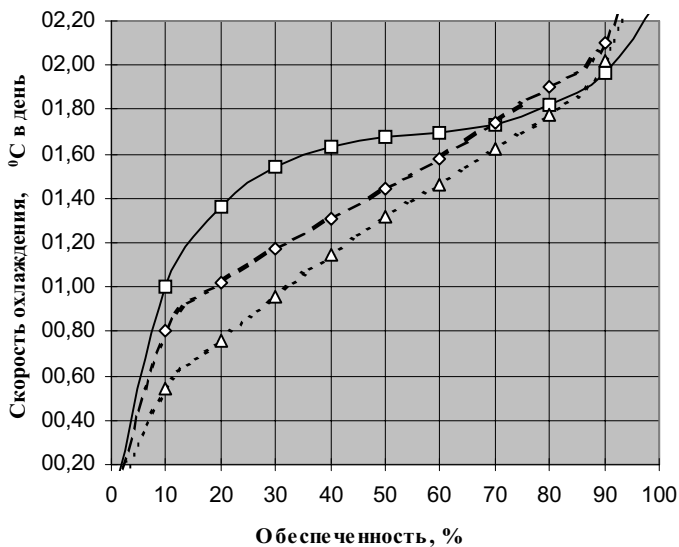


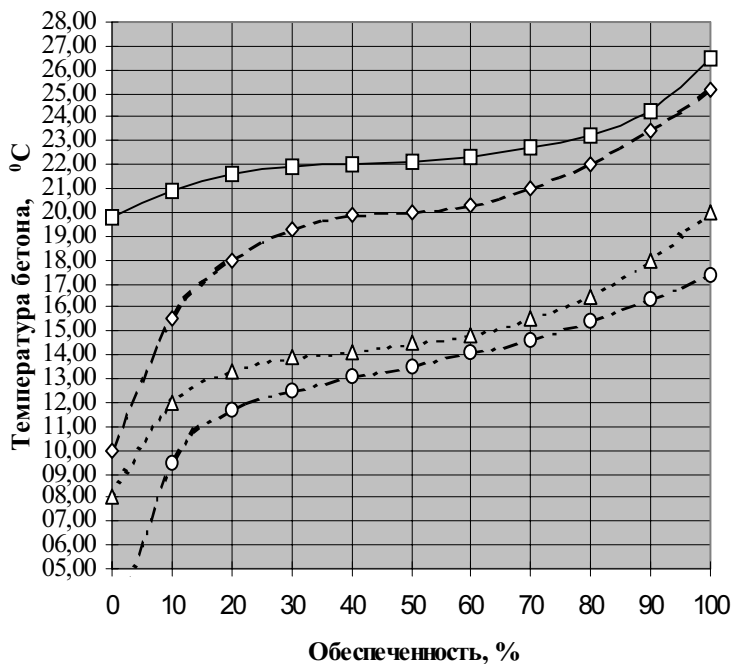
Рис. 3. Обеспеченность интервалов в бетонировании блока на блок

На рис. 5 приведена обеспеченность температуры бетона в момент укладки, а на рис. 6 - обеспеченность максимальной температуры бетона в блоках высотой 1,5 м. Средняя температура бетона в момент укладки в июне, июле и августе на Миятлинской плотине была равна 21,9, 22,0 и 23,6 °С, на Чиркейской плотине в те же месяцы, когда работали установки охлаждения заполнителей, - 16,3; 17,9 и 18,1 °С. Максимальная температура бетона в блоках высотой 1.5 М на Миятлинской плотине в 35 % случаев превысила 42 и в 13 % случаев 45 °С (в Чиркейской плотине соответственно 50 и 15 % случаев). Высокие температуры бетона в момент укладки и высокие максимальные температуры бетона не вызвали трещинообразование в Миятлинской плотине, как это имело место в Чиркейской [9] и Ингурской [15] плотинах, в которых трещинообразование было наиболее интенсивным в теплый период: на лето приходится – 38 %, на весну и лето – 80 % блоков с трещинами.



- 1 Средняя за 5 дней после пика температуры скорость охлаждения бетона в блоках Миатлинской плотины, уложенных в июле - августе
- ◇— 2 Средняя за 3 дня после пика температуры скорость охлаждения бетона в блоках Миатлинской плотины за весь период наблюдений
- △--- 3 Средняя за 3 дня после пика температуры скорость охлаждения бетона в блоках Чиркейской плотины за весь период наблюдений

Рис. 4. Обеспеченность скорости охлаждения бетона в блоках плотины



- - ○ - - 1 Температура бетона в ноябре - марте
- - - △ - - 2 Температура бетона в апреле и октябре
- - ◇ - - 3 Температура бетона в мае и сентябре
- □ — 4 Температура бетона в июле - августе

Рис. 5. Обеспеченность температуры бетона в момент укладки на Миатлинской плотине

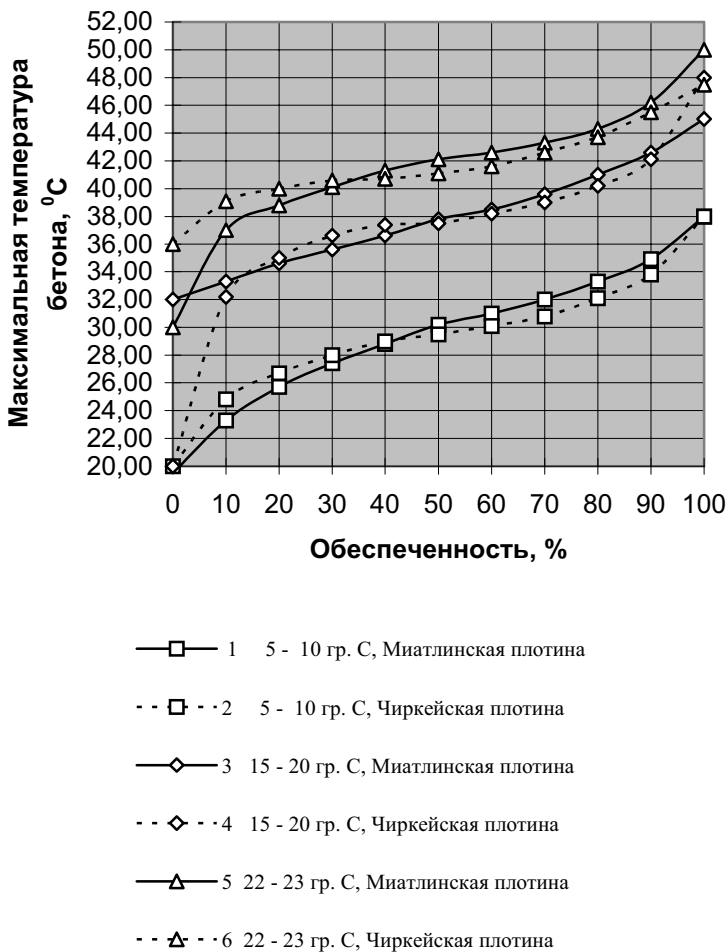


Рис. 6. Обеспеченность максимальной температуры бетона в блоках высотой 1,5 м при разной температуре воздуха

Библиографический список

1. **Нилендер Ю.А.** Испытания Днепровской плотины. – М.: Стройиздат, 1937.
2. **Лукьянов В.С.** Борьба с появлением температурных трещин в бетонных мостовых опорах. – М.: Трансжелдориздат, 1937.
3. **Гунтер Ю.С.** Регулирование температурных напряжений бетона массивных плотин // Гидротехническое строительство. – 1965. – № 3.
4. **Толкачев Л.А., Судаков В.Б.** Токтогульский метод бетонирования сооружений. – М.: Энергия, 1973.
5. **Инюшин М.В.** О тепловом режиме массивных бетонных плотин // Гидротехническое строительство. – 1965. – № 7.
6. **О. Holden.** High - Lift Construction Methods for Mass Concrete. Proceedings of the ASCE, June, № PO3. 1959. USA.
7. **Вербицкий Г.П., Чоговадзе Г.И., Дanelия Ф.И.** Об укрупнении блоков бетонирования арочных плотин с допущением радиальных термических трещин // Гидротехническое строительство. – 1987. – № 10.
8. **Гунтер Ю.С.** и др. Тепловой баланс блоков из укатанного бетона // Сб. докл. «Материалы конференций и совещаний по гидротехнике, ПТТС-88». – М.: Энергоатомиздат, 1989.
9. **Елизаров Е.Н.** и др. Анализ трещинообразования в блоках Чиркейской ГЭС. // Энергетическое строительство. – 1977. – № 8.
10. **Эйдельман С.Я.** Натурные исследования плотины Братской ГЭС. – М.: Энергия, 1968.
11. **Трапезников Л.П.** Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
12. **Гунтер Ю.С.** и др. Эффективность регулирования температуры бетона плотины Курпсайской ГЭС // Сб. докл. «Материалы конференций и совещаний по гидротехнике, ПТТС-88». – М.: Энергоатомиздат, 1989.
13. **Гунтер Ю.С.** и др. Принципы поярусной технологии возведения арочных плотин // Сб. докл. «Материалы конференций и совещаний по гидротехнике, ПТТС-88». – М.: Энергоатомиздат, 1989.
14. **Гунтер Ю.С.** и др. О требованиях к температурному режиму и технологии возведения арочных плотин // Сб. докл. «Материалы конференций и совещаний по гидротехнике, ПТТС-88». – М.: Энергоатомиздат, 1989.
15. **Колбазов Н.З., Микеладзе Г.Т., Габуния Л.С.** Внедрение передовой технологии и новой техники на строительстве Ингурской ГЭС // Гидротехническое строительство. – 1984. – № 8.
16. **Правила** производства бетонных работ при возведении гидротехнических сооружений. ВСН 31-83. – Министерство энергетики СССР, 1984.

УДК 627.824.012.4.023: 693.54:626

Управление температурным режимом – важнейший фактор скорейшего производства работ на высокой арочной плотине

*Ю.С. Гунтер, А.С. Данилов, кандидаты техн. наук,
М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук,
В.А. Редькин, М.В. Щелканова, инженеры*

На строительстве Миатлинской ГЭС была предложена новая поярусная технология возведения арочной плотины с оперативным гибким регулированием температурного режима бетона в процессе строительства.

От «столбчатого» метода возведения гравитационных плотин и от традиционного метода возведения арочных плотин с опережающими и отстающими секциями поярусная технология отличается тем, что наращивание плотины ведется равномерно ярус за ярусом без отстающих и опережающих секций с последовательной укладкой блоков одного яруса. Поярусная технология использует преимущества «послойного» метода – отсутствие опережающих секций, возможность организации поточного метода производства работ [1].

Поярусная технология отличается от послойного метода тем, что высота блока не зависит от возможностей уплотняющей техники, как при послойном бетонировании, а определяется количеством слоев, которых в блоке может быть два и более. Это дает следующие преимущества:

- за счет сокращения количества горизонтальных швов увеличивается надежность сооружения, что особенно важно для арочных плотин;
- в результате увеличения высоты блока–яруса и количества непрерывно укладываемой бетонной смеси возрастает средняя интенсивность укладки бетона, сокращается частота смены операций и частота переходов от операции к операции в потоке.

Основным средством регулирования температурного режима бетона при поярусной технологии является трубное охлаждение, которое производят непрерывно с оптимальной интенсивностью и используют не только для снижения максимальной температуры бетона и охлаждения кладки до температуры омоноличивания, но и (в сочетании с устройством временной теплозащиты внешних граней в холодный период) для выравнивания температурного поля в целях уменьшения перепадов между температурами в центре и на внешних гранях плотины. При послойном бето-

нировании основным средством регулирования температурного режима бетона является поверхностное охлаждение слоя – блока, перепад между температурами в центре и на внешних гранях специально не регулируют, а для предотвращения трещинообразования внешних граней устраивают швы–надрезы, уменьшающие на них растягивающие напряжения.

Анализ трещинообразования в блоках арочной Чиркейской плотины, построенной в аналогичных климатических условиях, показал [2], что, хотя такие параметры, как температура бетонной смеси при укладке, максимальный разогрев в блоках, перепады температур между ядром и горизонтальной поверхностью блоков оказывают влияние на процесс трещинообразования, определяющими факторами являются сроки перекрытия блоков и наличие опережающих секций при бетонировании плотины. В опережающих секциях зафиксировано 89 % всех температурных трещин, наблюдаемых с поверхности блока. Трещины были обнаружены в 47 % блоков опережающих секций и только в 8,6 % блоков – отстающих. Значительное трещинообразование наблюдалось на Саяно–Шушенской и других плотинах, возводившихся столбчатым методом, в то время как в массиве Токтогульской плотины, возводимом послойным методом, трещины не зарегистрированы.

Расчеты температурного режима бетона Миатлинской плотины показали, что требования проекта к максимальной температуре, перепаду температур и темпу остывания одновременно удовлетворить чрезвычайно трудно, а при неблагоприятном сочетании климатических и производственных факторов – невозможно. Например, при интенсивном поливе уменьшается разогрев бетона, но перепад температур превышает допустимый и наоборот. Вопрос предотвращения трещинообразования в тонкой арочной плотине Миатлинской ГЭС явился определяющим при разработке поярусной технологии и потребовал комплексного подхода к организации бетонных работ и технологии регулирования температурного режима бетона.

В результате предварительных исследований для обеспечения возможности гибкого использования средств и мероприятий по регулированию температурного режима были разработаны:

- режимы регулирования температуры бетона для различной высоты блоков, разной температуры бетонной смеси, различного расхода и типа цемента, разной температуры воздуха и др.;
- рекомендации по оперативному управлению температурным режимом бетона плотины, дающие возможность строителям маневрировать комплексом мероприятий по регулированию;

- увеличение мощности холодильной и насосной станций системы охлаждения плотины с увеличением расхода воды, подаваемой в трубное охлаждение;
- охлаждение крупных заполнителей речной водой на установке контрольного грохочения с расходом до 2 м³ воды на 1 м³ заполнителей;
- полив в жаркое время граней плотины речной водой;
- вынесение коллекторов и стояков трубного охлаждения на низовую грань плотины, устройство на сливе каждого змеевика воронки с разрывом струи и вентилей регулирования расхода воды, замена четырехтрубной системы магистралей на двухтрубную;
- предложения по организации строительного контроля с привлечением специализированной организации для выполнения оперативного анализа данных по температурному режиму, прогнозирования и разработки оперативных рекомендаций;
- проект размещения контрольно–измерительной аппаратуры строительного контроля с увеличенным количеством датчиков;
- программа исследований температурного режима и трещинообразования в строительный период.

По результатам натурных наблюдений температура бетонной смеси летом превышала допускаемые по технологическим правилам величины и была равна 20 и 22 °С соответственно в 100 и 55 % случаев. Тем не менее это не привело к образованию трещин. Проведенный анализ показал, что повышение температуры бетонной смеси до 22–23 °С допустимо.

Сопоставление максимальной температуры в блоках высотой 1,5 м Миатлинской и Чиркейской плотин для разных температур воздуха показало, что для теплого периода года максимальные температуры близки. На Миатлинской плотине 42 и 45 °С соответственно в 65 и 85 % случаев, на Чиркейской – в 50 и 85 % случаев. В условиях отсутствия охлаждения заполнителей (установка не включалась) на строительстве Миатлинской ГЭС снижение максимальной температуры достигнуто в основном за счет уменьшения расхода цемента с 260 (проект) до 220–240 кг/м³.

Расход цемента на Миатлинской плотине был меньше, чем на Чиркейской на 20–40 кг, что соответствует снижению максимальной температуры на 3 °С. Учитывая, что температура бетонной смеси в летнее время при укладке на Чиркейской плотине была на 3–4,5 °С ниже, уход за поверхностью бетона одинаков, а трубное охлаждение на Миатлинской плотине было более интенсивным и работало эффективнее, можно считать, что тепловыделение цемента карачаево–черкесского заво-

да близко по величине к тепловыделению цемента вольских и новороссийских заводов.

Отсутствие трещин в блоках, уложенных поярусной технологией, показывает, что при равномерном возведении, постоянно работающем трубном охлаждении и сроках перекрытия блоков не более 7 суток допускается максимальная температура бетона 45 °С, а возможно и выше. В осенне–весеннее время максимальные разогревы миатлинских блоков близки к чиркейским, в зимнее время – выше чиркейских.

Исследованиями [2] было установлено, что с увеличением сроков перекрытия блоков опасность трещинообразования возрастает. Среднее время перекрытия блоков Чиркейской плотины 10–11 суток, Миатлинской плотины – менее 6 суток. Поэтому уменьшение сроков перекрытия – важнейший фактор предотвращения трещинообразования.

Скорость охлаждения Миатлинской плотины в течение трех суток составила 1,5 °С/сут. в 50 % случаев во все сезоны (для Чиркейской плотины – 1,3 °С/сут.). На 6–10 суток – 1,2 °С/сут. в 48 % случаев, в 90 % случаев скорость остывания не превышала 1,7 °С/сут. Скорость остывания не перекрытых блоков в пределах 1,0–1,44 °С/сут. в период от 6 до 10 суток на Миатлинской плотине не оказала влияния на трещинообразование. Однако, если при сроках перекрытия до 7 суток можно утверждать, что ограничивать скорость охлаждения не следует, то при больших сроках перекрытия этот вопрос остается спорным.

Предотвращение трещинообразования в бетоне, уложенном поярусной технологией на Миатлинской плотине (около 75 % объема арочной части плотины), обусловили:

- равномерное поярусное бетонирование (без опережающих секций);
- высокий темп возведения плотины 7,5 м/мес. при среднем перекрытии блоков менее 6,0 суток;
- интенсивное непрерывное трубное охлаждение бетона речной и охлажденной водой (это в сочетании с утеплением в холодный период боковых граней определило меньшие перепады температур);
- снижение расхода цемента до 220–240 кг/м³;
- армирование напорной и низовой граней плотины.

Результаты наблюдений за температурным режимом плотины Миатлинской ГЭС показывают, что при поярусном возведении без опережающих элементов со сроками перекрытия блоков 4–7 суток и непрерывном трубном охлаждении становятся малозначимыми для предотвращения трещинообразования такие параметры температурного регулирования, как температура бетонной смеси, температура максимального разогрева

бетона, скорость остывания блоков после пика температур. Основное значение приобретают перепады температуры ядро – грань (до 22 °С) и хорошая работа трубного охлаждения. Причем работа трубного охлаждения определяет сроки снятия утепления с граней. В этом заключается гибкое регулирование в зависимости от измерительной информации и температурных прогнозов.

Анализ опыта возведения Миатлинской плотины позволяет утверждать, что поярусная технология может обеспечить отсутствие трещин. В условиях крайне сжатых сроков охлаждения плотины и ее омоноличивания для постановки под напор строители обратили серьезное внимание на работу трубного охлаждения, наладили постоянную проверку работы змеевиков и холодильной станции.

Достигнутые на Миатлинской плотине высокие темпы охлаждения бетонной кладки 9 °С/мес. являются результатом постоянного контроля за работой трубного охлаждения. Для сравнения средние скорости охлаждения плотины Чиркейской ГЭС составили 5–7 °С в месяц.

Выводы

1. Эффективность применения поярусной технологии бетонирования на арочной плотине Миатлинской ГЭС доказана рекордным темпом роста плотины в высоту (средний 7,5, максимальный 9 м в месяц), высоким качеством сооружения и хорошими условиями цементации швов.

В результате использования поярусной технологии достигнуто уменьшение стоимости и трудозатрат соответственно:

- на 217 тыс. руб. и 3,02 тыс. человеко–дней за счет сокращения срока охлаждения плотины;
- на 140 тыс. руб. и 1,68 тыс. человеко–дней за счет отказа от эксплуатации установки охлаждения заполнителей бетона;
- на 280 тыс. руб. за счет сокращения утепленных наружных граней.

2. Основные характерные элементы поярусной технологии возведения арочной плотины:

- равномерное возведение сооружения при последовательном бетонировании блоков каждого яруса со сроками перекрытия не более 7 суток;
- использование в качестве основного средства регулирования температурного режима бетона непрерывного интенсивного трубного охлаждения, выполняющего следующие функции: снижение максимальной температуры, охлаждение до температуры омоноличивания и выравнива-

ние температурного поля (в холодный период в сочетании с теплозащитой внешних граней);

- формирование межсекционных швов железобетонными панелями, включающими шпонки и цементационную арматуру.

3. При поярусном возведении без опережающих элементов и в непрерывном трубном охлаждении становятся малозначимыми для предотвращения трещинообразования температура бетонной смеси, максимальная температура бетона, скорость охлаждения, а основное значение приобретают сроки перекрытия блоков и теплозащита граней от температурного удара.

4. На основании натуральных наблюдений на Миатлинской плотине обосновано:

- повышение допустимых температур: бетонной смеси – до 23 °С, максимальной бетона – до 45 °С;
- увеличение скорости охлаждения бетона: в период после прохождения пика температур до 2,0 °С в сутки, средней – до 9 °С в месяц;
- увеличение темпа возведения плотины до 12 м в месяц.

5. Опыт возведения Миатлинской плотины позволяет поставить вопрос о снятии ограничений темпа роста сооружения в высоту, температуры бетонной смеси, максимальной температуры бетона, высоты блоков, скорости охлаждения и, возможно, плановых размеров блоков (в целесообразных пределах) при поярусной технологии бетонирования со сроками перекрытия блоков менее 7 суток, непрерывном интенсивном трубном охлаждении бетона и теплозащите граней в холодный период.

6. Увеличенное раскрытие межсекционных швов до 5–7 мм (против 3 мм в среднем на Чиркейской плотине) обеспечило условия качественной цементации швов. На Миатлинской плотине не было ни одного непроходимого шва.

Библиографический список

1. **Толкачев Л. А., Судаков В. Б.** Токтогульский метод бетонирования массивных сооружений. – М.: Энергия, 1973.
2. **Анализ трещинообразования в блоках Чиркейской ГЭС / Е. Н. Елизаров, Г. В. Кудепалов, В. С. Лахтин, В. А. Дорф, Л. А. Кораблева // Энергетическое строительство. – 1977. – № 8. – С. 66–69.**

УДК 627.824.7.012.4

Железобетонные панели для образования цементируемых швов как элемент поярусной технологии

*И.В. Артемьев, инж., А.С. Данилов, канд. техн. наук,
В.Н. Двуреков, А.В. Евсеев, инженеры,
М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук*

Важной составной частью внедренной на строительстве Миатлинской ГЭС поярусной технологии возведения арочной плотины является новый способ образования и новая конструкция сборных элементов для выполнения межсекционных швов плотины. Основные требования к этим элементам определяются сущностью поярусной технологии: бетонированием плотины горизонтальными ярусами от берега до берега; последовательным бетонированием блоков смежных секций, разделенных межсекционным швом; отсутствием в процессе возведения перерывов, необходимых для твердения бетона, снятием опалубки с поверхности швов и установкой выпусков и труб цементации, а также уплотнений цементируемых швов.

Такой технологии бетонирования отвечает способ образования межсекционных швов с помощью железобетонных панелей, оставляемых в массиве бетона. В отечественном гидростроении накоплен значительный опыт применения сборных железобетонных плит (армопанелей), включаемых в конструкции сооружений в качестве несущих, армирующих или формообразующих элементов или же совмещающих эти функции (Плявинская, Чебоксарская, Ташкумырская и другие ГЭС; Загорская и Кайшядорская ГАЭС; Токтогульская и Курпсайская гравитационные плотины, Андижанская массивно-контрфорсная, Ингурская арочная плотины). Опыт этих строек показал, что применение армопанелей сокращает трудоемкость опалубочных работ, ускоряет подготовку блоков, резко снижает потребность в пиломатериалах.

С наибольшим эффектом железобетонные панели были применены как основной элемент «токтогульского метода» — технологии возведения плотин горизонтальными слоями, укладываемыми от берега до берега и от бьефа до бьефа.

Единственной арочной плотиной, построенной с широким применением сборного железобетона, до строительства Миатлинской ГЭС была

Ингурская плотина, возводившаяся традиционным «столбчатым» методом, опережающими и отстающими секциями. Опыт ее строительства и, в частности, применения сборных железобетонных панелей в межсекционных швах выявил, наряду с положительными результатами, ряд недостатков, связанных как с применявшейся конструкцией панелей, так и с технологией их монтажа.

Как свидетельствуют отчеты о цементации плотины, при гидравлическом опробовании и омоноличивании межсекционных швов многие карты цементации оказывались непроходимыми из-за большого количества уступов («замков») на поверхности цементируемых швов. Не имело удовлетворительного решения и сопряжение сборных панелей с цементационными и противодиффузионными уплотнениями, с верховой и низовой гранью плотины, что приводило к применению на значительной части поверхности швов доборной, выполнявшейся по месту, деревянной необорачиваемой опалубки. Это также ухудшало качество поверхности швов и снижало эффект от применения железобетонных панелей. Не обеспечивалась герметичность контурных уплотнений цементационных карт, что вело к большим потерям раствора при цементации.

Технология, сочетающая преимущества токтогульского метода бетонирования с конструктивными особенностями арочной плотины, была разработана и осуществлена на строительстве Миатлинской ГЭС. При возведении тонкой арки (толщина по низу 11,5 м, по верху 6,3 м) особенно важное значение приобретало обеспечение высокого качества работ, и в частности цементации межсекционных швов. В ходе разработки технологии бетонирования потребовалось разработать конструкцию межсекционных швов в целом, включая вопросы их геометрии, уплотнения и цементации, а также конструкции самих сборных элементов в комплексе с технологией их изготовления, транспортирования и монтажа.

Межсекционные или радиальные швы арочной плотины представляют собой, кроме центрального шва, не плоскую, а сложную, так называемую геликоидальную поверхность, которая образуется при перемещении горизонтального прямого отрезка вдоль вертикальной прямой с постепенным его поворотом на определенный угол с каждым метром подъема.

Поверхность межсекционных швов имеет штрабы — трапециевидные выступы, осуществляющие взаимное зацепление соседних секций плотины. По высоте поверхность швов разделена на участки высотой до 12—15 м — карты цементации, разграниченные уплотнениями — цементационными шпонками; такие же уплотнения ограничивают карты цементации со стороны верховой и низовой грани; они препятствуют выте-

канию нагнетаемого в полость шва цементного раствора за пределы цементируемого участка шва.

В местах расположения горизонтальных уплотнений штрабы прерываются. Не имеют штраб также участки шва, примыкающие к верховой и низовой граням плотины. Вследствие кривизны граней эти участки имеют переменную по высоте ширину.

В полости швов располагаются выпуски систем цементации:

- линейные — для первичной цементации и
- клапанные — для многократной (повторной) цементации.

В систему цементации швов входят также подводящие к выпускам трубы, воздухоотводящие штрабы, цементационные шпонки и другие элементы.

Все эти многочисленные конструктивные и геометрические особенности межсекционных швов необходимо было учесть при выполнении их из железобетонных панелей. Исходя из требований проекта, особенностей технологии, условий строительства и с учетом опыта предыдущих строек, были сформулированы технические требования к железобетонным панелям.

Конструкция железобетонных панелей, их геометрические размеры, формы и узлы крепления должны обеспечивать:

- сохранение проектной разрезки плотины на секции и блоки бетонирования;
- сохранение геометрии межсекционных швов, деления на карты цементации, размеров и расположения штраб, близких к проектным;
- установку необходимой цементационной арматуры при минимальных затратах труда на ее монтаж и стыковку в блоках бетонирования;
- качественное стыкование панелей по высоте с образованием гладкой поверхности в месте стыка;
- надежное сцепление тыльной стороны панелей с монолитным бетоном;
- герметичность сопряжения панелей с контурными уплотнениями цементационных карт;
- однотипность или минимальное число типоразмеров плит при минимуме или полном исключении доборной опалубки;
- прочность панелей и их узлов при восприятии давления бетонной смеси, укладываемой и уплотняемой по принятой технологии, а также при монтажных и транспортных нагрузках.

В ходе разработки было рассмотрено два варианта образования поверхности шва из сборных панелей:

- *первый* – из прямоугольных панелей одного-двух типоразмеров, устанавливаемых в средней, штрабленной части шва, и дополнительных (доборных) панелей переменной ширины, устанавливаемых на участках шва, сопрягающих основные панели с гранями плотины;

- *второй* – из панелей в форме трапеции, боковые стороны которой параллельны верховой и низовой граням плотины, а основания имеют длину, равную толщине арки на данной отметке; так как толщина арки изменяется от 11,5 до 6,3 м, то все плиты, образующие шов, имеют различную длину оснований и переменный наклон боковых сторон.

Сравнение показало преимущество второго варианта, при котором в сумме получается меньшее число типоразмеров плит, и все они могут быть в принципе изготовлены в одной форме. Этот вариант сборности и был осуществлен на плотине Миатлинской ГЭС.

Было также изучено два способа образования геликоидальной поверхности шва.

- *в первом* из них панели изготавливаются искривленными на заданную величину путем перекоса поддона формы специальными винтами;

- *во втором* все панели выполняются плоскими, но при монтаже панель каждого следующего яруса поворачивают относительно нижележащей на расчетный угол. При этом получается поверхность, близкая к геликоидальной, составленная из плоских элементов, однако при этом возникает проблема ликвидации «замков» в стыках между панелями, в которых при повороте панелей образуются уступы.

В ходе разработки были испытаны оба способа, и после обоснования был принят второй, как технологически более простой и осуществимый на практике.

Разработанная с учетом изложенных требований железобетонная панель межсекционного шва представляет собой плиту с гладкой лицевой и шероховатой тыльной поверхностями. Размеры плиты: высота 1,48 м, длина наибольшая 11,5 м, наименьшая 6,0 м; толщина минимальная 0,15 м, с выступами 0,30 м; масса максимальная 9,5 т.

На лицевой поверхности выполнены трапециевидные выступы, соответствующие проектным штрафам межсекционных швов. Их число в зависимости от длины панели (т.е. толщины арки) меняется от 7 до 4. Выступы смежных по высоте плит точно совпадают по вертикали; таким образом образуются непрерывные вертикальные штрабы в пределах карты цементации.

В верхней и нижней панелях каждой карты цементации выступы доходят только до половины высоты плиты и плавно переходят в плоскость. В стыке между этими плитами, на плоском участке шва, размещается горизонтальная цементационная шпонка, разделяющая карты цементации.

Этим были значительно упрощены изготовление и монтаж плит. С той же целью проектная вертикальная разводка труб многократной цементации была изменена на горизонтальную, что в три раза уменьшило количество стыков труб между ярусами бетонирования.

В панели закладываются трубы многократной цементации, выпуски которых выходят на лицевую поверхность. При изготовлении панелей в них закладываются также деревянные бруски для последующего крепления линейных выпусков первичной цементации, а в верхних панелях каждой карты — воздухоотводящих штраб.

На тыльной стороне плит после их изготовления выполняются цилиндрические штрабы-вмятины; сразу же после снятия плит с поддона с их тыльной поверхности удаляется цементная пленка до обнажения зерен крупного заполнителя. Часть плит изготавливалась также с «щетиной» на тыльной стороне.

Бетон плит имеет марку 300₂₈; минимально необходимая прочность при распалубке — 60 % марочной (18 МПа), минимальная при транспортировке — 75% марочной (22,5 МПа).

Ряд принципиально новых конструктивных решений, осуществленных в панелях для швов плотины Миатлинской ГЭС, позволил устранить недостатки, связанные с применением сборных железобетонных плит на Ингурской плотине.

Так на верхней и нижней кромках каждой панели выполнены фаски. Панели монтируются на слой раствора; при заделке стыка между смонтированной и нижележащей панелями фаска заполняется раствором, который заглаживается вровень с лицевой поверхностью панелей, образуя между ними плавный, без уступа переход.

Цементационные шпопки, расположенные вдоль верховой и низовой граней, закладываются в панели при их изготовлении отрезками по 1,5 м. После монтажа панелей концы шпонок стыкуются, образуя водонепроницаемый контур. Апробирована также закладка горизонтальных шпонок в нижние плиты каждой карты цементации — этот способ применялся наряду с установкой горизонтальных шпонок в стыках между плитами.

Сопряжение панелей с противофильтрационной шпонкой осуществлялось непосредственным примыканием торца плиты к компенсатору шпонки, оклеенному битумматами.

Между контурным уплотнением грани и противодиффузионной шпонкой закладывалась пропитанная битумом доска или стальной лист. На низовую грань плиты панели выходили своими торцами, непосредственно примыкая к поверхности консольной опалубки.

Помимо разработки конструкции швов и железобетонных панелей программа работ включала также создание форм для изготовления панелей; изготовление и испытание опытных образцов; отработку на опытных изделиях и фрагментах межсекционного шва элементов конструкции шва, технологии изготовления и монтажа панелей; исследование в натуральных условиях — на опытном участке межсекционного шва — качества получаемой поверхности, раскрытия и проходимости швов, сцепления железобетонных панелей с монолитным бетоном и других характерных показателей.

Универсальная форма для изготовления панелей межсекционных швов, разработанная на основе технических требований к панелям, состоит из поддона, откидных продольных бортов и съемных поперечных бортов. Поддон имеет поверхность с углублениями, соответствующими проектной форме штраб межсекционного шва.

Длина формы рассчитана на изготовление изделий максимальной длины. Поперечные борта смещались относительно поддона и закреплялись в любом положении, позволяя изготовить плиты всех необходимых типоразмеров. Для изготовления плит с меньшим количеством штраб или с укороченными штрабами (на концевых участках цементационной карты) в углубления поддона устанавливались соответствующие вкладыши. Проектное положение труб и выпусков цементации, цементационных шпонок, монтажных петель фиксировались с помощью специальных элементов формы.

Положительные результаты испытаний и исследований позволили рекомендовать применение панелей в межсекционных швах плиты, что и было осуществлено в период с апреля по декабрь 1985 г.

За этот период было изготовлено и смонтировано 240 армопанелей 170 типоразмеров. Все они были изготовлены в одной форме на полигоне сборного железобетона при бетонном заводе Миатлинской ГЭС. Цикл изготовления одного изделия составлял 12—16 ч и включал подготовку формы, установку в нее сетки, закладных, цементационной арматуры; укладку и уплотнение бетона с устройством вмятин; пропаривание изделия в камере; охлаждение и съем готового изделия с поддона; обработку тыльной поверхности, складирование и маркировку.

Благодаря оперативной связи между районом основных работ и полигоном изготовление каждой партии панелей для очередного яруса пло-

тины выполнялось своевременно, без брака и отклонений. Производство также своевременно обеспечивалось рабочей документацией, сводившейся, главным образом, к заданию переменных размеров изделий и привязке элементов цементационной арматуры.

Натурные исследования межсекционных швов включали установку щелемеров, фиксировавших раскрытие швов, а также плотность контактов тыльной стороны плит с монолитным бетоном; определение гидравлической проходимости цементационных карт и их герметичности при нагнетании воды и цементного раствора; бурение скважин по контакту тыльной стороны плит и монолитного бетона с нагнетанием в них воды для определения плотности сцепления и водонепроницаемости контакта.

В результате проведенных исследований было экспериментально установлено наличие плотного водонепроницаемого контакта тыльной стороны железобетонных панелей с монолитным бетоном в 100 % случаев, независимо от установки или отсутствия анкеров («щетины»).

Раскрытие межсекционных швов при остывании массива плотины до температуры омоноличивания составило от 0,7 до 7,35 мм (в среднем 3—5 мм). Гидравлическое опробование карт перед цементацией показало хорошую проходимость практически всех швов. Герметичность контурных уплотнений в ряде мест была нарушена, что связано в большинстве случаев с излишней жесткостью сварного стыка вертикальной и горизонтальной цементационных шпонок и требует доработки конструкции уплотнения.

Общий вывод о высоком качестве цементируемых швов Миатлинской плотины в целом можно сделать, сравнивая данные по расходу цемента при первичной цементации с аналогичными данными по плотине Ингури ГЭС. Исходя из средних величин раскрытия швов, расход цемента на 1 м² шва для Ингурской плотины должен был быть в три раза меньше, чем для Миатлинской. По отчетным данным Гидроспецпроекта средние расходы цемента составили: для Миатлинской плотины — 6,65 кг/м² (при этом по арочной части — 9,1 кг/м²); для Ингурской плотины — 20,0 кг/м² (по арочной части — 20,4 кг/м²).

Если учесть, что до 40 % общего расхода цемента при омоноличивании Миатлинской плотины составили потери из-за негерметичности карт цементации, то очевидно, что для плотины Ингури ГЭС эти потери были в несколько раз больше.

Выводы

1. Железобетонные панели новой конструкции, перекрывающие всю плоскость межсекционного шва, смонтированными в них цементационной арматурой и шпонками явились одним из главных составных элемен-

тов новой поярусной технологии бетонирования, обеспечившим возможность применения этой технологии при возведении арочной плотины, сокращение цикла работы на каждом блоке и ярусе плотины и достижение рекордного темпа роста плотины.

2. Комплексное решение конструктивных и технологических вопросов на основе всестороннего изучения имеющегося опыта позволило создать конструкцию панелей, технологичную в изготовлении и монтаже, обеспечившую высокое качество работ по возведению и омоноличиванию плотины.

Библиографический список

1. Толкачев Л. А., Судаков В. Б. Токтогульский метод бетонирования массивных сооружений. – М.: Энергия, 1973.

2. Аргал Э. С. и др. Цементация швов бетонной плотины в очереди строительства Ингури ГЭС // Труды Гидропроекта. –1982. –Вып. 75.

УДК 621.224-253.5.004.69

Оптимизация формы лопастей рабочих колес гидротурбин Чиркейской ГЭС

М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук, А.А. Куприк, инж.

В соответствии с программой РАО «ЕЭС России» по развитию электроэнергетики России до 2010 г. предстоит расширить работы по модернизации и реконструкции действующих ГЭС. В настоящее время проводится обследование ряда ГЭС с оценкой эффективности мероприятий по модернизации. Прежде всего имеются в виду гидроэлектростанции с морально устаревшим и физически изношенным оборудованием. В то же время немалые резервы в улучшении энергетических параметров гидроагрегатов существуют и на сравнительно недавно принятых в эксплуатацию ГЭС.

Рассмотрим эффект от проведенной модернизации рабочих колес (РК) на основе материалов натуральных испытаний турбин Чиркейской ГЭС, которая состояла в модификации лопастей путем их подрезки.

Известны опыты подрезки лопастей поворотно-лопастных (ПЛ) РК и влияние модификации лопасти на энергетические характеристики турбины [1]. В случае ПЛ гидротурбин подрезка с округлением зоны пересечения выходной и периферийной кромок не влияет на энергетические характеристики турбин и их вибрационные и кавитационные показатели. Прямая подрезка снижает коэффициент полезного действия (КПД) и мощность агрегата. Снижение КПД при этом достигает 2 %. Одним из выводов авторов статьи в [1] был вывод о целесообразности проработки вопроса модификации лопастей для каждого типа РК. С этой точки зрения оценка эффекта от подрезки лопастей радиально-осевых (РО) РК приобретает актуальность, дополняя уже имеющиеся данные по подрезке лопастей других типов турбин.

На Чиркейской ГЭС проводилась серия научно-исследовательских и экспериментальных работ по доводке гидроагрегатов. Подвергались исследованию температурные режимы, система охлаждения и вибрация гидроагрегатов, гидроакустика потока через рабочее колесо, напряжения в металле от нагрузки и остаточные напряжения в металле лопастей рабочих колес (ЛРК). К работам на ГЭС привлекались фирмы: «ХТГЗ», «Уралэлектротяжмаш», «ЦНИИТМАШ», «ЦКТИ», Вятский политехнический институт, «Ленгидропроект» и «Союзтехэнерго». В результате проведенных работ были определены допустимые температурные режимы узлов гидроагрегата, найдены способы улучшения охлаждения гидроагрегата, проверена вибрация всех основных узлов, определены остаточные напряжения в металле рабочих колес и напряжения, возникающие от полной нагрузки; выяснено, что определяющим в долговечной работе гидротурбины является уровень остаточных напряжений в металле РК, разработана и осуществлена технология по уменьшению остаточных напряжений и созданы приборы по неразрушающему контролю размеров этих остаточных напряжений. В настоящей работе освещаются только вопросы подрезки выходных кромок лопастей рабочего колеса (ЛРК).

При гидроакустических исследованиях были определены области образования звуковых колебаний в потоке воды внутри рабочего колеса в зависимости от мощности. Это обстоятельство позволило высказать предположение, что в некоторых режимах имеют место жгутовые явления, которые вызываются несовершенной формой выходных кромок ЛРК. Также было высказано предположение, что следует придавать выходной кромке несимметричную форму в целях организации одностороннего давления и исключения возможных резонансных колебаний. Такая работа была выполнена на одной гидротурбине, однако не дала ощу-

тимых положительных результатов. Фирма «ХТГЗ» провела теоретические исследования и рекомендовала подрезку и форму выходной кромки ЛРК, которая приведена на рис. 1.

На рис. 1 показаны первоначальная форма, промежуточная форма, выполненная в процессе поиска, и окончательная форма подрезки выходных кромок ЛРК.

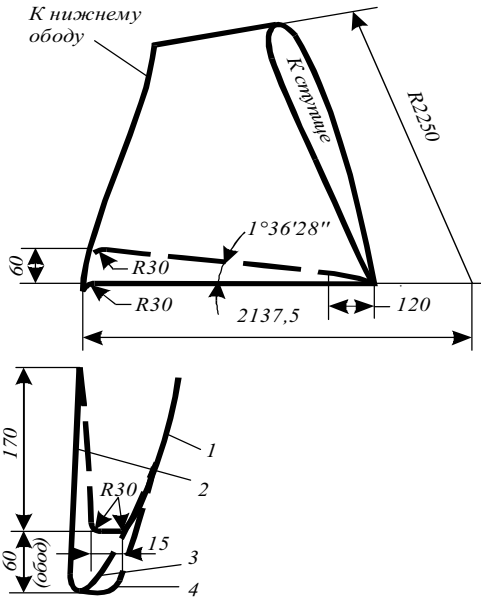


Рис. 1. Эскиз модификации лопасти: 1— выпуклая сторона лопасти (тыльная); 2 — вогнутая сторона лопасти (рабочая); 3 — запилковка, выполненная на ГЭС (до подрезки); 4 — выходная кромка

Работа по подрезке кромок выполнялась в течение трех лет в периоды капитальных ремонтов гидроагрегатов. В процессе работы была отработана своя оригинальная технология. Вместо предложенной заводом механической рубки металла лопастей была применена воздушно-дуговая резка, что увеличило производительность труда примерно в шесть раз. Для исключения насыщения поверхностного слоя металла углеродом, последние 4—5 мм снимались шлифмашинками.

Для оценки эффекта от подрезки ЛРК фирмой «Союзтехэнерго» были проведены натурные испытания турбин с измерением расхода воды через турбины абсолютным методом. Испытания проводились в течение одного года на всех четырех гидроагрегатах ГЭС при нескольких напорах.

Полученные результаты (КПД агрегатных блоков после модификации лопастей) сравнивались с результатами аналогичных испытаний, про-веденных фирмой «Ленгидропроект» до подрезки лопастей.

Для снижения систематической составляющей погрешности при определении разницы КПД, обусловленной подрезкой, были приняты меры, обеспечивающие идентичность условий проведения испытаний в обоих случаях: до и после подрезки. Это достигалось путем установки гидрометрических вертушек, измеряющих скорость потока в мерном створе напорного водовода турбины, в одном и том же створе, на одной и той же несущей раме и в одних и тех же местах измерительного сечения.

Расходомерный створ вертушек размещался во входном сечении водоприемника турбины. Использовались пазы ремонтного затвора, в которых перемещалась рама с 33 гидрометрическими вертушками, расположенными в три ряда по высоте. В каждом ряду устанавливалось 11 вертушек типа ГР-21М.

В каждом установившемся режиме работы испытываемого агрегата скорости воды измерялись в четырех положениях рамы по высоте измерительного сечения. Это обеспечивало измерение скоростей в 132 точка расходомерного створа. Обработка результатов измерений скоростей потока, вычисления расходов воды через турбину и КПД агрегатных блоков проводились по известным методикам [2, 3].

На рис. 2 приведены эксплуатационные характеристики агрегатных блоков до и после подрезки лопастей РК. Сравнивая характеристики, нетрудно заметить, что модификация лопастей приводит к сдвигу изолиний КПД вправо, в область высоких нагрузок агрегата.

Если до подрезки фактическая мощность турбины при напорах ниже 184 м была меньше гарантированной (с линии ограничения заводской характеристики ГТР 1642а) на 12—15 МВт, то после подрезки лопастей гарантии завода-изготовителя турбин выполняются во всем рабочем диапазоне напоров. Более того, подрезка ЛРК привела к существенному увеличению мощности турбин по сравнению с гарантированной. Так при напорах—нетто 164 — 168 м приращение мощности в результате подрезки составляет 1,6 МВт для турбины № 1; 5,4 МВт для турбины № 2; 11,5

МВт для турбины № 3. При напорах—нетто 193 — 197 м мощность турбин достигает 322 МВт вместо 290 МВт по заводской характеристике. Подрезка лопастей привела к увеличению мощности турбин на 15—20 МВт при напорах ниже 184 м и порядка 30 МВт при напорах выше 184 м.

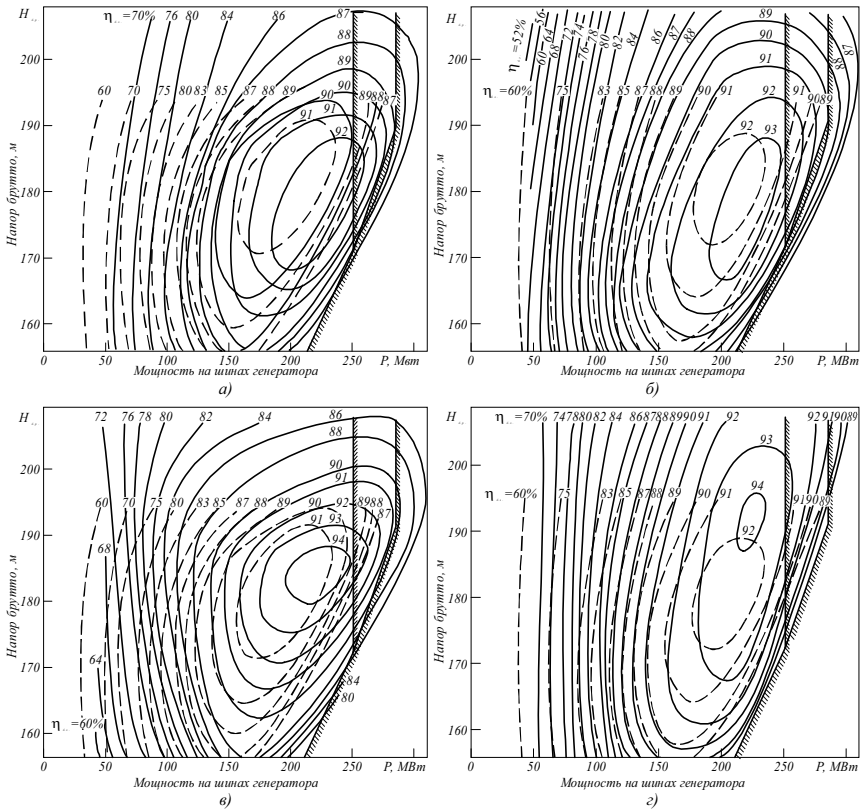


Рис. 2. Эксплуатационные характеристики агрегатных блоков до и после модификации лопастей РК: а—блок 1; б—блок 2; в—блок 3; з—блок 4

Положительный энергетический эффект от подрезки лопастей РК проявляется не только в увеличении мощности турбин, но и (в отличие от подрезки лопастей ПЛРК) в увеличении их КПД.

*Оптимизация формы лопастей рабочих колес
гидротурбин Чиркейской ГЭС*

КПД увеличивается, во-первых, за счет сдвига рабочих характеристик к линии ограничения максимальной мощности турбины (такое увеличение имеет место при мощностях турбины выше 150 МВт) и, во-вторых, за счет повышения абсолютных значений КПД в экстремумах рабочих характеристик.

В таблице приведены изменения КПД как в результате сдвига изолиний КПД вправо по отношению к их положению на эксплуатационной характеристике до подрезки $\Delta\eta_p$, так и за счет увеличения КПД в экстремумах $\Delta\eta_m$. Из таблицы видно, что сдвиг характеристик привел к значительному повышению КПД при нагрузках выше 150 МВт и к снижению КПД при малых нагрузках (за исключением случая, когда напоры близки к максимальным).

Изменение КПД в результате сдвига изолиний ($\Delta\eta_p$) и за счет увеличения в экстремумах ($\Delta\eta_m$)

Напор, м	Агрегат № 1			Агрегат № 2		
	Нагрузка, МВт	$\Delta\eta_p$, %	$\Delta\eta_m$, %	Нагрузка, МВт	$\Delta\eta_p$, %	$\Delta\eta_m$, %
160	100	-1,5	0	100	-1,0	0,6
	150	0		150	+0,7	
	190	+1,5		200	+1,3	
170	100	-1,5	1,3	100	-1,0	1,0
	150	-1,0		150	0	
	200	+2,0		200	+1,1	
	220	+4,5		230	+3,3	
180	100	-2,0	1,0	100	-1,0	0,4
	150	-0,8		150	0	
	200	+0,6		200	0	
	220	+1,5		230	+1,2	
	250	+6,0		250	+3,6	
190	100	0	1,4	100	-1,0	1,0
	150	+0,8		150	0	
	200	+1,0		200	+0,5	
	250	+2,0		250	+1,5	
	270	+4,0		270	+2,6	
160	100	-7,0	0	100	-1,5	1,0
	150	-0,7		150	+0,7	
	200	+1,5		215	+4,2	
170	100	-4,0	0,5	100	-1,0	1,3
	150	0		150	+0,5	
	200	+1,0		200	+1,3	
	220	+3,0		240	+3,6	

*Оптимизация формы лопастей рабочих колес
гидротурбин Чиркейской ГЭС*

Продолжение таблицы

Напор, м	Агрегат № 1			Агрегат № 2		
	Нагрузка, МВт	$\Delta\eta_p$, %	$\Delta\eta_m$, %	Нагрузка, МВт	$\Delta\eta_p$, %	$\Delta\eta_m$, %
180	100	0	2,4	100	0	1,1
	150	+0,8		150	+1,0	
	200	+2,3		200	+1,0	
	220	+2,7		240	+2,0	
	240	+4,0		260	+2,0	
190	100	+5,0	3,0	100	+1,2	2,3
	150	+3,0		150	+1,5	
	200	+2,8		200	+2,0	
	220	+3,0		240	+2,2	
	260	+4,8		280	+1,0	

Несмотря на снижение КПД в зоне малых мощностей турбин, суммарный годовой эффект, рассчитанный при работе ГЭС по реальным графикам нагрузки, выражается в экономии топлива на тепловых электростанциях на сумму около 250 тыс. руб., а при оптимальном ведении режима этот эффект увеличивается более чем вдвое.

Выводы

1. Модификация лопастей рабочих колес радиально-осевых гидротурбин, как показывает опыт работ по модификации РК турбин Чиркейской ГЭС, приводит к повышению энергетических параметров турбин: мощности и КПД, что позволяет перемаркировать агрегаты на повышенную мощность.

2. Положительный эффект от модификации лопастей РК турбин Чиркейской ГЭС в части КПД увеличивается, во-первых, за счет сдвига рабочих характеристик к линии ограничения максимальной мощности турбины (такое увеличение имеет место при мощностях турбины выше 150 МВт) и, во-вторых, за счет повышения абсолютных значений КПД в экстремумах рабочих характеристик.

3. Несмотря на снижение КПД в зоне малых мощностей турбин, суммарный годовой эффект, рассчитанный при работе ГЭС по реальным графикам нагрузки, выражается в экономии топлива на тепловых электростанциях на сумму около 250 тыс. руб., а при оптимальном ведении режима этот эффект увеличивается более чем вдвое.

Эффект заключается в увеличении мощности ГЭС на 10 %; в увеличении КПД за счет сдвига рабочих характеристик (в сторону больших мощностей) на 0,5–4 % (для нагрузок агрегата 50 % номинальной и выше); в увеличении КПД за счет повышения его максимальных значений в экстремумах рабочих характеристик на 0,5–3 %

4. Эффект от повышения КПД растет с ростом рабочих напоров турбин.

Библиографический список

1. **Иванченко И.П., Косач И.С.** Повышение надежности работы лопастей поворот-но-лопастных гидротурбин // Гидротехническое строительство. – 1981. – № 9.

2. **Методические** указания по проведению эксплуатационных энергетических испытаний гидроагрегатов ГЭС. – М.: СПО “Союзтехэнерго”, 1977.

Международный код приемо-сдаточных испытаний гидравлических турбин (публикация МЭК №41). Комитет по участию СССР в международных энергетических объединениях. Л., 1966.

УДК 621.313.311.3

Диагностика подпятника гидроагрегата

*А.В. Новиков, А.Н. Петрухин, И.П. Чесноков, кандидаты техн. наук,
М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук*

На Чиркейской ГЭС по поручению Минэнерго СССР в период с 1977 г. по 1988 г. проводились комплексные исследования сверхмощных гидроагрегатов, связанные с повышением надежности и устойчивости их работы в электроэнергетической системе. В частности, проводились исследования для замены установки механического проворота ротора гидроагрегата электрическим. С этой целью авторами этой статьи была разработана методика поворота при питании обмоток статора и ротора постоянным током [1]. При проведении этих исследований и экспериментов был выявлен один очень любопытный факт, который послужил основой для уникального способа диагностики подпятника гидроагрегата и кратко описан в настоящей статье.

Как известно, вращающий момент гидроагрегата определяется выражением [1, 3]

$$M_{ep} = \kappa \cdot E \cdot I_a \cdot \sin \delta, \quad (1)$$

где M_{ep} - вращающий момент; κ - масштабный коэффициент; $E = f(I_f)$ - фиктивная (машина неподвижна) ЭДС по характеристике холостого хода; I_a - ток в обмотках статора; δ - угол между осями магнитных потоков статора и ротора.

При вращении гидроагрегата с осушенной рабочей камерой на минимальных холостых оборотах (при шаговом повороте скорость вращения составляет около 1 % от номинальной) вращающему моменту M_{ep} противодействует только момент трения в подпятнике

$$M_{np} = \kappa_{mp} \cdot R_{mp} \cdot G, \quad (2)$$

где κ_{mp} - коэффициент трения подпятника; R_{mp} - радиус трения. G - вес вращающихся частей.

Если вращающий момент M_{ep} превышает противодействующий момент трения M_{np} в подпятнике, ротор приходит в движение, т.е. движение происходит при условии

$$\kappa_{mp} \cdot R_{mp} \cdot G \leq \kappa \cdot E \cdot I_a \cdot \sin \delta. \quad (3)$$

Движение ротора продолжается до совпадения осей потоков (погрешность ± 6 электрических градусов).

Переключение питания по фазам с А+В- (1) на В+С- (2) смещает ось магнитного потока на 120 электрических градусов, и новый шаг поворота начинается с угла 120° ($\sin \delta = 0,866$) (рис. 1).

Из выражения (3) по замерам E и I_a , можно определить коэффициент трения подпятника κ_{mp} в данный момент

$$\kappa_{mp} \leq \frac{\kappa \cdot E \cdot I_a \cdot \sin \delta}{R_{mp} \cdot G} = \left(\frac{\kappa}{R_{mp} \cdot G} \cdot \sin \delta \right) \cdot E \cdot I_a, \quad (4)$$

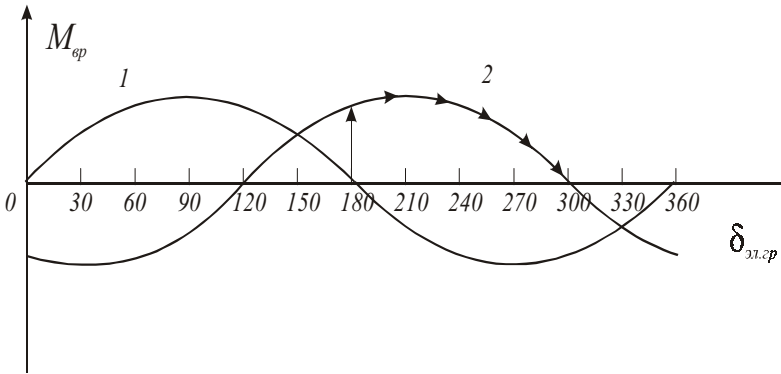


Рис. 1. Изменение вращающего момент $M_{вр}$ от переключение питания по фазам с A+B- (кривая 1) на B+C- (кривая 2)

По этой методике на Чиркейской ГЭС начиная с 1977 г. периодически проводились замеры коэффициента трения (рис. 2) и строились характеристики изменения коэффициента трения во времени для каждого агрегата.

Эти замеры выявили зависимость коэффициента трения $\kappa_{тр}(t)$ от времени, характерную для трех ярко выраженных зон:

- I (начальный период пуска и приработки);
- II (работа с номинальными параметрами);
- III (старение объекта).

Наиболее резко эта зависимость выражена для срыва из неподвижного положения. В последнем случае изменение коэффициента трения $\kappa_{тр}$ по отношению к минимальному более 25 % для подпятника с баббитом и более 15 % для подпятника с металлофторопластовым покрытием, при суммарной возможной погрешности измерения, не превышающей 10 % (кривая А, рис. 2).

Хотя при шаговом повороте скорость около 0,01 от номинальной и движение происходит практически на остаточной масляной пленке, зависимость коэффициента трения от времени выражена значительно слабее (кривая В, рис. 2). При работе агрегата под нагрузкой изменение $\kappa_{тр}$ не фиксировалось.

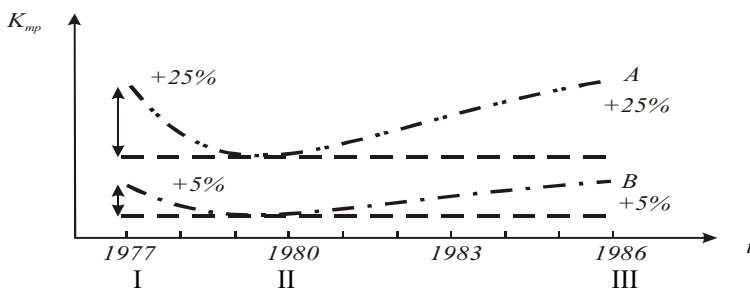


Рис. 2. Динамика коэффициента трения подпятника гидроагрегата по годам

Более частые замеры $\kappa_{тр}$ и создание компьютерной базы таких данных позволят выявить связь и динамику его изменения:

а) с режимом работы ("стоимость" часа работы под нагрузкой с пересчетом на номинальную);

б) с числом пусков и остановов ("стоимость" одного пуска или останова в часах работы при номинальной нагрузке).

Имея первые характеристики и зная физику процесса (на основе экспертных знаний), построили "эталонные характеристики изменения коэффициента трения во времени" для каждого агрегата. Сравнивая эталонные характеристики с фактическими характеристиками, оценивали текущее состояние подпятника агрегата.

Опыт показал, что после установления динамики этих соотношений можно не только производить диагностику состояния подпятника без его вскрытия, но и, самое главное, прогнозировать работоспособность подпятника.

Разработанная методика определения коэффициента трения была опробована на агрегатах других гидроэлектростанций и подтвердила свою корректность и надежность результатов диагностики.

Следует особо отметить, что при первой же апробации методики на одной из крупных ГЭС СНГ был выявлен износ сегментов подпятника с прогрессирующим увеличением коэффициента трения и была предотвращена тяжелая авария гидроагрегата. Этот факт убедил авторов в правоте идеи и позволил использовать в эксплуатации этой и других ГЭС разработанную авторами методику для оценки работоспособности подпятника без трудоемкой и занимающей значительное время операции вскрытия его с выпуском масла [2].

Существенное сокращение времени испытаний возможно при использовании метода самоторможения, когда агрегат останавливают за

счет механических потерь без принудительного торможения. При этом по утвержденной для данного агрегата методике замеряется ускорение самоторможения и производится компьютерная обработка информации по предлагаемой методике.

Серия таких опытов позволяет не только разделить потери по видам, но и проследить изменение потерь при изменении скорости агрегата. Это позволяет, зная “эталонные характеристики потерь по отдельным составляющим“, отследить аномальные отклонения текущих характеристик потерь от эталонных и принять меры для устранения ожидаемых неисправностей и дефектов, приняв превентивные меры до их наступления. Кроме того, характеристики самоторможения позволяют оптимизировать процесс электроторможения гидроагрегатов и определить оптимальные параметры торможения [3]. Ввиду своей простоты метод легко можно адаптировать в диагностический комплекс гидроагрегата для комплексной диагностической системы гидроагрегата [4].

Библиографический список

1. **Петрухин А.Н., Чесноков И.П., Мисриханов М.Ш.** Поворот ротора гидроагрегата постоянным током // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 4 / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова. – Иваново, 2001.
2. **Александров А.Е.** Подпятники гидроагрегатов. - М.: Энергия, 1975. – 289 с.
3. **Мисриханов М.Ш., Новиков А.В.** Электроторможение гидрогенераторов. Итоги исследований, разработок и перспективы широкого внедрения на действующих и строящихся ГЭС // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 4 / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова. – Иваново, 2001.
4. **Обнаружение** дефектов гидрогенераторов. - М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.

УДК 627.824.012.4.023:693.546.3

Организация строительных работ на Миатлинской арочной плотине

*И.В. Артемьев, В.Н. Двуреков, А.В. Евсеев, В.А. Редькин, инженеры,
А.С. Данилов, канд. техн. наук, М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук*

Введение. При возведении арочной плотины Миатлинской ГЭС был осуществлен ряд новых решений по технологии бетонирования, элемен-

там конструкции плотин, механизации бетонных работ, регулированию температурного режима бетона и омоноличиванию плотины (цементации межсекционных швов). Главными и наиболее крупными составными частями этой работы, проведенной Дирекцией строящихся Ирганайской и Миатлинской ГЭС (Мисриханов М.Ш.), Управлением строительства (Данилов А.С., Редькин В.А.) совместно с институтами Ленгидропроект (Двуреков В. Н., Масолкин Ю.П.) и Оргэнергострой (Артемьев И.В., Гюн-тер Ю.В. и Евсеев А.В.), явились:

- разработка и внедрение в ходе строительства поярусной технологии возведения арочной плотины;
- осуществление генеральной схемы механизации бетонных работ с рациональным размещением башенных кранов;
- разработка и организация производства новой конструкции несъемной железобетонной опалубки для формирования межсекционных швов плотины.

Поярусная технология как средство повышения темпов бетонирования плотины. Накопленный отечественным гидростроением опыт возведения бетонных плотин [1, 2], в том числе арочных, освоение интенсивных методов укладки бетона (последойного, высокими блоками и др.) позволили поставить задачу создания такой технологии бетонирования Миатлинской плотины, которая при высоких темпах возведения гарантировала бы требуемое качество, в первую очередь, предотвращение трещинообразования бетонной кладки, не внося при этом существенных изменений в конструкцию плотины.

Были выполнены комплексные научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы, позволившие обосновать и разработать новую технологию возведения арочной плотины и провести широкую инженерную подготовку к ее внедрению. Такой технологией явился поярусный метод бетонирования плотины. Его сущность заключается в равномерном по всему фронту возведении плотины не секциями, а ярусами, бетонлируемыми от берега до берега, без опережающих и отстающих секций; при этом межсекционные швы образуются при помощи сборных железобетонных панелей. Высота яруса бетонирования плотины составляла 1,5 м.

Все операции по подготовке и бетонированию блоков представляют единый технологический поток, последовательно захватывающий одну за другой секции плотины. Расчетное время бетонирования одного яруса плотины, т. е. цикл потока, составляло 7 сут., что соответствовало средней скорости роста плотины 6 м в месяц. Фактически средняя продолжительность цикла составила 6,15 сут., минимальная 4 сут. Соответствующим

шие скорости роста плотины: средняя 7,7 м/мес., максимальная до 12 м/мес. (для сравнения - средняя скорость возведения Чиркейской плотины составила 3,5 м/мес., максимальная – 7 м/мес.). При этом полностью обеспечивалось предотвращение трещинообразования бетонной кладки. Величины раскрытия межсекционных швов, обусловленные режимом возведения и охлаждения плотины, в 2–4 раза превышали обычно наблюдаемые значения, что, в свою очередь, создало условия для надежного и качественного омоноличивания плотины.

Расположение блоков бетонируемого яруса в одном уровне облегчило управление производственным процессом, организацию всего технологического потока, повысило безопасность труда.

В то же время эта технология обладает определенной гибкостью, позволяющей при необходимости легко переходить от поярусной схемы возведения к секционной или ступенчатой и обратно, разбивать фронт сооружения на отдельные участки с независимым ведением работ.

Образование межсекционных швов. Поярусное возведение плотины предусматривает образование межсекционных швов с помощью железобетонных панелей, оставляемых в бетонном массиве, т. е. несъемной опалубки.

При создании этого элемента требовалось разработать конструкцию межсекционных швов в целом, включая решение вопросов их геометрии, уплотнения и цементации.

В процессе разработки конструкции межсекционных швов был проанализирован опыт применения железобетонных панелей на Токтогульской, Курпсайской и Ингурской плотинах; учтены требования к качеству поверхности цементируемых швов, а также технические и технологические условия на возведение Миатлинской арочной плотины. Главное внимание уделялось обеспечению высокого качества поверхности швов, проходимости и герметичности карт цементации, соблюдению проектной геометрии швов.

В результате проведенных проектных и опытных работ была разработана и внедрена конструкция железобетонной панели, перекрывающей всю плоскость шва, с вмонтированной в нее закладной цементационной арматурой.

Отличительной особенностью панелей межсекционных швов Миатлинской плотины является включение в них цементационных шпонок.

Железобетонная панель имеет гладкую лицевую и шероховатую тыльную поверхности. На лицевой стороне отформованы выступы, на тыльной стороне – штрабы–вмятины для повышения сцепления панелей с массивом.

Геометрическая форма и размеры панелей меняются как по высоте плотины, так и в пределах одного яруса – от шва к шву. Это потребовало, в свою очередь, разработки специальной универсальной формы и технологии изготовления панелей. Изготовление было организовано на полигоне строительства при бетонном заводе. Удачная конструкция формы, наличие оперативной связи между полигоном и участком бетонных работ, заблаговременная отработка технологии обеспечили качественное и бесперебойное изготовление панелей более 170 типоразмеров (около 240 шт.) в одной форме.

При монтаже панелей в швах плотины благодаря высокой точности их изготовления достигалось полное совпадение выступов лицевой грани, точная стыковка закладных труб цементации и цементационных шпонок.

Геликоидальность швов обеспечивалась поворотом панелей очередного яруса на расчетный угол, что явилось простым и эффективным решением по соблюдению проектной геометрии швов.

Наличие фасок на верхней и нижней кромках лицевой грани панелей, установка панелей на раствор с последующей зачеканкой и затиркой стыка исключало образование «замков» в цементируемых швах.

Для сохранения проектной величины заделки противотрафиционной шпонки ее ширина в месте примыкания сборных панелей была увеличена на толщину плиты.

Решение всех этих конструктивных и технологических вопросов позволило в короткие сроки создать, освоить и внедрить панели межсекционных швов как один из основных элементов поярусной технологии возведения плотины.

Генеральная схема механизации бетонных работ. Ускорению темпов возведения плотины способствовала и детально разработанная схема механизации работ. В отличие от проектной схемы, предусматривавшей установку башенных кранов КБ–674 на эстакаде в нижнем бьефе плотины, после проработки более 10 вариантов была принята гибкая и экономичная схема механизации. В основе ее – 2 башенных крана КБГС–450, установленных со стороны верхнего бьефа по бортам ущелья. Принятое расположение кранов обеспечило независимость их монтажа от хода скальных и бетонных работ, своевременный ввод кранов, экономию более 300 т металла на устройстве эстакады. Кроме того, один из кранов помимо бетонирования плотины обслуживал возведение водоприемника.

Несмотря на то, что два крана практически охватывали всю плотину в плане и обеспечивали необходимую интенсивность бетонирования, выход любого из них из строя мог вызвать перерыв в возведении плотины.

Поэтому в дополнение к этим кранам на водобойной плите был смонтирован третий – КБ–674А, что повысило обеспеченность бетонных работ практически до 100 %, а интенсивность бетонирования – в 2 раза по сравнению с проектом.

На заключительном этапе работ высота одного из кранов КБГС–450 была увеличена наращиванием башни на 8 м, что дало возможность забетонировать водослив плотины. При этом для максимального увеличения отметки бетонирования была использована специально оборудованная бадья с укороченной траверсой.

Для бетонирования правобережной части плотины и завершения работ по гребню на правом устое был смонтирован кран КБ–674 с минимальной высотой башни и тележками, установленными на криволинейных путях для последующего выхода на гребень плотины.

Наличие резерва технической производительности кранов позволило широко использовать их при подготовке блоков к бетонированию и отказаться от специализированных механизмов для перестановки опалубки и монтажа железобетонных панелей. На внутриблочных работах использовались механизмы, созданные на строительстве Чиркейской ГЭС: электрические машинки для зачистки основания блоков и самоходный манипулятор с пакетом вибраторов, облегченный и модернизированный для стесненных условий тонкой арки [2]. Однако изготовленные в условиях стройки эти механизмы не обладали достаточной надежностью, что влияло на темпы и качество работ. Опыт возведения Миатлинской плотины еще раз убеждает в необходимости серийного выпуска такой техники промышленностью.

Для Миатлинской арочной плотины, небольшой по объему, пролету и высоте, примененную схему механизации на основе башенных кранов следует считать рациональной, так как в этих условиях при невысоких капитальных затратах и объемах дополнительных работ данная схема обладала высокой надежностью и обеспечила почти двукратное, по сравнению с проектом, увеличение интенсивности бетонирования.

Однако необходимо отметить, что в целом для арочных плотин оптимальной схемой остается применение кабелей–кранов [2], что подтверждается их использованием в подавляющем большинстве случаев на строительстве арочных плотин за рубежом.

Производство бетонных работ. По календарному графику бетонных работ уточненного технического проекта продолжительность возведения арочной плотины, включая пробку, составляла 23 мес. На возведение собственно арочной части плотины отводилось 20,5 мес. при среднем темпе роста 3,75 м/мес. и интенсивности укладки бетона до 6 тыс. м³/мес.

Фактически возведение плотины от пробки до пусковой отметки продолжалось 17 мес., в том числе арочной части – 10 мес. В ходе возведения арки была отработана и внедрена поярусная технология бетонирования.

В течение первых 7 мес. бетон укладывался в пробку и опорную подушку («седло»). Подача бетона осуществлялась главным образом гусеничным краном ДЭК–50. За этот период было уложено 13,5 тыс. м³ бетона со средней интенсивностью 1,9 тыс. м³/мес.

При бетонировании арочной части плотины укладка бетона производилась башенными кранами. За этот период было уложено 81,6 тыс. м³ бетона со средней интенсивностью 8,2 тыс. м³/мес. При этом в течение последних 8 мес. плотина возводилась с применением поярусной технологии. За этот период уложено 71,5 тыс. м³ бетона; среднемесячная интенсивность бетонирования составила 8,9 тыс. м³/мес., а максимальная – 11,315 тыс. м³/мес. Всего поярусным методом было уложено около 75 % объема бетона плотины.

Приведенная динамика интенсивности бетонирования свидетельствует о том, что с вводом в действие генеральной схемы механизации ход бетонных работ характеризовался высокой степенью равномерности, а с внедрением поярусной технологии была достигнута наивысшая интенсивность бетонирования.

Пуск первого агрегата ГЭС осуществлен при возведении плотины по всему фронту до отметки, на 5 м превышающей гребень водослива. Возведение последних ярусов плотины, гребня, бычков и пролетных строений водослива было завершено после пуска. Полная готовность арочной плотины обеспечила досрочный ввод второго агрегата.

Новые решения при бетонировании водослива. На последнем этапе возведения плотины для ускорения работ по водосливу был применен железобетон в виде сборных элементов криволинейного очертания. Входной оголовок выполнялся из криволинейных плит, водосливная поверхность образована балками, очерченными по расчетной кривой. Балки устанавливались с промежутками 1,5 м, заполняемыми жесткой бетонной смесью с тщательным уплотнением и заглаживанием заподлицо с поверхностью балок. Изготовление всех балок производилось в одной форме, снабженной шаблонами для точной установки опорных закладных. Балки монтировались на предварительно выверенные опоры, что обеспечило высокую точность выполнения проектной поверхности водослива.

Бычки водослива выполнялись в специальных крупногабаритных арматурно-опалубочных блоках, собираемых на берегу и монтируемых

краном в сборе. Все эти конструктивно-технологические решения обеспечили высокую скорость работ и хорошее качество водосливных поверхностей. Бетонирование пролетов и бычков водослива до пусковой отметки было выполнено за 2 недели, спустя еще 2 недели было осуществлено наполнение водохранилища и пропуск расходов через водослив.

Охлаждение плотины и цементация швов. В связи с ускоренными темпами возведения плотины особое внимание на строительстве уделялось мероприятиям по предотвращению трещинообразования, а также организации ускоренного охлаждения плотины и ее своевременного омоноличивания. Принятая система интенсивного трубного охлаждения бетона позволила в сжатые сроки (6 мес. вместо 18 по проекту) охладить плотину до температуры омоноличивания и провести цементацию швов, обеспечив постановку сооружения под напор.

К моменту цементации раскрытие швов составляло в среднем 6 мм, что наряду с хорошей проходимостью и герметичностью карт обеспечило условия для надежного заполнения швов цементным раствором.

Выводы

1. Высокие темпы и качество работ по возведению арочной плотины Миатлинской ГЭС достигнуты благодаря комплексному, системному подходу к решению задач организации и производства работ, внедрению передовых технологических идей, неослабному вниманию к подготовке производства, разработке, совершенствованию и строгому выполнению технологических правил.

2. При подготовке к строительству и в ходе бетонных работ оперативно и своевременно решались вопросы производства работ, внесения необходимых конструктивных изменений, способствовавших повышению технологичности сооружения, при сохранении в целом основных проектных решений и требований.

3. На строительстве внедрен и прошел широкую производственную проверку целый ряд новых технических решений:

- новая в практике гидростроения поярусная технология возведения арочной плотины;
- рациональная схема механизации бетонных работ, обладающая высокой надежностью, гибкостью и резервом мощности;
- ряд новых конструктивно-технологических решений по опалубочным работам, внутриблочной механизации, охлаждению и цементации плотины.

4. В результате проведенных проектных и опытных работ:

- были достигнуты темпы возведения арочной плотины, охлаждения и омоноличивания бетонной кладки, более чем вдвое превышающие лучшие из ранее известных в отечественной практике;
- получено высокое качество сооружения, выразившееся в отсутствии трещин и улучшении условий цементации швов;
- получена экономия материалов (цемента, дерева, металла), электроэнергии, трудозатрат, давшая в целом экономический эффект 610 тыс. руб. (или около 6 руб. на 1 м³ бетона) в ценах 1984 г.

5. Успешное осуществление крупномасштабного промышленного эксперимента в масштабах целого сооружения и, самое главное, безупречная работа арочной плотины с 1985 г. (более 17 лет), позволяют рекомендовать полученные результаты к использованию при проектировании и строительстве новых, более крупных плотин арочного типа, возводимых интенсивными методами, в частности, непрерывно-конвейерной технологией.

Библиографический список

1. Гунтер Ю.С., Данилов А.С., Мисриханов М.Ш. Новая технология возведения арочных плотин // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 5. - Иваново, 2002.
2. Данилов А.С., Зеленецкий З.Л., Мисриханов М.Ш. Опыт сооружения и эксплуатации Чиркейского гидроузла // Проблемы строительства и эксплуатации крупных ГЭС, ВЭС и каскадов ГЭС. Сб. науч. тр. ЭБВ. Вып. 8. - М.: Энергоатомиздат, 1988.

УДК 627.828.042.7

Исследование волнообразования в водохранилище при наличии остаточных сейсмических деформаций в его чаше, сейсмического давления воды и неустановившихся гидравлических режимов в напорной системе ГЭС

*Т.Л. Гвелесиани, Г.Я. Джинджихаивили, кандидаты техн. наук,
Г.П. Мамрадзе, М.Ш. Мисриханов, доктора техн. наук*

Введение. При проектировании, строительстве и эксплуатации гидроэлектростанций в условиях горного рельефа возникает целый ряд вопросов и задач, решение которых требует выполнения сложных и гро-

моздких расчетов, без чего невозможно принимать обоснованные проектные решения.

Так сравнительно высокая сейсмичность горных областей, в которых в основном сооружаются высоконапорные гидроэлектростанции, с особой остротой ставит вопросы обеспечения сейсмостойкости как плотин, так и напорных тоннелей и водоводов, а это, со своей стороны, требует разработки вопросов сейсмического взаимодействия воды с гидротехническими сооружениями.

Кроме того, при энергетическом использовании горных рек с узкими ущельями в целом ряде случаев целесообразно сооружение подземных машинных зданий с напорными отводящими деривациями.

Как в первом, так и во втором случае имеет место неустановившееся колебательное движение воды, описываемое дифференциальными уравнениями с частными производными, решение которых требует применения мощных компьютеров.

По обоим указанным вопросам - сейсмического взаимодействия гидросооружений с водой и неустановившихся гидравлических режимов в напорной системе ГЭС - в течение ряда лет нами проводились исследования и разрабатывались методы решения отдельных задач с применением компьютеров, результаты этих исследований кратко изложены в данной статье.

Колебания уровня воды в водохранилище при землетрясениях, связанных с сеймотектоническими, вертикально-ориентированными смещениями. Одним из важнейших вопросов, связанных с сейсмостойкостью плотин, является вопрос о волнообразовании в водохранилище при землетрясениях. Возможность образования в этих условиях волн значительной амплитуды, могущих вызвать повреждение плотины и даже катастрофу, делает необходимым исследования этого вопроса с учетом всех специфических особенностей сейсмического воздействия. Эти воздействия могут проявляться как в виде колебаний почвы, так и в виде сопутствующих этим колебаниям всевозможных остаточных деформаций.

Проведенный авторами анализ имеющихся решений для случая сейсмического воздействия колебательного характера [1] показал, что в этом случае высота волн получается незначительной. Вместе с тем ряд натуральных наблюдений на Ингури и Чиркейской ГЭС свидетельствует, что могут иметь место значительные колебания уровня воды в водохранилищах, связанные с процессом образования остаточных, главным образом первичных, сеймотектонических деформаций в области их расположения.

В целях получения количественных характеристик для зависимости колебания уровня воды в водохранилищах от характера и формы сейми-

ческих смещений авторами был выполнен большой цикл теоретических и натурных исследований.

В качестве основной была решена задача гидродинамики для потенциального движения жидкости в водохранилище, схематизированном в виде прямоугольника, в предположении возникновения волн малой амплитуды [2-5]. Жидкость при этом принималась идеальной и несжимаемой, а сеймотектонические деформации на дне водохранилища настолько малыми по сравнению с глубиной воды, что изменение области, занимаемой жидкостью, можно было не учитывать. Таким образом, в качестве граничного условия на дне задавалось значение скорости вертикального перемещения, соответствующей остаточным деформациям и действующей на некотором ограниченном участке дна в течение небольшого интервала времени $0 < t < t_0$ (где t_0 - продолжительность землетрясения). При $t < 0$ и $t > t_0$ скорость вертикального смещения участка дна $\varpi(x, t) = 0$.

Решения рассмотренных задач, полученных в виде бесконечных рядов, показали, что максимальное поднятие уровня воды у плотины зависит от следующих факторов:

- а) геометрических размеров водоема, т.е. глубины h и длины l ;
- б) характеристик остаточных деформаций, т.е. скорости смещения $\varpi(x, t)$, его продолжительности t_0 , протяженности $2b$, расстояния от плотины до середины участка смещений x_0 .

Здесь же следует отметить, что прогнозирование указанных выше параметров сеймотектонических смещений на данном этапе изученности вопроса невозможно. Разработанные нами на основании обработки своих данных [5] и данных, имеющихся в литературе, некоторые предварительные рекомендации дают возможность лишь приближенной оценки ожидаемых деформаций в районе чаши водохранилища. Поэтому существенное значение имеет установление влияния параметров вертикальных смещений на характер колебаний уровня воды у плотины. Лишь в результате этого можно судить о практической пригодности полученных зависимостей.

Поскольку оценить это влияние из выражения для высоты волн, полученного в виде бесконечного ряда аналитическим путем, не представляется возможным, потребовалось выполнить на компьютере цикл расчётов с различными параметрами сеймотектонических смещений дна водохранилища в целях выявления роли отдельных параметров в процессе волнообразования и наиболее неблагоприятного их сочетания.

Полученные расчетные зависимости для момента времени $t > t_0$ могут быть представлены в следующем безразмерном виде:

$$\frac{\eta^*}{\pm \bar{\omega}_M^*} = A_0^* + \sum_{n=1}^{\infty} A_n^* \cos \gamma_n^* \left(t^* - \frac{t_0^*}{2} \right), \quad (1)$$

где $\eta^* = \frac{\eta}{h}$; η - амплитуда колебания уровня воды у плотины; $\bar{\omega}_M^* = \frac{\bar{\omega}_M}{\sqrt{gh}}$,

$\bar{\omega}_M$ - максимальная скорость смещения дна; $t^* = t\sqrt{\frac{g}{h}}$, $t_0^* = t_0\sqrt{\frac{g}{h}}$ - приве-

денное время гидромеханических переходных процессов; $\gamma_n^* = \gamma_n\sqrt{\frac{h}{g}}$,

$\gamma_n = \sqrt{g \frac{n\pi}{l} t h \frac{n\pi}{l} h}$ - частоты собственных колебаний жидкости в чаше во-

дохранилища; A_0^* и A_n^* - безразмерные величины, зависящие от $b^* = b/n$,
 $x_0^* = x/h$, $l^* = l/h$, t_0^* .

Функциональные ряды, входящие в расчетные формулы типа (1), являются знакпеременными и абсолютно сходящимися, хотя сходимость их слабая. Это также обусловило использование компьютера для практических расчетов. В целях определения необходимого числа членов суммы ряда оценивалась величина остаточного члена R_n по соответственно подобранному мажорантному ряду, а также относительная ошибка, которая не должна была выходить за пределы допускаемого значения (5-7 %). Такая оценка указывала на необходимость суммирования порядка 400-600 членов ряда, однако практически выполненные расчеты показали достаточность суммирования 100-150 членов в случае, если смещение участка дна водохранилища имеет форму прямоугольника, т.е. в каждый данный момент скорость на протяжении участка смещения $2b$ постоянна. При других формах вертикального смещения, например по типу "треугольник" или "синусоида", достаточное число членов уменьшалось до 50-70 и даже до 20-50. Заметим, что эти данные справедливы для $l^* = 100 \div 300$, что, однако, наиболее часто встречается на практике. Увеличение l^* ухудшает сходимость рядов.

Для нахождения экстремальных значений изменения уровня воды у плотины, а также периодов его колебаний на основании данных расчетов строились графики зависимости $\eta/\bar{\omega}_M$ от «безразмерного времени»:

$$t^* = k\pi / \gamma_n^* + t_0^* / 2 \quad \text{где } k = 0, 1, 2, \dots, \infty.$$

При этом из соображений практической целесообразности и необходимой точности для большинства расчетов принималась $\gamma_n^* = T_{20}^*$. Таким образом, для того чтобы охватить всю картину колебаний уровня воды с момента $t = t_0$, до $t \cong 2T_1$, где T_1 - основной период собственных колебаний воды в водохранилище, значения k приходилось доводить до 80.

Учитывая кратковременность процесса вертикального смещения участка дна водохранилища и неопределенность в установлении действительного характера зависимости его от продольной координаты x и времени t , можно предполагать, что смещение для всех точек участка осуществляется во времени по одному и тому же закону, т.е., что $\varpi(x, t) = \varpi_1(x)f(t)$.

Первый этап расчетов показал, что влияние вида функции $f(t)$ на величину амплитуды и характер колебаний воды у плотины ничтожно (при $t_0^* \ll 12 \div 15$). Поэтому в дальнейших расчетах принималось скачкообразное изменение скорости во времени, т.е. при $0 \leq t \leq t_0$ $f(t) = 1$ при $t < 0$ и $t > t_0$, $f(t) = 0$.

Что касается формы смещения участка дна водохранилища, т.е. вида функции $\varpi_1(x)$, то она существенно влияет на амплитуду колебаний уровня вода.

Обширный цикл расчетов, проведенных для случая $\varpi_1(x) = const$ по всей длине смещения $2b$, позволил установить преимущественное влияние некоторых основных параметров на колебания уровня и прийти к следующей простой расчетной формуле для величины максимального поднятия уровня воды у плотины [5]:

$$\begin{aligned} \eta_M &= \bar{D}_B(0,03b/l + 1,42) \text{ при } b/l \leq 0,35; \\ \eta_M &= \bar{D}_B(0,22b/l + 1,29) \text{ при } b/l > 0,35. \end{aligned} \quad (2)$$

При этом

$$\begin{aligned} b &= l/2, \text{ если } L < l \text{ и} \\ 2b &= l, \text{ если } L > l. \end{aligned}$$

Здесь L - длина тектонического разрыва, км; $\bar{D}_B = D_B/2$ - расчетная амплитуда вертикального смещения (поднятия) дна; D_B - соответственно максимальная амплитуда. Для D_B и L даны приближенные эмпирические формулы [5].

Указанные выше формулы (2), полученные в результате проведения численного эксперимента на компьютере, дают возможность определе-

нии с некоторым запасом максимально возможного поднятия уровня воды у плотины при заданной интенсивности землетрясения и включены в "Указания по расчету гидротехнических сооружений на сейсмические воздействия", разработанные с участием авторов настоящей статьи.

Ряд расчетов выполнен также и для сейсмотектонических смещений, имеющих формы треугольника или синусоиды. Отметим, что треугольная форма смещений дна ожидается с наибольшей вероятностью при ориентации активного тектонического разрыва в поперечном водохранилищу направлении, а синусоидальная форма - в продольном направлении. В этом случае расчетная амплитуда смещения $\bar{D}_B = D_B$.

Указанные выше расчеты показали, что в ряде случаев максимальное поднятие уровня воды у плотины может оказаться большим, чем определенное для случая прямоугольной формы смещения [5]. Поэтому при необходимости уточнений, например в случае проектирования особо ответственных сооружений, следует принимать форму смещения в соответствии с природными условиями и провести более детальные расчеты на компьютере для рассматриваемого частного случая на основе «метода конечных элементов».

Ввиду обширности областей, обычно подверженных сейсмотектонической деформации, смещение может претерпеть вся чаша водохранилища, и, следовательно, на интенсивность волнообразования определенное влияние будет оказывать деформация как дна, так и бортов водохранилища.

В целях исследования этого фактора нами была решена плоская задача о колебании жидкости в водохранилище, когда одновременно его борта-стенки и дно испытывают некоторое сейсмическое воздействие нестационарного характера. Это воздействие задается в общем виде, как скорость смещения стенок и дна водоема в течение времени $0 < t < t_0$, и представляет произвольную функцию времени и соответствующих координат.

Представляется интересным с точки зрения волнообразования случай сейсмотектонического смещения всей чаши водохранилища - её наклона вокруг горизонтальной оси. Для этого случая из вышеуказанного решения получена конкретная формула и алгоритм для компьютерной программы.

В заключение следует отметить, что, как показали расчеты, проведенные по разработанной методике, максимальное поднятие уровня воды у высоконапорных плотин, расположенных в районах с расчетной сейсмичностью 8-9 баллов, составляет величину порядка 3÷4 м.

Определение вероятностных характеристик сейсмического давления воды в напорной системе ГЭС. При исследовании сейсмостойкости гидротехнических тоннелей и напорных водоводов большого диаметра весьма важно уметь определять сейсмическую нагрузку от воды, их заполняющей. Динамическое давление воды в напорных системах при сейсмических воздействиях может достигать значительной величины в случае, если колебания почвы направлены вдоль оси трубопровода (тоннеля), имеющего при этом также и значительную длину.

Как известно, движение жидкости в напорных водоводах и гидротехнических тоннелях может рассматриваться как одномерное, причем неустановившийся режим течения в них описывается уравнениями гидравлического удара [8].

Решение дифференциальных уравнений гидравлического удара можно получить численным путем для любых сложных разветвленных систем с изменением сечений водоводов по длине и для любых граничных и начальных условий, причем естественно, что применение ЭВМ в значительной степени облегчает и упрощает получение таких решений [8].

Однако численные решения, пригодные при проверке работы системы с заданными параметрами и определении её гидравлических характеристик, малоэффективны на предварительных стадиях проектирования, когда необходимо определить влияние отдельных параметров системы (длины участка, диаметра водовода, высоты и площади сечения уравнительного резервуара) на величину сейсмического давления, даже при условии внесения ряда упрощающих и облегчающих математическое решение задачи предпосылок.

Для решения дифференциальных уравнений гидравлического удара для случая длинных водоводов был использован метод интегрального преобразования Лапласа с внесением ряда ограничений и упрощений.

Так, например, поскольку диаметры напорных водоводов (тоннелей) и уравнительных резервуаров малы по сравнению с длиной, можно пренебречь поперечными колебаниями жидкости в них. Рассматривая случай длинных водоводов, где высота уравнительного резервуара относительно невелика, можно пренебречь упругими характеристиками последнего. Кроме того, рассматривался уравнительный резервуар без сопротивлений, как весьма часто встречающийся тип. Все это позволило упростить схему и для напорной системы ГЭС рассматривать тоннель и напорный трубопровод независимо друг от друга. В качестве более опасного рассматривался случай, когда расход через турбины отсутствует. Величина динамического давления во входном сечении напорного тоннеля при-

ближенно принималась равной сейсмическому давлению в соответствующем участке напорной грани без учета расположения отверстия тоннеля в ней.

Краевые задачи решались в предположении, что рассматриваемая напорная система претерпевает продольные синхронные колебания, т.е. все точки системы совершают одновременные колебания в невыгодном направлении - вдоль оси водовода.

При решении краевых задач на первом этапе принимался детерминистический подход, т.е. сейсмическое воздействие (ускорение, скорость и перемещение) считались заданными функциями времени.

Полученные при этом решения (в виде рядов [6]) для определения сейсмического давления воды в тоннеле в случае гармонических колебаний не представляли особой сложности для практических расчетов, так как ряды оказались быстро сходящимися, допускающими применение ручного счета.

В случае же необходимости рассматривать реальную акселерограмму для вычисления входящих в выражения для давления интегралов необходимо использование компьютера. Кроме того, чтобы ближе подойти к реальным условиям происходящего физического процесса, целесообразно принять новую математическую модель; рассматривая сейсмическое воздействие как случайный процесс.

Учитывая вышеуказанное и рассматривая сейсмическое воздействие как стационарный случайный процесс, модулированный при помощи детермированной функции времени (по методу проф. В.В. Болотина), удалось получить формулы для определения корреляционных моментов сейсмического давления вода в общем виде, а также дисперсии и соответственно стандарты сейсмического давления. Для вычисления указанных выше статистических параметров с помощью компьютера построена корреляционная функция сейсмического ускорения для скальных грунтов.

При определении дисперсии использовалась общая формула для сейсмического давления воды в напорном тоннеле (или водоводе), полученная для идеальной жидкости, т.к. анализ показал, что влиянием трения на величину сейсмического давления можно пренебречь. Формула имеет следующий вид [6]:

$$P(x,t) = -P_0 a(t) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \sin \beta_n (x/l)}{2\beta_n + \sin 2\beta_n} \times \left[-P_0 a(t) + (\delta_n p_0 + \rho c \sin \beta_n) \int_0^t a(\tau) \sin \delta_n (t - \tau) d\tau \right], \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

Здесь $p(x, t)$ - сейсмическое давление воды, t - время, x - координата, l - длина тоннеля (водовода), ρ - плотность воды, c - скорость распространения волн гидравлического удара в тоннеле (водоводе), $a(t)$ - сейсмическое ускорение грунта, $\delta_{II} = \beta_{II} c/l$, где β_{II} - корни уравнения

$$ctg\beta = (d_0/l)\beta, \quad (4)$$

которые могут быть найдены по приближенным формулам: $d_0 = (F_1/F_2)(\rho c^2/\gamma)$, причем F_1 и F_2 - соответственно площади поперечных сечений водовода и уравнительного резервуара, γ - объемный вес воды.

По формуле (3) сейсмическое давление воды выражается явно через ускорение от землетрясения $a(t)$, которое считается стационарным случайным процессом. Если $K_{aa}(t_1 - t_2)$ есть корреляционная функция этого ускорения, то, учитывая (3), приходим к выражению для корреляционной функции сейсмического давления второго порядка:

$$\begin{aligned} K_{pp}(x, t_1, t_2) = & p_0^2 K_{aa}(t_1 - t_2) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{4 \sin \beta_n(x/l)}{2\beta_n + \sin \beta_n} \right]^2 \times \\ & \times \left\{ -p_0^2 K_{aa}(t_1 - t_2) + [(\delta_n p_0)^2 + (\rho c \sin \beta_n)^2] \times \right. \\ & \left. \times \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} \sin \delta_n(t_1 - \tau_1) \sin \delta_n(t_2 - \tau_2) K_{aa}(\tau_1 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

Поскольку сейсмические колебания можно рассматривать как нормальный (Гауссовский) процесс с нулевым средним значением, достаточно определить дисперсию сейсмического давления, по которой можно найти вероятность больших отклонений от стандарта.

Из (5) для $t_1 = t_2 = t$ можно определить дисперсию, если иметь конкретные значения корреляционной функции ускорения грунта $K_{aa}(t_1 - t_2)$. С этой целью были использованы акселерограммы, построенные в Груз НИИЭ для скальных грунтов на основании эталонных акселерограмм, записанных для слабых грунтов [6].

По ординатам отобранных акселерограмм с помощью компьютера была определена оценка корреляционной функции и дана её аппроксимация по выражению

$$K_{pp}(x, t_1, t_2) = p_0^2 K_{aa}(t_1 - t_2) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{4 \sin \beta_n(x/l)}{2\beta_n + \sin \beta_n} \right]^2 \times$$

$$\times \left\{ -p_0^2 K_{aa}(t_1 - t_2) + [(\delta_n p_0)^2 + (\rho c \sin \beta_n)^2] \times \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} \sin \delta_n(t_1 - \tau_1) \sin \delta_n(t_2 - \tau_2) K_{aa}(\tau_1 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \right\}, \quad (6)$$

где α - величина, характеризующая степень корреляции для сейсмического ускорения, θ - преобладающая частота землетрясения, $\langle a_2 \rangle$ - дисперсия сейсмического ускорения, $\tau = t_1 - t_2$.

Для отобранной 7-балльной акселерограммы (г. Тафт) имеем следующие значения параметров: $\alpha = 4$, $\theta = 11$, $\sqrt{\langle a^2 \rangle} = 0,025g$, а для 8-балльной акселерограммы (Эль-Центро) - $\alpha = 3$, $\theta = 7$, $\sqrt{\langle a^2 \rangle} = 0,04g$. Здесь g - ускорение силы тяжести.

Для обеспечения достаточной надежности сооружения, помимо знания дисперсии сейсмического давления, желательно определить вероятность того, что это давление превзойдет величину своего стандарта в k раз:

$$P(p(x, t)) > k\sqrt{D[p(x, t)]} \approx \frac{\exp(-1/k^2)}{k\sqrt{2\pi}}. \quad (7)$$

Неустановившиеся гидравлические режимы в водопроводящих системах ГЭС [8]. В практике проектирования, строительства и эксплуатации ГЭС в горных районах встречаются разнообразные схемы с комбинированными деривациями и уравнительными резервуарами (Миатлинской ГЭС, Чиркейской ГЭС, Ингури ГЭС, Худони ГЭС и др.). При проектировании и эксплуатации таких ГЭС необходимо учитывать в расчетах наличие волновых процессов как для напорного, так и для безнапорного участка деривации. Уравнения колебаний масс при сбросах и набросах нагрузки в напорных системах описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, неустановившиеся режимы на безнапорных участках - уравнениями в частных производных. Их совместное решение при соответствующих начальных и граничных условиях сопряжено с большими математическими трудностями и невозможно без использования вычислительной техники.

В качестве основных вопросов гидравлических расчетов при проектировании ГЭС с напорным отводящим трактом, включающим уравнительный резервуар типа длинной камеры, можно рассматривать вопросы

колебания масс в системе "уравнительная камера - отводящий водовод" и вопросы устойчивости гидравлических стационарных режимов ГЭС.

Рассматривается задача одномерного неустановившегося движения воды в водопроводящей системе ГЭС. Уравнительная камера расположена непосредственно за отсасывающими трубами, уровни верхнего и нижнего бьефа принимаются постоянными в течение переходных процессов. Неустановившееся движение в длинной камере описывается уравнениями Сен-Венана, а в напорных системах - уравнениями колебаний масс. Граничные условия в створах сопряжения напорного и безнапорного участков пишутся в виде уравнений неразрывности.

В задаче колебаний масс решение системы ищется методом характеристик [8]. В начальный момент $t = 0$ задано установившееся движение воды, т.е. значение расхода вода $Q = const$, и соответствующие ему значения функций $F(0, s)$ и $u(0, s)$ (живого сечения и скорости течения) в заданных створах при выбранном начальном шаге Δs .

Сетка характеристик строится в прямоугольной области $[0 \leq s \leq l, 0 \leq t \leq T_0]$, где l - длина камеры, t - время, в течение которого исследуется процесс.

Разработан программный комплекс для персонального компьютера (ПВК) в целях расчета колебаний масс в рассматриваемой системе, общий для различных конструкций камеры, включая конструкцию камеры с горизонтальной диафрагмой (с отверстием в начале, в середине и в конце камеры), для случаев сбросов и набросов нагрузки, как полных, так и частичных. ПВК позволяет производить также расчеты колебаний масс в водопроводящем тракте ГЭС, состоящем из безнапорного и напорного участков деривации, когда вместо камеры имеется безнапорный водовод. ПВК составлен без учета разрывностей течения, появление которых возможно при наполнении камеры (безнапорного водовода). Это позволяет построить графики колебаний уровней в начальном и в конечном створах камеры (безнапорного водовода) и изменения скорости течения (расхода) воды при неустановившихся режимах в камере (безнапорном водоводе) и в отводящем напорном туннеле. На основании этих зависимостей определяются величины экстремальных значений отметок уровня вода в камере (безнапорном водоводе), необходимые при проектировании сооружений.

Программа была использована для математического моделирования процесса колебаний масс воды в напорном тракте при сбросе и набросе расхода (мощности) ГЭС для целей проектирования на предварительных стадиях, а также для обработки и анализа результатов натурных экспериментов.

В задачах устойчивости исследовалась устойчивость "в малом" при идеальном регулировании турбин. Рассматривались различные схемы компоновки сооружений. Здесь приводятся результаты исследований для промежуточной схемы ГЭС с уравнительным резервуаром обычного типа на подводящей деривации и с резервуаром типа длинной камеры - на отводящей деривации.

Исходные уравнения, кроме перечисленных выше, включают в себя уравнения регулирования турбины. В целях упрощения выкладок пренебрегается силами трения по длине камеры и величиной уклона её дна из-за их малости.

Характеристическое уравнение для рассматриваемой системы получено с помощью применения преобразований Лапласа и имеет вид [8, 9]

$$\varphi_0(p) + \varphi_1(p)e^{cp} + \varphi_2(p)e^{-cp} = 0,$$

где

$$\varphi_0(p) = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3;$$

$$\varphi_1(p) = b'_0 + b'_1 p + b'_2 p^2 + b'_3 p^3;$$

$$\varphi_2(p) = b''_0 + b''_1 p + b''_2 p^2 + b''_3 p^3;$$

a_i, b'_i, b''_i - коэффициенты, зависящие от параметров рассматриваемой физической системы; $c = [2l / (1 - \lambda^2)](B_0 / F_0)$ - параметр, характеризующий длину камеры, $\lambda = \sqrt{(B_0 Q_0^2 / g F_0^3)}$ - параметр, характеризующий волновые процессы в камере. Здесь b_0 и F_0 соответственно ширина и живое сечение камеры при расчетном расходе Q_0 , g - ускорение силы тяжести.

Для головной схемы компоновки сооружений полиномы, входящие в характеристическое уравнение, получаются первого порядка [8, 9].

Обычно все параметры системы заданы, и ищутся параметры уравнительных резервуаров, в нашем случае - площадь верхнего резервуара и длина низового. В плоскости этих параметров требуется построить область устойчивости. Рассмотрены две задачи:

а) задана длина камеры - определяется критическая площадь верхнего резервуара;

б) задана площадь верхнего резервуара - определяется критическая длина камеры, удовлетворяющая условиям устойчивости.

В первом случае задача сводится к решению алгебраических уравнений. Во втором случае, а также в задаче для головной схемы трансцен-

дентность уравнений приводит к нескольким решениям, выбор действительного из которых требует проведения дополнительного анализа.

Построение области устойчивости производится методом D -разбиения. Все параметры системы заданы, неизвестной является площадь верхового резервуара F_l . Заменяя её через $\alpha+i\beta$, соответственно преобразуя коэффициенты a_i, b'_i, b''_i , полагая $p = i\omega$, разделением мнимой и реальной частей характеристического уравнения получаем систему уравнений относительно α и β , решение которых ищется на компьютере. Для каждого заданного значения l сначала строится граница устойчивости в плоскости $F_l(\alpha, \beta)$ при изменении ω от 0 до ∞ и выделяется область устойчивости. Значения F_l , удовлетворяющие условиям устойчивости, лежат на реальной оси α между значениями $\alpha_{min} \div \alpha_{max}$. Нас интересуют значения $F_{lmin} = \alpha_{min}$. Далее по парам значений F_{lmin} и α_{min} строится граница устойчивости в плоскости (F_l, l) .

Дальнейшая задача отыскания наивыгоднейшего соотношения между этими параметрами ставится и решается в каждом конкретном случае в соответствии с требованиями практики.

Компьютерная программа была использована:

- для определения очертания границы устойчивости в плоскости $F_l(\alpha, \beta)$, что позволило в дальнейшем искать решение задачи непосредственно для значения F_{lmin} ;
- для анализа влияния отдельных параметров ГЭС на устойчивость;
- в расчетах при проектировании и эксплуатации конкретных объектов (варианты с напорным подводящим и отводящим трактом для Митатлинской ГЭС, Чиркейской ГЭС, Ингури ГЭС, Худони ГЭС и др.)

Библиографический список

1. Гвелесиани Т.Л., Мамрадзе Г.П., Мисриханов М.Ш. Моделирование волнообразования в водохранилищах при горизонтальном колебании дна и берегов в случае местных землетрясений и телсейсмов // Проблемы строительства и эксплуатации крупных ГЭС, ВЭС и каскадов ГЭС: Сб. науч. тр. ЭБВ. Вып.1. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Гвелесиани Т.Л., Джинджихашвили Г.Я., Мисриханов М.Ш. Исследование основной зависимости для высоты образованной волны в водохранилищах при вертикальном смещении части их дна в результате тектонических землетрясений // Проблемы строительства и эксплуатации крупных ГЭС, ВЭС и каскадов ГЭС: Сб. науч. тр. ЭБВ. Вып.2. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Гвелесиани Т.Л., Мамрадзе Г.П., Мисриханов М.Ш. Волнообразование в водохранилище при деформации его дна в результате тектонического землетрясения // Пробле-

Исследование волнообразования в водохранилище при наличии остаточных сейсмических деформаций в его чаше, сейсмического давления воды и неустановившихся гидравлических режимов в напорной системе ГЭС

мы строительства и эксплуатации крупных ГЭС, ВЭС и каскадов ГЭС: Сб. науч. тр. ЭБВ. Вып.2. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

4. **Гвелесиани Т.Л.** К вопросу о колебании вязкой жидкости, возникающем в результате возмущений на дне водоема // Сообщения АН ГССР, 1969. - Т. 53. - № 2.

5. **Исследование** волнообразования в водохранилищах в результате возникновения остаточных деформаций в их ложе при землетрясениях / Т.Л. Гвелесиани, Г.Я. Джинджихашвили, Г.П. Мамрадзе, М.Ш. Мисриханов // Проблемы строительства и эксплуатации крупных ГЭС, ВЭС и каскадов ГЭС: Сб. науч. тр. ЭБВ. Вып.3. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

6. **Киласония Д.Н.** Динамическое давление воды в напорной системе гидроэлектростанции во время землетрясений // Автореф. дис. ...канд техн. наук. – Тбилиси, 1971.

7. **Исследование** сейсмических колебаний скального основания гидротехнических сооружений / Т.Л. Гвелесиани, Г.Я. Джинджихашвили, Г.П. Мамрадзе, М.Ш. Мисриханов // Тр. Международной конференции по численному моделированию в гидравлике. - Братислава, 1981, секция 1.2. – С. 34.

8. **Мисриханов М.Ш.** Исследования условий устойчивости стационарных гидравлических режимов гидроэлектростанций с различной компоновкой подводящего и отводящего тракта // Тр. Международной конференции по численному моделированию в гидравлике. - Братислава, 1981, секция 1.2. – С. 31.

9. **Манджавидзе Н.Ф.** Исследование устойчивости стационарных режимов гидроэлектростанций с длинным уравнительным резервуаром на отводящей напорной деривации // Тр. ин-та энергетики. Т. XVII. - Тбилиси, 1963.