

УДК 502/504:627.8

Д. В. КОЗЛОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет природообустройства»

Д. А. КРУТОВ

ОАО «Институт Гидропроект»

ТЕНДЕНЦИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА ВЫСОКОНАПОРНЫХ ГИДРОУЗЛАХ

Приводятся особенности технического проекта высоконапорного гидроузла во Вьетнаме. Представлена методика численных исследований бетонной плотины. Сопоставлены данные расчетных исследований и натурных наблюдений. Показаны преимущества контрольно-измерительной аппаратуры, которая позволяет напрямую измерять напряжения в бетоне.

Бетонная плотина, натурные данные, конечно-элементная модель, контрольно-измерительная аппаратура.

There are given peculiarities of the engineering design of a high-pressure hydraulic works in Vietnam. The methodology of numerical investigations of a concrete dam is presented. The rated investigations and field data are compared. There are shown the advantages of the instrumentation which allows directly stress measuring in concrete.

Concrete dam, field data, finite-element model, instrumentation.

В декабре 2012 года состоялась сдача в промышленную эксплуатацию гидроузла Шон Ла во Вьетнаме. Технический проект гидроузла Шон Ла был разработан проектным институтом «РЕСС1» (Вьетнам) с привлечением международных консультантов из «Colenco» (Швейцария) и «Институт Гидропроект» (Россия). Экспертизу проекта проводили Государственная экспертная комиссия Вьетнама и японская фирма «NipponKoei». Совместные усилия международных проектных организаций позволили реализовать сложные технические решения и выполнить расчетное обоснование проектных решений.

Особенности выполнения анализа надежности будут продемонстрированы на примере сооружений напорного фронта гидроузла Шон Ла. Гидроузел Шон Ла – проект комплексного назначе-

ния, основными задачами которого являются борьба с наводнениями в долине реки Красной и выработка электроэнергии на ГЭС установленной мощностью 2400 МВт.

Строительство гидроузла Шон Ла было начато в 2004 году, в декабре 2010 года пущен первый агрегат ГЭС, ввод шестого агрегата осуществлен в сентябре 2012 года.

В состав сооружений напорного фронта гидроузла входят:

левобережная глухая плотина из укатанного бетона длиной 245 м;

станционная плотина длиной 189 м (водоприемник ГЭС на основании из укатанного бетона);

русовая глухая плотина из укатанного бетона длиной 197 м;

водобросная плотина с донными отверстиями и поверхностным водосливом

из вибрированного бетона длиной 115,5 м;
глухая правобережная плотина из
вибрированного бетона длиной 158,5 м;
сопрягающая правобережная каменно-

земляная плотина с ядром из суглини-
стого материала длиной 56,6 м.

Максимальная высота бетонной
плотины составляет 138,1 м (рис. 1).



Рис. 1. Сооружения напорного фронта. Вид с нижнего бьефа

При укладке бетона в массивные блоки плотины полностью исключить возникновения трещин в бетоне не удалось. Трещины были пронумерованы и определена глубина их распространения посредством бурения наклонных скважин.

Трещины в блоках появились в основном в осенне-зимний сезон, когда температура окружающей среды снижалась значительно. В отдельные периоды температура опускалась до 10°C и держалась длительное время, что привело к охлаждению открытых наружных поверхностей блоков.

В процессе строительства при укладке бетона в блоки, расположенные над блоками с трещинами, зона трещин перекрывалась двумя рядами арматурных сеток и затем производилась непрерывная укладка бетона.

Для анализа надежности сооружений напорного фронта с учетом их фактического состояния выполнены конечно-элементные расчеты секций, оборудованных контрольно-измерительной аппаратурой. На рис. 2 представлена объемная конечно-элементная модель глухих секций 15 и 16, в которых по исполнительной документации количество трещин и их размеры являются наибольшими.

На рис. 3 представлена модель трещин, обнаруженных визуальными наблюдениями в блоках секций в пределах отметок 140,7...146,7 м.

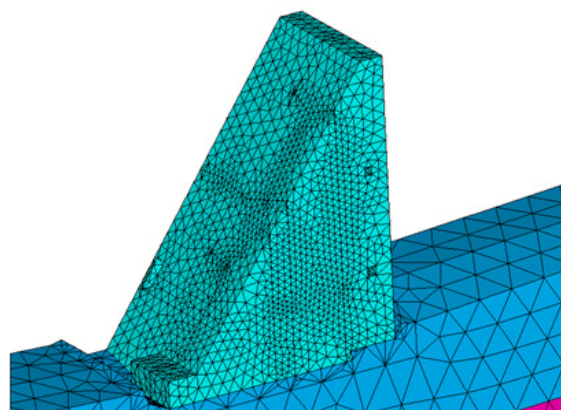


Рис. 2. Конечно-элементная модель секций 15 и 16. Вид с нижнего бьефа

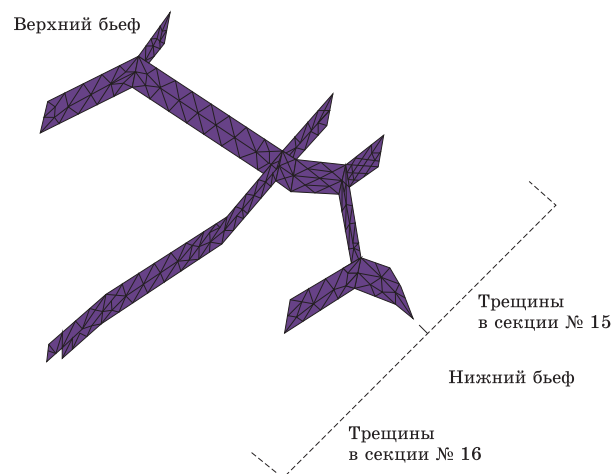


Рис. 3. Трещины в секциях 15 и 16, зафиксированные визуальными наблюдениями

На рисунке 4 представлена схема возможного трещинообразования (гипотетического) в блоках секций 15 и 16.

Предусмотрено, что в случае образования новых трещин они вышли бы на подошву плотины. Трещины моделировались объемами толщиной 0,05 м с модулем упругости $E = 1 \text{ т/м}^2$; плотностью $\rho = 0,01 \text{ т/м}^3$; коэффициентом Пуассона $\nu = 0$.

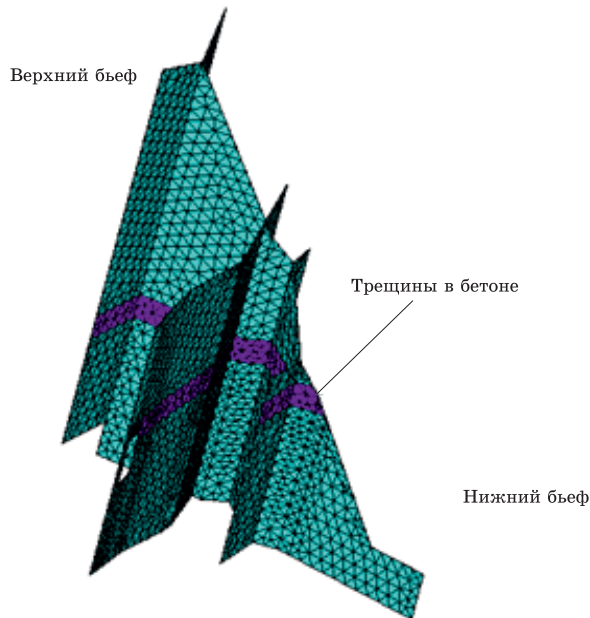


Рис. 4. Схема возможного развития трещин в сечениях 15 и 16

Цветом выделены зафиксированные трещины. Голубым цветом моделируется укатанный бетон с проектными характеристиками, но в конечно-элементной модели предусмотрена возможность развития трещин через каждые 3...6 м путем задания заниженных деформативных характеристик.

Секции плотины нагружались с верхнего и нижнего бьефов и противодействием на подошву плотины. Учитывали, что с верхнего бьефа напорная грань секций засыпана грунтом. Давление грунта с верхнего бьефа определяли как давление покоя.

Рассмотрены следующие сочетания нагрузок и воздействий.

1. Основное 1 сочетание нагрузок и воздействий при нормальном подпорном уровне (НПУ) (проектное состояние).

2. Основное 2 сочетание нагрузок при НПУ с учетом трещин, зафиксированных визуальными наблюдениями.

3. Особое 3 сочетание нагрузок при НПУ при допущении о распространении трещин со стороны низового клина до

подошвы плотины.

4. Особое 4 сочетание нагрузок при НПУ с допущением о распространении всех зафиксированных трещин до подошвы плотины.

5. Особое 5 сочетание нагрузок и воздействий при форсированном подпорном уровне с учетом трещин, зафиксированных визуальными наблюдениями.

6. Особое 6 сочетание нагрузок при сейсмическом воздействии с учетом трещин, зафиксированных визуальными наблюдениями.

Анализ расчетных исследований показал, что существующие в настоящее время трещины в бетонных блоках не вносят существенных изменений в напряженно-деформированное состояние плотины.

В расчетных исследованиях использовались фактические физико-механические характеристики укатанного бетона.

Значение расчетного модуля упругости определяли по формуле, заимствованной из СНиП 2.06.06.-85 для плотин, возведенных послойным методом бетонирования [1]:

$$E_{bd} = 0,75E_b \left[1 - 0,04 \left(\frac{3}{h_{bl}} - 1 \right) \right],$$

где E_b – начальный модуль упругости бетона, МПа; h_{bl} – высота блока бетонирования, м.

При этом расчетное значение E_{bd} , МПа, должно удовлетворять следующему условию [1]:

$$0,65E_b \leq E_{bd} \leq 30\,000.$$

В соответствии с фактическими данными испытаний укатанного бетона определены фактические расчетные характеристики (табл. 1).

Таблица 1

Расчетные физико-механические характеристики укатанного бетона

Номер исследуемой секции	Блок, в котором проводилось испытание	Начальный модуль упругости бетона (в образце) E_b , МПа	Расчетный модуль упругости E_{bd} , МПа
15	R4 R3 C5 C4	28 002	21 002
16	R4 R3 C5	28 197	21 147

Для контроля состояния сооружения во время его постоянной эксплуатации в блоки бетонной плотины установлена контрольно-измерительная аппаратура (КИА).

Контрольно-измерительная аппаратура диагностирует: степень деформирования плотины и основания; деформации в скальном массиве; напряжения (деформации) в бетоне и арматуре; монолитность плотины; фильтрационный режим в плотине, основании и береговых примыканиях; температурный режим плотины и основания.

Общее число датчиков, установленных на сооружениях гидроузла Шон Ла, около 600. Данное количество КИА можно назвать оптимальным в сопоставлении с количеством контрольно-измерительной аппаратуры на Богучанской, Братской, Усть-Илимской плотинах (до 2,5 тысячи датчиков).

Остановимся на способах контроля напряжений в теле бетонных плотин.

В настоящее время основным способом является тензометрический, сущность которого состоит в измерении тензometрами относительных деформаций бетона и вычислении по ним напряжений на основе соответствующих зависимостей упруго-ползучего тела [2].

Для вычисления напряжений необходимо знать напряженную деформацию, т. е. деформацию, вызванную действующими в бетоне напряжениями. Она определяется как разность между измеренной тензometром суммарной деформацией и измеренной свободной деформацией, обусловленной изменениями температуры и влажности бетона. Свободные деформации бетона измеряются в специально

выделенном в массиве ненапряженном образце. Ненапряженный образец с тензometром по его оси устраивается в массиве с помощью опалубки с двойными стенками и представляет собой усеченный конус, связанный с окружающим бетоном одним из концов. Для каждой тензometрической розетки необходимы свои ненапряженные образцы. Это требование обусловлено тем, что температура и влажность в ненапряженной и рабочей областях должны отличаться как можно меньше.

На основе напряженных деформаций в дальнейшем вычисляют действующие в бетоне напряжения.

Описанная методика сложна и непонятна как службе эксплуатации гидротехнических сооружений, так и международным экспертам.

Вместе с тем, в последнее десятилетие появилось новое поколение датчиков, которые использованы на плотине Шон Ла совместно с традиционными типами струнных датчиков. Так, наряду с измерениями деформаций в блоках плотины проводятся непосредственные измерения напряжений с помощью датчиков мюнхенского типа. Эти датчики позволяют непосредственно измерять напряжения в бетоне, а не получать напряжения путем определения деформации.

Недостатком, сдержавшим применение этого типа датчиков, явилось то, что ранее они не устанавливались в бетонных блоках массивных гидротехнических сооружений и тем самым не прошли проверку временем.

В таблице 2 приведены результаты расчетных и натуральных напряжений в бетоне.

Таблица 2

Сопоставление натуральных и расчетных напряжений в секции 15

Расстояние от напорной грани	Натурные данные, напряжения, МПа			Расчетные исследования, напряжения, МПа		
	SY	SX	SZ	SY	SX	SZ
Отметка 105,9 м						
- 0,3 м	-0,8			-0,3		
- 1,5 м	-0,35			-0,7		
-44,0 м	0			-0,7		
- 45,0 м		+0,15			+0,04	
Отметка 108.5 м						
- 2,0 м	-0,4	-0,3	-1,75	-0,7	0	-3,0
Отметка 142,0 м						
- 2,0 м	-0,2	0	-0,8	0	-0,9	-1,9

Хорошее совпадение результатов расчетных исследований и натуральных наблюдений свидетельствует о соответствии фактического состояния бетонной плотины проектному и подтверждает работоспособность датчиков непосредственного измерения напряжений.

Выводы

Контрольно-измерительной аппаратуры в количестве около 600, установленной на сооружениях высоконапорного гидроузла, достаточно для анализа напряженно-деформированного состояния и назначения критериев безопасности гидротехнических сооружений.

Использовать опытные физико-механические характеристики бетона и учитывать трещинообразование в расчетных моделях целесообразно для определения фактической схемы работы сооружения.

Полученные данные натуральных наблюдений и их хорошее совпадение с

результатами расчетных исследований позволяют рекомендовать датчики непосредственного измерения напряжений для контроля гидротехнических сооружений.

1. Плотины бетонные и железобетонные: СП 40.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 2.06.06–85. – М.: Минрегион России, 2012. – 66 с.

2. Эйдельман С. Я. Натурные исследования бетонных гидротехнических сооружений. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 210 с.

Материал поступил в редакцию 30.09.13.

Козлов Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, профессор, ректор
Тел. 8 (499) 976-29-62

Крутов Денис Анатольевич, кандидат технических наук, главный специалист
Тел. 8 (495) 741-44-86

E-mail: dkrutov@rambler.ru

УДК 502/504:551.495

В. И. ЗАНОСОВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный аграрный университет», Барнаул

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА БАЛАНС И РЕЖИМ ГРУНТОВЫХ ВОД

Рассмотрены вопросы эксплуатации природно-техногенного водного объекта и его влияния на окружающую среду. Выполнены гидродинамические расчеты режима грунтовых вод с учетом фильтрационных свойств водовмещающих пород. Определена дальность распространения рассолов озера с грунтовым потоком для обоснования размеров санитарно-защитной зоны объекта.

Озеро, рассолы, баланс грунтовых вод, фильтрация, гидрогеохимические условия, источник загрязнения, санитарная зона.

The article considers questions of usage of a natural – anthropogenic water body and its impact on the environment. Hydrodynamic calculations of a ground water regime are made taking into account filtration properties of water containing rocks. The distance of lake brines with ground flow is determined to justify the sizes of the sanitary protection zone of the object.

Lake, brines, balance of groundwater, filtration, hydro-geochemical conditions, source of pollution, sanitary zone.

Озеро Селитренное расположено в западной части Алтайского края и является природно-техногенным объектом. До введения в строй Кучукского сульфатного завода озеро представляло собой мелководный водоем глубиной до 0,5 м

с высокоминерализованной рапой, систематически пересыхающий в летнее время и покрывающийся солевой коркой, которая активно подвергалась дефляции при солевых бурях. Низкие побережья озера представляли собой полосу корково-