

СОСТОЯНИЕ БЕТОНА СЕВЕРНЫХ ПЛОТИН (БРАТСКОЙ И УСТЬ-ИЛИМСКОЙ) В МЕСТАХ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И МОРОЗНОГО РАЗРУШЕНИЯ

На примере двух высоких бетонных плотин на р. Ангаре – Братской и Усть-Илимской – были проведены исследования состояния бетона зоны переменного уровня воды и мест сосредоточенной фильтрации после 40–45 лет эксплуатации. Исследования включали натурные испытания, контрольное бурение и др. Полученные выводы отражают влияние факторов внешней среды и условий твердения на стойкость бетона в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: плотина, бетон, подводная зона, зона переменного уровня, напорная грань, фильтрация, коррозия, морозостойкость.

Исследование состояния бетонных конструкций таких ответственных сооружений, как Усть-Илимская и Братская плотины на р. Ангаре, являются основной составляющей их мониторинга. Для оценки состояния бетона плотин был проведен комплекс мер, включающий неразрушающие испытания открытых поверхностей и всесторонние испытания образцов-кернов, выбуренных из характерных зон плотин. Кроме того, анализу были подвергнуты результаты натурных наблюдений за динамикой фильтрации по сквозным трещинам в напорном фронте плотин и химическим составом фильтрата в сопоставлении с химическим составом воды в водохранилище [1].

За период эксплуатации плотин в течение 35 лет (Усть-Илимская) и 45 лет (Братская) был накоплен большой объем наблюдений статистического характера. Примененный статистический анализ случайных процессов и величин позволил дать обоснованные оценки изменений в состоянии бетона, которые произошли за период эксплуатации.

В наиболее благоприятных условиях находится бетон внутренней и подводной зон плотин, лишенный влагообмена с окружающей средой и пребывающий в условиях относительно стабильной температуры (+3...+5 °С). Для бетона характерна достаточно развитая система капиллярных пор и, против ожидания, невысокий прирост прочности [2].

Влияние воздушной среды на бетон наружных зон плотин прослеживается на глубину не более 10...15 см и выражается в повышении общей пористости и размера капиллярных пор в цементном камне. Карбонизацией затронуто 2...3 см поверхностного слоя бетона.

В результате подробных исследований особенностей процессов, протекающих в бетоне в местах сосредоточенной фильтрации, была предложена модель химизма коррозии бетона [1], объясняющая как коагуляцию слабо фильтрующих трещин, так и вынос компонентов цементного камня при повышенной фильтрации. Высказанное Г.П. Вербецким предположение о возможности осаждения CaCO_3 из воды водохранилища в процессе фильтрации по бетону [3] получило под-

тверждение и объясняется действием легкорастворимых щелочей K_2O и Na_2O , присутствующих в цементном камне и активно влияющих на насыщение фильтрата при малых фильтрационных расходах (до 0,02...0,10 л/мин на погонный метр трещины). Таким образом, характерное для первых лет эксплуатации Братской плотины интенсивное кальцитовое высолообразование на поверхности смотровых галерей напорного столба объясняется тем, что в условиях малых фильтрационных расходов, которые имели место в период эксплуатации, основным поставщиком кальция была вода водохранилища. Отложение кальция происходило на поверхности не только смотровых галерей, но и фильтрующих трещин, что полностью подтвердило контрольное бурение с извлечением кернов на контакте с фильтрационным потоком. В результате слабо фильтрующие трещины на Братской плотине со временем практически «замолчали», что подтверждается замерами фильтрационных расходов, а опасения, что выщелачивание, относимое К.В. Алексеевым только к бетону, приведет к потере водонепроницаемости напорного фронта, оказались напрасными.

Уникальные исследования были проведены на Усть-Илимской плотине, где сильно фильтрующая в течение более 30 лет трещина в напорной грани была подсечена густой сеткой разведочных скважин. В результате построена пространственная модель трещины (рис. 1) и изучено состояние бетона на контакте с фильтрационным потоком.

Характер пористости бетона оценивался по динамике водопоглощения бетона кернов, отобранных на различном удалении от трещины.

Сопоставление вероятности распределения величины λ_2 , характеризующей средний диаметр капиллярных пор, и максимального водопоглощения по объему, являющегося интегральной характеристикой капиллярной пористости (табл. 1), позволяет сделать заключение о последствиях фильтрации в течение 30 лет для состояния контактной бетонной поверхности, которое проявляется в виде увеличения сравнительных размеров капиллярных пор (рис. 2) и их относительного объема.

* - автор, с которым следует вести переписку

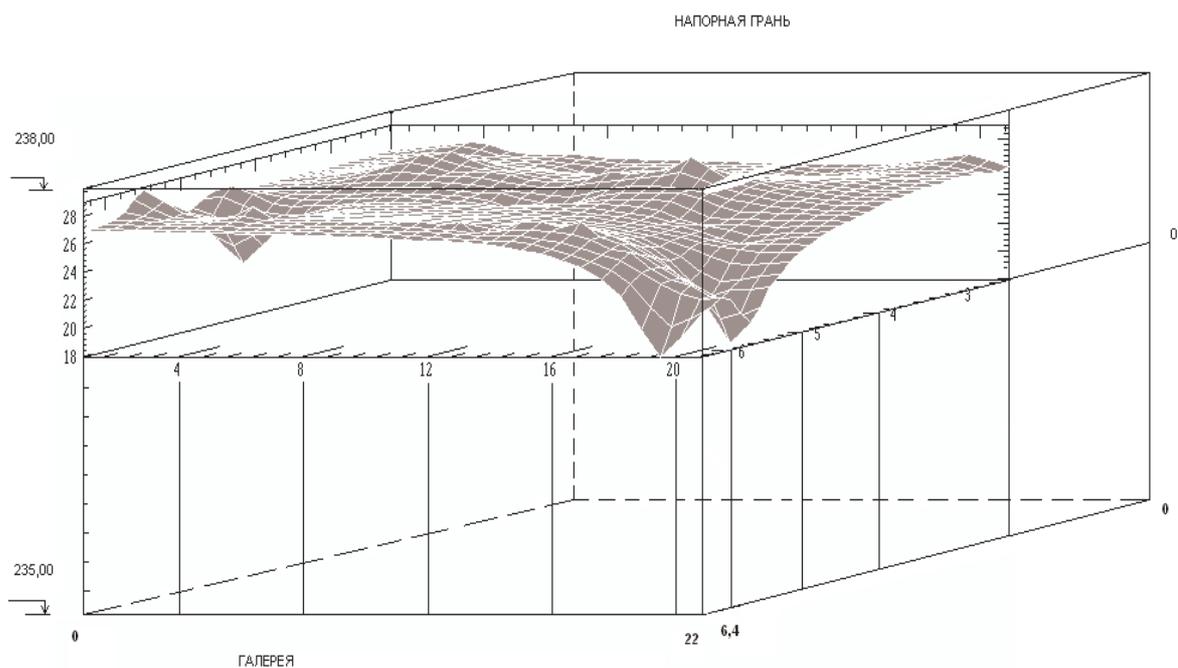


Рис. 1. Пространственное изображение трещины в зоне разведки (секция 30, в отметках 236,80...237,93)

Таблица 1

Сравнительные показатели пористости бетона по мере удаления от трещины

| Расположение керна относительно трещины | Параметры пористости | | | |
|--|-------------------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| | $W_{\text{макс}}$ по объему | | Величина λ_2 | |
| | $W_{\text{макс}}^{\text{ср}}$ | Диапазон | $\lambda_2^{\text{ср}}$ | Диапазон |
| На контакте с трещиной ≈ 2 см | 11,96 | 3,46...16,06 | 2,22 | 0,01...11,50 |
| На расстоянии 1...6 см от трещины | 10,98 | 8,80...13,68 | 0,64 | 0,09...1,80 |
| На расстоянии 5...11 см от трещины | 10,43 | 9,13...11,98 | 0,20 | 0,01...0,72 |
| В массиве | 9,00 | 5,30...12,10 | 1,10 | 0,30...2,70 |

Это влияние убывает по мере удаления от трещины в глубину массива и с учетом статистического разброса становится незначимым на расстоянии 6...11 см.

Сопоставление гистограмм распределения пористости показывает, что 60...70 % бетона, примыкающего к трещине, имеет показатели пористости, не отличающиеся от аналогичных для массивного бетона, т.е. изменение капиллярной пористости затронуло около 30 % поверхности трещины.

Образцы разрушенного при бурении поверхностного слоя бетона, выходящего в трещину, подвергались химическим исследованиям. Содержание свободной СаО определялось глицератным методом, степень гидратации – по приросту массы после дополнительной гидратации, химически связанная вода – по потерям при прокаливании.

Сравнение полученных результатов с аналогичными исследованиями, выполненными для глубинных слоев бетона напорного столба Усть-Илимской плотины (табл. 2), показало, что снижение содержания свободной СаО, которое произошло за 30 лет «работы» трещины, зависит

от состояния бетона и составляет от 80 % для размытого бетона до 50 % для бетона, сохраняющего сплошность на контакте с трещиной.

Таблица 2

Результаты определения химического состава цементного камня

| Зоны плотины | Содержание в % от массы цементного камня | | |
|------------------------------------|---|-----------------------------|-----------------------|
| | СаО _{св} | Химически связанная вода | Степень гидратации |
| Массив напорного столба | 5,9 | 13,2 | 100 |
| Из размытого (разрушенного) бетона | 0,8...1,1 | 10,9 | 100 |
| На контакте с фильтрующей трещиной | 3,12 | 10,99 | 100 |

Кроме того, на кернах, выходящих в трещину, обнаружен тонкодисперсный налет от светло-желтого до темно-коричневого цвета, который механически счищался и был исследован.

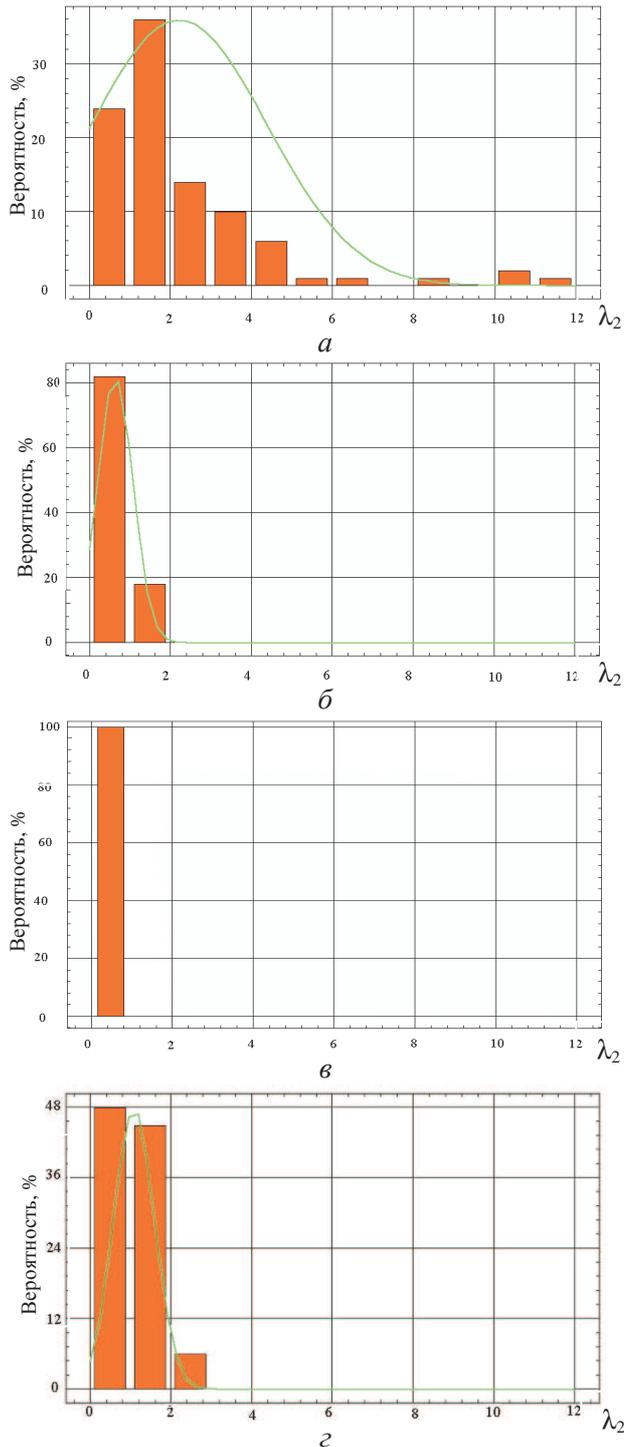


Рис. 2. Гистограмма величины λ_2 образцов (сравнительного среднего диаметра капиллярных пор в бетоне по мере удаления от трещины):

- a* – контактирующих с трещиной;
- б* – отстоящих от трещины на 1...6 см;
- в* – отстоящих от трещины на 5...11 см;
- г* – из массива

Рентгенофазовый анализ налета, выполненный в Институте земной коры Сибирского отделения Российской Академии наук (ИЗК СО РАН), показал наличие кварца, возможно, в смеси с халцедоном, плагиоклаза, калиевых полевых шпатов

и кальцита. В виде незначительных примесей в налете содержатся слюды, амфиболы, доломит, глины, цеолит, каолинит. Большинство из обнаруженных веществ являются породообразующими минералами заполнителей, использовавшихся для приготовления бетона. Это позволяет сделать вывод, что налет на поверхности трещины является продуктом разрушения бетона до минеральных составляющих заполнителей.

С помощью калориметрического метода оценивалось наличие органических примесей в налете. Поскольку раствор NaOH над пробой налета через сутки имел цвет темнее эталонного, то присутствие органических примесей в налете вполне вероятно.

Таким образом, было установлено, что в условиях сосредоточенной фильтрации по трещинам в бетоне напорного фронта плотин происходят далеко не однозначные процессы выщелачивания, т.е. имеет место достаточно сложная, в зависимости от фильтрационных расходов, картина кольматации отложениями кальцита, переходного состояния и размыва бетона с выносом растворимых компонентов цементного камня. Столь пестрая картина характерна даже для сильно фильтрующих трещин, в которых наряду с явными признаками деструкции остаются участки, не затронутые коррозией. Предполагая, что стойкий к размыву бетон имеет более плотную структуру и высокую прочность, можно сформулировать прочностной критерий бетона напорного столба, используемый при подборе состава и контроле качества в процессе строительства.

Бетон зоны переменного уровня воды находится в условиях, которые формируются в результате воздействия водной и воздушной среды.

Температура бетона на контакте с водной средой в верхнем бьефе (В.Б.) следует за относительно медленным изменением температуры воды – в зависимости от сезона и отметки относительно горизонта воды в водохранилище.

Ледяной покров водохранилища устанавливается в ноябре, после чего уровень водохранилища постепенно падает по мере его сработки. В этот период температура поверхностных слоёв бетона над льдом близка к температуре наружного воздуха. В пределах ледяного покрова температура бетона изменяется от 0 °С на отметке «лёд – вода» до температуры наружного воздуха на отметке «лёд – воздух»; таким образом, на контакте со льдом происходит своеобразное сглаживание перехода температуры бетона от 0 °С к отрицательной.

Несколько иная температурная картина складывается в незамерзающем нижнем бьефе, где в самые сильные морозы вода имеет температуру около +2 °С при малых колебаниях уровня.

Переход температуры бетона через 0 °С происходит в условиях близости (в той или иной степени) от уровня воды – в зависимости от темпера-

туры наружного воздуха. Указанный дрейф нулевой изотермы даже в течение одного зимнего периода приводит к многократному замораживанию и оттаиванию бетона на ограниченном участке вблизи от уровня воды, т.е. в условиях водонасыщения. Таким образом, если в В.Б. бетон зоны переменного (стабильно понижающегося) уровня однократно замораживается в течение одного зимнего периода, то в нижнем бьефе (Н.Б.) происходит многократное попеременное замораживание и оттаивание, концентрированное на небольшом (по высоте) участке бетонных конструкций, имеющих выход в Н.Б. Картина распределения температуры бетона приобретает экстремальный характер, когда при низких отрицательных температурах нулевая изотерма проходит вблизи от постоянно волнующейся после выхода из отсасывающих труб воды, а замораживание происходит в зоне капиллярного подсоса.

По результатам обследований монолитный бетон верхнего бьефа зоны переменного уровня не имеет признаков разрушений, что подтверждает достаточную стойкость бетона указанной зоны. Прочность монолитного бетона зоны переменного уровня воды в верхнем бьефе 30...50 МПа и более.

Показательно, что пазы затворов Братской плотины, выполненные из сборных железобетонных блоков и эксплуатируемые в тех же условиях, что и монолитный бетон, не выдержали испытания временем и практически полностью разрушились на глубину 10...15 см [2].

Известно, что структура пропаренного бетона характеризуется повышенной пористостью, формирующейся в процессе тепловой обработки, которая существенно снижает морозостойкость бетона, что нашло отражение в реальной долговечности сборных конструкций.

Осмотр и испытания бетона зоны переменного уровня воды в нижнем бьефе позволили сопоставить состояние надводных участков, не имеющих непосредственного контакта с водой, и бетона у самой поверхности воды. Прочность надводного бетона колебалась в пределах от 30 до 50 МПа и на некоторых участках – более 50 МПа.

Незамерзающая вода нижнего бьефа имеет примерно постоянный уровень, на отметке которого бетон находится в процессе стабильной деструкции и постепенного разрушения. Глубина повреждений доходит до 30 см, прочность бетона – от 5 до 20 МПа.

Особенностью морозостойкого бетона Ангарских плотин является использование бездобавочного портландцемента по специальным ТУ и его повышенные расходы, обеспечивающие В/Ц фактор в проектных составах в пределах 0,4...0,5.

Различие в составах бетона морозостойких зон в В.Б. и Н.Б. плотин заключается в повышении расходов цемента в бетоне Н.Б., т.к. бетонирование конструкций бычков и стенок, выходящих в Н.Б., совмещалось с отсасывающими трубами, для которых выполнялись дополнительные требования по кавитационной стойкости.

Морозостойкая зона В.Б. Братской плотины в основной части представлена монолитным бетоном с расходом цемента 280 кг/м³ при среднем водосодержании бетонной смеси 145...150 л/м³.

При определении капиллярной пористости необходимо назначить α – количество химически связанной воды. По нашим данным, для использованного портландцемента $\alpha \approx 15\%$, тогда средняя величина капиллярной пористости

$$P_{\text{кап}} = \frac{V - 2\alpha a}{1000} \cdot 100 = \frac{147 - 2 \cdot 0,15 \cdot 280}{1000} \cdot 100 \approx 6\%.$$

Расчётные границы колебаний пористости ($p = 0,95$) составят 3,6...8,0%, с учётом регрессии от 3 до 9%.

Для морозостойкого бетона Н.Б. указанные колебания пористости сохраняются.

Сопоставление картин распределения величин капиллярной пористости морозостойкого и подводного бетона напорного столба (рис. 3) даёт наглядное представление о соотношении рассматриваемых случайных величин. Морозостойкий бетон может иметь структуру пор неморозостойкого бетона с той вероятностью, которая имеет место в конкретной реализации, в нашем случае это 15%.

Именно это обстоятельство, на наш взгляд, является одной из причин наличия на поверхности бетона морозостойкой зоны в Н.Б. плотин участков с поверхностными разрушениями.

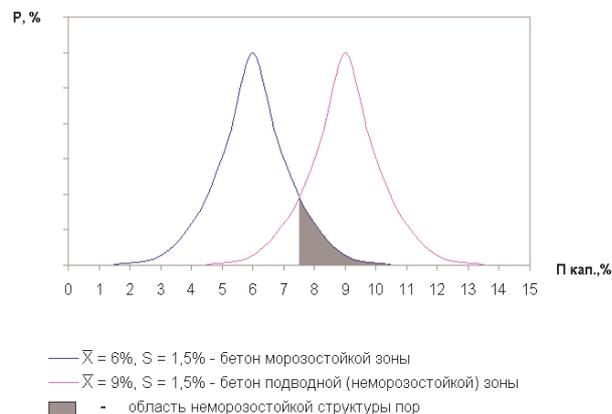


Рис. 3. Распределение величины капиллярной пористости

Следует признать, что для условий эксплуатации в Н.Б. реализованная технология не обеспечила требуемой долговечности бетона. Пути её улучшения сосредоточены в следующих основных направлениях:

- выполнение повышенных требований по морозостойкости при проектировании состава бетона;

- применение технологии, обеспечивающей более высокую стабильность основных параметров бетона данной зоны плотины (включая пористость) за счёт оптимального сочетания комплекса производственных факторов.

Заключение

Подробное рассмотрение состояние бетона в местах сосредоточенной фильтрации в напорном фронте Ангарских бетонных плотин оказалось возможным благодаря систематическим натурным наблюдениям в сочетании со специальными исследованиями.

Проведенные всесторонние испытания позволили обоснованно определить потенциально опасные места фильтрации, в частности, на Усть-Илимской плотине, которые в настоящее время подвергаются ремонту.

Бетон зоны уровня воды в НБ всех без исключения Ангарских плотин постепенно разрушается из-за недостаточной стойкости в экстремальных условиях эксплуатации. Установлено, что нестабильность свойств бетона, характерная для реальных сооружений, существенно влияет на развитие деструктивных процессов в рассмотренных зонах плотин. Таким образом, проблема обеспечения стабильности свойств бетона, решаемая в основном в строительный период, имеет прямое отношение к долговечности этого материала в сооружении.

Литература

1. Особенности коррозионных процессов, протекающих в бетоне напорного фронта плотины Братской ГЭС / М.А. Садович, Т.Ф. Шляхтина, З.И. Соловьёва // Гидротехническое строительство. – 2000. – № 3. – С. 14–17.
2. Стойкость бетона в различной эксплуатационной среде / М.А. Садович, Т.Ф. Шляхтина, А.М. Тигунцева // Бетон и железобетон – пути развития. Научные труды 2-й Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону. 5–9 сентября 2005 г., Москва; В 5 т. Т.4. Секционные доклады. Секция «Легкие и ячеистые бетоны. Долговечность железобетонных конструкций». – М.: Дипак, 2005. – С. 689–695.
3. Вербецкий, Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде. – М.: Стройиздат, 1976. – 128 с.
4. Алексеев, С.Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шисль. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.