Journal of International Scientific Publications:
Materials, Methods & Technologies, Volume 5, Part 3
ISSN 1313-2539, Published at: http://www.science-journals.eu

STATE OF NORTH CONCRETE DAMS RUSSIA

Mark Sadovich[1], Tatyana Shlyakhtina[1] and Anna Kuritsyna[1]
Department of Technology and Organisation Construction, Bratsk State University,
665709, Bratsk, Russia. E-mail: kaftsp@brstu.ru

Abstract

It is envisaged that the interest in investigation the state of long exploitation of concrete dams will continue to grow as they age. Authentic assessments of changes in the strength and the concrete structure, the characteristics of corrosion processes, the repercussions of frost affects, combined with water saturation, and others may be considered as part of a systematic monitoring of responsible concrete structures, which certainly include dams.

Given that the largest Russian northern dams were built in the 60 ÷ 70-th years of the twentieth century, the duration of operation is to date 40 ÷ 50 years. This period is sufficient to detect the repercussions of the exploitation environment on the condition of the concrete.

In accordance with the classification of interactions in the system "concrete - environment" identifies areas of dams in relation to which were executed complex studies of the concrete.

Key words: *dam, concrete, strength, corrosion, filtration, crack*

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СРЕДЫ

Водная и воздушная среда оказывает непосредственное воздействие на тело бетонной плотины.

Наиболее важным и потенциально опасным фактором внешней среды по отношению к бетонным плотинам является водная среда, поскольку вода не только омывает большие бетонные поверхности, но и фильтрует по отдельным трещинам под гидростатическим напором.

Северные реки России несут чистые воды. Так, по данным Центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ангарская вода при общей минерализации не более 200 мг / л в качестве преобладающего аниона содержит 50 ÷100 мг / л HCO^-_3, а в качестве катиона - 15÷30 мг / л Ca^{2+}. Содержание свободной CO_2 в воде изменяется от нуля в отдельные летние дни до 20 мг / л зимой.

Сопоставление химического состава ангарской воды с критериями агрессивности показывает, что в бетоне плотин возможно сочетание выщелачивающей и углекислотной коррозии [1].

Особенностью северных водохранилищ является длительная консервация в зимнее время подо льдом, когда прекращается газовый обмен с наружным воздухом и происходит повышение кислотности воды. Продолжительность ледового периода составляет около 7 месяцев в году. С таянием льда и снега связано опреснение воды водохранилищ в весенне-летний период. Для водохранилищ характерно летнее наполнение и зимнее срабатывание с понижением уровня воды в среднем на три метра, а в отдельные годы - до пяти метров.

В нижнем бьефе вода в районе ГЭС зимой не замерзает из-за некоторого разогрева при прохождении через турбины и высоких скоростей течения. Колебания уровня нижнего бьефа носят периодический характер и находятся в пределах 1 ÷ 1,5 м.

Северные плотины России эксплуатируются в основном в условиях резко континентального климата, который в соответствии с классификацией « ISO 9000 » относится по температурному режиму к классам « С и VC » со среднемесячной температурой самого холодного месяца от - 15 ^{0}С до – 30 ^{0}С и ниже по влажности - к классу „n” с относительной влажностью воздуха самого тёплого месяца 45 - 75 %. Количество переходов через 0^{0}С составляет от 50 до 100 циклов в год.

Химический состав воздуха в сочетании с умеренной влажностью не имеет, как правило, опасных для бетона концентраций газов.

Таким образом, эксплуатационная среда характеризуется комплексом факторов, связанных с суровым климатом Севера, особенностями водного режима верхнего и нижнего бьефа и химическим составом воды.

2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА ПЛОТИН

При строительстве плотин, большую часть которых составляют гравитационные, была принята зональная схема распределения бетона по маркам (таблица 1, рисунок 1) [2].

Таблица 1. Зональное распределение бетона по маркам

Зона плотины	Марка бетона
Подводная	200,W 8
Переменного уровня верхнего бьефа	200, W 8,F250
нижнего бьефа	400,W 12, F400
Внутренняя зона	100÷150,W 2
Наружная зона	200,W4,F200

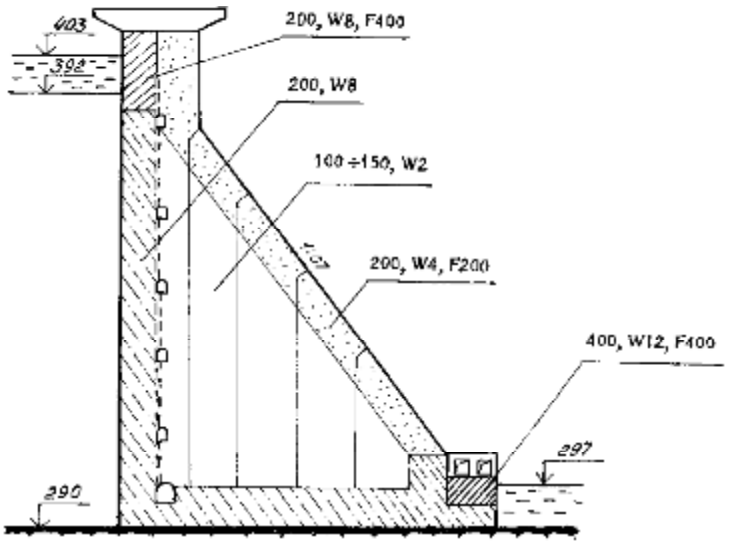


Рис.1. Принципиальная схема зонирования бетона плотины по маркам

Для приготовления бетона Северных Восточно-сибирских плотин использовался специальный низкотермичный цемент Красноярского завода с нормированным минеральным составом клинкера (таблица 2).

Портландцемент типа I использовался для приготовления морозостойких бетонов, шлакопортландцемент типа II для подводного бетона.

Общий объем бетона, уложенного в наиболее высокие (100 м и более) плотины, составляет около 15 млн. м^3.

Таблица 2. ***Минералогический состав цемента***

Тип цемента	**Содержание % по массе**				**Активные минеральные добавки, %**
	C_3S	**C_2S**	**C_3A**	**C_4AF**	
I-портландцемент	46 ÷ 52	22 ÷ 25	6.4 ÷ 7.5	15 ÷ 17	_____
II- шлакопортландцемент					доменный шлак 40÷50%

3.РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПЛОТИН

В соответствии с классификацией взаимодействий в системе «бетон – среда» назначены зоны плотин, по которым были выполнены комплексные исследования бетона.

К таким характерным частям или зонам плотин были отнесены:

1) подводный бетон напорного столба;

2) внутренняя зона;

3) зона переменного уровня воды в верхнем и нижнем бьефах;

4) наружная зона глухих и пристанционных плотин, контактирующая с воздушной средой;

5) водосливная зона, подверженная периодическому воздействию воды.

В комплексных исследованиях бетона предполагалось сочетание натурных испытаний с отбором образцов- кернов.

Натурные испытания включали визуальный осмотр, фотографирование и испытания бетона неразрушающими методами.

Испытания бетона образцов–кернов состояли из определения прочностных свойств бетона, структуры пор, степени гидратации цемента и количества свободной CaO в цементном камне, микроскопических исследований цементного камня на контакте с заполнителем и др.

В методическом плане была реализована идея сравнительных испытаний бетона, находящегося в различных условиях в процессе эксплуатации.

Результаты определения прочности неразрушающими методами испытаний, дополненные визуальной оценкой, позволили получить наиболее достоверную картину состояния поверхности бетона изучаемых зон плотин, что для наружных зон – важнейший показатель стойкости бетона после длительной эксплуатации.

В этом плане состояние бетона зоны переменного уровня воды в верхнем и нижнем бьефах Братской и Усть-Илимской плотин выглядит следующим образом:

образом, долговечность или стойкость (включая морозостойкость) бетона указанных зон 1) Бетон напорного столба, обследованный со стороны внутренних смотровых галерей путём осмотра и испытаний склерометром, характеризуется поверхностной прочностью $\overline{R} = 35$ МПа при диапазоне колебаний 19÷60 МПа.

Поверхностная прочность бетона, увлажняемого постоянно текущим фильтратом или покрытого кальцитом $\overline{R} = 21{,}3$ МПа, диапазон 4 ÷36 МПа.

Таким образом, увлажняемая в течение многих лет текущим фильтратом поверхность имеет существенно меньшую прочность и является своеобразной моделью состояния поверхности фильтрующих трещин.

2) Бетон зоны переменного уровня воды в верхнем бьефе плотин находится под воздействием переменного увлажнения, морозной атаки, ветра и других факторов внешней среды.

Монолитный бетон напорного столба Братской плотины в зоне переменного уровня воды в верхнем бьефе был обследован с использованием поверхностных ультразвуковых испытаний.

Анализ результатов испытаний позволил выделить 2 основных состояния бетона:

- без повреждений;

- с поверхностными повреждениями.

Соответствующие статистические параметры прочности бетона без признаков разрушения (рисунок 2а): $\overline{R} = 35{,}9$ МПа, S = 9,0 МПа, V = 26% (распределение нормальное).

Поврежденный бетон имеет характерную ассиметричную кривую распределения с наиболее вероятной прочностью до 10 МПа (рисунок 2б). Отмеченные повреждения носят

поверхностный характер и составляют около 30% от общей поверхности напорной грани. Соотношение между сохранившимися и поврежденными участками в целом по напорной грани 70 ÷30%.

Аналогичное состояние наружной поверхности напорной грани характерно для Усть-Илимской плотины.

3) Бетон в зоне переменного уровня воды в нижнем бьефе был испытан на Братской ГЭС в конструкциях здания ГЭС.

В нижнем бьефе имеет место концентрированное разрушение бетонных поверхностей бычков в зоне основных колебаний уровня воды. Глубина разрушенных участков достигает 30 см. Прочность бетона на поверхности разрушающегося бетона составляет 5÷20 МПа, что сопоставимо с прочностью разрушенных участков бетона напорной грани [1].

Разрушение бетона в нижнем бьефе в зоне переменного уровня воды, незамерзающего даже в лютые морозы, характерно для многих северных плотин. Указанные условия приводят к многократному замерзанию и оттаиванию в течение даже одного зимнего сезона, причем замерзание бетона при больших морозах происходит в зоне капиллярного подъема. Таким оказалась исчерпанной в течение рассматриваемого срока эксплуатации и некоторые гидроузлы (в частности Братский) приступили к ремонту разрушенных участков.

Натурные испытания в целом обеспечили получение важнейших показателей состояния бетонной поверхности изучаемых зон плотин, которые подвержены непосредственному воздействию окружающей среды.

Испытания образцов – кернов имели своей основной целью изучение глубинных слоёв бетона с установлением таких показателей, как прочность, плотность, пористость, сравнительный диаметр капиллярных пор, содержание CaO в цементном камне и др.

Анализ результатов испытаний кернов даёт основание для следующих выводов.

Сопоставление прочности бетона напорного столба (200, W –8) и внутренней зоны (100÷150, W-2) Северных плотин показало возможность их объединения и получения общих зависимостей прочности от возраста бетона (таблица 3, рисунок 3).

При дискретном методе определения пористости бетона, который был применён в данной работе, испытание сводится к определению водопоглощения в установленные моменты времени (τ = 0; 0,25; 1; 24 ч).

ISSN 1313-2539, Published at: http://www.science-journals.eu

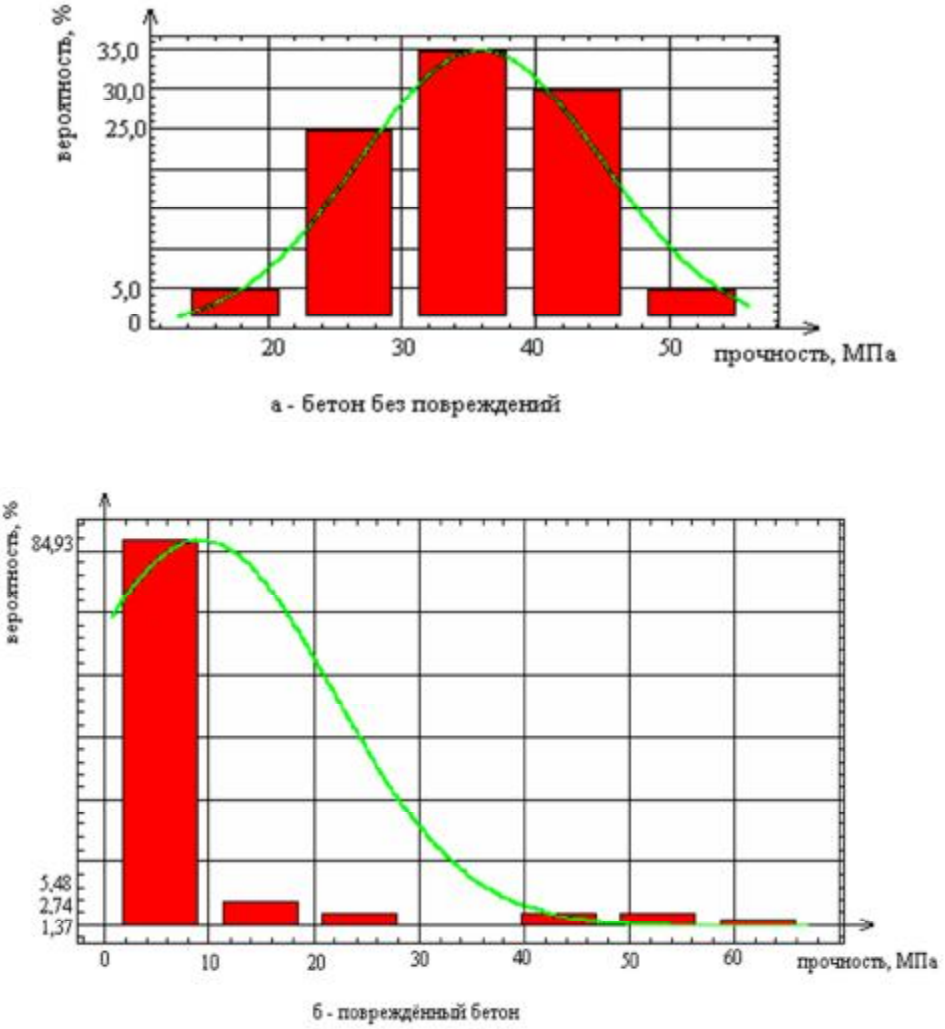


Рис. 2. Гистограммы распределения прочности бетона напорной грани Братской плотины

ISSN 1313-2539, Published at: http://www.science-journals.eu

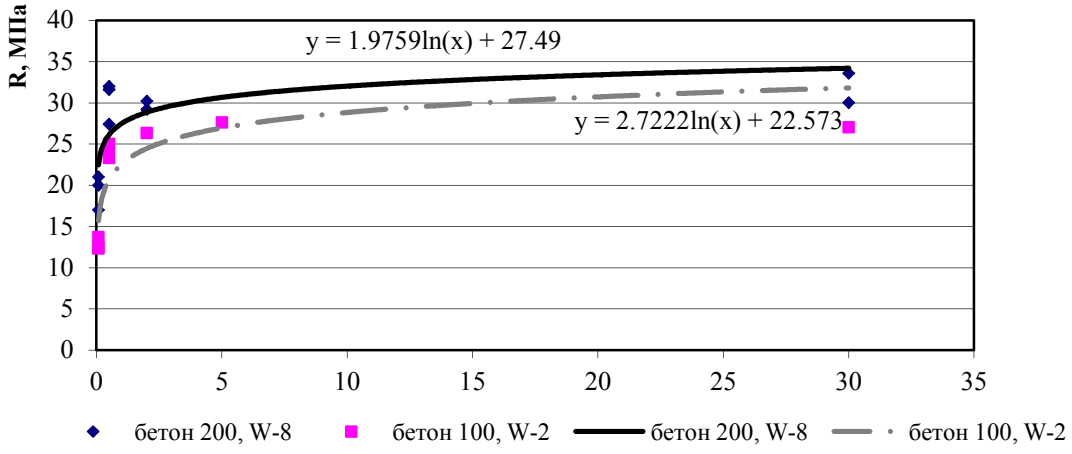


Рис. 3. Зависимость прочности бетона марок 200, W-8 и 100 W-2 Северных плотин от возраста (по результатам испытаний контрольных образцов до 180 сут. и кернов- более 180 сут)

Таблица 3. Сравнительные данные по прочности бетона Северных плотин

Строительство станций	**Марка бетона**	**Прочность, МПа**			
		Контрольных образцов		**Кернов в возрасте**	
		28 сут.	**180 сут.**	**до 5 лет**	**30-45 лет**
1	2	3	4	5	6
Братская	200, W-8	21.0	31,6 18	29,2 34 (2 года)	30,0 26 (44 года)
Красноярская		21,0	32,0 22	30,2 26 (2 года)	-
Усть – Илимская		20,0	32,0 15	43,0 24 (5 лет)	33,6 32,8 (31 год)
Зейская		17,0	27,4 14	31,2 23 (5 лет)	-
Братская	100, W-2	13,7	23,3 27	26,3 32 (2 года)	22,5 28,2 (44 года)

Зейская		12,3	24,7 18	27,6 26 (5 лет)	-
Усть – Илимская		12,5	25,0 20,0	39,0 23 (7 лет)	-
Примечание. Под чертой – коэффициент вариации, %					

Для определения параметров, характеризующих строение порового пространства цементного камня по кривой его водонасыщения, используется аппроксимация динамики водонасыщения экспоненциальной зависимостью, предложенная М.И. Бруссером [3]:

$$W_t = W_{макс}\left[1 - e^{-\left(\bar{\lambda}_2 \cdot t\right)\alpha}\right], \qquad (1)$$

где W_t – водонасыщение образца за время t;

$W_{макс}$ – максимальное водонасыщение;

$\bar{\lambda}_2$ - показатель степени экспоненты, равный пределу отношения ускорения к скорости процесса насыщения, значением которого оценивается средний радиус капилляров;

α – коэффициент, характеризующий степень однородности капилляров по их радиусам

($0 < \alpha \leq 1$). При $\alpha = 1$ все капилляры имеют постоянные размеры.

Анализ динамики водонасыщения, характеризуемой отношением W_τ / W_{max} в зависимости от положения кернов относительно наружных поверхностей, позволил выделить зоны, значимо различающиеся по среднему размеру капиллярных пор.

Так, керны, отобранные с поверхности низовой грани плотин, имеют λ_2= 2,55, что в 2 ÷ 4 раза превышает аналогичный показатель для глубинных слоёв бетона. Толщина поверхностной зоны, для которой характерны указанные показатели, не превышает 10 см. Для глубинных слоёв отмечается совпадение кривых водонасыщения, независимо от марки бетона.

Таким образом, температурно- влажностные условия, в которых сформировались и эксплуатировались наружные поверхности плотин, сказались на капиллярной пористости таким образом, что средний размер капилляров существенно превышает таковой для глубинных слоёв бетона.

Кроме того, было проведено сравнение капиллярной пористости бетона глубинных слоёв, определённой экспериментально, и рассчитанной по формуле Горчакова Г.И. с учётом изменчивости водосодержания [4]. Сравнение показало достаточно точное совпадение результатов определения параметров капиллярной пористости: $\overline{X}$ =9 %, S= 1,5 %, где $\overline{X}$ - среднее значение, S – среднеквадратическое отклонение.

Для оценки совместного влияния факторов пористости и Ц/В фактора на прочность бетона был проведён множественный регрессионный анализ наиболее представительных выборок

результатов испытаний кернов напорного столба северных Братской и Усть – Илимской плотин в сравнении с южной плотиной Токтогульской ГЭС.

Регрессионная составляющая отражает влияние изменчивости пористости на прочность бетона.

Технологическая составляющая отражает влияние изменчивости Ц/В фактора бетона заводского изготовления.

Возможность переноса изменчивости водосодержания и Ц/В фактора заводского бетона на бетон в плотине подтвердило совпадение расчётной и фактической пористости бетона. Как видно из таблиц 4 и 5, технологическая составляющая Токтогульского бетона находится в границах колебаний дисперсий заводского бетона, что подтверждает близость условий твердения бетона Южных плотин к условиям твердения контрольных образцов заводского бетона.

Таблица 4. Матрица дисперсий прочности кернов

Плотина	**Дисперсия, (МПа)^2**			
	Регрессионная Составляющая	**Остаточная**		
		общая	**В том числе**	
			изменчивости активности цемента	**технологическая**
Усть - Илимская	27,8 36 %	50,4 64 %	16,8 21,3 %	33,6 42,7 %
Братская	7,92 23 %	27,2 77 %	9,07 25,6 %	18,13 51,4 %
Токтогульская	9 – 10 30 %	21,6 70 %	7,2 23,4 %	14,7 46,6 %

Таблица 5. Матрица дисперсий прочности контрольных образцов (180 сут) заводского бетона

Марка бетона	**Вид цемента**	**Дисперсия, (МПа)^2**		
		изменчивости активности цемента	**технологическая составляющая**	**общая**
200, W - 8	Шлакопортландцемент Красноярского завода	5 ÷ 7 33,5 %	10 ÷14 66,5 %	15 ÷21 100 %

Влияние особых температурных условий твердения бетона в северных плотинах проявляется в том, что технологическая составляющая дисперсии прочности Северных плотин стабильно выше, чем для заводского бетона.

Составляющая переменной активности цемента отражает уровень технологической дисциплины (предотвращение смешивания цементов разных марок), который ниже на отдалённых от заводов изготовителей цемента Северных стройках.

Петрографический анализ прозрачных шлифов бетона Братской плотины и Кругобайкальской железной дороги выполнен сотрудником Института Земной коры Сибирского отделения Академии Наук Российской Федерации Орловой Г.В.

Главный вывод состоит в том, что отмечено срастание цементного камня с поверхностью зёрен заполнителя как для 40-летнего бетона Братской плотины, так и для 100- летнего бетона Кругобайкальской железной дороги, в котором произошло срастание цементного камня с частицами мелкого заполнителя, так что цементный камень и заполнитель выглядят как монолитная порода.

Этот важнейший, на наш взгляд, вывод даёт надежду на столетнее существование бетона северных плотин России (исключая поверхностные зоны) без каких – либо опасений за его будущее.

4. КОРРОЗИЯ В МЕСТАХ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Первый опыт эксплуатации плотины Братской ГЭС под напором был весьма впечатляющим, т.к. продукты выщелачивания бетона по фильтрующим трещинам и дренам образовали многочисленные живописные сталактиты, «украшающие» своды смотровых галерей (рисунок 4, 5). По расчётам К.В. Алексеева, относящимся к 1976 г., из бетона напорного фронта Братской плотины выносилось ежегодно около 6 т. извести (CaO), что вызывало серьёзные опасения потери водонепроницаемости напорного фронта, поскольку указанное количество относилось только к местам концентрированной фильтрации.

Таким образом, проблема коррозионной стойкости бетона Ангарских плотин в местах сосредоточенной фильтрации была поставлена уже с первых лет эксплуатации Братской, Усть – Илимской и других северных плотин.

Подробное изучение особенностей коррозии бетона в местах сосредоточенной фильтрации было проведено на примере Братской и Усть-Илимской плотины.

В основе методики оценки протекающих коррозионных процессов лежало сопоставление химического состава воды водохранилища и воды, профильтровавшейся через тело плотины (фильтрата).

Методика отбора проб фильтрата отвечала следующим требованиям: проба фильтрата имела привязку к месту и времени отбора; отбор пробы, хранение и транспортировка должны были исключать изменения в содержании определяемых компонентов. За время наблюдений был получен большой массив данных, который был подвергнут статистическому анализу.

ISSN 1313-2539, Published at: http://www.science-journals.eu



Рис. 4. *Отложения кальцита на стенке смотровой галереи*



Рис. 5. *Сталактиты и сталагмиты в смотровой галерее*

В соответствии с общепринятыми представлениями процесс коррозии связан с растворением и выносом из бетона основного структурообразующего компонента цементного камня -

гидроксида кальция, обеспечивающего высокую щелочность среды в бетоне, необходимую для устойчивого существования минералов цементного камня (Байков А.А., Москвин В.М., Алексеев С.Н).

В действительности, по результатам анализов было обнаружено, что примерно в половине наблюдений ионы кальция не вымываются, а осаждаются в процессе фильтрации через бетон, то есть концентрация ионов кальция в фильтрате ниже, чем в воде водохранилища.

Построенные по результатам наблюдений зависимости количества выносимых ионов от величины фильтрационных расходов позволили сделать заключение о преимущественном осаждении ионов кальция по путям фильтрации при расходах до 0,005 л/мин [5]. При фильтрационных расходах в интервале от 0,005 до 0,02 л/мин наблюдается как осаждение, так и вынос ионов кальция. Также было отмечено, что концентрация в фильтрате ионов $Na^+ + K^+$ стабильно выше, чем в воде водохранилища, независимо от величины фильтрационных расходов. При высоких фильтрационных расходах (более 0,02 л/мин) имеет место вынос как ионов Ca^{2+} так и Na^+, K^+. Расходы приведены из расчета на 1 м длины фильтрующей трещины.

Такое явление, как преимущественный вынос из бетона натриевых соединений, отмечено впервые, тем не менее, оно вполне объяснимо. Как уже отмечалось, для подводного бетона северных плотин использовался шлакопортландцемент Красноярского завода, содержащий до 50 % магнитогорских доменных гранулированных шлаков. Содержание щелочных оксидов $Na_2O + K_2O$ в цементе определяется их наличием в клинкере (до 1%) и в минеральных добавках (до 2%).

Таким образом, при содержании в цементе до 50% доменных шлаков содержание щелочных оксидов составит 1- 1,5 % от массы цемента. Поскольку оксиды натрия и калия химически значительно активнее, чем гидроксид кальция, процесс их растворения в фильтрующейся воде накладывается на общую картину коррозии цементного камня.

Важно отметить, что степень насыщения фильтрата ионами натрия и калия зависит от фильтрационных расходов. Так, при фильтрационных расходах до 0,02 л/мин pH фильтрата увеличивается до 10 – 12 по сравнению с 7 – 8 в водохранилище. При более высоких расходах такого резкого увеличения щелочности фильтрата не наблюдается.

Как уже отмечалось, ангарская вода может быть источником углекислой коррозии из-за присутствия агрессивной углекислоты. Необходимо отметить, что в последние годы прослеживается тенденция к увеличению содержания растворённой в воде углекислоты, что может быть связано с биохимическими процессами и другими факторами, влияющими на химический состав воды водохранилищ.

Наличие углекислотной коррозии в бетоне напорного фронта подтверждается увеличением концентрации ионов CO_3^{2-} и HCO_3^- в фильтрате по сравнению с водой водохранилища. Одновременно отмечается резкое снижение свободной CO_2, что подтверждает её переход в карбонатные соединения. Поиск корреляции связей между концентрацией ионов Ca^{2+} и $Na^+ + K^+$ и карбонатными ионами позволил установить наличие достаточно тесной корреляционной связи только между содержанием в фильтрате ионов $Na^+ + K^+$ и карбонатных CO_3^{2-} и HCO_3^- (коэффициент корреляции 0,91 – 0,95). Процесс углекислотной коррозии протекает так, что в первую очередь образуются легкорастворимые карбонатные соединения типа Na_2CO_3 и $NaHCO_3$. Отмеченная особенность позволяет дать объяснение такому явлению, как осаждение кальция по путям фильтрации. Присутствие бикарбоната в воде водохранилища возможно только при наличии определённого количества свободной CO_2. Переход свободной CO_2 в карбонатные соединения Na и K нарушает это природное равновесие, и в силу обратимости реакции ионы кальция выпадают в осадок в виде $CaCO_3$.

$$Ca(HCO_3)_2 \Leftrightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O.$$

Распад бикарбоната, в свою очередь, освобождает новые порции углекислоты, которая способна перейти в карбонатные соли натрия и калия.

Малорастворимый $CaCO_3$ осаждается на путях фильтрации и на поверхности бетона в виде отложений, состоящих из кальцита.

Однако влияние карбонатных соединений Na и K не ограничивается распадом бикарбоната кальция. Появление в фильтрате новых карбонатных соединений существенно увеличивает жёсткость фильтрата по сравнению с водой водохранилища, что неизбежно приводит к снижению растворимости $Ca(OH)_2$, то есть имеет место замедление или прекращение процесса выщелачивания.

Предложенная модель коррозионного процесса, учитывающая влияние оксидов натрия и калия, не может рассматриваться в отрыве от фильтрационных расходов, величина которых определяет концентрацию растворяемых соединений. Осаждение $CaCO_3$ возможно только при достаточном насыщении фильтрата карбонатами натрия и калия, которое в той или иной степени происходит при фильтрационных расходах примерно до 0,02 л/мин.

Дальнейшее повышение фильтрационных расходов и соответствующее снижение концентрации растворяемых компонентов цементного камня меняет характер коррозионного процесса таким образом, что растворение и вынос как щелочных оксидов, так и гидроксида кальция лимитируется в конечном счёте диффузией указанных соединений из бетона. При расходах более 0,5 л/мин прирост концентрации контролируемых ионов в фильтрате по сравнению с водой водохранилища настолько мал, что создаётся иллюзия отсутствия коррозии. Очевидно, что в таких наиболее опасных местах фильтрации в плотине требуется более точный контроль концентрации ионов как в фильтрате, так и в воде водохранилища с тем, чтобы истинная картина процесса коррозии не ускользала от исследователя.

Для проверки сделанных предположений был поставлен эксперимент, цель которого - моделирование процессов, протекающих в воде водохранилища в процессе её фильтрации по бетону [6]. Результаты эксперимента полностью подтвердили особенности протекающих коррозионных процессов.

Таким образом, предлагаемая модель коррозионного процесса в бетоне под воздействием мягких вод учитывает влияние присутствующих в цементном камне легкорастворимых оксидов натрия и калия и описывает состояние процесса в зависимости от фильтрационных расходов, которые, в свою очередь, определяют концентрацию растворимых соединений в фильтрате. Указанные подходы позволяют дать объяснение такому явлению, как понижение концентрации ионов кальция в фильтрате по сравнению с водой водохранилища, т.е. источником для образования кальцита в определённых условиях может служить не только цементный камень, но и распадающийся бикарбонат кальция из воды водохранилища.

В результате проведенных исследований стало ясно, что опасения потери водонепроницаемости напорного фронта в результате выщелачивания бетона оказались напрасными, т.к. поставщиком кальцита в значительной мере была вода водохранилища. При этом отложения кальцита происходят не только на стенках смотровых галерей, но и непосредственно в фильтрующей трещине. Это неизбежно сказалось на динамике фильтрационных расходов, многие из которых к настоящему времени резко понизились.

ISSN 1313-2539, Published at: http://www.science-journals.eu

5.СОСТОЯНИЕ НАПОРНОГО ФРОНТА В МЕСТАХ ПОВЫШЕННОЙ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Практически не изученный вопрос влияния сосредоточенной фильтрации на омываемую бетонную поверхность впервые был подробно рассмотрен на примере горизонтальной фильтрующей трещины в напорном столбе Усть – Илимской плотины (секция 30, отм. 235). Как показало разведочное бурение, указанная трещина прошла в непосредственной близости от горизонтального строительного шва (рисунок 6).

Фильтрационные расходы по рассматриваемой трещине длиной около 22 м отличались ярко выраженной сезонностью с пиковыми нагрузками в январе – марте до 300 ÷ 400 л/мин.

Полученные образцы-керны были подвергнуты испытаниям на водопоглощение и прочность, кроме того, был проведён химический анализ цементного камня по мере удаления от трещины.

Результаты сопоставления величины λ_2 , характеризующей сравнительный диаметр капиллярных пор, и максимального водопоглощения по объёму позволяет оценить последствия фильтрации в течение 30 лет на состояние контактной бетонной поверхности, которое проявляется в виде увеличения размеров капиллярных пор и их относительного объёма.

Указанное влияние убывает по мере удаления от трещины в глубину массива и, учитывая статистический разброс, становится незначимым на расстоянии около 16 см.

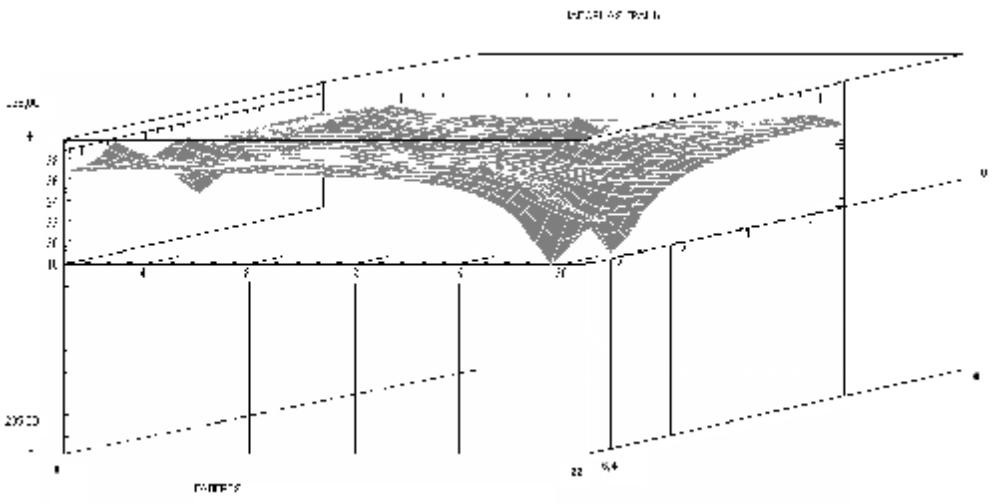


Рис. 6. Пространственное изображение трещины секции 30 в отметках 236,80 ÷237,93

Химический состав цементного камня контактного бетона в сопоставлении с бетоном массива показывает, что количество свободной CaO уменьшилось от 5,8 % до 1,1 %, т.е. примерно в 5 раз, Na_2O – от 1,35 % до 0,6 %, в 2 раза.

Полученная величина выноса CaO за 30 лет «работы» трещины составила около 100 кг , Na_2O - около 30 кг, что соответствует уменьшению содержания CaO и Na_2O в активной (±5 см) зоне на 46 ÷ 56 %.

Последствия выноса CaO и Na_2O отразились на развитии капиллярной пористости бетона в части их размера и относительного объёма. Такое увеличение составило около 30 %, что можно перенести на 30 % площади фильтрующей трещины.

В первую очередь поддаваться размыву будут ослабленные (менее плотные и прочные) участки бетона, соответствующие 30 % минимальному «хвосту» кривой нормального распределения прочности. Тогда для Усть–Илимской плотины достаточно стойким к размыву будет бетон с прочностью $R_{призм.} > 20$ МПа.

Указанный критерий, сформулированный в виде требований к бетону напорного столба (для генеральной совокупности): $R^{куб}_{min(p=0,95)} \geq 25$ МПа, является той величиной, на которую может быть ориентирована технология и контроль качества бетона.

Таким образом, в отличие от слабофильтрующих сильнофильтрующие трещины в напорном фронте плотин со временем приводят к размыву, который в первую очередь затрагивает наименее стойкие участки бетонной поверхности.

На основании проведенных исследований можно рекомендовать ремонт напорного фронта при сосредоточенной фильтрации более 12 л/мин (на 1 м длины трещины) при раскрытии трещин более 2 ÷ 3 мм. В частности, такая трещина на Усть-Илимской плотине была подвергнута герметизации полимерными составами в 2006 г.

6. СТОЙКОСТЬ МОРОЗОСТОЙКИХ ЗОН

Как уже отмечалось, особенностью морозостойкого бетона северных плотин является использование бездобавочного портландцемента по специальным техническим условиям и его повышенные расходы, обеспечивающие В/Ц фактор в проектных составах в пределах 0,4 ÷ 0,5.

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

Морозостойкая зона, в частности Братской плотины, представлена монолитным бетоном с расходом цемента 280 кг/ м^3 при среднем водосодержании бетонной смеси 145 ÷150 л/м^3.

При определении капиллярной пористости необходимо назначить α - количество химически связанной воды. По нашим данным, для использованного портландцемента $\alpha \approx 15$ % , тогда среднюю величину капиллярной пористости [4]:

$$П_{кап} = \frac{В - 2\alpha Ц}{1000} \cdot 100 = \frac{147 - 2 \cdot 0{,}15 \cdot 280}{1000} \cdot 100 \approx 6\% \qquad \textbf{(2)}$$

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

Для морозостойкого бетона нижнего бьефа указанные колебания пористости сохраняются.

Сопоставление картин распределения величин капиллярной пористости морозостойкого и подводного бетона напорного столба (рисунок 7) 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 этим, на наш взгляд, обстоятельством объясняется наличие на поверхности бетона морозостойкой зоны в Н.Б. плотин отдельных участков с признаками разрушения.

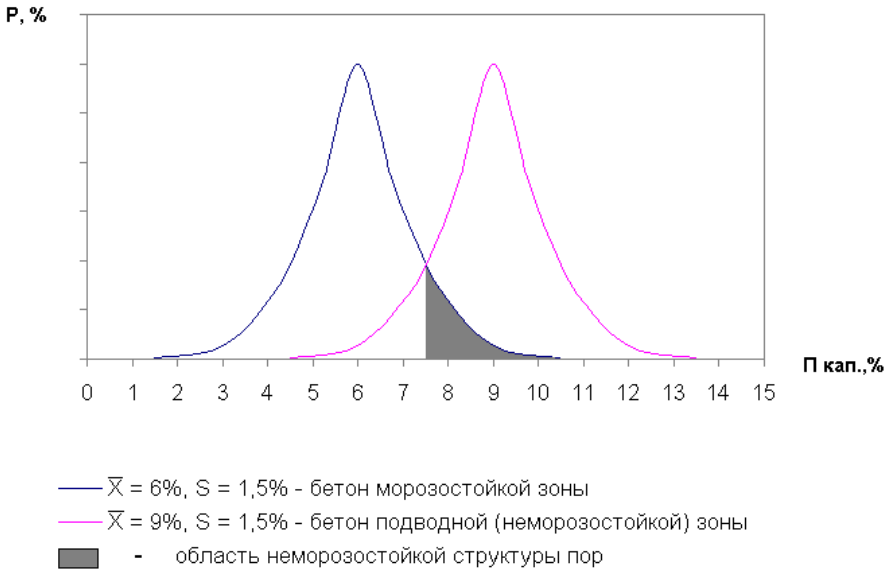


Рис. 7. Распределение величины капиллярной пористости

Таким образом, следует признать, что для условий эксплуатации нижнего бьефа 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 основных производственных факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты комплексных исследований состояния бетонного тела ангарских и других плотин после 40 ÷ 50 лет их эксплуатации в условиях Севера России.

Анализ результатов исследований дает основание для следующих общих выводов:

1) Непосредственное влияние окружающей водной и воздушной среды в процессе эксплуатации проявляется с поверхности тела плотин на различную глубину в зависимости от

сочетаний факторов внешней среды. На контакте с воздушной средой формируется отличная от массива система капиллярных пор, на контакте с водной средой растворяются компоненты цементного камня, что, в конечном счете, также приводит к изменению прочности и структуры пор бетона.

Совместное воздействие водной и воздушной среды в нижнем и верхнем бьефах плотин является источником проявления сложных процессов в бетоне, сочетающих водонасыщение с замораживанием. В некоторых случаях, в частности в нижнем бьефе, имеет место разрушение бетона на отдельных участках конструкций в числе прочих факторов из-за достаточно высокой вероятности (~15%) использования неморозостойкой структуры капиллярной пористости.

2) Бетон массива плотины, будучи лишен влагообмена с окружающей средой, находится в наиболее благоприятных условиях стабильной температуры и влажности. Рост прочности бетона всех северных плотин может быть описан общим логарифмическим уравнением регрессии, в соответствии с которым рост прочности после 180 суток резко замедляется. Дисперсионный анализ статистических рядов прочности бетона позволил выявить влияние основных производственных факторов на нестабильность прочности:

- переменной активности цемента;

- технологической составляющая или изменчивость Ц/В фактора заводского бетона;

-температурного фактора характеризующего особые температурные условия существования бетона в северных плотинах.

Сравнительный петрографический анализ прозрачных шлифов современного бетона ангарских плотин и 100 летнего бетона выявил общие процессы срастания цементного камня с заполнителем, что дает надежду на столетнее существование бетона плотин (исключая поверхностные зоны) без каких либо опасений за его будущее.

3) Анализ динамики фильтрационных расходов позволил разделить фильтрующие трещины по характеру процесса на две основные группы: с затухающими расходами и с дрейфующими расходами. Самозалечивание трещин с затухающими расходами объясняется отложением по путям фильтрации кальцита, источником которого является вода водохранилища. Обязательным условием самозалечивания трещин является ограничение по величине фильтрационных расходов (до 0,15 л/мин) на 1 м трещины или на 1 дрену. «Дышащие» трещины с дрейфующими расходами наиболее опасны, т.к. пиковые расходы могут составлять более 100 л/мин. В районе сильнофильтрующих трещин происходит размыв бетонной поверхности. В некоторых случаях такие трещины нуждаются в срочном ремонте. В качестве критерия стойкости бетона напорной грани предлагается нормирование прочности и, как следствие, плотности $R^{куб}_{min(p=0,95)} \geq 25$ МПа.

Кроме перечисленных факторов, полученные выводы и рекомендуемые критерии могут быть использованы при выборе технологии возведения плотин, гарантирующих стойкость в условиях Севера.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Садович, М.А., Шляхтина, Т.Ф. и Соловьева, З.И.(1999) Особенности коррозионных процессов, протекающих в бетоне напорного фронта плотины братской ГЭС. Материалы международной конференции 25-27 мая 1999 г. Москва “Долговечность и защита конструкций от коррозии”, с. 264-271.

2. Sadovich, M., Shlyakhtina T. (2003) Strength of concrete in different operational media.- Concrete solutions 1st International Conference on Concrete Repair,ST-Malo, France 15-17 July 2003, pp.6.

3. Бруссер, М.И. (1983) Разработка и внедрение статистических методов контроля прочности бетона / М.И. Бруссер // IX всесоюзная конференция по бетону и железобетону: сб.науч.тр./НИИЖБ. – М.: НИИЖБ, с.130-133.

4. Горчаков, Г.И., Капкин, М.М. и Скрамтаев, Б.Г. (1965) Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений/ Г.И. Горчаков, – М.: Стройиздат, 196 с.

5. Sadovich, M.A. and Sokolovskaya, A.A. (2002) Corrosion processes in concrete of the dams on the river Angara. Proceedings of the International Seminar held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5-6 September 2002. "Repair, Rejuvenation and Enhancement of Concrete", pp 55-64.

6. Курицына, А.М., Бронникова, О. Г. (2008) Проверка гипотезы о преимущественном выносе из бетона натриевых и калиевых соединений при осаждении кальциевых в условиях слабой фильтрации воды через бетон. Труды Братского государственного университета: Серия Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири – В 2т. - Т. 2. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», с. 206-209.