

ХАРАКТЕРНЫЕ ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА В ЗОНЕ ПЕРЕМЕННОГО УРОВНЯ ВОДЫ

МАЛЮК В. В., МАЛЮК В. Д., ЛЕОНОВИЧ С. Н.

Разрушение бетона при морозном воздействии, как правило, обусловлено многими факторами, поэтому проявляется в различных формах. В данной работе предполагалось установить характер разрушения и возможные причины разрушения бетонных конструкций портовых сооружений в зоне переменного уровня воды. Основная причина разрушения бетона – это несоответствие свойств бетона условиям эксплуатации. Несоответствие, в основном, может быть обусловлено двумя причинами. Во-первых, недостаточной изученностью реальных условий эксплуатации бетона и назначением заниженных требований к качественным показателям бетона, обеспечивающих стойкость в условиях морозного воздействия и, во-вторых, фактические качественные показатели бетона не соответствуют нормативным требованиям. Однако нельзя исключать тот факт, что установленные нормативные показатели и методы оценки условий эксплуатации адекватно отражают реальные условия эксплуатации.

Одной из задач данной работ является установление фактов разрушения бетона, характера и возможных причин этих разрушений для понимания долговечности бетонных конструкций. Эта информация необходима как для разработки методов совершенствования технологии бетонных работ, так и понимания механизма деградации для разработки алгоритма расчета-прогноза долговечности бетона в условиях морозного воздействия.

Виды разрушений бетона в зоне переменного уровня воды.

При исследовании морозного воздействия на бетон выделяют два вида повреждений – объемное (далее – P_B) и поверхностное (далее – P_{II}) [1, 2]. Объемное (или внутреннее) разрушение характеризуется разрушением структуры всего объема элемента конструкции (рис. 1, а). Второй вид разрушений (P_{II}) – поверхностное, характеризуется нарушением структуры только поверхностного слоя об-

разца или растворной части в поверхностном слое бетона в конструкции (рис. 1, б). Такое разрушение, характерно для бетонов, в структуре которых создана система условно-замкнутых пор [2].



Рисунок 1. Виды разрушения бетона в тетраподах после 45 лет эксплуатации: а – объемное разрушение; б – поверхностное разрушение в виде шелушения

Таблица 1

Виды разрушений бетона в зоне переменного уровня портовых сооружений и возможные причин их возникновения

Вид разрушения	Характер разрушения	Возможные причины разрушения
$R_{\text{П}}$	Поверхностное разрушение до обнажения крупного заполнителя	Применение загрязненного щебня или щебня, имеющего высокое водопоглощение, механическое воздействие волн и льда. Водонасыщение поверхностного слоя бетона до критической степени в процессе эксплуатации, дополненное механическим воздействием волн и льда.
$R_{\text{В}}$	Объемное прогрессирующее разрушение	Структурная неоднородность бетона из-за нестабильности технологических режимов: нарушения режимов уплотнения, применение бетонных смесей способных к расслоению при уплотнении.

Окончание таблицы 1

Вид разрушения	Характер разрушения	Возможные причины разрушения
R_{C1}	Отслоение поверхностного слоя из-за разрушения внутреннего подстилающего слоя бетона на участках обледенения (постепенный отказ)	Неоднородность бетона в конструкциях из-за расслоения бетонной смеси при использовании высокоподвижных смесей. Водонасыщение внутренних слоев бетона до критической степени в процессе эксплуатации при высоких качественных показателях бетона в поверхностном слое.
R_{C2}	Глобальное или локальное поверхностное разрушение бетона на участках обледенения конструкций с отслоением поверхностного слоя из-за разрушения внутреннего слоя (внезапный отказ)	Недостаточное время для вызревания структуры бетона при первом длительном цикле замораживания. При первом замораживании бетона на границе замерзания происходит насыщение пор до критической степени за счет миграции влаги из внутренних слоев бетона.
R_T	Растрескивание бетона с последующим разрушением на куски	Нарушение режима твердения бетона.

Анализ повреждений бетона в конструкциях зоны переменного уровня показал, что можно выделить ряд характерных видов разрушений бетона в конструкциях, которые не моделируются в процессе стандартных испытаний на морозостойкость. Например, при стандартных испытаниях на морозостойкость не наблюдается разрушений в виде отслаивания поверхностного слоя (далее – вид разрушения R_C).



Рисунок 2. Вид разрушения P_C – отслоение поверхностной части бетона с последующим объемным разрушением внутренних слоев бетона:
a – конструкция (тетрапод) после 40 лет эксплуатации на объекте X2-1;
б – конструкция (гексабит) после первого зимнего сезона на объекте K3-1;
в – конструкция причальной стенки после первого зимнего сезона на объекте K3-2

Вид разрушений P_C наблюдается в конструкциях после первого зимнего сезона (рис. 2, *б*, *в*) и в конструкциях с длительным сроком эксплуатации (рис. 2, *a*) на участках В и С зоны переменного уровня, подверженных волновому воздействию выше зоны прилива, т. е. на участках обледенения, где отсутствует ЦЗО.

В результате обследования сооружений отмечен вид разрушения, который связан с нарушением технологических режимов твердения бетона в конструкциях и проявляется в процессе эксплуатации. Данный вид разрушений обозначен как P_T и принят в

исследованиях в качестве одного из показателей, характеризующих уровень организации технологического процесса изготовления конструкций. При эксплуатации конструкций с повреждениями вида P_T наблюдается трещинообразование с раскрытием до 5 мм. Конструкции с такими повреждениями в зоне прибоя разрушаются от воздействия волн на фрагменты. Такой вид разрушений характерен, например, для тетраподов в берегоукрепительных сооружениях (рис. 3).



Рисунок 3. Вид разрушения P_T у тетраподов на объекте X2-1:
a – раскрытие трещин в бетоне; *б* – последующее разрушение на отдельные фрагменты от воздействия прибойной волны

К разрушениям вида P_T можно отнести трещинообразование в местах установки закладных элементов или разрушения защитного слоя в армированных конструкциях (рис. 4).

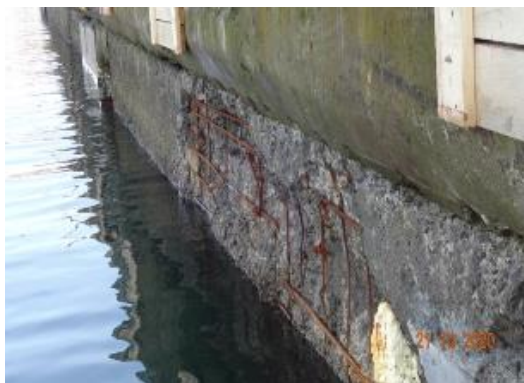
Причины разрушений бетона в зоне переменного уровня воды.

Как уже отмечалось, разрушение бетона в процессе эксплуатации сооружений может происходить, как правило, по двум причинам: – недостаточная изученность реальных условий эксплуатации бетона и назначение заниженных требований к качественным показателям бетона;

– качественные показатели бетона в конструкции не соответствуют нормативным требованиям.



а)



б)

Рисунок 4. Вид разрушения R_T : *а* – трещинообразование в бетоне в местах установки монтажных петель; *б* – разрушение элементов вследствие несоблюдения толщины защитного слоя для арматуры

Есть все основания считать, что четыре выделенные вида повреждений бетона – R_B , R_{II} , R_C , R_T , обусловлены технологическими причинами, поскольку в одном сооружении можно наблюдать конструкции по внешнему виду, соответствующие нормативному состоянию, и конструкции с повреждениями, свидетельствующие о деградации бетона от морозного воздействия. Установлено, что разрушения могут иметь как локальный, так и глобальный характер. Проведенные обследования дают основание считать, что по виду разрушений можно установить возможные причины разрушений, а

по характеру разрушения оценить значимость влияния технологических режимов на долговечность конструкций в зоне переменного уровня воды.

Вид разрушения R_B , который проявляется в виде объемного разрушения бетона (рис. 1), связан с особенностью структуры бетона, в котором отсутствуют условно-замкнутые поры, образованные за счет искусственного вовлечения воздуха. Одна из причин повышения морозостойкости бетона с воздухововлекающими ПАВ – это создание на границе цементный камень-заполнитель пузырьков вовлеченного воздуха, которые согласно теории Гриффитса способствуют релаксации напряжений от процессов льдообразования в структуре цементного камня и прерывают развитие микротрещин [3]. Это позволяет снизить вероятность прорастания микротрещин в магистральные. За счет этого при ЦЗО в бетонах с воздухововлекающими добавками ПАВ происходят локальные поверхностные разрушения. В бетонах без добавок, т. е. в традиционных бетонах, этот эффект отсутствует. Исходя из структурной теории бетона, обеспечить долговечность обычного бетона можно за счет создания к началу морозного воздействия в структуре цементного камня изолированной (дискретной) системы капиллярных пор [1, 4, 5]. Общеизвестно [1], формирование структуры с изолированной системой капиллярных пор зависит от вида цемента, величины водоцементного отношения и режима твердения бетона. Исходя из того, что для бетона применяется постоянный вид цемента, разрушения вида R_B обусловлены следующими причинами:

- нестабильностью В/Ц;
- ненадлежащим режимом твердения бетона;
- отсутствие контроля за воздухововлечением в бетонной смеси.

Параметры режима твердения: влажность, температура, продолжительность, являются критическими для процесса формирования в структуре цементного камня дискретной системы капиллярных пор. Результаты исследований показывают, что вид разрушения R_B наблюдается в сооружениях, изготовленных с применением классического бетона и современного. Разрушения бетона в сооружениях ранней постройки – (до 1970 г), носят как локальный, так и глобальный характер. Например, для сооружения К1 в зоне действия отлива и прилива разрушения вида R_B носят локальный характер с глубиной разрушения бетона до 300 мм (рис. 5).



а)



б)

Рисунок 5. Общий вид отдельных участков причальной стенки сооружения К1 (срок эксплуатации 80 лет): а – конструкции с поверхностным разрушением вида $R_{П}$; б – конструкции с локальными разрушениями вида $R_{В}$ на глубину 300 мм

Как видно, конструкции из традиционного бетона могут иметь разрушения вида $R_{П}$ и $R_{В}$. Следовательно, вид разрушения определяется способностью бетона сопротивляться внешним воздействиям.

Вид разрушения бетона $R_{П}$ наблюдается в конструкциях, изготовленных из классического бетона (рис. 5, а), и в конструкциях из бетона с воздухововлекающими ПАВ (рис. 1, б). Считают, что разрушения вида $R_{П}$ характерно для бетонов с воздухововлекающими ПАВ [3, 5]. Однако в реальных условиях конструкции из бетонов с воздухововлекающими ПАВ после длительного срока эксплуатации могут не иметь признаков поверхностных разрушений (рис. 6). Следует отметить, что в зоне действия прилива и отлива процессы деградации в поверхностном слое могут быть интенсифицированы воздействием льдов, которые могут появляться в акватории портов в результате нагонов. Поскольку лед не имеет устойчивого ледяного поля, при волнении возникает механическое воздействие льда на бетон кон-

струкции, т. е. происходит истирание поверхности бетона льдом. Результаты исследований показывают, что бетон в конструкциях способен противостоять этому воздействию в течение длительного периода (рис. 6). Поэтому причины разрушений вида РП следует связывать со свойствами бетона. Есть все основания полагать, что механическое воздействие льда приводит лишь к удалению слоя бетона, который находится на стадии деградации.



Рисунок 6. Состояние бетона в тетраподах оградительного сооружения X2-1 после 50 лет эксплуатации

Установлены случаи «точечного» поверхностного разрушения бетона после первого зимнего сезона (рис. 7). Наиболее вероятная причина такого повреждения- применение для бетона загрязненного крупного заполнителя.



Рисунок 7. Точечное поверхностное разрушение бетона после первого зимнего сезона на объекте K3-2

Разрушение бетона вида R_C наблюдается в конструкциях в основном после первого зимнего сезона. Этот вид разрушений не привлекал к себе внимание, поскольку он не связан с ЦЗО. Разрушение происходит после первого зимнего сезона, когда бетон подвергается лишь одному длительному циклу замораживания (рис. 2). При этом бетон находится на участках зоны переменного уровня, которые расположены выше зоны действия отлива и прилива, т. е. на участках, где отсутствует насыщение бетона от прямого контакта с водой. Анализ возможных причин показывает, что данный вид разрушения обусловлен многими факторами. Глобальный характер разрушений бетона вида R_C и большие материальные затраты на ликвидацию повреждений для приведения сооружения в рабочее состояние предопределяет необходимость в глубоком изучении этого вида разрушений. Аналогичный вид разрушений отмечен и на тетраподах в сооружениях ранней постройки (рис. 2, а).

Разрушение бетона вида R_T наблюдается в фасонных массивах (тетраподах), которые используются для строительства оградительных и берегоукрепительных сооружениях портов. На объекте X2-1 применяли тетраподы марки T5 массой пять тонн, которые изготавливали с применением тепловой обработки методом пропаривания. С одной стороны, это дает основание полагать, что причина трещинообразования связана с неконтролируемым температурным режимом пропаривания. Опыт показывает, что несоблюдение темпа подъема и снижения температуры и максимальной температуры при пропаривании приводят к трещинообразованию в виде волосяных трещин, которые раскрываются при морозных воздействиях. Однако, с другой стороны, эти дефекты проявляются на тетраподах массой 20 т в условиях естественного твердения при температуре воздуха в пределах плюс 20...25 °С (рис. 8). Следовательно, температурный режим бетона должен контролироваться при изготовлении сборных конструкций независимо от условия твердения. Последствия неконтролируемой технологии приводит к разрушениям вида R_T . Эти разрушения наблюдаются в сооружениях на всех участках зоны переменного уровня воды (рис. 3).

Таблица 2

Морские гидротехнические сооружения, построенные на о. Сахалин
за период 1925–2018 гг.

Шифр объекта	Тип сооружения и конструктивное решение	Год и район строительства
К1	Причалные сооружения (пирс) из массивов-гигантов	1927–1940, г. Корсаков
Х2-1	Берегоукрепительные сооружения морской железнодорожной переправы Ванино-Холмск из тетраподов массой 5 т	1970–1973, г. Холмск
Х2-2	Причалные сооружения базы флота «Сахалинрыбпрома» из монолитного бетона, сооружение возводилось «насухо»	1971–1973, г. Холмск
К2	Берегоукрепительные сооружения территории нефтебазы	1993–1995, г. Корсаков
К3-1	Берегоукрепительные сооружения вспомогательного пирса завода СПГ из гексабитов массой 5 т.	2002–2004, п. Пригородное, Корсаковский район
К3-2	База аварийно-спасательная завода СПГ, волноотбойная стенка из массивных блоков. Волноотбойная стенка из сборных железобетонных блоков массой 40 т и гексабитов массой 5 т	2004–2006, п. Пригородное, Корсаковский район
У3	Причалные сооружения (реконструкция), верхнее строение из монолитного бетона	2008–2009, г. Углегорск
Н3	Набережная, верхнее строение из монолитного бетона	2007–2008, г. Невельск
К3-3	Причалные и оградительные сооружения, верхнее строение из монолитного бетона	2016–2018, г. Корсаков
Х3-3	Оградительное сооружение из тетраподов массой 20 т	2016–2017, г. Холмск.



Рисунок 8. Вид разрушения P_T у тетраподов Т-20 на объекте ХЗ-3: раскрытие трещин в бетоне и последующая фрагментация

В соответствии с программой исследований выполнено визуальное обследование бетона в зоне переменного уровня 10 портовых сооружений. Деление зоны переменного уровня на участки по условиям внешних воздействий и классификация разрушений по видам позволили в результате визуального обследования сооружений определить участки конструкций с преобладающими видами разрушений в сооружениях (таблица 3). В трех сооружениях проводилось детальное обследование бетона для определения основных качественных показателей бетона в различных участках зоны переменного уровня.

Таблица 3

Вид и характер разрушений бетона в зоне переменного уровня портовых сооружений на о. Сахалин

Шифр сооружения	Вид и характер разрушений бетона на различных участках зоны переменного уровня воды		
	Участок А	Участок В	Участок С
К1	P_{II} (Л) P_V (Л)	Механические повреждения	Механические повреждения
Х2-1	P_{II} (Л)	P_V (Л) P_{II} (Л) P_{C2} (Л) P_T (Л)	P_V (Л) P_{II} (Л) P_{C2} (Л) P_T (Л)

Шифр сооружения	Вид и характер разрушений бетона на различных участках зоны переменного уровня воды		
	Участок А	Участок В	Участок С
X2-2	Разрушения отсутствуют	Разрушения отсутствуют	Разрушения отсутствуют
K2	R_{C2} (Л)	R_B (Л) R_{II} (Л) R_{C2} (Л)	R_B (Л) R_{II} (Л) R_{C2} (Л)
K3-1	Разрушения отсутствуют	R_{C1} (Л)	R_{C1} (Л)
K3-2	Разрушения отсутствуют	Разрушения отсутствуют	Разрушения отсутствуют
У3	Разрушения отсутствуют	R_{C1} (Г)	R_{C1} (Г)
Н3	–	Разрушения отсутствуют	R_B (Л)
K3-2	–	R_{C1} (Г)	R_{C1} (Г)
K3-3	Разрушения отсутствуют	Разрушения отсутствуют	Разрушения отсутствуют
X3-3	Разрушения отсутствуют	R_{II} (Л)	R_{II} (Л)

Примечание: Л – локальный, Г – глобальный.

Список использованных источников:

1. Кунцевич О. В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. – Л.: Стройиздат. Ленинградское отделение, 1983. – 132 с.
2. Fagerlund, G. (1995). Freeze-thaw resistance of concrete: destruction mechanisms, concrete technology, test methods, quality control: a contribution to the BRITE/EURAM project BREU-CT92-0591 "The Residual Service Life of Concrete Structures". (Report TVBM; Vol. 3060). Division of Building Materials, LTH, Lund University.
3. Добролюбов, Г. Прогнозирование долговечности бетона с добавками: монография / Г. Добролюбов, В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг. – Москва: Стройиздат, 1983. – 212 с. – Текст: непосредственный.
4. Горчаков Г. И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений [Текст]

/ Г. И. Горчаков, М. М. Капкин, Б. Г. Скрамтаев. – Москва: Стройиздат, 1965. – 195 с.

5. А. Е. Шейкин, Л. М. Добшиц. Цементные бетоны высокой морозостойкости. Л., 1989.

6. С. Н. Леонович 2001. Алгоритмы расчета долговечности железобетонных конструкций при хлоридной агрессии. Сб. тр. VII Межд. научно-методического семинара/ под ред. Блещика Н. П., Борисевича А. А., Пецолюда Т. М. – Брест, БГТУ, 2001.

7. С. Н. Леонович 2001. Вероятностная оценка коррозии арматуры в существующих железобетонных конструкциях при хлоридной агрессии. Сб. тр. VII Межд. научно-методического семинара/ под ред. Блещика Н. П., Борисевича А. А., Пецолюда Т. М. – Брест, 2001.

8. С. Н. Леонович, А. В. Прасол 2013. Железобетон в условиях хлоридной коррозии: деформирование и разрушение. Строительные материалы с.94 – 95.

9. Е. Е. Шалый, С. Н. Леонович, Л. В. Ким, В. Е. Румянцева, Н. А. Будревич 2018. Совместное действие карбонизации и хлоридной агрессии на конструкционный бетон: вероятностная модель. Вестник гражданских инженеров с. 123 – 131.

10. Е. Е. Шалый, Л. В. Ким, С. Н. Леонович 2018. Железобетон при воздействии карбонизации и хлоридной агрессии: вероятностная модель расчета-прогноза срока службы. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова с.5 – 14.

11. Е. Е. Шалый, С. Н. Леонович, Л. В. Ким 2019. Деградация железобетонных конструкций морских сооружений от совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии. Строительные материалы с.67.

12. С. Н. Леонович, Е. Е. Шалый, Л. В. Ким 2019. Железобетон при воздействии карбонизации и хлоридной агрессии: вероятностная модель расчета-прогноза срока службы. Наука и техника с.284 – 291.