

## АНАЛИЗ СРОКА СЛУЖБЫ СОВРЕМЕННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ

Рапопорт П. Б.<sup>1</sup>, Рапопорт Н. В., Полянский В. Г.<sup>1</sup>, Соколова Е. Р.<sup>1</sup>,  
Гарибов Р. Б.<sup>2</sup>, Кочетков А. В.<sup>3</sup>, Янковский Л. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «Научно-исследовательский центр технического регулирования», Саратов, Россия (410501, Саратовская область, Саратовский район, р.п. Соколовый, ул. Лесная, 7),  
e-mail: soni.81@mail.ru;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Министерство образования и науки Российской Федерации, Пенза, Россия (440028, г. Пенза, ул. Титова, 28); e-mail: volgapsb@mail.ru

<sup>3</sup>ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Министерство образования и науки Российской Федерации, Пермь, Россия, (614990, г. Пермь, Комсомольский просп., д. 29), e-mail: yanekperm@yandex.ru.

---

На основе анализа срока службы современных цементных бетонов определяется наличие общей причины снижения долговечности цементных бетонов за последние 40 лет. Необходимо перейти к проектированию и использованию бетонов «комплексных» марок, которые должны учитывать помимо условий эксплуатации и заданную долговечность конструкции или сооружения, в составе которой предполагается использование проектируемого бетона. Оказалось, что в настоящее время скорость разрушения бетонных сооружений выше, чем в прошлом. Причём в числе этих бетонов как естественного твердения (монолитные), так и пропаренные (конструкций заводского изготовления). В технической литературе всё чаще фиксируются случаи отсутствия прироста прочности бетона во времени, иногда и в условиях благоприятных для твердения бетона и при отсутствии агрессивных сред.

---

Ключевые слова: цементобетон, качество, статистический контроль.

## THE ANALYSIS OF SERVICE LIFE OF MODERN CEMENT CONCRETE

Rapoport P. B.<sup>1</sup>, Rapoport N. V.<sup>1</sup>, Polyanskii V. G.<sup>1</sup>, Sokolova E. R.<sup>1</sup>, Garibov R. B.<sup>2</sup>,  
Kochetkov A. V.<sup>3</sup>, Jankovskij L. V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Open Company «Research center of technical regulation», Russia 410501, the Saratov region, the Saratov area, the river of the item of Sokolovuj, street Wood, 7), e-mail: soni.81@mail.ru;

<sup>2</sup>Penza state university of architecture and building, Penza Russia (440028, Penza, Titov's street, 28), e-mail: volgapsb@mail.ru;

<sup>3</sup>Perm national research polytechnical university, Perm, Russia (614990, Perm, Komsomol avenue, 29), e-mail: yanekperm@yandex.ru.

---

On the basis of the analysis of service life of modern concrete presence of the general reason of decrease in durability of concrete for last 40 years is defined. It is necessary to pass to designing and use of concrete of "complex" marks which should consider besides service conditions and the set durability of a design or a construction in which structure use of projected concrete is supposed. It has appeared that now speed of destruction of concrete constructions above, than in the past. And among these concrete as natural твердения (monolithic) and пропаренные (designs of factory manufacturing). In the technical literature cases of absence of a gain of durability of concrete in time, sometimes and in the conditions of favorable for твердения concrete and in the absence of excited environments are even more often fixed.

---

Keywords: concrete, quality, statistical control.

### Введение

В технической литературе достаточно широко представлены многочисленные случаи преждевременного разрушения по различным причинам бетонов различных сооружений, как правило, построенных в течение последних 30–40 лет. В настоящее время скорость разрушения бетонных сооружений выше, чем в прошлом [1]. Причём в числе этих бетонов как

естественного твердения (монолитные), так и пропаренные (конструкций заводского изготовления). Многочисленность выше перечисленных фактов заставляет предполагать наличие общей причины снижения долговечности цементных бетонов за последние 40 лет.

### **Цель исследования**

Представляют определённый интерес данные по изменению во времени свойств бетонов, полученные исследователями в различных странах [1, 2, 5-7]. Так, опубликованы обобщённые результаты определения прочности бетонов, приготовленных в различные периоды. Опытами, проведенными американскими учёными в 1910-1930 годы, установлено, что в течение 20 лет прочность бетонов увеличивается в 2,5–3 раза. Анализ данных, представленных в таблице 1, показывает, что прирост прочности бетона во времени становится проблематичным. Первыми (30-е годы прошлого столетия) исследованиями было установлено, что прочность увеличивается вдвое за первые 5 лет, и прирост наблюдается в течении более 20 лет. Последующие исследования (40–50-е годы) показали, что прочность увеличивается в 2 раза за первые 10 лет, и прирост прочности наблюдается в течение первых 15 лет.

Исследованиями, проведенными в 60-х годах, выявлено, что прочность в 2 раза не увеличивается вовсе, и прирост прочности наблюдается в течение примерно 10 лет.

Современные исследования, проведенные в различных странах, в том числе и в России, показали, что некоторые виды бетона (например – пропаренные) дают прирост прочности только в течение 1 года. У остальных бетонов наблюдается прирост прочности только в течение первых пяти лет. Всё чаще фиксируются случаи снижения прочностей бетонов во времени [5]. Установлено, что условия твердения действительно влияют на кинетику роста прочности во времени. При сухих условиях хранения, по данным О. Графа, прирост прочности наблюдается только в первый год, в последующем возможен спад прочности. Уизей установил, что после 3 месяцев сухого хранения прирост прочности бетона прекращается. Зависимость долговременной прочности бетона от условий твердения явилось одной из причин, по которой С. В. Шестопёров предложил ввести понятие комплексной марки бетона [4]. Весьма интересные данные получены при изучении изменения прочности на растяжение. Для выяснения причин изменения кинетики роста прочности бетона во времени рассмотрен ряд других показателей.

### **Материал и методы исследования**

По данным, полученным И. М. Френкелем [3], «цементы с тонким помолом дают более быстрое нарастание прочности в первые дни твердения, чем размолотые более грубо». С. В. Шестопёров [4] считал, что бетоны на домолотых цементах отличаются пониженной морозостойкостью, и предлагал, в связи с этим ввести нормирование гранулометрического состава цемента. Ранее (в 30-е годы прошлого столетия) отмечалось, что в бетоне после 15 лет твердения на воздухе содержится до 40 % негидратированных реликтов. В бетонах того же состава и возраста, но твердевшего во влажной среде, количество реликтов составляет 25 %. В более поздних исследованиях (в 50-е годы) было установлено, что после 6 месяцев твердения в нормальных условиях в портландцементном камне количество негидратированных зёрен клинкера составляет 40 %, а после полной гидратации – 10–15 % (при этом под микроскопом не обнаруживаются  $C_3S$  и  $C_3A$ ) [5–7].

По-видимому, такое разногласие связано с изменением дисперсности, минералогического состава и активности цементов за этот период. Исследованиями доказано, что наличие реликтов не даёт гарантии дальнейшего упрочнения цементных бетонов, а активность цемента может быть связана с тонкостью помола цемента.

Как известно, минералогический состав цемента предопределяет его поведение при дальнейшем твердении в составе бетона. Так работами Юнга, Бутта, Андерегга, Губеля, Богга, Лерча, Кинда, Некрасова К. Д., Огорокова С. А. и других учёных доказано, что процесс гидратации минералов цементного клинкера во времени протекает не равномерно. К 28 суткам степень гидратации  $C_3S$  составляет 69–87 %,  $C_3A$  – 84–100 %,  $C_4AF$  – 81–95 %, а  $C_2S$  всего 11–28 %. Поэтому можно предполагать, что последующий рост прочности бетона связан с продолжающейся гидратацией  $C_2S$ , а прочность в возрасте 28 суток предопределяется в основном гидратацией  $C_3S$ .

Повсеместно получили широкое применение различные методы интенсификации твердения бетонов. Эти методы нацелены на ускорение твердения бетона в ранних возрастах (тепловая, ТВО, добавки ускорители твердения цемента и т.п.). В многочисленных публикациях, посвящённых изучению свойств пропаренных бетонов, отмечается, что такие бетоны отличаются отсутствием или снижением темпа роста прочности во времени.

Увеличение прочности бетона в раннем возрасте с 1930 годов достигалось:

- повышением активности цемента, преимущественно за счёт повышения тонкости помола в процессе изготовления цемента или последующего доизмельчения;
- увеличением содержания в цементе алита за счёт уменьшения количества белита;
- заменой части негидратированных реликтов в цементном камне инертными материалами (микронаполнителями различного вида);
- интенсификацией твердения цемента в составе бетона (посредством воздействия повышенных температур или использованием добавок ускорителей твердения);
- создание условий твердения, интенсифицирующих процесс твердения, преимущественно алита (химические методы интенсификации).

Реализация большей части перечисленных методов сопровождалась снижением темпов роста прочности бетона в последующих возрастах [5–7]. Причём, чем больше увеличение прочности в раннем возрасте, тем больше снижение темпа роста прочности бетона в последующем. Очевидно, что существует предел прочностей в раннем возрасте, превышение которого приводит к спаду прочности бетона в последующем.

Изменение темпа роста прочности бетона во времени сопровождается, как правило, изменением взаимосвязей прочности с другими свойствами и соответственно изменением морозо-, водо-, атмосферостойкости бетонов, и соответственно долговечности их в составе конструкций и сооружений [5–7]. В 30-е годы прошлого столетия отмечалось, что в бетоне после 15 лет твердения на воздухе содержится до 40 % негидратированных реликтов. В бетонах того же состава и возраста, но твердевшего во влажной среде, количество реликтов составляет 25 %. В более поздних исследованиях (в 50-е годы 20 века) было установлено, что после 6 месяцев твердения в нормальных условиях в портландцементном камне количество

негидратированных зёрен клинкера составляет 40 %, а после полной гидратации – 10-15 % (при этом под микроскопом не обнаруживаются  $C_3S$  и  $C_3A$ ) [5–7].

### Результаты исследования и их обсуждение

В качестве доказательства может быть рассмотрено изменение коэффициента конструктивного качества (ККК) бетона, коэффициента призмной прочности во времени. Установлено, что прочность на растяжение увеличивается только в течение первого года, потом имеет место спад прочности и по истечению 20 лет она составляет 65–70 % прочности на растяжение бетона в 28 суточном возрасте. При этом меняется соотношение между прочностями бетона на растяжение и на сжатие. По мнению Залигера, прочность на растяжение зрелых бетонов составляет от 1/6 до 1/24 прочности этих же бетонов на сжатие. Отсутствие или снижение темпа роста прочности и стойкости современных бетонов в условиях воздействия любых сред, отличных от нормальных, должно учитываться при проектировании бетонов, а также конструкций и сооружений на основе этих бетонов. В таблице 1 представлены процентные соотношения изучаемых характеристик бетона, при изучении влияния добавок на него. Выделены свойства, имеющие отношение к долговечности бетона. Непосредственно долговечность изучалась в 19 % всех исследований за период 1965–2000 гг. Предложено значительное число методов оценки долговечности, некоторые из которых представлены в таблице 2. Появились попытки описания процесса накопления повреждений (таблица 3) [1].

Таблица 1. Процентное соотношение изучаемых характеристик бетона

№ п./п.	Код эффекта	Свойство бетона, меняющееся при внесении добавки	Из общего числа добавок изучено влияние на данный эффект, %
1	X <sub>1</sub>	Прочность на сжатие	59,09
2	X <sub>2</sub>	Расход цемента	53,64
3	X <sub>3</sub>	Подвижность бетонной смеси	52,27
4	X <sub>4</sub>	Морозостойкость бетона	47,73
5	X <sub>5</sub>	Сроки схватывания цемента	45,0
6	X <sub>6</sub>	Жизнеспособность бетонной смеси	44,09
7	X <sub>7</sub>	Водопотребность бетонной смеси	43,64
8	X <sub>8</sub>	Водонепроницаемость	37,27
9	X <sub>9</sub>	Воздухововлечение	30,0
10	X <sub>10</sub>	стойкость бетона к действию агрессивных сред	26,36
11	X <sub>11</sub>	Время тепловлажностной обработки	19,09
12	X <sub>12</sub>	Долговечность бетона	19,0
13	X <sub>13</sub>	Расслаиваемость бетонной смеси	18,64
14	X <sub>14</sub>	Плотность бетонной смеси	16,36
15	X <sub>15</sub>	защитная способность бетона по отношению к арматуре	11,82
16	X <sub>16</sub>	Статический модуль упругости бетона	8,64
17	X <sub>17</sub>	Прочность бетона на растяжение	7,27
18	X <sub>18</sub>	Ползучесть бетона	6,82
19	X <sub>19</sub>	стойкость бетона при действии повышенных температур	5,45
20	X <sub>20</sub>	Водопоглощение бетона	5,45
21	X <sub>21</sub>	Капиллярное всасывание бетона	4,55
22	X <sub>22</sub>	Усадка бетона	4,09

№ п./п.	Код эффекта	Свойство бетона, меняющееся при внесении добавки	Из общего числа добавок изучено влияние на данный эффект, %
23	X <sub>23</sub>	Сцепление арматуры с бетоном	2,73
24	X <sub>24</sub>	Призменная прочность бетона	2,27
25	X <sub>25</sub>	Время помола цемента	1,82
26	X <sub>26</sub>	Время уплотнения бетонной смеси	1,82
27	X <sub>27</sub>	Капиллярная пористость бетона	1,36
28	X <sub>28</sub>	Сроки твердения бетона	1,36
29	X <sub>29</sub>	Динамический модуль упругости бетона	0,91
30	X <sub>30</sub>	Плотность бетона	0,9
31	X <sub>31</sub>	Пластическая усадка цементного теста	0,45
32	X <sub>32</sub>	Трещиностойкость бетона	0,45

Таблица 2. Методы оценки долговечности

Название метода	Суть или специфика метода	Источник, разработчик
Оценка долговечности	По приведенному удлинению образцов	Горчаков Г. И. и др.
Оценка долговечности	По водонасыщению и распределению влаги	Бруссер М. И.
Оценка долговечности	Ключевой структурный параметр	Рыбьев И. А.
Оценка долговечности	Коэффициент гидрофильности	Книгина Г. И.
Долговечность и стойкость	Открытая и замкнутая пористость	Минас А. И.
Стойкость, прогнозирование долговечности	Зависимость от температурно-влажностных деформаций в разных возрастах	Курбанов Т. Ю.
Прогнозирование долговечность	Методика определения проницаемости для ионов хлора	Etude comparative de la durabilite des betons B30 et B80 des ouvrages jumeaux de Bourges. 11. Etude experimentale de la penetration des ions chlorures par differentes methods / Baroghel-Bouny V., Rougeau P., Chaussadent T., Croquette G. // Bull. Lab. Ponts et Chaussees. –1998. -№ 217.- С. 75-84, 106, 110
Прогнозирование долговечность	Процессы карбонизации и усадки	То же
Анализ «жизненных циклов»(LCA) «eco-quantuma» есо-индикаторы, модели TWIN система BEDS	Определение нормируемой долговечности, но не самой долговечности	Duurzaam bouwen, is dat meetbaar // Otar.-1998.-83, №9.-С. 303-307
Остаточный ресурс общественных зданий	Методы динамических испытаний Обследование в целях реконструкции	В. М. Улицкий, д.т.н., проф., В. Н. Парамонов, д. т. н., А. Г. Шашкин, к.т.н., К. Г. Шашкин «Северо-западное отделение РНКМГ и Ф», «Геореконструкция»
Остаточный ресурс, методы риск - анализа конструкций потенциально опасных объектов	Модели вероятностной динамики повреждений в сложных, структурно неоднородных системах	Москвичев В. В., д.т.н., зав. отделом ВЦК СО РАН; Лепихин А. М., к.т.н., зав. лабораторией ВЦК СО РАН; Доронин С. В., к.т.н., н.с. ВЦК СО РАН
Остаточный ресурс,	Нетрадиционная задача распознавания образов в условиях неоднозначных "указаний учителя", позволяющая расширить область применения теории классификации при исследовании сложных систем	Лапко А. В. – д.т.н., зав. лаб. ВЦК СО РАН; Крохов С. И. – к.т.н., профессор КГТУ; Новоходько Н. А. – аспирант КГТУ
Определение остаточного ресурса посредством экспертной системы "Строитель"	Анализ данных по реальному состоянию элементов зданий, выявление закономерности их изменения (старения)	Ростовская-на-Дону государственная академия строительства совместно с НИИ механики и прикладной математики Ростовского государственного университета

Таблица 3. Гипотезы накопления повреждений

Название гипотезы	Суть	Формула
Линейного накопления повреждений Пальмгрена – Майнера	Доля повреждённости при любом уровне амплитуды напряжения цикла $S_i$ прямо пропорциональна отношению числа циклов его действия к полному числу циклов, которое привело бы к разрушению при этом уровне, т.е. $D_i = n_i/N_i$ .	Разрушение произойдёт если $\sum_{j=1}^m \frac{n_j}{N_j} \geq 1$
Марко – Старки (Рихарта – Ньюмарка)	Нелинейная гипотеза повреждения, $D_i = (n_i/N_i)^{m_i}$ , где $m_i$ зависит от уровня напряжения.	$\sum \frac{n}{N} = \int_0^i \frac{\left[ 1 + \frac{N_1}{N_2} + \frac{N_1}{N_3} + \dots + \frac{N_1}{N_i} \right] dD}{\left[ 1 + \frac{N_1}{N_2} r_2 D \left( \frac{r_2 - 1}{r_2} \right) + \dots + \frac{N_1}{N_i} r_i D \left( \frac{r_i - 1}{r_i} \right) \right]}$
Генри	Кривые усталости смещаются по мере накопления повреждений $D = (E_0 - E)/E_0$ , $E_0$ - предел усталости исходного материала, $E$ - тоже после повреждений. Считается, что при действии циклических нагрузок ниже предела усталости не возникает никаких повреждений.	$D = \frac{\frac{n}{N}}{1 + \left[ \frac{E_0}{S - E_0} \right] * \left( 1 - \frac{n}{N} \right)}$
Гатса	Усталостная прочность и предел усталости меняются непрерывно $D(S) = (S - S_e)^p$ , $S_e$ -предел усталости, $S$ -мгновенное значение прочности.	Эквивалентно соотношению Генри
Кортена – Долана	Время, требуемое для образования зародышей повреждённости, равно нулю $N^1 = 0$ . Между удельной повреждёностью и числом циклов существует степенная зависимость $D^1 = rN^a$ .	$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_1} \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^d + \frac{n_3}{N_1} \left( \frac{S_3}{S_1} \right)^d + \dots + \frac{n_i}{N_1} \left( \frac{S_i}{S_1} \right)^d = 1$
Марина	Построено семейство кривых усталости соответствующих различным уровням повреждённости.	$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^q + \frac{n_3}{N_3} \left( \frac{S_3}{S_1} \right)^q + \dots + \frac{n_i}{N_i} \left( \frac{S_i}{S_1} \right)^q = 1$
Билинейное правило Мэнсона, суммирования повреждений	Процесс усталости разделён на фазы зарождения трещины и её распространения. Правило линейного суммирования повреждений применяется к каждой фазе отдельно.	

Повсеместно из-за сложности определения и отсутствия достоверной и надёжной методики долговечность подменяется другими параметрами (морозостойкостью, коэффициентом стойкости, долговечности, трещиностойкости, различными параметрами, в том числе и комплексными, состоящими из двух и более характеристик). Имеет место тенденция получения комплексного показателя свойств цементных бетонов.

#### **Заключение**

Необходимо перейти к проектированию и использованию бетонов «комплексных» марок, которые должны учитывать помимо условий эксплуатации и заданную долговечность конструкции или сооружения, в составе которой предполагается использование проектируемого бетона.

#### **Список литературы**

1. Рапопорт П. Б. Оценка и прогнозирование стойкости бетона с добавкой пластификатора в условиях сухого жаркого климата: Автореф. дис... канд. техн. наук / П. Б. Рапопорт. – Алма-Ата, 1988. – 19 с.
2. Гарибов Р. Б. Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации // А. Н. Маринин, Р. Б. Гарибов, И. Г. Овчинников. – Саратов: Изд-во РАТА, 2008. – 260 с.
3. Френкель И. М. Технология пластичности бетона / И. М. Френкель. – М.: Стройиздат, 1922. – 74 с.
4. Шестопёров С. В. Контроль качества бетона транспортных сооружений / С. В. Шестоперов. – М.: Транспорт, 1975. – 245 с.
5. K. Hajnal-Konyi. Concrete New Ways of Building. – London, 1951. – P. 19.
6. Zito F/ La drabilità del calcestruzzo La tecnica professionale. Collegio inqerheri ferroviari italiani, 1983. – P. 636-643.
7. Idorn G/ M/ Cognate energy and Darabrljty. Cognate International Design Construction. USA/ 1984. – P. 13-20.

#### **Рецензенты:**

Овчинников Игорь Георгиевич, д.т.н., профессор, академик транспорта Российской академии транспорта, профессор кафедры «Транспортное строительство» Саратовского государственного технического университета, г. Саратов.

Кадыров Жаннат Нурғалиевич, д.т.н., профессор, академик Метрологической академии (Россия), профессор Казахского автомобильно-дорожного института, г. Алматы.