

Л.В. Янковский

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ОПИСАНИЕ ИНЖЕНЕРНОГО МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЦЕМЕНТОБЕТОННЫХ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований состояния дорожных конструкций из цементных бетонов, испытывающих воздействие резкого континентального климата Урала и Сибири России. Рассмотрен инженерный метод расчета долговечности бетонных конструкций. Приведены результаты апробирования метода на собственных данных и данных других ученых.

Ключевые слова: бетон, долговечность, прогнозирование, резко континентальный климат, состояние, агрессивное воздействие.

L.V. Iankovskii

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

DESCRIPTION OF THE ENGINEERING METHOD OF FORECASTING OF DURABILITY OF CONCRETE ROAD DESIGNS

In article results of theoretical and pilot studies of the forecast of a condition of road designs from the cement concrete which are affected sharp continental climate of the Urals and Siberia of Russia are considered. The engineering method of calculation of durability of concrete designs is given. Results of approbation of a method on own data and these other scientists are presented.

Keywords: concrete, durability, forecasting, sharply continental climate, state, aggressive influence.

По уровню технических и экономических показателей цементный бетон и, соответственно, железобетон (далее – бетон) по-прежнему остаются основными конструкционными материалами, занимая приоритетные места в общей структуре мирового производства строительной продукции. В России формируется новый крупный сектор экономики, в котором будут применяться в больших масштабах бетоны, – это строительство автомобильных дорог. Жесткие дорожные покрытия, изготовленные по современным технологиям, обеспечивают хорошее сцепление колеса с дорогой при любой температуре и влажности, нет

колеи, волн и «гребенки», в жару покрытие не размягчается, а в стужу – не трескается. Швы, выполненные без сколов и просадок, заполненные качественной мастикой, не создают шума. Особенно это актуально для регионов с резко континентальным климатом (рис. 1).

Раньше считалось, что сооружения и конструкции из бетона являются очень прочными, надежными и долговечными. Но после массового применения бетонов в прошлом веке выяснилось, что интенсивность и стохастичность разрушения бетонных сооружений нарастает, особенно под воздействием неблагоприятного резко континентального климата [1].

По оценкам специалистов, в Российской Федерации до 75 % сооружений, в том числе бетонных элементов автомобильных дорог и искусственных сооружений на них, подвергаются агрессивным природным воздействиям, в том числе и резким климатическим. Систематическое воздействие изменяющихся параметров реальной климатической среды на бетон конструкции способствует развитию микро- и макродефектов в бетоне и накоплению новых повреждений, что приводит к снижению долговечности конструкции или сооружения.



Рис. 1. Автомобильная магистраль с бетонным покрытием [1]

Неблагоприятное воздействие резкого и вариативного изменения климата на бетон должно быть учтено, особенно при проектировании и эксплуатации сооружений, к которым предъявляются повышенные требования с точки зрения эксплуатационной надежности: транспортные, гидротехнические и другие сооружения. Это требует тщательного изучения изменения структуры и свойств современных бетонов под

влиянием природных климатических условий. Для разработки экономически рациональной стратегии сохранности, содержания и ремонта конструкций и сооружений из бетона необходима оценка их остаточного ресурса на текущем этапе эксплуатации. Поэтому совершенствование методов оценки остаточного ресурса и долговечности бетонов, эксплуатируемых в условиях воздействия резко континентального климата, является текущей актуальной задачей.

Метод прогнозирования состояния конструкций из бетона

Влияние систематического переменного воздействия сурового климата на структуру и свойства бетонов, приготовленных по современным методам и технологиям, изучены недостаточно полно. Инженерного расчета долговечности проектируемых, строящихся, эксплуатируемых конструкций и сооружений из бетона вообще не существует. Обычно долговечность подменяется морозостойкостью, которая, по мнению ученых, является основным показателем качества бетона, предопределяющим долговечность железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях попеременного замораживания-оттаивания в водонасыщенном состоянии.

Нами были проведены экспериментальные и теоретические исследования, посвященные разработке простого инженерного способа расчета текущего состояния конструкций из бетона и прогноза их долговечности для условий резко континентального климата Урала и Сибири. Метод позволяет учитывать в комплексе как климатическое, силовое, так и агрессивное воздействие на конструкции из бетона. При этом для прогноза долговечности бетонных конструкций были введены следующие допущения [1]:

- под разрушением следует понимать достижение бетоном предельного состояния;

- цикличность изменения эксплуатационной среды составляет 1 год;

- изменения происходят внутри годового цикла, но не за его пределами;

- воздействие среды можно представить в виде времени воздействия к моменту обследования бетона ($n_i = t_i$);

- количество циклов приложения эксплуатационной среды, вызывающее достижение бетоном предельного состояния, является, по определению, долговечностью бетона T ;

– агрессивность среды от цикла к циклу не меняется ($m_i = 1$).

Были изучены свойства дорожных изделий: свай, лотков, предварительно напряженных дорожных плит (ПДН) и ребристых плит (ПГ). Из тела конструкций предварительно напряженных дорожных плит, испытывающих воздействие климата в течение 7, 8 и 12 мес., отбирались образцы-керны. Плиты, предназначенные для последующего отбора кернов, изготавливались из бетона с пластифицирующей добавкой ПД-01 со сниженными расходами цемента и воды и из бетона без добавок такой же подвижности. Влияние качества бетона на потребительские свойства конструкций определялись периодическим испытанием плит ПДН на трещиностойкость и плит ПГ на прочность, жесткость и трещиностойкость. Часть экспериментов проведена на пропаренных и не пропаренных растворных образцах, испытывавших воздействие климата после изготовления. В дополнение к проведению химических, рентгенографических и дифференциально-термических анализов определены водо- и сульфатостойкость, замерены линейные деформации образцов при выдерживании их в воде и растворе Na_2SO_4 до года. Изучена также возможность повышения стойкости бетонов в условиях воздействия климата с помощью пленкообразующего препарата К-9, который использовался для удержания влаги в изделиях и образцах при прогреве их в термоформах, а также в качестве вторичной защиты.

В качестве параметров, характеризующих свойства бетона, были рассмотрены следующие параметры: кубиковая (R) и призмная прочности (R_b), модуль упругости (E_b) и коэффициент упругости (γ), нижний ($R_{\text{срс}}^0$) и верхний ($R_{\text{срс}}^1$) пределы микротрещинообразования, водопоглощение (W). Методики определения этих характеристик нормированы, что снижало ошибки при вычислении их значений [1].

Для упрощения расчетов инженерным методом был произведен отбор основных параметров для описания состояния бетона. С помощью численных и экспериментальных исследований было установлено, что состояния бетонов достаточно полно описываются (информативность от 79,6 до 86,7 %) относительными изменениями значений трех характеристик – R_b , $R_{\text{срс}}^0$, W .

Для определения тренда развития состояния бетона в процессе эксплуатации исследуемый бетон в каком-либо возрасте t описывался изменениями названных трех параметров относительно того же начала

отсчета. Тогда предельное состояние и состояние бетона в исследуемый момент времени будут представлены в виде изменения параметров относительно их значений для состояния, принятого за начальное. Если теперь измерить расстояние $\cos \varphi$ в n -мерном пространстве признаков, то тем самым будет охарактеризована степень поврежденности исследуемого бетона за период времени t . При этом считается, что поврежденность бетона в предельном состоянии равна 1, а в состоянии, принятом за начальное, – 0. Тогда долговечность бетона может быть представлена в виде функции $T = f(\cos \varphi, t)$. Закономерность накопления повреждений будет выглядеть следующим образом [2]:

$$\frac{t_1}{T} + \frac{t_2}{T} + \dots + \frac{t_{i-1}}{T} + \frac{t_i}{T} \leq 1 \text{ или } \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{T} \leq 1, \quad (1)$$

где t_i – время воздействия климата на бетон к моменту определения повреждения текущего состояния; T – полное возможное время воздействия климата для достижения бетоном состояния, принятого за предельное.

Поврежденность бетона под воздействием климата представлена изменением угла между векторами, описывающими состояния изучаемого бетона и бетона в предельном состоянии. Тогда прогнозирование бетона можно осуществить по формуле

$$T = \frac{\frac{\pi}{2} t_i}{\frac{\pi}{2} - \varphi}, \text{ где } \varphi = \arccos \varphi = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^{(p)} x_i^{(q)}}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i^{(p)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{i=1}^n (x_i^{(q)})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

есть угол между векторами, описывающими состояния бетона; x_i – координата состояния в n -мерном пространстве признаков; p, q – соответственно индексы принадлежности к состоянию.

Таким образом, мы практически представили в виде тренда обобщенную качественную характеристику развития состояния объекта прогнозирования или, по принятой терминологии, прогнозную тенденцию. Количественной характеристикой объекта прогнозирования в нашем случае будет изменяющаяся в процессе эксплуатации близость состояний, измеряемая углом φ . Долговечность в данном случае можно трактовать как время, за которое система достигнет состояния, принятого за предельное, или пройдет от начального состояния путь, равный $\frac{\pi}{2}$, в пред-

положении, что скорость останется неизменной. При этом время ($T - t_i$) представляет собой так называемый остаточный ресурс бетона. Применяя экстраполяцию тренда состояния бетона, мы сможем ответить на вопрос в течение какого времени исследуемый бетон под воздействием реальной климатической среды будет соответствовать эксплуатационным требованиям, или определить его долговечность в годах [3].

Процедура оценки соответствия изучаемой бетонной конструкции проектному сроку службы

Данная процедура задается следующей последовательностью шагов [1]:

Шаг 1. По данным испытаний лабораторных образцов определяются значения параметров R_b , $R_{\text{срс}}^0$, W бетона до начала воздействия климата. Испытания рекомендуется проводить на образцах, отобранных по установленным правилам из конкретной конструкции или сооружения, долговечность которой определяется.

Шаг 2. Определяются отклонения этих же параметров относительно начальных значений (R_b^* , $R_{\text{срс}}^{0*}$, W^*) после воздействия климатической среды на бетон конструкции или сооружения в течение 1 года. Необходимо использовать тот же метод определения характеристик бетона, что и в п. 1.

Шаг 3. Проверяется соответствие бетона проектному сроку службы:

$$\frac{R_b^* R_b^{\text{пп}} + R_{\text{срс}}^{0*} R_{\text{срс}}^{0\text{пп}} + W^* W^{\text{пп}}}{\sqrt{(R_b^*)^2 + (R_{\text{срс}}^{0*})^2 + (W^*)^2} \sqrt{(R_b^{\text{пп}})^2 + (R_{\text{срс}}^{0\text{пп}})^2 + (W^{\text{пп}})^2}} \leq K, \quad (3)$$

где R_b^* , $R_{\text{срс}}^{0*}$, $W^{\text{пп}}$ – предельно допустимые изменения значений параметров R_b , $R_{\text{срс}}^0$, W относительно их начальных значений для бетона до начала воздействия климата; K – коэффициент, принимаемый при проектном сроке службы (табл. 1).

Шаг 4. Проверяется условие (3). При выполнении этого условия делается вывод о соответствии прогнозируемого срока службы бетона проектному сроку службы его в конструкции.

Шаг 5. При невыполнении условия делается вывод о несоответствии прогнозируемого срока службы бетона проектному сроку службы его в конструкции.

Таблица 1

Показатели значений коэффициента K

Возраст бетона t , к моменту второго определения свойств, годы	Проектный срок службы T , годы				
	10	20	30	40	50
1	0,1564	0,0785	0,0523	0,0393	0,0314
2	0,3093	0,1564	0,1045	0,0785	0,0625
3	0,4540	0,2334	0,1564	0,1011	0,0943
4	0,5878	0,3090	0,2079	0,1564	0,1248
5	0,7071	0,3827	0,2588	0,1951	0,1564
6	0,8090	0,4540	0,3090	0,2334	0,1874
7	0,8910	0,5225	0,3584	0,2546	0,2178
8	0,9511	0,5878	0,4067	0,3093	0,2490
9	0,9877	0,6494	0,4540	0,3132	0,2790
10	1,0000	0,7071	0,5000	0,3827	0,3090

Процедура оценки остаточного ресурса бетона

Задача формулируется как определение остаточного ресурса, т.е. времени воздействия эксплуатационной среды T , необходимого бетону в конструкции или сооружении для достижения им предельного состояния (R_b^{np} , R_{crc}^{0np} , W^{np}), если бетон в течение времени t испытывал воздействие климатической среды.

На основе этого формируется следующая последовательность пошаговой оценки и прогнозирования состояния бетонов [1]:

Шаг 1. Устанавливаются по исполнительной или проектной документации значения параметров R_b , R_{crc}^0 , W бетона до начала воздействия климата.

Шаг 2. Определяются значения параметров бетона (R_{b2} , R_{crc2}^0 , W_2) во время t и соответственно их изменения (R_b^* , R_{crc}^{0*} , W^*) относительно начальных значений (R_{b1} , R_{crc1}^0 , W_1):

$$R_b^* = \frac{R_{b2} - R_{b1}}{R_{b1}}, \quad R_{crc}^{0*} = \frac{R_{crc2}^0 - R_{crc1}^0}{R_{crc1}^0}, \quad W^* = \frac{W_2 - W_1}{W_1}.$$

Испытания рекомендуется проводить на образцах, отобранных из конкретной конструкции или сооружения, остаточный ресурс которой определяется.

Шаг 3. Проверяется условие достижения изучаемым бетоном заданного предельного состояния по формуле

$$R_b^* R_b^{\text{пр}} + R_{\text{срс}}^{0*} R_{\text{срс}}^{0\text{пр}} + W^* W^{\text{пр}} > 0. \quad (4)$$

При невыполнении условия считается, что заданное предельное состояние изучаемых бетонов в установленный срок не будет достигнуто. При выполнении условия (4) далее производится расчет остаточного ресурса.

Шаг 4. Определяется время T воздействия климатической среды, необходимое для достижения бетоном предельного состояния, по формуле (2), при этом

$$\varphi = \arccos \frac{R_b^* R_b^{\text{пр}} + R_{\text{срс}}^{0*} R_{\text{срс}}^{0\text{пр}} + W^* W^{\text{пр}}}{\sqrt{(R_b^*)^2 + (R_{\text{срс}}^{0*})^2 + (W^*)^2} \sqrt{(R_b^{\text{пр}})^2 + (R_{\text{срс}}^{0\text{пр}})^2 + (W^{\text{пр}})^2}}. \quad (5)$$

Остаточный ресурс, в годах, может определяться также графическим способом по номограмме, разработанной нами и представленной на рис. 4.

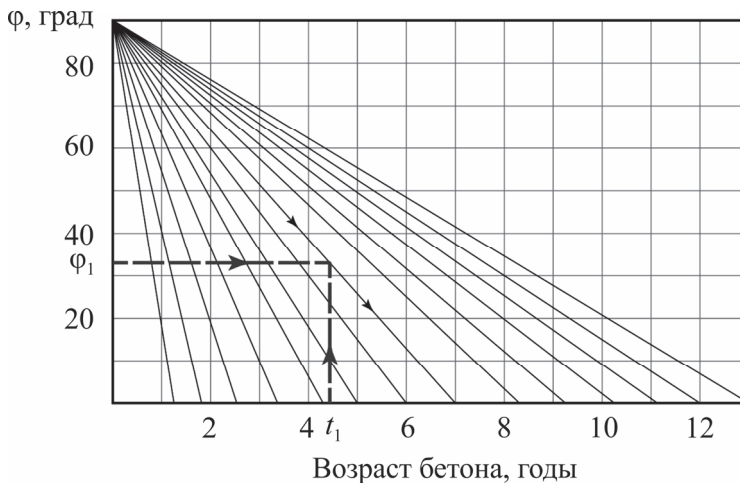


Рис. 2. Номограмма для определения времени воздействия эксплуатационной среды, в течение которого система (бетон) достигнет состояния, принятого за предельное

Апробирование разработанного метода прогнозирования состояния бетона на собственных экспериментальных данных и данных, заимствованных из работ М.М. Селимова (результаты изучения свойств бетонов дорожных покрытий за 11 лет) (табл. 2) и У.Ф. Фазылова (результаты изучения свойств бетонов, испытывающих воздействие среды, имитирующую климатическую), доказало приемлемую точность метода для инженерных расчетов [1].

Таблица 2

Результаты натурного прогнозирования времени, необходимого для достижения бетоном предельного состояния

Возраст бетона в рассматриваемом состоянии	Значение параметров бетона в рассматриваемом состоянии					Возраст бетона к моменту достижения им предельного состояния, определенный	
	E_b	R_b	W	$\cos \varphi$	φ , град	по формуле	по номограмме
1 мес.	35,5	3,66	4,85	0	90	–	–
1 год	46,5	3,07	6,59	0,165	80,5	9,47/13,9	9,5/13,6
1 год 6 мес.	55,0	3,34	7,66	0,228	76,8	10,22/7,0	10,5/4,5
2 года 6 мес.	42,0	3,305	5,8	0,298	72,1	12,61/14,6	12,1/10,0
2 года 11 мес.	64,6	3,56	7,85	0,433	64,2	10,17/7,5	10,5/4,5
4 года 7 мес.	60,0	3,37	3,34	0,694	46	9,37/14,7	9,5/13,6
6 лет 8 мес.	75,9	3,86	5,9	0,789	37,8	11,36/3,3	11,6/5,4
7 лет 9 мес.	53,0	3,67	4,7	0,912	23,7	10,52/4,4	10,8/1,7
11 лет	65,0	4,09	2,81	1,0	0	–	–

Примечания: 1. За начальное принято состояние бетона в возрасте 1 мес. 2. За предельное принято состояние бетона в возрасте 11 лет. 3. Перед чертой приведен прогнозируемый возраст, в годах, за чертой – ошибка прогнозирования, %.

Заключение

Как видно из данных, приведенных в табл. 2, предлагаемый метод дает погрешность до 14,7 %, что вполне приемлемо для практического прогнозирования. Неточность прогноза в данном случае объясняется применяемыми исходными данными, а именно: при описании

состояния вместо рекомендованного параметра $R_{\text{сгс}}^0$ (нижний уровень микротрещинообразования) использован менее информативный параметр E_b (модуль упругости).

Определение остаточного ресурса позволит обоснованно назначать сроки различного вида ремонтов по состоянию или принятия решений об усилении или защите бетона различных дорожных конструкций, испытывающих воздействие сурового климата северных территорий.

Список литературы

1. Янковский Л.В., Рапопорт П.Б., Кочетков А.В. Мониторинг состояния цементобетонных дорожных конструкций: моногр. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 237 с.

2. Янковский Л.В. К вопросу оценки и прогноза состояния цементных бетонов, эксплуатирующихся в условиях воздействия климата Урала и Сибири // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность движения. – 2012. – № 2. – С. 86–95.

3. Янковский Л.В. Метод прогнозирования состояния цементобетонных строительных конструкций в условиях воздействия климата // Вестник гражданских инженеров. Сер.: Архитектура. Строительство. Транспорт. – 2012. – № 5 (34). – С. 315–319.

References

1. Iankovskii L.V., Rapoport P.B., Kochetkov A.V. Monitoring sostoianiia tsementobetonnykh dorozhnykh konstruktssii [Monitoring of the cement-concrete road constructions status]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2012, 237 p.

2. Iankovskii L.V. K voprosu otsenki i prognoza sostoianiia tsementnykh betonov, ekspluatiruiushchikhsia v usloviiakh vozdeistviia klimata Urala i Sibiri [About assessment and status forecast of cement concretes being operated under Urals and Siberia climate conditions]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhaiushchei sredy, transport, bezopasnost' dvizheniia*, 2012, no. 2, pp. 86-95.

3. Iankovskii L.V. Metod prognozirovaniia sostoianiia tsementobetonnykh stroitel'nykh konstruktssii v usloviiakh vozdeistviia

klimate [Forecasting method of cement concrete building structures condition under the climate conditions]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. Seriya "Arkhitektura. Stroitel'stvo. Transport"*, 2012, no. 5 (34), pp. 315-319.

Получено 14.11.2014

Об авторе

Янковский Леонид Вацлавович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и технологические машины» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: yanekperm@yandex.ru).

About the author

Iankovskii Leonid Vatslavovich (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automobiles and Technological Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: yanekperm@yandex.ru).