

## АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 691.328: [620.191.33+620.169.1+539.3]

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА  
ПО ОБОБЩЕННОМУ КРИТЕРИЮ*Докт. техн. наук, проф. ЛЕОНОВИЧ С. Н.**Белорусский национальный технический университет*

Разработан метод расчета долговечности бетона с использованием подходов механики разрушения, который опирается на концепцию накопления дефектов в структуре в виде пор, капилляров и трещин до их критической концентрации  $S_c$ . При этом рассматривается процесс на двух стадиях: на первой – процесс образования и развития дефектов и на второй – процесс, непосредственно сопровождающий разрушения (фрагментацию) при критической концентрации дефектов.

**Основные предпосылки и допущения.** Приоритет в управлении свойствами бетона на цементном вяжущем принадлежит высоким наукоемким технологиям на основе дисперсий наноразмеров с размером частиц от 10 нм – для матричной основы композита и до 50–100 мкм – для системы наполнителей. Величины абсолютных размеров наночастиц, межфазной и контактной поверхности для свойств дисперсий в дисперсионной среде имеют важное значение. Удельная поверхность наночастиц должна рассматриваться как интенсивный энергетический источник в структурообразовании. Этот параметр можно сравнить с концентрацией структурообразующих элементов дисперсной структуры и выразить ее количеством поверхности, приходящейся на единицу объема [1–4].

В качестве теоретической основы метода приняты физические представления о механизме приращения объема пустотности трещин в модели бетона, представленной как двухуровневая структура: матрица затвердевшего цементного камня с включениями и пустоты различной формы (трещины) как результат внешних воздействий, изменяющих напряженно-деформированное состояние.

Установлен основной расчетный критерий метода – обобщенный суммарный параметр трещиностойкости  $K_c = \sqrt{K_{lc}^2 + K_{llc}^2}$ , вычисляемый на основании модельных схем развития, объединения, локализации системы трещин, их классификации по видам и относительному количеству в объеме при начальной концентрации, возрастающей до критической, что обусловлено физическими процессами изменения температуры, состояния воды (пар, лед) и физико-химическими, коррозионными процессами.

При теоретическом обосновании метода расчета долговечности бетона с использованием подходов механики разрушения по обобщенному критерию сформулированы основные допущения.

Разработанная модель является иерархической системой, пригодной для описания процессов разрушения (деструкции) бетона на любых уровнях рассмотрения его структуры. Введя соответствующие характеристики для материалов заполнителя и цементно-песчаного раствора, можно получить деформативные, прочностные характеристики, параметры развивающихся трещин для бетона в случае изменения его влажности и температуры.

Базируясь на рассмотренных закономерностях процесса разрушения бетона, предложено подразделить все дефекты структуры – как исходные, так и развившиеся в результате силовых и несиловых воздействий – на пять основных типов. Содержание пор и трещин первых четырех типов зависит от пористости бетона, а типа 5 – и от объемного содержания зерен мелкого или крупного заполнителя. Каждому

виду повреждений соответствует свой коэффициент интенсивности напряжений, степень влияния и величина которого на общую трещиностойкость материала зависят от количества данного вида пор и трещин в объеме бетона (табл. 1).

Коэффициент интенсивности напряжений бетона  $K_{Ic}$  уменьшается во времени. Этот факт исключительно важен в понимании всего процесса разрушения и проблемы долговечности, которая лимитируется уменьшающейся во времени трещиностойкостью.

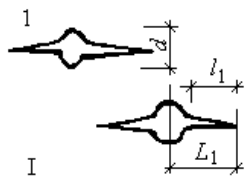
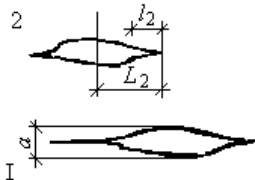
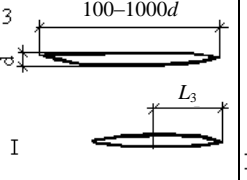
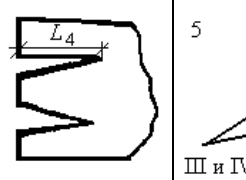
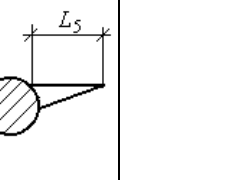
Классифицируем все дефекты структуры как исходные, так и развившиеся в результате

силовых и несиловых воздействий на пять основных видов:

- 1 – округлые пустоты-поры с выходящими на их границы субмикротрещинами, образовавшимися в результате концентрации напряжений вокруг кругового отверстия;
- 2 – эллипсоидные пустоты-поры с выходящими на их границы микротрещинами;
- 3 – мезотрещиновидные дефекты в теле бетона;
- 4 – краевые трещиновидные дефекты;
- 5 – радиальные и контактные трещины вокруг трещин и включений.

Таблица 1

Коэффициенты интенсивности напряжений с учетом содержания пустот капилляров, трещин в цементном камне

	Вид дефекта 1	Вид дефекта 2	Вид дефекта 3	Вид дефекта 4	Вид дефекта 5
Содержание пор $n_1, \dots, n_5, \%$					
	$K_{Ic} = A\sigma_b \sqrt{\pi l_1 (1 + d/L_1)}$	$K_{Ic} = B\sigma_b \sqrt{\pi(a + l_2)}$ $K_{Ic} = B\sigma_b \sqrt{\pi l_2 (1 + d/L_2)}$	$K_{Ic} = C\sigma_b \sqrt{\pi l_3}$ $K_{Ic} = C\tau \sqrt{\pi l_3}$	$K_{Ic} = D\sigma_b \sqrt{\pi l_4}$ $K_{Ic} = D\tau \sqrt{\pi l_4}$	$K_I = E\sigma_b \sqrt{\pi l_5/2}$ $K_I = E\tau \sqrt{\pi l_5/2}$
	A	B	C	D	E
5	1,733	1,0550	1,0122/1,0205	0,2303/0,2004	0,643/0,060
10	1,912	1,1003	1,0212/1,0417	0,3116/0,1997	0,651/0,061
15	2,067	1,2794	1,0480/1,0630	0,3992/0,1901	0,657/0,063
20	2,235	1,4212	1,0647/1,0890	0,4570/0,1762	0,682/0,068
25	2,506	1,6517	1,1010/1,1812	0,5640/0,1592	0,701/0,072
30	2,973	1,8432	1,1535/1,2810	0,6810/0,1446	0,793/0,081
35	3,084	2,0020	1,4032/1,4216	0,7632/0,1410	0,854/0,087
40	3,512	2,1760	1,5547/1,5732	0,8720/0,1337	0,892/0,092

**Примечания:**

1. Для субмикро-, микро- и мезоуровней:  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м;  $L_1 = 1 \cdot 10^{-8}$ ;  $L_2 = 1 \cdot 10^{-8}$ ;  $L_3 = 5 \cdot 10^{-5}$ ;  $L_4 = 5 \cdot 10^{-5}$ ;  $a = 5 \cdot 10^{-6}$  м;  $L_1, L_2, L_3, L_4$  – полудлина (длина) дефектов или пустот-пор; A, B, C, D – коэффициенты над чертой.

2. Для мезо- и макроуровней:  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м;  $L_1 = 1 \cdot 10^{-8}$ ;  $L_2 = 1 \cdot 10^{-8}$ ;  $L_3 = 5 \cdot 10^{-3}$ ;  $L_4 = 5 \cdot 10^{-3}$  м;  $L_5 = D_{\max}^{ag}$ ;  $a = 5 \cdot 10^{-6}$  м;  $D_{\max}^{ag}$  – максимальный диаметр зерна мелкого или крупного заполнителя в матрице или бетоне;  $L_5$  – длина радиальной трещины; E – коэффициент над чертой.

3.  $K_I^1, K_I^2, K_I^3, K_I^4$  – коэффициенты интенсивности напряжений соответственно в вершинах микродефектов 1–4-го видов;  $K_I^5$  – в вершинах радиальных и контактных трещин вида 5 на границе с зёрнами мелкого и крупного заполнителей;  $n_i$  – содержание микродефектов различных видов в общем количестве микроповреждений.

**Алгоритм расчета** содержит последовательность операций расчета как для подбора состава по известным параметрам внешних воздействий и характеристикам свойств компонентов бетона, его технологическим параметрам и параметрам первичной защиты от коррозии, так и для определения остаточного ресурса бетона по образцам, отобранным из конструкций в условиях эксплуатации.

Алгоритм включает в себя:

1) исходные данные о проектных параметрах внешних воздействий: силовых (продольная сила  $N$ , момент  $M$ , поперечная сила  $Q$ ) и несиловых (температура  $t$ , влажность  $W$ , давление  $p$ ) воздействий; о характеристиках компонен-

тов бетона: цемента  $R_c$ , заполнителя  $R_a$ , химических добавок, концентрации заполнителя  $\phi$ ;

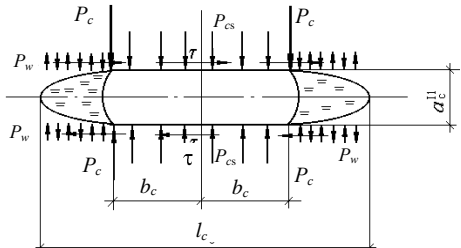
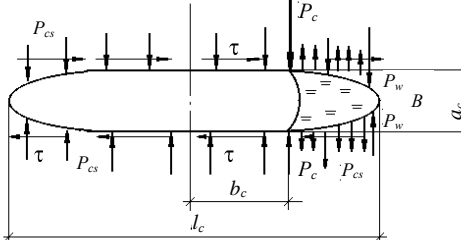
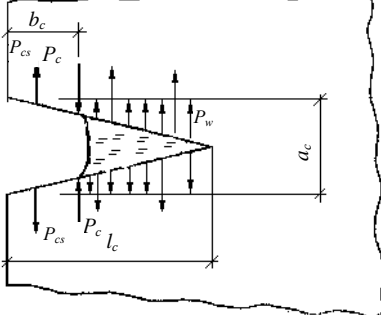
2) данные о свойствах бетона, его прочности  $f_c$  и  $f_{ct}$ , упругости  $E_c$ , трещиностойкости  $f_{cre}^0$  и  $f_{cre}^v$ ;

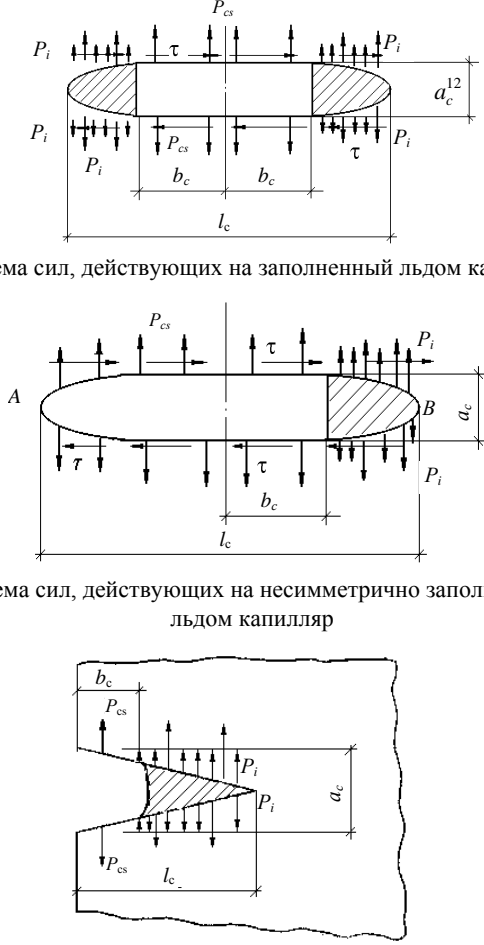
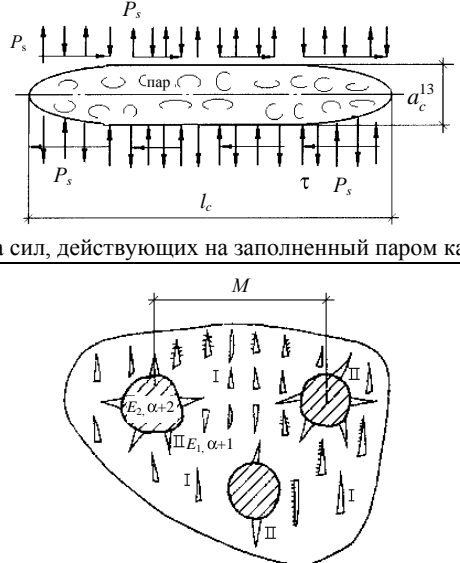
3) операции по расчету пористости бетона (общей, капиллярной, гелевой, содержанию воздуха);

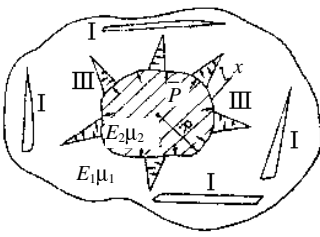
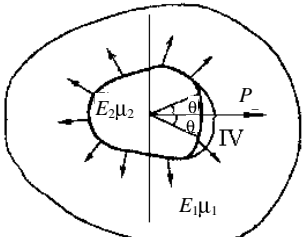
4) операции по расчету коэффициентов интенсивности напряжений (КИН)  $K_{Ii}^b$ ,  $K_{IIi}^b$  в вершинах дефектов 1–4-го видов при температурно-влажностных воздействиях. Модели трещин, условные обозначения и промежуточные математические операции приведены в табл. 2;

Таблица 2

**Модели трещин (дефектов) в бетоне, условные обозначения и промежуточные математические операции**

№ п/п	Модель дефекта	Условные обозначения
1	2	3
I температурный диапазон (вода)	 <p>Система сил, действующих на заполненный водой капилляр</p>	$l_c$ – длина капилляра; $b_c$ – зависит от влажности цементного камня $W$ ; $a_c$ – диаметр пустоты капилляра; $\sigma_0$ – поверхностное натяжение жидкости ( $t = 0^\circ\text{C}$ ); $\theta$ – угол смачивания, или краевой угол, на границе «жидкость – стенка капилляра»; $P_c$ – сила, определяемая капиллярным давлением; $P_w$ – то же расширением воды при повышении температуры; $\alpha_{tw}$ – коэффициент температурного расширения воды; $\alpha_t, c_s$ – коэффициенты температурного расширения кристаллической системы; $g_c$ – расстояние между двумя соседними капиллярами; $t_k = 370^\circ\text{C}$ (для воды); $\sigma_0 = 0,076 \text{ Н/м}$ ( $t = 0^\circ\text{C}$ ); $E_{cs}$ – модуль упругости кристаллической системы
	 <p>Система сил, действующих на несимметрично заполненный водой капилляр</p>	
	 <p>Система сил, действующих на незамкнутый капилляр в первом температурном диапазоне</p>	

1	2	3
II температурный диапазон (лед)	 <p>Система сил, действующих на заполненный льдом капилляр</p> <p>Система сил, действующих на несимметрично заполненный льдом капилляр</p> <p>Система сил, действующих на незамкнутый капилляр, заполненный льдом</p>	<p><math>P_{cs}</math> – сила от расширения кристаллической системы; <math>\tau</math> – касательные напряжения от действия сил в капиллярах, ориентированных параллельно <math>P</math>; <math>\alpha_{t,i}</math> – коэффициент температурного расширения льда; <math>E_i</math> – модуль упругости льда</p>
III температурный диапазон (пар)	 <p>Система сил, действующих на заполненный паром капилляр</p> <p>Распространение трещин на микроуровне цементного камня:                      I – трещины в матрице; II – радиальные трещины; M – расстояние между зернами</p>	<p><math>P_s</math> – сила, определяемая давлением пара</p> $\alpha(r) = 2(1-\mu_1)r / r^2 + (1-2\mu_1) \times$ $\times (M-R)^2 + [(M-R)^2 - r^2] 1-\mu_2 \times$ $\times (M-R)E_1 / [1+\mu_1 \quad M-R-l \quad E_2];$ $g = 1,7 + 14\alpha_0 l / (M-2R);$ $r = l + r; \quad \alpha_0 = \sigma_1 / \sigma_2;$ <p><math>E_1, E_2</math> – модуль Юнга соответственно матрицы и заполнителя</p>

1	2	3
III температурный диапазон (пар)	 <p>Радиальные трещины в гидратированной массе</p>	$f \ l/R = 2,26 - l/R0,15;$ <p><math>R</math> – средний радиус негидратированного зерна;  <math>l</math> – длина радиальной трещины; <math>\mu_1, \mu_2</math> – коэффициенты Пуассона соответственно матрицы и заполнителя</p>
	 <p>Контактные трещины на границе «негидратированное зерно – гидратированная масса»</p>	$\beta = 1/2\pi \ln \alpha;$ $\alpha = G_1 + G_2\chi_1 / G_2 + G_1\chi_2 ;$ <p><math>G = E/2 \ 1 + \mu</math> – модуль сдвига; <math>E</math> – модуль Юнга; <math>\mu</math> – коэффициент Пуассона; <math>\chi = 3 - 4\mu</math> – для плоской деформации;  <math>\chi = 3 - \mu / 1 + \mu</math> – для обобщенного плоского напряженного состояния</p>

5) операции по расчету критерия КИН при температурно-влажностных воздействиях с учетом распределения пор и капилляров в общем количестве дефектов;

6) операции по расчету  $K_{II}^b, K_{III}^b$  от силовых воздействий для каждого из видов трещин и суммарного КИН. Формулы и необходимые данные для расчетов приведены в табл. 1, 2;

7) расчет предельного значения КИН для данного состава;

8) расчет модуля упругости  $E_c$  для данного состава;

9) расчет долговечности бетона от силовых

и термовлажностных воздействий с учетом предельного значения КИН  $K_{Ic}^{cr}$  и суммарного КИН  $K_I^N$ , а также разницы КИН в пределах цикла ( $K_{I,W}^{TW} - K_{I,S}^{TW}$ );

10) определение времени безопасной эксплуатации бетона конструкций из условия длительных внешних воздействий с учетом меры ползучести  $C(\infty, 28)$  и КИН;

11) операции оценки результата и корректировки состава.

Алгоритм расчета долговечности представлен в табл. 3.

Таблица 3

Алгоритм расчета долговечности бетона изготавливаемых конструкций

1	Исходные данные: а) проектные параметры внешних силовых ( $N, M, Q$ ) и несилowych ( $t, W, p$ , концентрация химических веществ) воздействий; б) характеристики компонентов бетона: цемента ( $R_c$ ), заполнителя ( $R_a$ ), химических добавок
Требуемый (проектный) срок службы	
↓	
2	Проектирование состава бетона по прочности $f_c, f_{cb}$ , деформативности $E_c$ и трещиностойкости $f_{cr}^0, f_{cr}^v$
↓	
3	Расчет по выбранному составу бетона его пустотности: общей, гелевой, капиллярной, дифференциальной пористости цементного камня и бетона
↓	
4	Расчет коэффициентов интенсивности напряжений в вершинах дефектов 1–5-го видов при температурно-влажностных воздействиях

<p>I температурный диапазон (вода)</p>	$K_{l,t}^{I,1,c} = \frac{4\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} \frac{a_c \cos \theta \sigma_0 \left(1 - \frac{t}{t_k}\right)}{g_c \sqrt{l_c \left[1 - \left(\frac{W}{100}\right)^2\right]}}$ $K_{l,t}^{I,1,w} = \alpha_{t,w} \Delta t E_w \sqrt{\frac{\pi l_c}{2}} \left[1 - \left(\frac{2}{\pi}\right) \arcsin \left(\frac{2b_c}{l_c}\right)\right];$ $K_{l,t}^{I,1,cs} = \alpha_{t,cs} \Delta t E_{cs} \sqrt{\frac{\pi l_c}{2}}; \quad K_{l,t}^{I,1,c,m} = p_c \sqrt{2} / \sqrt{\pi l^2 - 4b^2};$ $K_{l,t}^{I,1,w,m} = \alpha_{t,w} \Delta t E_w \sqrt{\frac{l_c}{2\pi}} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{2b_c}{l_c}\right)\right];$ $K_{l,t}^{II,1,w} = 2p_w \sqrt{\frac{l_c}{\pi}} \arccos \left(\frac{b_c}{l_c}\right) \left[1 + 0,1215 \left(1 - \frac{b_c}{l_c}\right)\right];$ $K_{l,t}^{II,1,cs} = 3,523 \alpha_{t,cs} \Delta t E_{cs} \sqrt{\frac{l_c}{\pi}}$
<p>II температурный диапазон (лед)</p>	$K_{l,t}^{I,2,i} = \alpha_{t,i} \Delta t E_i \sqrt{\frac{\pi l_c}{2}} \left[1 - \left(\frac{2}{\pi}\right) \arcsin \left(\frac{2b_c}{l_c}\right)\right];$ $K_{l,t}^{I,2,cs} = \alpha_{t,cs} \Delta t E_{cs} \sqrt{\frac{\pi l_c}{2}};$ $K_{l,t}^{I,2,i,m} = \alpha_{t,i} \Delta t E_i \sqrt{\frac{l_c}{2\pi}} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{2b_c}{l_c}\right)\right];$ $K_{l,t}^{II,2,i} = 2\alpha_{t,i} \Delta t E_i \sqrt{\frac{l_c}{\pi}} \arccos \left(\frac{b_c}{l_c}\right) \left[1 + f \left(\frac{b_c}{l_c}\right)\right];$ $K_{l,t}^{II,2,cs} = 3,523 \alpha_{t,cs} \Delta t E_{cs} \sqrt{\frac{l_c}{\pi}}$
<p>III температурный диапазон (пар)</p>	$K_{l,t}^{I,3,5} = p_0 \left[1 + \alpha t \sqrt{\frac{\pi l_c}{2}}\right]$
<p>Для каждого из трех диапазонов</p>	
$K_{l,t}^{III} = p \sqrt{\pi l} \left\{ \frac{\left[1 - \alpha r\right] f \left(\frac{l}{R}\right) M - R^2}{\left[M - R^2 - r^2\right]} \right\} 1 + g;$ $K_{l,t}^{IV} = 2p \left[1 + \alpha^{-1} \sqrt{\pi R \sin \theta} G_2 \left[1 + X_1 \left[G_1 \left[1 + X_2 + G_2 \left[1 + X_1\right]\right] e^{\beta \theta + \pi} / G_2 + G_1 X_2 \times \right.\right.\right.\right.$ $\left.\left.\left.\times \left[G_1 \left[1 + X_2 + 2G_2 \left[1 + X_1\right]\right] - G_1 \left[1 + X_2\right] G_1 + G_2 X_1 \cos \theta - 2\beta \sin \theta e^{-2\beta \theta}\right]\right]\right] - 2\beta \times \right.$ $K_{l,t}^{IV} = 2p R^{\beta} \left[1 + \alpha^{-1} \sqrt{\pi R \sin \theta} G_2 \left[1 + X_1 \left[G_2 \left[1 + X_1 + G_1 \left[1 + X_2\right]\right] 1 - 2\beta \times \right.\right.\right.\right.$ $\left.\left.\left.\times e^{\beta \theta + \pi} e^{-\beta \ln 2 \sin \theta} / G_2 + G_1 X_1 \left[G_1 \left[1 + X_2 + 2G_2 \left[1 + X_1\right] - \right.\right.\right.\right.$ $\left.\left.\left.\left.- G_1 \left[1 + X_2\right] G_1 + G_2 X_1 \cos \theta - 2\beta \sin \theta e^{-2\beta \theta}\right]\right]\right] - 2\beta \sin \theta e^{-2\beta \theta}\right]$	
<p>5</p>	<p>Расчет КИН при температурно-влажностном воздействии с учетом распределения пор и капилляров в общем количестве дефектов</p>

	$K_{1,W}^{TW} = \sum_{i=1}^{IV} n_i K_{1,W}^{iTW} = n_1 K_{1,W}^1 + n_2 K_{1,W}^2 + n_3 K_{1,W}^3 + n_4 K_{1,W}^4 + 1 - n_1 - n_2 - n_3 - n_4 K_{1,W}^5;$ $K_{1,s}^{TW} = \sum_{i=1}^{IV} n_i K_{1,s}^{iTW} = n_1 K_{1,s}^1 + n_2 K_{1,s}^2 + n_3 K_{1,s}^3 + n_4 K_{1,s}^4 + 1 - n_1 - n_2 - n_3 - n_4 K_{1,s}^5$	
6	<p>Расчет КИН от силовых воздействий для каждого из пяти видов трещин и суммарного КИН:</p> $K_{1,1}^N = A\sigma_b \sqrt{\pi l_1} \sqrt{1+d/L_1}; \quad K_{1,2}^N = B\sigma_b \sqrt{\pi a+L_2};$ $K_{1,3}^N = C\sigma_b \sqrt{\pi L_3}; \quad K_{1,4}^N = D\sigma_b \sqrt{\pi L_4}; \quad K_{1,5}^N = E\sigma_b \sqrt{\pi L_5/2};$ $K_1^N = \sum_{i=1}^5 K_{1i}^N$	
7	<p>Расчет предельного значения КИН</p> $K_{lc}^{cr} = -0,015 + 0,01R_a +$ $+ 0,133 \frac{II}{B} + 0,06R_c -$ $- 0,008W - (-0,583\varphi)$	<p>Расчет модуля упругости для данного состава</p> $E_c = -13515,9 + 184,7R_a +$ $+ 11292,5 \frac{II}{B} + 190,5R_c -$ $- 269W - 16900\varphi$
9	<p>Расчет долговечности бетона с учетом силовых и термовлажностных воздействий (в годах)</p> $t = 2 \frac{K_{lc}^{cr} - K_1^N}{ K_{1,W}^{TW} - K_{1,s}^{TW}  \Psi}$	
10	<p>Определение времени (в сутках) безопасной эксплуатации бетона конструкций</p> $\lg t = \frac{K_{lc}^{cr}}{K_{lc}} \lg 28 \times$ $\times \sqrt{1 + 2E_c c_{\infty,28} - 1 - e^{-\gamma t - 28}},$ <p>где</p> $K_{lc} = K_1^N + \frac{K_{1,W}^{TW} + K_{1,s}^{TW}}{2};$ $c_{\infty,28} = a \left( \frac{56 \sqrt{l_{bg}}}{K_{lc} \pi^{3/2}} - 0,63 \right) \cdot 10^{-4};$ $\gamma = 0,03 \frac{Q \sqrt{l_{bg}}}{K_{lc} \pi^{3/2}}$	
11	<p>Выбирается минимальное <math>t</math> из (9) и (10) и сравнивается с требованиями табл. 4</p>	

**Категории долговечности и параметры критической трещиностойкости.** Долговечность бетона при внешних воздействиях формируется как состояние эксплуатационной пригодности, характеризуемое свойствами сплошности, трещиноватости, вязкости разрушения структуры, оцениваемое показателями критической трещиностойкости  $K_{1(II)c}$ , приведенными в табл. 4 для временных категорий долговечности  $A, B$  и  $C$ .

Признаками исчерпания предела долговечности рассчитываемых составов бетона и бе-

тонных элементов во временных категориях  $A, B, C$  являются значения  $K_{1(II)c}$ , ниже установленных в табл. 4. Данную таблицу следует рассматривать как пробную для последующей классификации по долговечности. Классы по долговечности установлены для температуры  $t = 20$  °С. Для других температурных условий выполняется соответствующий пересчет.

Категории долговечности охватывают диапазон времени:  $A - 25-50$  лет;  $B - 50-65$ ;  $C - 65-75$  лет.

Зависимость категорий долговечности *A, B, C* бетона от аналитических параметров критической трещиностойкости  $K_{Ic}^b$  и  $K_{IIc}^b$

Классы бетона по энергии разрушения (по прочности)	$B_G - 90$ C20			$B_G - 105$ C30			$B_G - 120$ C40		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Категория долговечности бетона									
Коэффициент интенсивности напряжений при отрыве $K_{Ic}$ , МН/м <sup>3/2</sup>	0,6	0,8	0,9	0,5	0,7	0,85	0,4	0,6	0,8
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Коэффициент интенсивности напряжений при сдвиге $K_{IIc}$ , МН/м <sup>3/2</sup>	0,7	0,9	1,05	0,6	0,8	0,95	0,5	0,75	0,95
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Критерий трещиностойкости, $K_c = \sqrt{K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2}$ , МН/м <sup>3/2</sup>	6,9	9,2	10,4	5,8	8,1	9,8	4,7	5,8	9,2
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Критерий трещиностойкости, $K_c = \sqrt{K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2}$ , МН/м <sup>3/2</sup>	8,0	10,8	12,2	6,9	9,2	11,1	6,8	8,1	11,1
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Критерий трещиностойкости, $K_c = \sqrt{K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2}$ , МН/м <sup>3/2</sup>	6,92	9,23	10,43	5,82	8,13	9,83	4,7	5,82	9,23
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	8,13	10,43	12,24	6,93	9,23	11,14	6,82	8,13	11,14

### ВЫВОД

Сформулировано понятие долговечности бетона при внешних воздействиях. Разработан метод расчета долговечности бетона с использованием подходов механики разрушения, который опирается на концепцию накопления дефектов в структуре в виде пор, капилляров и трещин.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гузев, Е. А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики / Е. А. Гузев, С. Н. Леонович, К. А. Пирадов. – Брест, 1999. – 218 с.

2. Леонович, С. Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения / С. Н. Леонович. – Минск: Тыздзень, 1999. – 266 с.

3. Снежков, Д. Ю. Неразрушающие методы оценки качества монолитного бетона / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2006. – 250 с.

4. Леонович, С. Н. Прочность конструкционных бетонов при циклическом замораживании-оттаивании с позиции механики разрушения / С. Н. Леонович. – Брест: Изд-во БрГТУ, 2006. – 380 с.

Поступила 30.05.2008

УДК 539.620.171.178-179

## ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЕ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ РАСТЯНУТЫХ АРМАТУРНЫХ ИЗДЕЛИЙ И ИХ ТЕРМОГРАФИЯ

Канд. техн. наук, доц. МОЙСЕЙЧИК Е. А.

Белорусский национальный технический университет

При деформировании металлов, других материалов поверхности разрушения излучают энергию [1] в основном инфракрасного диапазона. Изменение потока фотонов инфракрасного излучения  $\Delta\Phi$  можно получить, дифференцируя уравнение Стефана – Больцмана [2]:

$$\Delta\Phi = 13eB'T^2\Delta T. \quad (1)$$

Выражение (1) представим в виде

$$\Delta\Phi = -3eB'T^3K_m\Delta\sigma, \quad (2)$$

где  $B'$  – постоянная Стефана – Больцмана для фотонной эмиссии ( $1,52041 \cdot 10^{15}$  фотон  $\cdot$  с<sup>-1</sup>  $\cdot$  м<sup>-2</sup>  $\cdot$  К<sup>-3</sup>).

Более полно выявить и взаимоувязать процессы, происходящие при деформировании