

## ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ БЕТОНА В РАННЕМ ВОЗРАСТЕ ПРИ КАПИЛЛЯРНОЙ УСАДКЕ: АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПО ОБОБЩЕННОМУ КРИТЕРИЮ

**С. Н. Леонович**

*Белорусский национальный технический университет (Минск)*

*Аннотация.* Разработан метод расчета долговечности бетона в раннем возрасте при капиллярной усадке с использованием подходов механики разрушения, который опирается на концепцию накопления дефектов в структуре в виде пор, капилляров и трещин до их критической концентрации  $C_c$ . При этом рассматривается процесс на двух стадиях: на первой – образование и развитие дефектов, а на второй – процесс, непосредственно сопровождающий разрушения (фрагментацию) при критической концентрации дефектов.

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  $K_c = \sqrt{K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2}$ , 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 капиллярной усадки.

Базируясь на рассмотренных закономерностях процесса разрушения бетона, предложено разделить все дефекты структуры (как исходные, так и развившиеся в результате силовых и несиловых воздействий) на 5 основных типов. Содержание пор и трещин первых четырех типов зависит от пористости бетона, а типа V – 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.

Предложен новый научно обоснованный алгоритм расчета трещиностойкости при усадке бетона в раннем возрасте по обобщенному критерию, который содержит последовательность операций расчета как для целей подбора состава с учетом влияющих на капиллярное давление факторов и по характеристикам свойств компонентов бетона, его технологическим параметрам, так и для определения остаточного ресурса бетона по его составу и свойствам, а также по образцам, отобраным из конструкций в раннем возрасте.

*Ключевые слова:* алгоритм; расчет; трещиностойкость; пластический бетон (в раннем возрасте); капиллярная усадка; обобщенный критерий; коэффициент интенсивности напряжений.

### 1. Определение основных характеристик трещиностойкости бетона на любом уровне его иерархического строения

Коэффициенты интенсивности напряжений в вершине трещиновидного дефекта в

материале, структура которого содержит другие микро- и макроповреждения, отражают в своем численном значении влияние этих повреждений на напряженно-деформированное состояние как вокруг дефекта, так и всего

объема материала. Учесть это суммарное влияние возможно, рассмотрев все микро- и макродефекты на всех уровнях иерархического строения композита. Каждая из пор и трещин в бетоне создает некое поле напряжений вокруг себя. Если считать, что эти поры и трещины располагаются в объеме бетона с некоторой периодичностью, поля напряжений и деформаций накладываются друг на друга, что создает сложное напряженно-деформированное состояние.

Базируясь на рассмотренных выше [1, 10] закономерностях процесса разрушения бетона, разделим 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 (тип I);

4 – краевые трещиновидные дефекты (тип II);

5 – радиальные и контактные трещины вокруг зерен и включений (типы III и IV).

Содержание пустот – пор и трещин видов 1...4 – зависит от пористости бетона, а вида 5 – от объемного содержания зерен мелкого или крупного заполнителя, причем эти трещины на границе цементного камня и зерен заполнителя характеризуют мезо- и макроуровень рассмотрения структуры бетона. Объемное содержание каждого вида пустот – пор и трещин – в зависимости от пористости материала и объемного содержания заполнителя определяется экспериментально. Каждому виду повреждений соответствует свое значение коэффициента интенсивности напряжений, степень влияния и величина которого на общую трещиностойкость материала зависит от количества данного вида пор и трещин в объеме бетона. Применяя принцип независимости действия сил и счи-

тая, что пустоты – поры и трещины – распределены равномерно по всему объему материала, можно записать:

- для субмикро-, микро- и мезоуровней

$$K_1 = n_1 K_1^1 + n_2 K_1^2 + n_3 K_1^3 + (1 - n_1 - n_2 - n_3) K_1^4, \quad (1)$$

где  $K_1^1, K_1^2, K_1^3, K_1^4$  – коэффициенты интенсивности напряжений соответственно в вершинах микродефектов 1, 2, 3 и 4 видов;  $n_1, n_2, n_3$  – содержание микродефектов 2 и 3 видов в общем количестве микроповреждений;

- для мезо- и макроуровней

$$K_1 = n_1 K_1^1 + n_2 K_1^2 + n_3 K_1^3 + n_4 K_1^4 + (1 - n_1 - n_2 - n_3 - n_4) K_1^5, \quad (2)$$

где  $K_1^5$  – коэффициент интенсивности напряжений в вершинах радиальных и контактных трещин на границе с зернами мелкого и крупного заполнителей;  $n_4$  – содержание краевых трещин в общем количестве повреждений.

Величины  $K_1^1 \dots K_1^5$  вычисляются по таблице 1 в зависимости от содержания пустот – пор и трещин – данного вида в общем количестве повреждений. Тогда окончательно:

- для субмикро-, микро- и мезоуровней

$$K_1 = p\sqrt{\pi} \{n_1 A \sqrt{L_1(1 + R/(R + L_1))} + n_2 B \sqrt{a + L_2} + n_3 C \sqrt{L_3} + (1 - n_1 - n_2 - n_3) D \sqrt{L_4}\}, \quad (3)$$

где  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м,  $L_1 = 1 \cdot 10^{-8}$  м,  $L_2 = 1 \cdot 10^{-8}$  м,  $L_3 = 5 \cdot 10^{-5}$  м,  $L_4 = 5 \cdot 10^{-5}$  м,  $a = 5 \cdot 10^{-6}$  м,  $L_1 \dots L_4$  – полудлина (длина) дефектов или пустот – пор,  $A, B, C, D$  – коэффициенты, приведенные в таблице 1 над чертой;

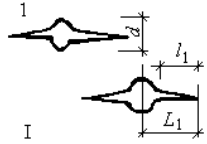
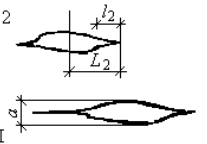
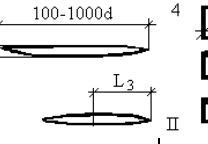
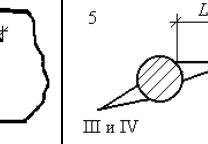

- для мезо- и макроуровней

$$K_1 = p\sqrt{\pi} \{n_1 A \sqrt{L_1(1 + R/(R + L_1))} + n_2 B \sqrt{a + L_2} + n_3 C \sqrt{L_3} + n_4 D \sqrt{L_4} + (1 - n_1 - n_2 - n_3 - n_4) E \sqrt{L_5/2}\}, \quad (4)$$

где  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м,  $L_1 = 1 \cdot 10^{-8}$  м,  $L_2 = 1 \cdot 10^{-8}$  м,  $L_3 = 5 \cdot 10^{-3}$  м,  $L_4 = 5 \cdot 10^{-3}$  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;  $E$  – коэффициент, приведенный в таблице над чертой.

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

Содержание пор $n_1 \dots n_5, \%$	1	2	3	4	5
					
	$K_{IC} = \sigma_e \sqrt{\pi l_1 (1 + d/L_1)}$	$K_{IC} = \sigma_e \sqrt{\pi l_2 (a + l_2)}$ $K_{IC} = \sigma_e \sqrt{\pi l_2 (1 + d/L_2)}$	$K_{IC} = \sigma_e \sqrt{\pi l_3}$ $K_{IIc} = C \tau \sqrt{\pi l_3}$	$K_{IC} = \sigma_e \sqrt{\pi l_4}$ $K_{IIc} = D \tau \sqrt{\pi l_4}$	$K_I = \sigma_e \sqrt{\pi l_5 / 2}$ $K_{IIc} = E \tau \sqrt{\pi l_5 / 2}$
	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

Величину  $K_{II}$  можно определить по коэффициентам  $C, D$  и  $E$ , приведенным в таблице под чертой. Отметим, что сдвиговые напряжения в вершинах пустот – пор типов 1 и 2 не возникают. Тогда

- на субмикро-, микро- и мезоуровнях

$$K_{II} = n_3 K_{II}^3 + (1 - n_3) K_{II}^4, \quad (5)$$

- на мезо- и макроуровнях

$$K_{II} = n_3 K_{II}^3 + n_4 K_{II}^4 + (1 - n_3 - n_4) K_{II}^5, \quad (6)$$

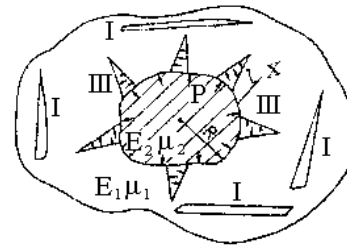
где характерные размеры трещин 3...5 принимаются для каждого из уровней рассмотрения в соответствии с (1) и (2).

Константу материала  $K_C$  определяем по формуле

$$K_C = \sqrt{\sum K_I^2 + \sum K_{II}^2}. \quad (7)$$

## 2. Усадочные трещины в зоне контакта матрицы и заполнителя

В результате капиллярных процессов происходят некоторые деформации в гидратированной массе, свободному течению которых мешают негидратированные жесткие зерна, модуль упругости которых больше, чем модуль упругости гидратированной массы. Тогда трещину III и систему сил, вызывающую ее развитие, представим, как показано на рисунке 1.



**Рис. 1. Радиальные трещины в гидратированной массе**

Давление  $p$  найдем из формулы

$$p = \varepsilon_{gm}^I E_{gm}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{gm}^I$  определится для каждого диапазона температур по формуле

$$\varepsilon_{gm}^{I1} = [\sigma_0 \pi \alpha_c \cos \theta (1 - t/370) + \alpha_{t,cs} \Delta t E_{cs} l_c^{I1} g_c - 2a_{t,w} \Delta t E_w g_c \times (l_c^{I1}/2 - b_c)] G_{Ic} / [l_c^{I1} a_c^{I1} (K_{I,t}^{I1})^2]. \quad (9)$$

Тогда величину  $K_{I,t}^{III}$  определим из выражения

$$K_{I,t}^{III} = p \sqrt{\pi l} \left\{ \frac{[1 - \alpha(r)] f(l/R) (M - R)^2}{(M - R)^2 - r^2} \right\} \times (1 + g), \quad (10)$$

где  $\alpha(r) = 2(1 - \mu_1)r / \{r^2 + (1 - 2\mu_1)(M - R)^2 + [(M - R)^2 - r^2] \times$   
 $\times (1 - \mu_2)(M - R)E_1 / [(1 + \mu_1)(M - R - l)E_2]\}$ ;  
 $g = (1,7 + 14\alpha_o)l / (M - 2R)$ ;  $r = l + R$ ;  
 $\alpha_o = G_1 / G_2$ ;  $G_1$  – модуль сдвига матрицы;  
 $G_2$  – модуль сдвига заполнителя;  
 $f(l/R) = 2,26 - l/R \cdot 0,15$ ;  $R$  – средний радиус негидратированного зерна;  $M$  – расстояние между зёрнами;  $l$  – длина радиальной трещины.

Ширина раскрытия такой трещины определяется по формуле

$$a_{crc}^{III} = (2\pi / E_1) p g_c \times \ln \left[ \frac{(l - \sqrt{l^2 - R^2})}{(l + \sqrt{l^2 - R^2})} \right]. \quad (11)$$

Если вычисленные по (9) деформации имеют отрицательные значения, то в гидратированном пространстве происходит сжатие и трещина возникает на контуре соединения негидратированного зерна и гидратированной массы (рис. 2) – индекс III. Тогда длина трещины определяется центральным углом.

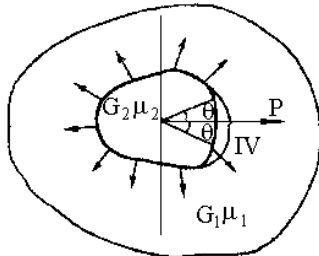


Рис. 2. Контактные трещины на границе «негидратированное зерно – гидратированная масса»

Рассмотрим напряженное состояние в контактной трещине на границе крупного заполнителя и цементно-песчаного раствора. Пусть на контуре соединения кругового включения и бесконечной плоскости имеется

Для нашего случая

$$K_{I,II}^{IV} = 2p(1 + \alpha)^{-1} \sqrt{\pi R \sin \theta} \{G_2(1 + \chi_1)[G_2(1 + \chi_1) + G_1(1 + \chi_2)] \cdot e^{\beta(\theta + \pi)}\} / \{(G_2 + G_1\chi_2)[G_1(1 + \chi_2) + 2G_2(1 + \chi_1)] - G_1(1 + \chi_2)(G_1 + G_2\chi_1)(\cos \theta - 2\beta \sin \theta)e^{-2\beta\theta}\} \quad (13)$$

трещина (рис. 3). КИН при действии на бесконечности растягивающих напряжений  $\sigma$  связаны зависимостью, полученной А. Перлманом и Дж. Си [11]:

$$K_I - iK_{II} = 2i\sigma R^{\beta} (1 + \alpha)^{-1} \sqrt{\pi R \sin \theta} \times \{G_1(1 + \chi_2)[G_1(1 + \chi_2) + G_2(1 + \chi_1)] \times (i - 2\beta) e^{\beta(\theta + \pi)} e^{-i\beta \ln 2 \sin \theta}\} / \{(G_1 + G_2\chi_1) \times [G_2(1 + \chi_1) + 2G_1(1 + \chi_2)] - G_2(1 + \chi_1) \times (G_2 + G_1\chi_2)(\cos \theta - 2\beta \sin \theta)e^{-2\beta\theta}\}, \quad (12)$$

где  $\beta = (1/2\pi) \ln \alpha$ ;  $\alpha = (G_1 + G_2\chi_1) / (G_2 + G_1\chi_2)$ ;  
 $G = E/2(1 + \mu)$  – модуль сдвига;  $E$  – модуль Юнга;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\chi = (3 - 4\mu)$  – для плоской деформации;  $\chi = (3 - \mu) / (1 + \mu)$  – для обобщенного плоского напряженного состояния.

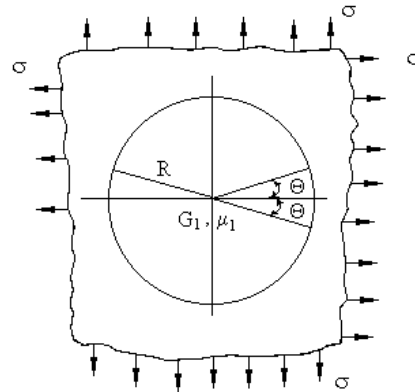


Рис. 3. Всестороннее растяжение конечной пластины с круговым включением и трещиной на линии раздела сред

Задачи о дугообразных трещинах на контуре кругового включения в бесконечной пластине изучались в работах Д. В. Грилицкого, И. А. Прусова, Ингланда, Л. Т. Бережницкого, В. В. Панасюка, Г. П. Черепанова [12]. Рассматривались также трещины на контуре жесткого эллиптического и квадратного включения [12].

$$K_{IIc}^{IV} = 2pR^\beta(1+\alpha)^{-1}\sqrt{\pi R \sin\theta} \{G_2(1+\chi_1)[G_2(1+\chi_1)+G_1(1+\chi_2)] \times \\ \times (1-2\beta)e^{\beta(\theta+\pi)}e^{-\beta \ln 2 \sin\theta}\} / (G_2+G_1\chi_2)[G_1(1+\chi_2)+2G_2(1+\chi_1)] - \\ - G_1(1+\chi_2)(G_1+G_2\chi_1)(\cos\theta-2\beta\sin\theta)e^{-2\beta\theta}. \quad (14)$$

Таким образом, предложенный математический аппарат позволяет произвести расчет усадочных напряжений в бетоне в раннем возрасте с различными видами заполнителей.

### 3. Алгоритм расчета трещиностойкости (долговечности) бетона в раннем возрасте при капиллярной усадке по обобщенному критерию

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

В качестве теоретической основы метода приняты физические представления о механизме приращения объема пустотности трещин в модели бетона, представленной как двухуровневая структура: матрица твердеющего 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  $K_c = \sqrt{K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2}$ , 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 капиллярной усадкой.

Алгоритм расчета трещиностойкости при усадке содержит последовательность операций как для подбора состава по известным влияющим на капиллярное давление факторам и характеристикам свойств компонентов бетона, его технологическим параметрам в раннем возрасте, так и для определения остаточного ресурса бетона по образцам, отобраным из конструкций в раннем возрасте в условиях твердения.

Алгоритм включает в себя:

1) исходные данные о проектных параметрах внешних воздействий: силовых ( $N$ ,  $M$ ,  $Q$ ) и несиловых ( $t$ ,  $W$ ,  $P$ ) воздействий; о характеристиках компонентов бетона: цемента ( $R_c$ ), заполнителя ( $R_a$ ), химических добавок;

2) данные о свойствах бетона, его прочности  $R_b$  и  $R_{bt}$ , упругости  $E_b$ , трещиностойкости  $R_{crc}^0$  и  $R_{crc}^v$  в раннем возрасте;

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

4) операции по расчету  $K_{Ii}^b$ ,  $K_{IIi}^b$  в вершинах дефектов I-V вида при капиллярной усадке;

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

6) расчет предельного значения КИН для данного состава;

7) расчет модуля упругости  $E_b$  для данного состава;

8) расчет долговечности бетона с учетом усадки (термовлажностных воздействий);

9) операции оценки результата и корректировки состава;

Алгоритм расчета долговечности представлен на рисунке 4.

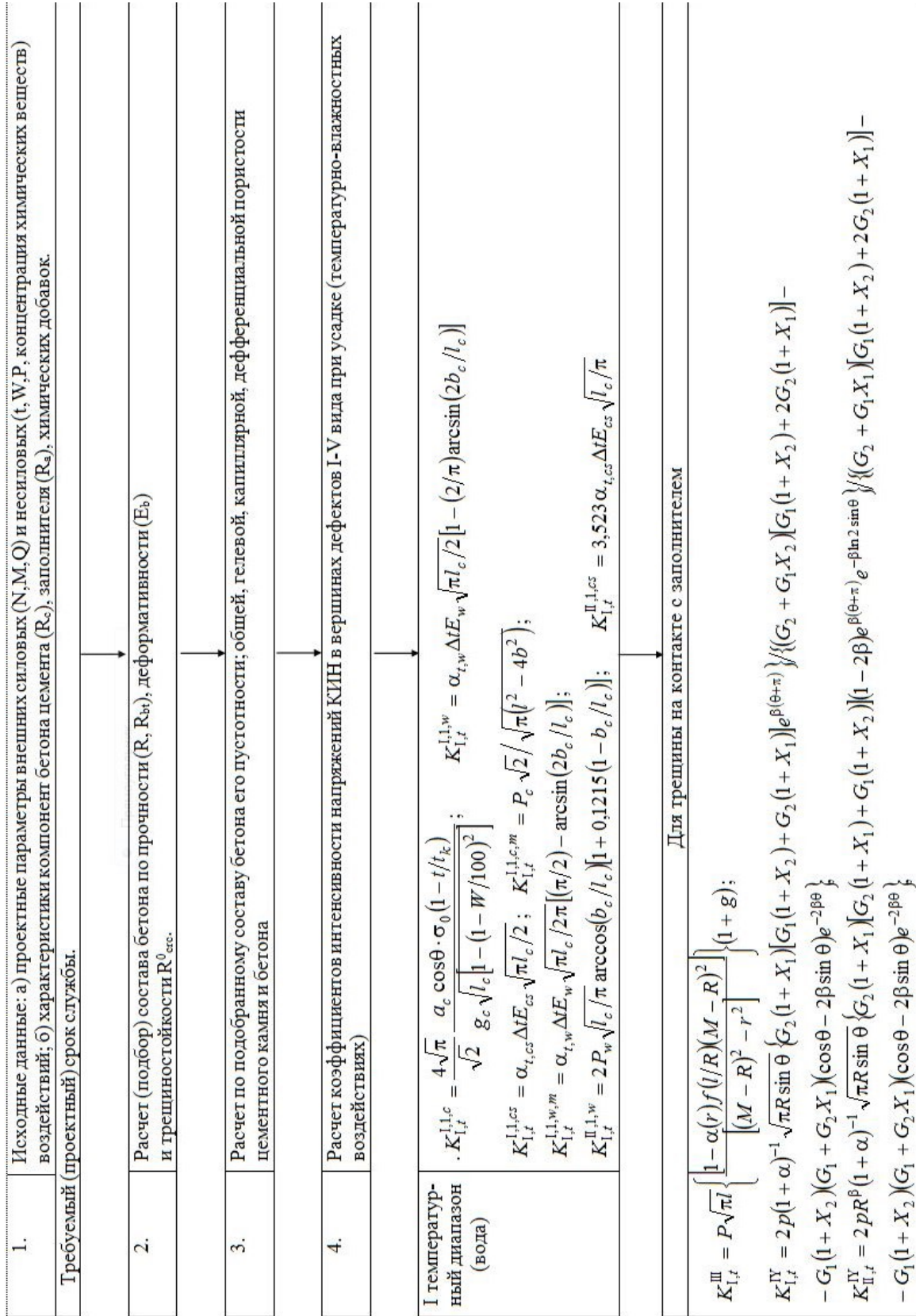


Рис. 4. Алгоритм расчета трещиностойкости (долговечности) бетона в раннем возрасте изготавливаемых конструкций при капиллярной усадке (начало)

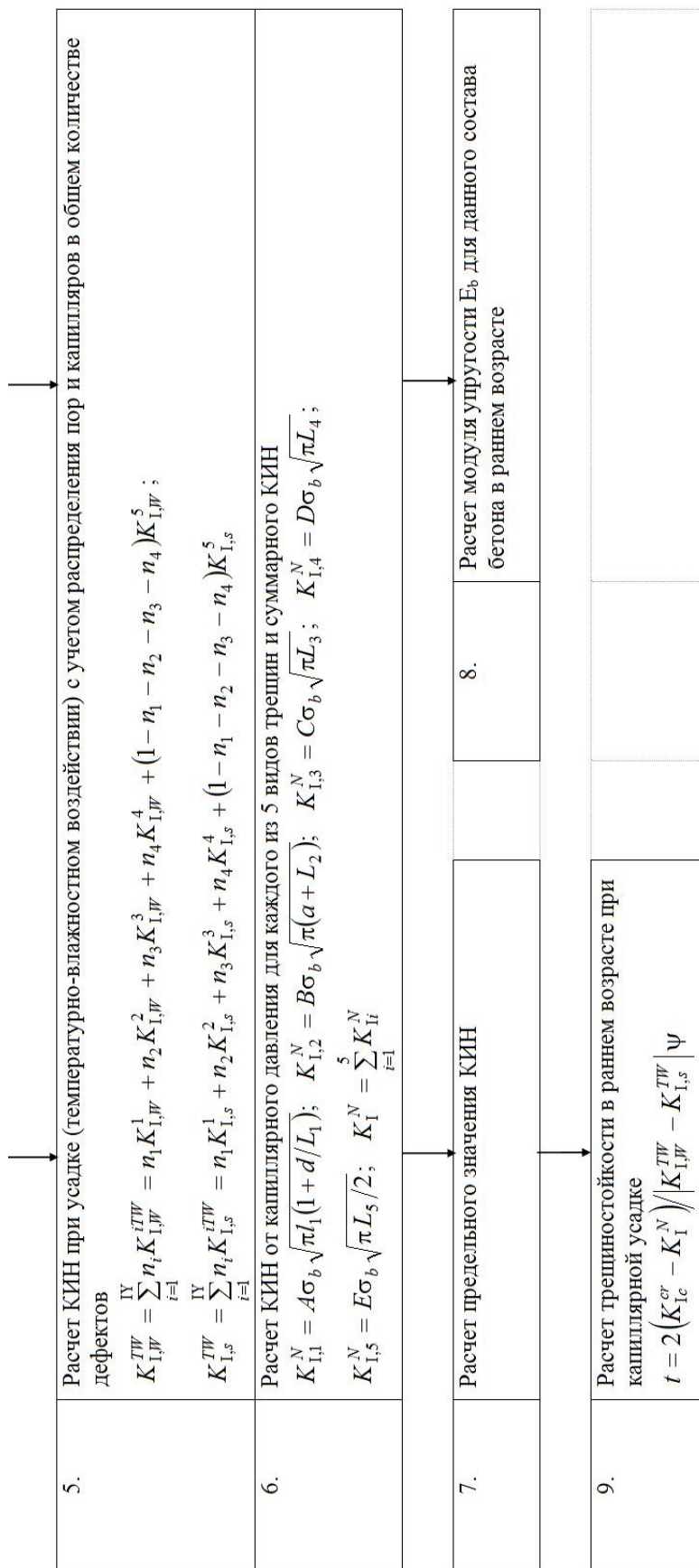


Рис. 4. Алгоритм расчета трещиностойкости (долговечности) бетона в раннем возрасте изготавливаемых конструкций при капиллярной усадке (окончание)

**Выводы**

1. При теоретическом обосновании метода расчета трещиностойкости при капиллярной усадке бетона в раннем возрасте с использованием подходов механики разрушения по обобщенному критерию сформулированы основные допущения.

2. Разработанная модель является иерархической системой, пригодной для описания процессов разрушения (деструкции) бетона в раннем возрасте 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 (при усадке).

3. Базируясь на рассмотренных закономерностях процесса разрушения бетона, предложено разделить все дефекты структуры (как исходные, так и развившиеся в результате силовых и несиловых воздействий) на 5

основных типов. Содержание пор и трещин первых четырех типов зависит от пористости бетона, а типа V – 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.

4. Предложен новый научно обоснованный алгоритм расчета трещиностойкости при усадке бетона в раннем возрасте по обобщенному критерию, который содержит последовательность операций расчета как для целей подбора состава с учетом влияющих на капиллярное давление факторов и по характеристикам свойств компонентов бетона, его технологическим параметрам, так и для определения остаточного ресурса бетона по его составу и свойствам, а также по образцам, отобранным из конструкций в раннем возрасте.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Леонович С. Н. Капиллярная усадка и трещинообразование бетона в раннем возрасте // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2017. № 3. С. 22-33.
2. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при коррозионных и температурных воздействиях: монография: в 2 ч. / С. Н. Леонович [и др.], под ред. С. Н. Леоновича. Минск: БНТК, 2016. 597 с.
3. The influence of carbon dioxide on the durability of offshore concrete structures / S. Leonovich, E. Shalyi, N. Falaleeva, L. Kim // International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE-2016. Rhodes, Greece. 2016. June 26 – July 1.
4. Frost destruction and fracture mechanics of concrete / S. Leonovich, Yu. Zaitsev, V. Tsuprik, L. Kim // Полярная механика: материалы третьей междунар. конфер., 27-30 сентября 2016, Владивосток / науч. ред. А. Т. Беккер; Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. [1096 с.]. С. 687-693.
5. Снежков Д. Ю., Леонович С. Н. Мониторинг возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами: монография. Минск: БНТУ, 2016. 331 с.
6. Контроль железобетонных конструкций неразрушающими методами: монография / Д. Ю. Снежков, А. Т. Беккер, С. Н. Леонович, Л. В. Ким: Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. 137 с.
7. Зайцев Ю. В., Леонович С. Н., Шнайдер У. Структура, прочность и механика разрушения бетонов при двухосном и трехосном сжатии: монография. Минск: БНТУ, 2011. 382 с.
8. Эберхардштайнер Й., Леонович С. Н., Зайцев Ю. В. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционных строительных материалов при сложном напряженном состоянии: монография. Минск: БНТУ, 2013. 522 с.
9. Леонович С. Н., Литвиновский Д. А., Ким Л. В. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при воздействии высоких температур: монография / Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2015. 148 с.
10. Двухсолитонное решение задачи о разупрочняющемся стержне / Г. В. Земляков, М. А. Князев, Е. Е. Трофименко, С. Н. Леонович // Доклады НАН РБ. 2012. Т. 56, № 3. 3 с.



11. Sih G. C. Handbook of stress intensity factors. Bethlehem: Lehigh University Press. Vol. 1. 420 p.
12. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.

### Информация об авторе

*ЛЕОНОВИЧ Сергей Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры технологии строительного производства, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь. Область научных интересов – долговечность железобетонных конструкций, механика разрушения бетона и железобетона при эксплуатации в условиях температурно-влажностных и коррозионных воздействий. E-mail: sleonovich@mail.ru

UDC 666.972.16

## PLASTIC CONCRETE CRACK RESISTANCE IS UNDER CAPILLARY SHRINKAGE: ALGORITHM OF CALCULATION USING GENERALIZING CRITERIA

**S. N. Leonovich**

*Belarusian National Technical University (Minsk)*

*Abstract.* The method of calculation of durability of concrete at early age is developed at capillary shrinkage with use of approaches of mechanics of destruction which is guided by the concept of accumulation of defects in structure in the form of capillaries and cracks to their critical concentration of  $S_s$ . At the same time process at two stages is considered: on the first – process of formation and development of defects and on the second – the process which is directly accompanying destructions (fragmentation) at critical concentration of defects.

As a theoretical basis of a method physical ideas of the mechanism of an increment of volume of hollowness of cracks in the model of concrete presented as two-level structure are accepted: a matrix of the hardened cement stone with inclusions and emptiness of various form (crack) as result of the external influences changing the intense deformed state.

The main settlement criterion of a method – the generalized total parameter of crack resistance  $K_c = \sqrt{K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2}$  calculated on the basis of model schemes of development, association, localization of system of cracks, their classification by types and relative quantity in volume at the initial concentration increasing to critical that is caused by physical processes of capillary shrinkage is established.

Being based on the considered regularities of process of destruction of concrete, it is offered to divide all defects of structure, both initial, and developed as a result of power and not power influences, into 5 main types. The maintenance of a time and cracks of the first four types depends on porosity of concrete, and type V – and on the volume content of grains of small or large filler. To each type of damages there corresponds the coefficient of intensity of tension, extent of influence and which size on the general crack resistance of material depend on quantity of this type of a time and cracks in volume of concrete.

The new evidence-based algorithm of calculation of crack resistance at shrinkage of concrete at early age by the generalized criterion which contains the sequence of operations of calculation as for selection of structure taking into account the factors influencing capillary pressure and according to characteristics of properties of components of concrete, his technological parameters, and for definition of a residual resource of concrete on its structure and properties, and also on the samples which are selected from designs at early age is offered.

*Keywords:* algorithm; calculation; crack; resistance; plastic (early age) concrete; capillary shrinkage; generalizing criteria; stress intensity factor.

## REFERENCES

1. Leonovich S. N. Kapilljarnaya usadka i treshhinoobrazovanie betona v rannem vozraste [Capillary shrinkage and cracking of concrete at an early age], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Ser.: "Materialy. Konstrukcii. Tehnologii"* [Vestnik of the Volga State University of Technology. Series "Materials. Design. Technologies"], 2017, No. 3, pp. 22-33.
2. Leonovich S. N. et al. Prochnost', treshhinostojkost' i dolgovechnost' konstrukcionnogo betona pri korrozionnyh i temperaturnyh vozdeystvijah: monografija: v 2 ch. [Strength, crack resistance and durability of structural concrete under corrosion and temperature effects: monograph in 2 parts], pod red. S.N. Leonovicha, Minsk: BNTK, 2016, 597 p.
3. Leonovich S., Shalyi E., Falaleeva N., Kim L. The influence of carbon dioxide on the durability of offshore concrete structures, *International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE-2016*, Rhodes, Greece, 2016, June 26 – July 1.
4. Leonovich S., Zaitsev Yu., Tsuprik V., Kim L. Frost destruction and fracture mechanics of concrete, *Poljarnaja mehanika: materialy tret'ej mezhdunar. konfer.* [Polar mechanics: Proceedings of the third international conference], 27-30 sentjabrja 2016, Vladivostok, nauch. red. A. T. Bekker; Inzhenernaja shkola DVFU, Vladivostok: Dal'nevost. federal. un-t, 2016. [1096 p.], pp. 687-693.
5. Snezhkov, D. Yu., Leonovich S. N. Monitoring vozvodimyh i jekspluatiruemyh zhelezobetonyh konstrukcij nerazrushajushhimi metodami: monografija [Monitoring of installed and operated reinforced concrete structures by non-destructive methods]: monograph, Minsk: BNTU, 2016, 331 p.
6. Snezhkov D. Yu., Bekker A. T., Leonovich S. N., Kim L. V. Kontrol' zhelezobetonyh konstrukcij nerazrushajushhimi metodami: monografija [Control of reinforced concrete structures by non-destructive methods: monograph], *Inzhenernaja shkola DVFU* [Engineering School of Far-Eastern Federal University], Vladivostok: Dal'vost. federal. un-t, 2016, 137 p.
7. Zaitsev U. V., Leonovich S. N., Schneider, W. Struktura, prochnost' i mehanika razrushenija betonov pri dvuhosnom i trehosnom szhatii: monografija [The structure, strength and fracture mechanics of concrete under biaxial and triaxial compression], Minsk: BNTU, 2011, 382 p.
8. Eberhardsteiner J., Leonovich S. N., Zaitsev Yu. V. Prochnost', treshhinostojkost' i dolgovechnost' konstrukcionnyh stroitel'nyh materialov pri slozhnom naprjazhennom sostojanii: monografija [Strength, crack resistance and durability of structural building materials in a complex stress state: monograph], Minsk: BNTU, 2013, 522 p.
9. Leonovich S. N., Litvinovsky D. A., Kim, L. V. Prochnost', treshhinostojkost' i dolgovechnost' konstrukcionnogo betona pri vozdeystvii vysokih temperatur: monografija [Strength, crack resistance and durability of structural concrete at high temperatures: monograph], *Inzhenernaja shkola DVFU* [Far-Eastern Federal University School of Engineering], Vladivostok: Dal'nevostochnyj federal'nyj universitet, 2015, 148 p.
10. Zemlyakov G. V., Knyazev M. A., Trofimenko E. E., Leonovich S. N. Dvuhosolitonnoe reshenie zadachi o razuprochnjajushhemsja sterzhne [Two-soliton approach to stud weakening], *Doklady NAN RB* [Reports of the national Academy of Sciences of Belarus], 2012, T. 56, No. 3, 3 p.
11. Sih G. C. Handbook of stress intensity factors, Bethlehem: Lehigh University Press, Vol. 1, 420 p.
12. Cherepanov G. P. Mehanika hrupkogo razrushenija [Mechanics of brittle fracture], Moscow: Nauka, 1974, 640 p.

**Information about the author**

*LEONOVICH Sergei Nikolaevich* – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction Production Technology, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus. Scientific interests – durability of reinforced concrete constructions, mechanics of concrete destruction under temperature-humidity and corrosion impact. E-mail: sleonovich@mail.ru

**Библиографическая ссылка**

Леонович С. Н. Трещиностойкость бетона в раннем возрасте при капиллярной усадке: алгоритм расчета по обобщенному критерию // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 1(5). – С. 42-51.