

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Технология строительного производства»

**РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА  
ПРИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ, ВЛАЖНОСТНЫХ И СИЛОВЫХ  
ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ОСНОВЕ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ**

**Методические указания  
для студентов строительных специальностей**

М и н с к 2 0 0 4

УДК 624.05.4.35

Настоящее издание содержит методы расчета долговечности бетона для проектирования бетонных и железобетонных конструкций по параметрам механики разрушения при заданных условиях температурно-влажностных и силовых воздействий и сроках безремонтной эксплуатации.

Методические указания предназначены для студентов специальности «Промышленное и гражданское строительство».

Составители:

С.Н. Леонович, О.В. Попов, К.А. Пирадов

Рецензенты:

Т.М. Пецольд, Н.Д. Банников

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Под долговечностью бетона понимается *состояние* его структурной сплошности, количество структурных связей и их разрывов, микро- и макродефектов – трещин в цементном камне, зонах его контакта с заполнителями, *обеспечивающее сопротивление* кратковременным и длительным силовым и несиловым воздействиям и характеризуемое уровнями *докритической трещиностойкости*  $K_I(t)$ ,  $K_{II}(t)$  в пределах времени безремонтной эксплуатации  $t$ . Условием, обеспечивающим требуемую долговечность бетона, является

$$\begin{cases} K_I(t) < K_{Ic}(t); \\ K_{II}(t) < K_{IIc}(t). \end{cases}$$

Предельное состояние по долговечности бетона (нормативный срок безремонтной эксплуатации по категориям  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) оценивается по вычисленным критическим значениям  $K_{Ic}^{(t)}$ ,  $K_{IIc}^{(t)}$  – коэффициентов интенсивности напряжений и критерию трещиностойкости  $K_c$  (табл. 1) и характеризуется критической концентрацией микро- и макродефектов – трещин в каноническом объеме (образце  $0,001 \text{ м}^3$  с линейными размерами  $3-5D$ ,  $D$  – размер зерна крупного заполнителя) либо формированием и стартом магистральных критических трещин нормального отрыва ( $\ell_{Ic}$ ,  $a_{Ic}$ ) или поперечного сдвига ( $\ell_{IIc}$ ,  $a_{IIc}$ ) в рабочих сечениях элементов.

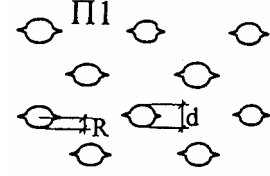
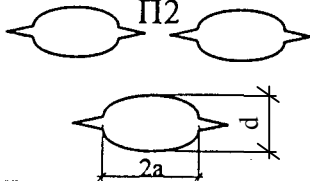
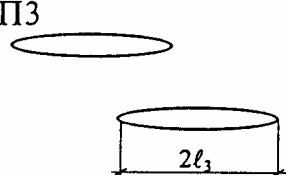
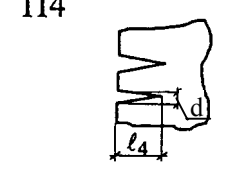
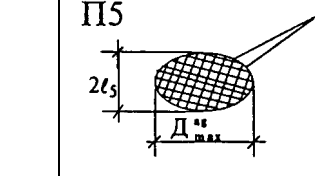
Экспериментальные величины параметров трещиностойкости бетона  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $\ell_{crc}$ ,  $a_{crc}$  определяются по ГОСТ 29.167-91 «Бетоны. Методы определения трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении».

Теоретические значения параметров трещиностойкости  $K_I$ ,  $K_{II}$  при заданных режимах силовых и температурно-влажностных воздействий на бетон вычисляются по формулам настоящего издания. При этом длительное воздействие силовых и температурно-влажностных нагрузок, проявляемое в изменении уровня сплошности в структуре бетона и увеличении количества дефектов-трещин, характеризуется мерой ползучести бетона  $C(t, 28)$ .

Методы расчета долговечности бетона позволяют:

- определить состояние докритической трещиностойкости бетона  $K_I$ ,  $K_{II}$  с известной порово-капиллярной структурой в пределах проектного срока  $t$  при заданных параметрах силовых и несиловых воздействий;
- подобрать оптимальную структуру и состав бетона требуемой долговечности на проектный срок эксплуатации в заданных условиях силовых и температурно-влажностных воздействий;
- определить остаточную долговечность бетона после эксплуатации конструкций в условиях силовых и температурно-влажностных воздействий

## Содержание пор

Характеристики		I	II	III	IV	V
пористость	объемное содержание заполнителя $\varphi_{ц}$	П1	П2	П3	П4	П5
						
1	2	3	4	5	6	7
0,02	0	40	30	25	5	0
	0,1	38	28	24	5	5
	0,2	36	26	24	4	10
	0,3	34	24	23	4	15
	0,4	33	23	20	4	20
0,04	0	30	30	30	10	0
	0,1	28	28	29	9	6
	0,2	26	26	28	8	12
	0,3	25	25	25	7	13
	0,4	24	24	23	5	24
0,06	0	30	26	25	16	0
	0,1	26	26	26	15	7
	0,2	24	24	25	13	14
	0,3	22	22	23	12	21
	0,4	20	20	21	11	28

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
0,08	0	29	26	26	19	0
	0,1	25	25	25	17	8
	0,2	23	23	23	15	16
	0,3	20	20	21	15	24
	0,4	19	15	20	14	32
0,10	0	28	27	25	20	0
	0,1	27	24	21	19	9
	0,2	26	20	20	15	18
	0,3	22	19	16	16	27
	0,4	20	18	16	10	36
0,012	0	27	23	25	25	0
	0,1	26	20	22	22	10
	0,2	22	18	21	19	20
	0,3	20	17	19	14	30
	0,4	18	14	18	16	44

## 2. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК НОРМАТИВНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА СФОРМИРОВАВШЕЙСЯ СТРУКТУРЫ

Исходные данные для расчета: состав бетона (классы по энергии разрушения и прочности), внешние силовые и несиловые воздействия, вызывающие напряжения в устьях дефектов структуры и определяющие безремонтный срок эксплуатационной пригодности бетона, используемые для расчета-прогноза его долговечности.

A – несиловые воздействия:

$T$  – температура среды в заданном режиме, вызывающая напряжения в структуре вследствие разности коэффициентов линейного температурного расширения компонентов в трех диапазонах: I –  $T < 0^{\circ}\text{C}$ ; II –  $0^{\circ}\text{C} \leq T < 100^{\circ}\text{C}$ ; III –  $T > 100^{\circ}\text{C}$ ;

$W$  – влажность (относительная) среды в стационарном режиме в трех формах, соответствующих температурным диапазонам;

B – силовые воздействия:

$N$  – внешние статические нагрузки при стационарных режимах, создающие напряжения в устьях трещиноподобных дефектов структуры, кН.

**Исходные характеристики поровой структуры затвердевшего бетона**

Исходными характеристиками поровой структуры являются результаты определений методами ртутной порометрии, расчетно-весовым методом и расчетным методом:

объем пор геля в единице объема цементного камня вычисляется по формуле

$$\Pi_r = 0,19 \alpha \rho_{\text{ц}} / (1 + \rho_{\text{ц}} B / m);$$

объем капилляров в цементном камне вычисляется по формуле

$$\Pi_k = \rho_{\text{ц}} (B/m - 0,42 \alpha) / (1 + \rho_{\text{ц}} B / m);$$

общий объем пор в образце цементного камня вычисляется по формуле

$$\Pi_o = \text{Ц} (B/\text{Ц} - 0,23 \alpha);$$

общая пористость бетона вычисляется по формуле

$$П_{о.б.} = [(B - 0,23 \alpha Ц) + (1 - \delta) \cdot 1000];$$

открытая пористость бетона

$$П_{о.б.} = W_{о.ц.к.} \cdot \varphi_{ц.к.},$$

где  $\alpha$  – степень гидратации цемента, равная 0,65...0,8;

$\rho_{ц} = 3,15 \text{ г/см}^3$  – объемная масса цемента;

Ц – масса цемента;

$m = Ц + Д$ ;

Д – масса активных добавок;

$W_{о.ц.к.}$  – водопоглощение цементного камня;

$\varphi_{ц.к.}$  – относительное содержание цементного камня в бетоне;

$$\delta = \varphi_{щ} + \varphi_{п} + \varphi_{ц} + \varphi_{в},$$

где  $\varphi_i$  – соответственно относительное содержание в бетоне щебня, песка, цемента, воды.

Диапазон размеров диаметров пор, капилляров, трещин в их вершинах и цементном камне, пустот и зерновых полостей находится в пределах от 100 ангстремов до 10 мм и для целей упрощения расчетного подхода условно разделен на пять групп П-1 ... П-5 (см. табл. 1).

В каждой группе П-1 ... П-5 в зависимости от общей пористости бетона и объемного содержания в нем щебня и цементного камня условно дифференцировано количество дефектов в их вероятностной связи с размерами (по диаметрам и длине) при 100 % их общем количестве в единичном объеме.

Расчетные данные по условно дифференциальной пористости бетона приведены в табл. 1, а в табл. 2 – условные размеры дефектов 1...5 для различных уровней рассмотрения структуры бетона.

Условные размеры дефектов в структуре бетона

Уровень рассмотрения структуры	Размеры дефектов структуры, м					
	$d$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$
Микроуровень	$10^{-8}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
Мезоуровень	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
Макроуровень	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$

Примечание: уровень рассмотрения структуры принимается в зависимости от объема или линейных размеров элемента, в которых определяется долговечность бетона; для локальных дефектов и микрообъемов с размерами до 0,1 м – микроуровень; от 0,1 до 1 м – мезоуровень и свыше 1 м – макроуровень.

В каждом микродефекте структуры имеются трещиновидные устья, и в их вершинах интенсивность напряжений от усилий, создаваемых несилowymi и силовыми воздействиями, определяется из условия независимости действия сил. При этом «заполненность» дефекта структуры водой, паром, льдом определяется параметром  $W$  в пределах температурных диапазонов I – III.

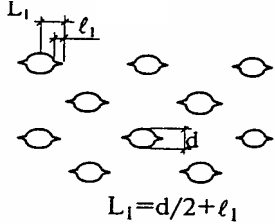
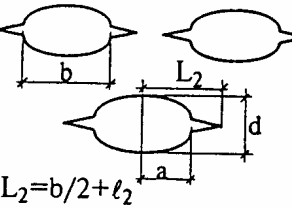
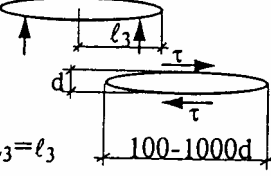
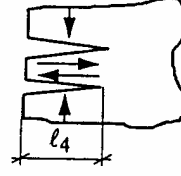

При силовых и несилowych воздействиях напряженное состояние в вершине трещин каждого дефекта структуры определяется коэффициентом интенсивности напряжений при нормальном отрыве  $K_I$  и поперечном сдвиге  $K_{II}$ . В микродефектах 1-й и 2-й группы при параметрах длины, близкой к размерам диаметра, значения  $K_{II}$  малозначимы.

Коэффициенты интенсивности напряжений  $K_I^1 \dots K_I^5$  для каждого из пяти видов микро- и макродефектов при силовых воздействиях (напряжения  $\rho$  и  $\tau$ ) определяются с учетом данных табл. 1 по табл. 3.



Таблица 3

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

Содержание пор П <sub>1</sub> ...П <sub>5</sub> , %	I	II	III	IV	V
					
	$K_{IC} = A\sqrt{\pi l_1 \left(1 + \frac{d}{L_1}\right)}$	$K_{IC} = Bp\sqrt{\pi(a + L_2)}$	$\frac{K_{IC} = Cp\sqrt{\pi L_3}}{K_{II} = C\tau\sqrt{\pi L_3}}$	$\frac{K_{IC} = Dp\sqrt{\pi L_4}}{K_{II} = D\tau\sqrt{\pi L_4}}$	$\frac{K_I = Ep\sqrt{\pi L_5 / 2}}{K_{II} = E\tau\sqrt{\pi L_5 / 2}}$
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	0,7632/0,1392	0,854/0,087
40	3,512	2,1760	1,5547/1,5732	0,8720/0,1330	0,892/0,092
45	3,917	2,264	1,6932/1,7212	0,9626/0,1296	0,913/0,098

Для силовой нагрузки суммарный коэффициент интенсивности напряжений по всем трещиновидным дефектам характеризует общую сопротивляемость бетона и определяется по формуле

$$K_I^{\Sigma N} = \sum_{i=1}^{i=5} K_I^{iN} .$$

Определение производится с учетом процентного содержания каждого вида дефекта, заложенного в коэффициенты А, В, С, D и Е табл. 3.

При температурно-влажностных воздействиях коэффициент интенсивности напряжений во всех трещиноподобных дефектах характеризует общую сопротивляемость бетона и определяется по формуле

$$K_{IW(S)}^{IW} = \sum_{i=1}^{i=4} K_i \cdot K_I^{iTW} ,$$

где  $K_I^{iTW}$  – вычисляется для каждого из четырех типов трещин А, В, С, D по заданным значениям  $T$  и  $W$  отдельно для соответствующего температурного диапазона с учетом процентного содержания каждого из дефектов  $K_i$ .

Значения  $K_I^{iTW}$  для замкнутого дефекта\* определяются по формуле

$$K_I^{iTW} = 4\sqrt{\pi} \cdot a_{c1} \cdot \cos \theta \sigma_0 (1 - T / T_k) / g_c \sqrt{2l_{c1} [1 - (1 - 0,01W)^2]} + K_I^{IT} ,$$

где  $\theta = 35^\circ$ ;

$l_{c1}, a_{c1}$  – длина и диаметр дефекта 1-го рода (см. табл. 2);

$W$  – в процентах;

$\sigma_0$  – поверхностное натяжение воды при  $T = 0^\circ\text{C}$ ;  $\sigma_0 = 0,076 \text{ Н/м}$ ;

$g_c$  – расстояние между дефектами;

$T_k = 370^\circ\text{C}$ ;

$K_I^{IT}$  вычисляется для заданного диапазона температур (см. п. 2.1):

I диапазон:

$$K_I^{IT} = \alpha_{ti} \cdot \Delta T \cdot E_{ice} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot l_{c1}}{2}} \left[ 1 - (2/\pi) \cdot \arcsin(2b_{c1}/l_{c1}) \right] + \\ + \alpha_{tm} \cdot \Delta T \cdot E_m \sqrt{\frac{\pi \cdot l_{c1}}{2}} ,$$

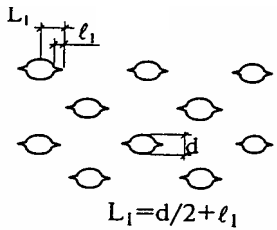
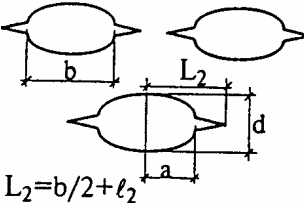
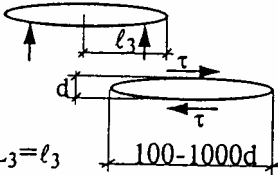
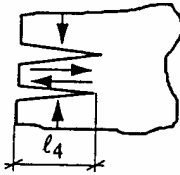

где  $E_{ice}$  – модуль упругости льда;

---

\* Замкнутые дефекты: типы I, II и III в табл. 3.  $K_I = (II + II2 + II3) / 100$ .

Таблица 3

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

Содержание пор П <sub>1</sub> ...П <sub>5</sub> , %	I	II	III	IV	V
					
	$L_1 = d/2 + l_1$	$L_2 = b/2 + l_2$	$L_3 = l_3$	$L_4 = l_4$	$L_5 = D_{\max}$
	$K_{IC} = A\sqrt{\pi l_1 \left(1 + \frac{d}{L_1}\right)}$	$K_{IC} = Bp\sqrt{\pi(a + L_2)}$	$\frac{K_{IC} = Cp\sqrt{\pi L_3}}{K_{IIc} = C\tau\sqrt{\pi L_3}}$	$\frac{K_{IC} = Dp\sqrt{\pi L_4}}{K_{IIc} = D\tau\sqrt{\pi L_4}}$	$\frac{K_I = Ep\sqrt{\pi L_5 / 2}}{K_{II} = E\tau\sqrt{\pi L_5 / 2}}$
	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	0,7632/0,1392	0,854/0,087
40	3,512	2,1760	1,5547/1,5732	0,8720/0,1330	0,892/0,092
45	3,917	2,264	1,6932/1,7212	0,9626/0,1296	0,913/0,098

$$b_{c1} = l_{c1}(1 - 0,01W)/2;$$

$\alpha_{t1m}$  – коэффициент линейного расширения цементного камня  
( $11,5 \cdot 10^{-6}$  1/град);

$E_m$  – модуль упругости цементного камня;

$\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$  в пределах заданного диапазона.

II диапазон:

$$\begin{aligned} K_I^{1T} = & 4\sqrt{\pi} \cdot a_{c1i} \cdot \cos\theta \sigma_0 (1 - T/T_\kappa) g_c \sqrt{2l_{c1}[1 - (1 - 0,01W)^2]} - \\ & - \alpha_{t1w} \cdot \Delta T \cdot E_w \sqrt{\frac{\pi \cdot l_{c1}}{2}} [1 - (2/\pi) \cdot \arcsin(2b_{c1}/l_{c1})] + \\ & + \alpha_{t1m} \cdot \Delta T \cdot E_m \sqrt{\frac{\pi \cdot l_{c1}}{2}}; \end{aligned}$$

III диапазон:

$$K_I^{1T} = P_0(1 - \alpha/T) \sqrt{\frac{\pi \cdot l_{c1}}{2}} - \alpha_{t1m} \cdot \Delta T \cdot E_m \sqrt{\frac{\pi \cdot l_{c1}}{2}}.$$

Значение  $K_I^{2TW}$  для I и II температурных диапазонов для краевой трещины\* определяется по формуле

$$K_I^{2TW} = P_c \sqrt{2c} / \left( \sqrt{\pi l_{c12} (1 - (b_{c12}/l_{c12})^c)} + K_I^{2T} \right),$$

где  $c = 2\pi^2/(\pi^2 - 4)$ ;  $P_c = \sigma_0 \pi d_c \cos \theta (1 - T/T_\kappa)$ ;

$$b_{c1} = l_{c1}(1 - 0,01W)/2;$$

$l_{c12}$  – по табл. 2.

Значение  $K_I^{2T}$  вычисляется в зависимости от температурного диапазона:

для I диапазона –

$$\begin{aligned} K_I^{2T} = & 2\alpha_{t1i} \cdot \Delta T \cdot E_{ice} \cdot \sqrt{\frac{l_{c12}}{\pi}} \arccos(b_{c12}/l_{c12}) \cdot (1 + f(b_{c12}/l_{c12})) + \\ & + 3,523\alpha_{t1m} \cdot \Delta T \cdot E_m \sqrt{\frac{l_{c12}}{\pi}}, \end{aligned}$$

где  $f(b_{c12}/l_{c12}) = 0,12(1 - b_{c12}/l_{c12})$ ;

\* Краевой дефект – тип IV в табл. 1  $K_2 = \text{П4/100}$ .

для II диапазона –

$$K_I^{2T} = 2\alpha_{tw} \cdot \Delta T \cdot E_w \sqrt{\frac{l_{c12}}{\pi}} \cdot \arccos(2b_{c12}/l_{c12}) \cdot (1 + f(2b_{c12}/l_{c12})) + \\ + 3,523\alpha_{t1m} \cdot \Delta T \cdot E_m \sqrt{\frac{l_{c12}}{\pi}},$$

где  $E_w$  – модуль упругости поровой жидкости (жидкости насыщающей тон);

для III диапазона при  $T > 100^\circ\text{C}$

$$K_I^{2T} = 0.$$

Значение  $K_I^{3TW}$  для радиальных\* трещин вычисляется по формуле

$$K_I^{3TW} = P \sqrt{\pi l_{crc}} \left\{ [1 - \alpha(r)] \cdot f(l_{crc}/R)(M - R)^2 / [(M - R)^2 - r^2] \right\} (1 + g),$$

где

$$\alpha(r) = 2(1 - \mu_{la})r / \{r^2 + (1 - 2\mu_{la})(M - R)^2 + [(M - R)^2 - r^2] \cdot (1 - \mu_m^2) \times \\ \times (M - R) \cdot E_{la} / [(1 + \mu_{la})(M - R - l_{crc}) \cdot E_m]\};$$

$$g = (1,7 + 14\alpha_0)l_{crc} / (M - 2R);$$

$$r = l_{crc} + R; \quad \alpha_0 = \frac{G_r}{G_{ag}}; \quad f(l_{crc}/R) = 2,26 - \frac{l_{crc}}{R} \cdot 0,15, \quad (2.1)$$

где  $R$  – средний радиус зерна крупного заполнителя, принимаемый равным 0,02 м для конструкций шириной до 0,1 м и  $R = 0,05$  м – для конструкций больших размеров;

$E_{la}$  – модуль упругости зерна крупного заполнителя;

$G_{ag}$  – модуль сдвига крупного заполнителя;

$l_{crc}$  – длина радиальной трещины,  $l_{crc} = 2R$ ;

$M$  – среднее расстояние между двумя зернами крупного заполнителя,  $M = 3R$ ;

$\mu_{la}$  – коэффициент поперечной деформации зерна крупного заполнителя.

Значение  $P$  определяется в зависимости от температурного диапазона:

I диапазон –

$$P = [2\alpha_{li} \cdot \Delta T \cdot E_{ice} \cdot (l_{c11}/2 - b_{c11}) + \alpha_{t1m} \Delta T l_{c11} \cdot g_{c11} \cdot E_m] \cdot l_{c11} \cdot a_{c11}, \quad (2.2)$$

где  $g_{c11}$  – по (2.1) при  $l_{crc} = l_{c11}$ ;

\* Радиальные трещины тип IV табл. 1 приняты как 50 % общего количества и другие 50 % – как контактные,  $K_3 = \text{П5/200}$  и  $K_4 = \text{П5/200}$ .

II диапазон –

$$P = [\sigma_0 \pi \cdot a_c \cdot \cos \theta (1 - T/T_r) + \alpha_m \cdot E_m \cdot l_{c1} \cdot g_{c1} - 2\alpha_{tw} \cdot \Delta TE_w \cdot g_{c1} (l_{c1}/2 - b_{c1})] \cdot l_{c1} \cdot a_{c1}; \quad (2.3)$$

III диапазон –

$$P = [P_0(1 + \alpha T) \cdot \sqrt{\pi l_{c1}/2} - \alpha_{tm} \cdot E_m \cdot \Delta T \cdot l_{c1} \cdot g_{c1}] \cdot l_{c1} \cdot a_{c1}, \quad (2.4)$$

где  $a_{c1}$  – диаметр капилляра, принимаемый по формуле  $a_{c1} = l_{c1}/100$ ;

$P_0$  – давление газа при 0°C;  $P_0 = 0,062$  МПа;

$\alpha$  – термический коэффициент давления;  $\alpha = 1/273,15$  градус<sup>-1</sup>;

$$a_{c1} = 2\pi P / E_m \cdot l_m \cdot \left[ (l_{c1}^2 - \sqrt{l_{c1}^2 - R^2}) / (l_{c1}^2 + \sqrt{l_{c1}^2 - R^2}) \right].$$

Значение  $K_I^{4TW}$  для контактных околосерновых трещин вычисляется по формуле

$$K_I^{4TW} = 2P(1 + \alpha)^{-1} \cdot \sqrt{\pi \cdot R \cdot \sin \theta} \cdot \{G_{ag}(1 + \chi_1)[G_{ag}(1 + \chi_1) + G_m(1 + \chi_2)] \cdot e^{\beta(\theta + \pi)}\} / \{(G_{ag} + G_m \cdot \chi_2)[G_m(1 + \chi_2) + 2G_{ag}(1 + \chi_1)] - G_m(1 + \chi_2) \cdot (G_m + G_{ag} \chi_1)(\cos \theta - 2P \sin \theta) e^{-2\beta\theta}\},$$

где  $\theta$  – центральный угол, определяет длину константной околосерновой трещины;

$$\chi_1 = (3 - \mu_m) / (1 + \mu_m); \quad \chi_2 = (3 - \mu_{ag}) / (1 + \mu_{ag}); \quad \beta = \frac{1}{2\pi} \cdot l_n \alpha;$$

$$\alpha = (G_{ag} + G_m \chi_2)(G_m + G_{ag} \chi_1);$$

$G_m$  – модуль сдвига цементного камня (матрицы);

$G_{ag}$  – модуль сдвига зерна заполнителя;

$P$  определяется по формулам (2.2)...(2.4).

Интегральный коэффициент интенсивности напряжений  $K_I^J$  в бетоне от действия кратковременной статической силовой и стационарной температурно-влажностной нагрузок определяется по формуле

$$K_I^J = K_I^N + (K_{I,W}^{TW} + K_{I,S}^{TW}) / \Psi, \quad (2.5)$$

где  $K_I^J$  – коэффициент интенсивности напряжений от силовых воздействий;

$K_{I,W}^{TW}$  и  $K_{I,S}^{TW}$  – коэффициенты интенсивности напряжений в бетоне от температурно-влажностных воздействий соответственно в температурном диапазоне I (зима) и диапазоне II (лето);

$\psi$  в климатическом режиме равно 2, для технологических режимов  $\psi > 2$ .

Величина  $K_{II}^J$  определяется из выражения

$$K_{II}^J = \sum_{i=3}^5 K_{II}^{IN},$$

а критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_c$  по формуле

$$K_c = \sqrt{(K_I^J)^2 + (K_{II}^J)^2}.$$

Долговечность бетона при длительных силовых и температурно-влажностных воздействиях в пределах заданного срока  $t$  характеризуется значением коэффициента интенсивности напряжения  $K_I^J(t)$ , который вычисляется по формуле

$$K_I^J(t) = K_I^J \cdot \lg t / \lg 28 \sqrt{1 + 2E_b \cdot C(t, 28)},$$

где  $E_b$  – модуль упругости бетона;

$C(t, 28)$  – мера ползучести бетона, определяется согласно теории старения:

$$C(t, 28) = C(\infty, 28)(1 - e^{-\gamma(t-28)});$$

$$C(\infty, 28) = a \left( \frac{56\sqrt{l_{bg}}}{K_I^J \cdot \pi^{3/2}} - 0,63 \right) \cdot 10^{-4};$$

$$\gamma = 6\sqrt{l_{bg}} / K_I^J \cdot \pi^{3/2},$$

где  $a = 0,6 - 0,8$  для тяжелых бетонов в зависимости от их составов (количества цементного камня  $\varphi_{цк}$  и количества щебня  $\varphi_{щ}$ ),  $l_{bg} = 1$  м.

Величина  $K_{II}^J(t)$  определяется по формуле

$$K_{II}^J(t) = K_{II}^J \lg t / \lg 28 \sqrt{1 + 2E_b C(t, 28)}$$

для элементов, где доминируют деформации поперечного сдвига, тогда

$$K_c(t) = \sqrt{K_I^J(t)^2 + K_{II}^J(t)^2}.$$

Оценка соответствия принятого в расчете по структурной дефектности бетона требованиям эксплуатации в условиях заданных силовых и несилевых воздействий за проектный срок  $t$  производится из условия

$$K_I^J(t) < K_{Ic}(t).$$

При невыполнении условия или больших запасах производится уточнение структурных параметров бетона и его состава. Значения  $K_{Ic}^{(f)}$  и  $K_{IIc}^{(f)}$  принимаются по табл. 4.

Для бетонов с известным составом и свойствами компонентов возможно вычислить остаточную продолжительность их безремонтной эксплуатации  $\Delta t$  в заданных условиях силовых и температурно-влажностных воздействий.

По известным параметрам состава, свойств бетона и его компонентов:  $R_c$  – активность цемента, Ц/В – истинное цементно-водное отношение,  $R_{ag}$  – прочность щебня,  $K_{ag}$  – количество щебня в единице объема бетона,  $W$  – влажность бетона, вычисляется по формуле проф. К.А. Пирадова, коэффициент интенсивности напряжений

$$K_I^{cr} = -0,0148 + 0,0058R_c + 0,0011R_{ag} + 0,1330Ц / В - 0,0082W - 0,5825K_{la}.$$

По расчетной формуле (2.5) вычисляется интегральный коэффициент интенсивности напряжений бетона в заданных силовых и температурно-влажностных условиях  $K_I^J$ .

Расчетная остаточная продолжительность безремонтной эксплуатации бетона определяется по формуле

$$\lg t = K_I^{cr} \cdot \lg 28 \sqrt{1 + 2E_b \cdot C(t, 28)} / K_I^J \quad (2.6)$$

и формуле

$$t = 2(K_I^{cr} - K_I^N) / \left( K_{IW}^{TW} - K_{IS}^{TW} \mid \psi \right). \quad (2.7)$$

Расчетом является меньшее из значений, вычисленных по формулам (2.6) и (2.7).



Свойства бетона	Значения характеристик								
Класс по прочности	$B_R-20$			$B_R-30$			$B_R-40$		
Класс по энергии разрушения	$B_G \leq 90$			$B_G \leq 105$			$B_G \leq 120$		
	60	100	130	80	100	120	100	150	200
Энергия разрушения $G_I$ , Н/м	60	100	130	80	130	155	100	150	200
Критический коэффициент интенсивности напряжения при отрыве $K_{Ic}(t)$ , МПа · м <sup>1/2</sup>	0,6–0,7	0,8–0,9	0,9–1,05	0,5–0,6	0,7–0,8	0,85–0,95	0,4–0,5	0,6–0,75	0,8–0,95
Критический коэффициент интенсивности напряжения при срезе $K_{IIc}(t)$ , МПа · м <sup>1/2</sup>	6,9–8,0	9,2–10,4	10,4–12,2	5,8–6,9	8,1–9,2	9,8–11,1	4,7–6,8	5,8–8,1	9,2–11,1
Критерий трещиностойкости $K_c(t) = \sqrt{K_{Ic}^2(t) + K_{IIc}^2(t)}$									
Временные категории долговечности, годы	A 30	B 60	C 75	A 30	B 60	C 75	A 30	B 60	C 75

**Примеры расчета долговечности и несущей способности  
эксплуатируемых и опытных железобетонных конструкций**

Пример 1

Дано: колонна железобетонная монолитная сгустителя  $\varnothing 30$  м на 2-м рудоуправлении ПО «Беларуськалий», показанная на рисунке. Состав бетона наружного слоя колонн: Ц – 500 кг, Щ – 1000 кг, П – 695 кг, В – 152 л, суперпластификатор С-3 – 6,6 кг. Температура в зимнее время – 10°C, влажность – 4,5%, температура в летнее время +20°C, влажность – 2,1%. Внутренняя часть выполнена из бетона класса В15. Размеры и армирование колонн показано на рис. П1.1.

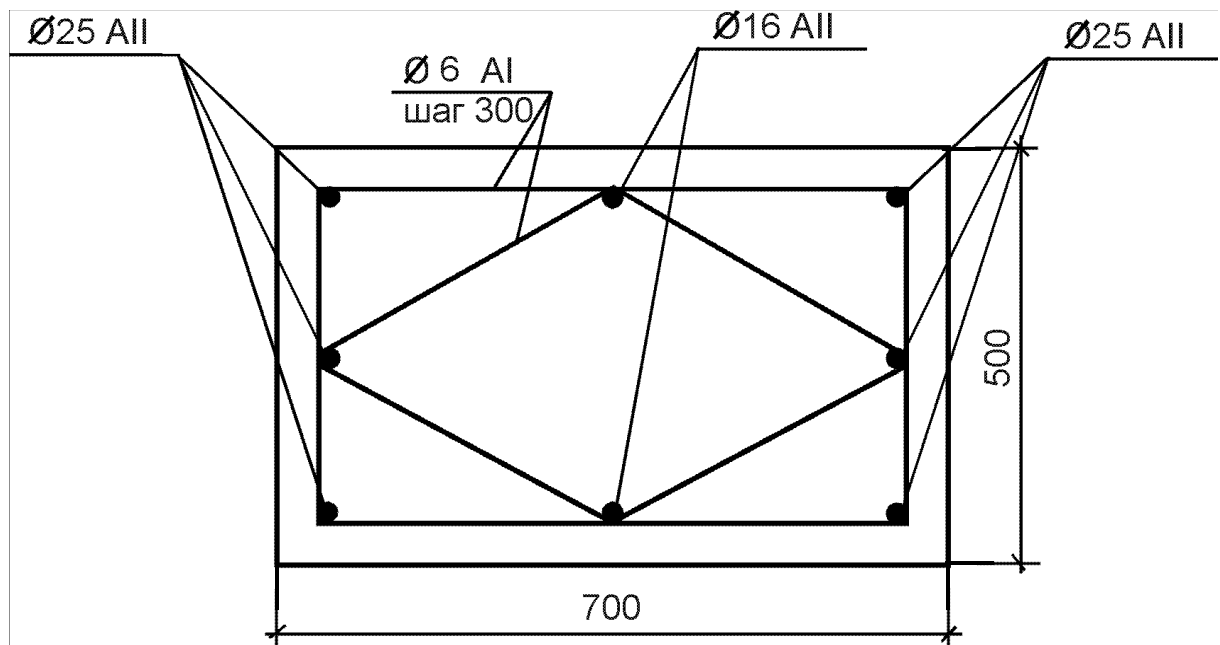


Рис. П1.1. Размеры и армирование колонны Км 1

Требуется определить долговечность бетона, предназначенного для омоноличивания колонны.

Определим предельное значение коэффициента интенсивности напряжений для заданного состава бетона по:

$$\begin{aligned}
 K_{ic}^{cr} &= -0,015 + 0,001R_a + 0,133 + \frac{Ц}{В} + 0,006R_c - 0,008W - 0,583K_{la} = \\
 &= -0,015 + 0,001 \cdot 80 + 0,133 \cdot \frac{500}{152} + 0,006 \cdot 46,1 - 0,008 \cdot 0,45 - \\
 &- 0,583 \cdot 0,416 = -0,015 + 0,08 + 0,4375 + 0,2766 - 0,036 - 0,2425 = \\
 &= 0,501 \text{ МН/м}^{3/2},
 \end{aligned}$$

где  $R_a = 80$  МПа,  $R_c = 46,1$  МПа,  $K_{la} = 0,416$ .

Таблица П1.1

Распределение пор в бетоне железобетонной монолитной колонны сгустителя  $\varnothing 30$  м ПО «Беларуськалий»

I	I	I	II	III, IV
20	20	21	11	28

Распределение пор и капилляров в бетоне для омоноличивания колонн по их форме (до приложения внешней нагрузки) определялось пористостью бетона 0,06 и объемной концентрацией зерен заполнителя – 0,416.

Напряжения в бетоне наружного слоя определены с учетом армирования и напряжений, возникающих в существующем бетоне В15, согласно принципам механики разрушения и условиям равновесия (рис. П1.2.):

$$N = \frac{2K_I^{st_1} A_{s,1}}{K_{crc} \sqrt{0,0625\pi d_1}} + \frac{2K_I^{st_2} A_{s,2}}{\sqrt{0,0625\pi d_2}} + \frac{2\sigma_{b,3}}{\sqrt{l_{bg}}} b_3 h_3 + \frac{K_{II}^{b_4} \pi^{3/2}}{\sqrt{l_{bg}}} b_4 h_4. \quad (\text{П1.1})$$

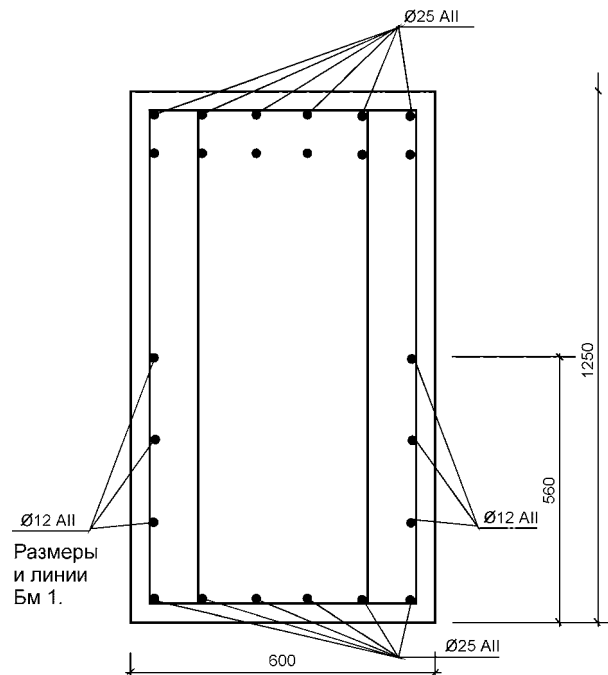


Рис. П1.2. Размеры и армирование балки Бм1

Это уравнение равновесия основано на параметрах трещиностойкости. Напряжения в арматуре

$$\sigma_S = \frac{K_{Ic}^{st}}{K_{crc} \sqrt{0,0625\pi d}}, \quad (1.2)$$

где  $K_{crc} = 1$  при наличии начальной трещины в арматуре диаметром  $d$ ;  
 $K_{crc} = \pi$  при отсутствии трещин.

Подставляя параметры трещиностойкости и геометрические характеристики в (П1.1), имеем:

$$\frac{2 \cdot 27,5 \cdot 30,1 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{0,0625\pi \cdot 0,008}} + \frac{2 \cdot 25 \cdot 294,3 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{0,0625\pi \cdot 0,025}} + \frac{2\sigma_{b,3}}{1} 0,7 \cdot 0,4 + \frac{0,22 \cdot \pi^{3/2}}{1} 0,7 \cdot 0,5 = 4,345,$$

где  $K_I^{st,1} = 27,5$  МН/м<sup>3/2</sup> для стали класса АIII;

$K_I^{st,1} = 25,0$  МН/м<sup>3/2</sup> для стали класса АII;

$K_I^b = 0,22$  МН/м<sup>3/2</sup> для бетона В15.

Тогда найдем  $\sigma_{b,3} = 2,496$  МПа.

Величина  $K_1^{I,TW}$  для замкнутого дефекта (так как переменными величинами являются и влажность и температура, то здесь одновременно присутствуют состояния 1 и 2, откуда и индекс  $TW$ ):

– в зимнее время

$$K_{I,t}^{I,2,TW} = \alpha_{t,i} \cdot \Delta t \cdot E_i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot l_c^{I,2}}{2}} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{2}{\pi} \right) \arcsin \left( \frac{2b_c}{l_c^{I,2}} \right)^{I,2} \right] +$$

$$+ \alpha_{t,cs} \cdot \Delta t \cdot E_{cs} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot l_c^{I,2}}{2}} = (50 \cdot 10^{-6}) 30 \cdot 300 \frac{4\sqrt{\pi \cdot 10^{-3}}}{2} \times$$

$$\times \left[ 1 - \left( \frac{2}{\pi} \right) \arcsin \left( \frac{9,56 \cdot 10^{-4}}{10^{-3}} \right) \right] +$$

$$+ 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 12000 \sqrt{\frac{\pi \cdot 10^{-3}}{2}} = 0,16737 \text{ МН/м}^{3/2},$$

где  $b_c^{I,2} = l_c^{I,2} (1 - 0,01W) / 2 = 10^{-3} (1 - 0,01 \cdot 4,5) / 2 = 4,78 \cdot 10^{-4}$ ;

– в летнее время

$$K_{1,t}^{I,1,TW} = \frac{4\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\alpha_c \cdot \cos\Theta \cdot \sigma_0 \left(1 - \frac{t}{t_k}\right)}{g_c \sqrt{l_c^{I,2} \left[1 - \left(1 - \frac{w}{100}\right)^2\right]}} + \frac{2\alpha_c \cdot \cos\Theta \cdot \sigma_0 \left(1 - \frac{t}{t_k}\right) \cdot \sqrt{\frac{l_c^{I,1}}{2}}}{g_c \sqrt{\pi \cdot \left((l_c^{I,1})^2 / 4 - (b^{I,1}_c)^2\right)}} -$$

$$- \alpha_{t,w} \cdot \Delta t \cdot E_w \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot l_c^{I,1}}{2}} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{2}{\pi} \right) \arcsin \left( \frac{2b^{I,1}_c}{l} \right) \right] + \alpha_{t,CS} \Delta t \cdot E_{CS} \sqrt{\pi l_c^{I,1} / 2} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{4\sqrt{\pi} \cdot 10^{-5}}{\sqrt{2}} \cos 35^\circ \cdot 76 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{20}{370}\right) / \sqrt{10^{-3} (1 - (1 - 0,01 \cdot 2,1))^2} \times \\
&\times \sqrt{2} \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-5} \cos 35^\circ \cdot 76 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{20}{370}\right) \sqrt{10^{-3} / 2} / \sqrt{[(10^{-3})^2 - (4,89 \cdot 10^{-4})^2]} \pi \cdot 10^{-3} - \\
&- (69 \cdot 10^{-6}) \cdot 30 \cdot 158 \sqrt{\frac{\pi \cdot 10^{-3}}{2}} \times [1 - (2/\pi) \arcsin(9,79 \cdot 10^{-4} / 10^{-3})] + \\
&+ 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 12000 \sqrt{\pi \cdot 10^{-3} / 2} = 0,162 \text{ МН/м}^{3/2},
\end{aligned}$$

где  $b_c^{I,1} = l_c^{I,1} (1 - 0,01W) / 2 = 10^{-3} (1 - 0,01 \cdot 2,1) / 2 = 4,89 \cdot 10^{-4}$ .

Определим величину  $K_I^{II,TW}$  для краевой трещины:

– в зимнее время

$$\begin{aligned}
K_{1,t}^{II,2,TW} &= 2\alpha_{t,i} \cdot \Delta t \cdot E_i \sqrt{l_c^{I,2} / \pi} \cdot \arccos(b_c^{II,2} / l_c^{II,2}) \times \\
&\times (1 + f(b_c^{II,2} / l_c^{II,2}) + 3,523\alpha_{t,CS} \Delta t \cdot E_{CS} \sqrt{\pi l_c^{II,2} / \pi}) = 2(50 \cdot 10^{-5}) \times \\
&\times 30 \cdot 300 \sqrt{10^{-3} / \pi} \cdot \arccos(4,78 \cdot 10^{-4} / 10^{-3})(1 + 0,063) + \\
&+ 3,523 \cdot 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 12000 \sqrt{10^{-3} / \pi} = 0,2786 \text{ МН/м}^{3/2},
\end{aligned}$$

где  $f(b_c^{II,2} / l_c^{II,2}) = 0,1215(1 - 4,78 \cdot 10^{-4} / 10^{-3}) = 0,063$ ;

– и в летнее время

$$\begin{aligned}
K_{1,t}^{II,1,TW} &= a_c \sqrt{2\pi} \cdot \cos \theta \sigma_0 (1 - t / 370) \sqrt{c} / g_c \sqrt{l_c^{II,1} (1 - (b_c^{II,1} / l_c^{II,12})^c)} - \\
&- 2\alpha_{t,W} \cdot \Delta t \cdot E_W \cdot \sqrt{l_c^{I,1} / \pi} \arccos(b_c^{II,1} / l_c^{II,1}) \times \\
&\times (1 + f(b_c^{II,1} / l_c^{II,1}) + 3,523 \alpha_{t,CS} \Delta t \cdot E_{CS} \sqrt{\pi l_c^{II,1}}) = \\
&= 10^{-5} \sqrt{2\pi} \cdot \cos 35^\circ (76 \cdot 10^{-3} (1 - 20 / 370)) \times \\
&\times \sqrt{3,36} / \sqrt{10^{-3} (1 - (4,89 \cdot 10^{-4} / 10^{-3})^{3,36})} - 2(69 \cdot 10^{-6}) \times \\
&\times 30 \cdot 158 \sqrt{10^{-3} / \pi} \arccos(4,89 \cdot 10^{-4} / 10^{-3})(1 + 0,062) + \\
&+ 3,523 \cdot 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 12000 \sqrt{10^{-3} / \pi} = 0,2549 \text{ МН/м}^{3/2},
\end{aligned}$$

где  $c = 2\pi^2 / (\pi^2 - 4) = 3,36$ ;

$f(b_c^{II,1} / l_c^{II,1}) = 0,1215(1 - 4,89 \cdot 10^{-4} / 10^{-3}) = 0,062$ .

Определим величину  $p$  внутреннего усилия вокруг зерна заполнителя:

– для второго температурного диапазона

$$p_2 = [2\alpha_{t,i}\Delta t \cdot E_i(l_c^{I,2} / 2 - b_c^{I,2}) + a_{t,CS} E_{CS} l_c^{I,2} g_c^{I,2} G_{lc}](l_c^{I,2} \alpha_c^{I,2} (K_{l,t}^{I,2})^2) =$$

$$= [2 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 30 \cdot 300 (10^{-3} / 2 - 4,78 \cdot 10^{-4}) + 11,5 \cdot 10^6 \times$$

$$\times 12000 \cdot 10^{-3} 17,96] \cdot 10^{-3} 10^{-5} = 2,48838 \cdot 10^{11} \text{ МН},$$

где  $\alpha_c^{I,2} = l_c^{I,2} / 100 = 10^{-3} / 100 = 10^{-5}$ ;

$$g_c^{I,2} = (1,7 + 14\alpha_0) l_{crc} / (M - 2R) = (1,7 + 14 \cdot 0,52) 0,04 / (0,06 - 2 \cdot 0,02) = 17,96;$$

$$R = 0,02 \text{ м}; \quad M = 3R = 0,06 \text{ м}; \quad \alpha_0 = G_1 / G_2 = 0,52; \quad l_{crc} = 2R = 0,04 \text{ м};$$

– для первого температурного диапазона

$$p_1 = [(\sigma_0 \pi a_c \cos \theta \sigma_s - t / t_k) + \alpha_{t,CS} \Delta t \cdot E_{CS} l_c^{I,1} g_c^{I,1} - 2\alpha_{t,W} \cdot \Delta t \cdot E_w g_c \times$$

$$\times (l_c^{I,1} / 2 - b_c^{I,1}) G_{lc}] \cdot l_c^{I,1} \alpha_c^{I,1} K_{lt}^2 = [10^{-5} \pi \cos 35 \cdot 76 \cdot 10^{-3} (1 - 20 / 370) +$$

$$+ 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 12000 \cdot 10^{-3} \cdot 17,96 - 2(69 \cdot 10^{-6}) \cdot 30 \cdot 158 \times$$

$$\times 17,96 (10^{-3} / 2 - 4,89 \cdot 10^{-4})] \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-5} = 2,3493 \cdot 10^{11} \text{ МН}.$$

$$K_{1,t}^{III.2.TW} = p \sqrt{\pi l_{crc}} \{ [1 - \alpha(r)] f(l_{crc}, R) (M - R)^2 / [(M - R)^2 - r^2] \} \times$$

$$\times (1 + g) = 2,48838 \cdot 10^{-11} \sqrt{\pi \cdot 0,04} \{ (1 - 6,2 \cdot 10^{-3}) 1,96 (0,06 - 0,02)^2 / [(0,06 -$$

$$- 0,02)^2 - 0,06^2] \} (1 + 17,96) = 2,606 \cdot 10^{-10} \text{ МН/м}^{3/2},$$

где

$$r = l_{crc} + R = 0,04 + 0,02 = 0,06 \text{ м};$$

$$\alpha(r) = 2(1 - \mu_1) r / \{ r^2 + (1 - 2\mu_1)(M - R)^2 + [(M - R)^2 - r^2] \} \times$$

$$\times (1 - \mu_2) \cdot (M - R) E_1 / \{ (1 + \mu_1)(M - R - l_{crc}) E_2 \} = 6,2 \cdot 10^{-3};$$

$$f(l_{crc}, R) = 2,26 - \frac{l_{crc}}{R} 0,15 = 2,26 - \frac{0,04}{0,02} 0,15 = 1,96;$$

– в летнее время  $K_{1,t}^{III.1.TW} = 2,46 \cdot 10^{-10} \text{ МН/м}^{3/2}$  (вычислено по значению  $p = 2,3493 \cdot 10^{11} \text{ МН}$ ).

Коэффициент интенсивности напряжений от температурно-влажностного воздействия для околосерновых трещин:

– в зимнее время

$$K_{1,t}^{IV.2.TW} = 2p(1 + \alpha)^{-1} \sqrt{\pi R \sin \theta} \{ G_2(1 + \chi_1)[G_2(1 + \chi_1) +$$

$$+ G_1(1 + \chi_2)] \cdot e^{\beta(\theta + \pi)} \} / \{ G_2 + G_1 \chi_2 [G_1(1 + \chi_2) + 2G_2(1 + \chi_1)] -$$

$$- G_1(1 + \chi_2)(G_1 + G_2 \chi_1)(\cos \theta - 2p \sin \theta) \cdot e^{-2\beta\theta} \} =$$

$$\begin{aligned}
&= 2 \cdot 4,48838 \cdot 10^{-11} (1 + 0,52)^{-1} \sqrt{\pi \cdot 0,02 \cdot \sin \frac{5\pi}{6}} \{24000(1 + 2,08) \times \\
&\times [24000(1 + 2,08) + 12480(1 + 2,81)] \cdot e^{3,5(\frac{5\pi}{6} + \pi)}\} / \{(24000 + 12480 \cdot 2,08) \times \\
&\times [12480(1 + 2,81) + 2 \cdot 24000(1 + 2,08)] - 12480(1 + 2,81) \times \\
&\times (12480 + 24000 \cdot 2,08) \cdot (\cos \frac{5\pi}{6} - 2 \cdot 2,48838 \cdot 10^{-11} \cdot \sin \frac{5\pi}{6}) \cdot e^{-2,3,51 \cdot 5\pi/6} = \\
&= 9,368 \cdot 10^{-5} \text{ МН/м}^{3/2},
\end{aligned}$$

где

$$\chi_1 = \frac{3 - \mu_1}{1 + \mu_1} = \frac{3 - 0,3}{1 + 0,3} = 2,08; \quad \chi_2 = \frac{3 - \mu_2}{1 + \mu_2} = \frac{3 - 0,05}{1 + 0,05} = 2,81;$$

$$\beta = \frac{1}{2\pi} \ln \alpha = \frac{1}{2\pi} \ln 3,69 \cdot 10^9 = 3,51;$$

$$\begin{aligned}
\alpha &= (G_2 + G_1 \chi_2)(G_1 + G_2 \chi_1) = \\
&= (24000 + 12480 \cdot 2,81)(12480 + 24000 \cdot 2,08) = 3,69 \cdot 10^9;
\end{aligned}$$

– в летнее время

$$K_{1,T}^{IV,1.TW} = 8,845 \text{ МПП} \cdot \text{м}^{1/2} \left( \text{МН/м}^{3/2} \right) \quad (\text{по } p = 2,3493 \cdot 10^{-11} \text{ МН}).$$

Тогда коэффициент интенсивности напряжений при температурно-влажностном воздействии составит

$$\begin{aligned}
K_{1,t}^{2,TW} &= \sum_{i=I}^{IV} n_i K_{1,t}^{i,TW} = 0,61 \cdot 0,16737 + 0,11 \cdot 0,2786 + \\
&+ 0,14 \cdot 2,606 \cdot 10^{-10} + 0,14 \cdot 9,368 \cdot 10^{-5} = 0,1327 \text{ МН/м}^{3/2};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K_{1,t}^{1,TW} &= \sum_{i=I}^{IV} n_i K_{1,t}^{i,TW} = 0,61 \cdot 0,162 + 0,11 \cdot 0,2549 + \\
&+ 0,14 \cdot 2,46 \cdot 10^{-10} + 0,14 \cdot 8,845 \cdot 10^{-5} = 0,1268 \text{ МН/м}^{3/2},
\end{aligned}$$

где 0,61 – содержание дефектов типа I (20+20+21)/100=0,61; 0,11 – типа II и по 0,14 – типов III и IV (будем считать, что количество контактных и радиальных трещин одинаково – по 14%).

Коэффициент интенсивности напряжений при действии силовой нагрузки (4,345 МН) определим для каждого из 5 видов трещин:

– для трещин (капилляров) 1-го вида, содержание которых составляет 20%, согласно табл. 3

$$K_{1c}^1 = A \sigma_b \sqrt{\pi l_1 (1 + d / L_1)} =$$

$$= 2,235 \cdot 2,496 \sqrt{\pi \cdot 10^{-5} (1 + 10^{-5} / 1,5 \cdot 10^{-5})} = 0,040 \text{ МН/м}^{3/2};$$

для трещин 2-5

$$K_{1c}^2 = B \sigma_b \sqrt{\pi(a + L_2)} = 1,4212 \cdot 2,496 \sqrt{\pi(5 \cdot 10^{-5} + 10^{-4})} = 0,077 \text{ МН/м}^{3/2};$$

$$K_{1c}^3 = C \sigma_b \sqrt{\pi L_3} = 1,0647 \cdot 2,496 \sqrt{\pi \cdot 10^{-3} / 2} = 0,105 \text{ МН/м}^{3/2};$$

$$K_{1c}^4 = D \sigma_b \sqrt{\pi L_4} = 0,3116 \cdot 2,496 \sqrt{\pi \cdot 10^{-3}} = 0,436 \text{ МН/м}^{3/2};$$

$$K_{1c}^5 = E \sigma_b \sqrt{\pi L_5 / 2} = 0,793 \cdot 2,496 \sqrt{\pi \cdot 10^{-4} / 2} = 0,024 \text{ МН/м}^{3/2}.$$

Тогда

$$K_{1c}^N = \sum_{i=1}^5 K_{1c}^i = 0,040 + 0,077 + 0,105 + 0,436 + 0,024 = 0,2896 \text{ МН/м}^{3/2}.$$

По формуле, с учетом изменения величины коэффициента интенсивности напряжений, определим время  $t$  (в годах) безопасной эксплуатации колонны (при коэффициенте  $\psi=2$ , учитывающем годовые колебания температуры):

$$t = \frac{2(K_{1c}^{cr} - K_{1c}^N)}{|K_{1,t}^{2.TW} - K_{1,t}^{1.TW}| \psi} = \frac{2(0,501 - 0,2896)}{|0,1327 - 0,1268| 2} = 36 \text{ лет}.$$

Теперь определим долговечность другим способом.

Рассчитаем модуль упругости бетона для заданного состава по формуле К.А. Пирадова:

$$E_b = -13515,9 + 184,7 \cdot R_{ag} + 11292,5 \frac{C}{B} + 190,5 R_c - 269W -$$

$$- 16900 K_{la} = -13515,9 + 184,7 \cdot 80 + 11292,5 \frac{500}{152} + 190,5 \cdot 46,1 -$$

$$- 269,0 \cdot 4,5 - 1690,0 \cdot 0,416 = 38947,6 \text{ МПа}.$$

Величина, характеризующая предельную релаксацию критического КИН:

$$K_{1c} = K_{1c}^N + \frac{K_{1,t}^{1.TW} + K_{1,t}^{2.TW}}{2} = 0,2896 + \frac{0,1327 + 0,1268}{2} = 0,41935 \text{ МН/м}^{3/2}.$$

Далее определяем

$$K_{IIc} = 0,250 + 0,015 R_a + 1,445 \frac{C}{B} + 0,070 R_c - 0,126 W - 7,508 K_{la} =$$

$$= 0,250 + 0,015 \cdot 80 + 1,445 \frac{500}{152} + 0,07 \cdot 46,1 - 0,126 \cdot 4,5 -$$

$$- 7,58 \cdot 0,416 = 5,71 \text{ МН/м}^{3/2}.$$



Мера ползучести согласно теории старения

$$C(t,28) = C(\infty,28) \cdot (1 - e^{-\gamma(t-28)})$$

и величина

$$C(\infty,28) = a \left( \frac{56\sqrt{l_{bg}}}{K_{lc} \cdot \pi^{3/2}} - 0,63 \right) \cdot 10^4 = 0,8 \left( \frac{56 \cdot 1}{5,71\pi^{3/2}} - 0,63 \right) 10^{-4} =$$

$$= 0,906 \cdot 10^{-4} \text{ 1/МПа};$$

$$\gamma = 0,03 \frac{q\sqrt{l_{bg}}}{K_{lc} \cdot \pi^{3/2}} = 0,03 \frac{1,4 \cdot 1}{5,71\pi^{3/2}} = 1,32 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{сут}}.$$

Далее определяем время (в сутках), за которое коэффициент  $K_{lc}^{cr}$  достигнет величины  $K_{lc}$ :

$$\lg t = 0,501 \cdot \lg 28 \sqrt{1 + 2 \cdot 387947,6 \cdot 0,906 \cdot 10^{-4} (1 - e^{-1,32 \cdot 10^{-3} (t-28)})} / 0,41935 = 4,5432,$$

откуда имеем  $t = 15366$  суток  $\approx 42,1$  года.

### Пример 2.

Дано: балка БМ1 сгустителя  $\varnothing 30$  м № 20 2-го Рудоуправления ПО «Беларуськалий», изображенная на рис. П1.2.

Зимой к низкотемпературному воздействию добавляется коррозионное от действия хлористого калия.

Требуется определить долговечность бетона балки, срок эксплуатации которой составляет на данный момент более 25 лет.

Определяем значение  $K_{lc}^{cr}$ :

$$K_{lc}^{cr} = -0,015 + 0,001 R_a + 0,133 \frac{W}{B} + 0,006 R_c - 0,008 W - 0,583 K_{la} =$$

$$= -0,015 + 0,001 \cdot 80 + 0,133 \cdot 2,3 + 0,006 \cdot 50,0 - 0,008 \cdot 4,5 -$$

$$- 0,583 \cdot 0,40 = 0,4017 \text{ МН/м}^{3/2}.$$

Оцениваем исходное распределение пор и капилляров различной конфигурации в бетоне, исходя из следующих характеристик бетона: пористость 0,10;  $K_{la} = 0,4$  (табл. П1.2)

Т а б л и ц а П1.2

Распределение пор в бетоне балки БМ1 сгустителя  $\varnothing 30$  м № 20 2-го Рудоуправления ПО «Беларуськалий»

I	I	I	II	III, IV
24	24	23	5	24

Определим величину коэффициента интенсивности напряжений от температурно-влажностного воздействия, считая, что коррозионное воздействие компенсируется (добавляет) 50%-м увеличением температурного перепада ( $\Delta T = 45^\circ\text{C}$ ).

Величина  $K_{1,t}^{I.TW}$  :

– в зимнее время

$$K_{1,t}^{I.2.TW} = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 45 \cdot 300 \sqrt{\frac{\pi \cdot 10^{-3}}{2}} \left[ \left( 1 - (2/\pi) \arcsin \left( \frac{9,56 \cdot 10^{-4}}{10^{-3}} \right) \right) \right] +$$

$$+ 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 45 \cdot 10000 \sqrt{\frac{\pi \cdot 10^{-3}}{2}} = 0,2101 \text{ МН/м}^{3/2};$$

– в летнее время

$$K_{1,t}^{I.1.TW} = \frac{4\sqrt{\pi \cdot 10^{-5}}}{\sqrt{2}} \cos 35^\circ \cdot 76 \cdot 10^{-3} \left( 1 - \frac{20}{370} \right) / \sqrt{10^{-3} (1 - (1 - 0,01 \cdot 2,1))^2} +$$

$$+ 2 \cdot 10^{-5} \cos 35^\circ \cdot 76 \cdot 10^{-3} \left( 1 - \frac{20}{370} \right) \sqrt{\frac{10^{-3}}{2}} / \sqrt{(10^{-3})^2 - (4,89 \cdot 10^{-4})^2} \times$$

$$\times 3,14 \cdot 10^{-3} - (69 \cdot 10^{-6}) \cdot 45 \cdot 158 \sqrt{\frac{\pi \cdot 10^{-3}}{2}} \left[ \left( 1 - (2/\pi) \arcsin \left( \frac{9,79 \cdot 10^{-4}}{10^{-3}} \right) \right) \right] +$$

$$+ 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 45 \cdot 10000 \sqrt{\pi \cdot 10^{-3}} = 0,2026 \text{ МН/м}^{3/2}.$$

Величина  $K_{1,t}^{II.TW}$  :

– в зимнее время

$$K_{1,t}^{II.TW} = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 45 \cdot 30 \sqrt{10^{-3} / \pi} \cdot \arccos \left( \frac{4,87 \cdot 10^{-4}}{10^{-3}} \right) \cdot (1 + 0,063) +$$

$$+ 3,523 \cdot 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 45 \cdot 10000 \sqrt{\frac{10^{-3}}{\pi}} = 0,3267 \text{ МН/м}^{3/2};$$

– в летнее время

$$K_{1,t}^{II.1.TW} = 10^{-5} \sqrt{2\pi} \cos 35^\circ \cdot 76 \cdot 10^{-3} \left( 1 - \frac{20}{370} \right) \sqrt{3,36} / \sqrt{10^{-3} \left( 1 - \left( \frac{4,89 \cdot 10^{-4}}{10^{-3}} \right)^{3,36} \right)} -$$

$$- 2(69 \cdot 10^{-6}) \cdot 45 \cdot 158 \sqrt{10^{-3} / \pi} \cdot \arccos \left( \frac{4,89 \cdot 10^{-4}}{10^{-3}} \right) \cdot (1 + 0,062) + 3,523 \cdot 11,5 \cdot 10^{-6} \times$$

$$\times 45 \cdot 10000 \sqrt{\frac{10^{-3}}{\pi}} = 0,307 \text{ МН/м}^{3/2},$$

где значения  $f(b_c^{II,2} / l_c^{II,2})$  и  $f(b_c^{II,1} / l_c^{II,1})$  см. в примере 1.

Определяем величину  $p$ :

$$p_2 = [2(50 \cdot 10^{-6}) \cdot 45 \cdot 300(10^{-3} / 2 - 4,78 \cdot 10^{-4}) + 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 45 \cdot 10000 \cdot 10^{-3} \cdot 17,96] 10^{-3} \cdot 10^{-5} = 9,29 \cdot 10^{-10} \text{ МН};$$

$$p_1 = [10^{-5} \cdot \pi \cdot \cos 35^\circ \cdot 76 \cdot 10^{-3} (1 - \frac{20}{370}) + 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 45 \cdot 10000 \cdot 10^{-3} \cdot 17,96 - 2(69 \cdot 10^{-6}) \cdot 45 \cdot 158 \times \\ \times 17,96 \left( \frac{10^{-3}}{2} - 4,89 \right)] \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-5} = 2,96 \cdot 10^{-7} \text{ МН}.$$

Тогда величина  $K_{1,t}^{III.TW}$ :

– в зимнее время

$$K_{1,t}^{III.2.TW} = 9,29 \cdot 10^{-10} \sqrt{\pi \cdot 0,04} \{ (1 - 6,3 \cdot 10^{-3}) \cdot 1,96 \times \\ \times (0,06 - 0,02)^2 / [(0,06 - 0,02)^2 - 0,06^2] \} (1 + 17,96) = 9,73 \cdot 10^{-9} \text{ МН/м}^{3/2};$$

– в летнее время

$$K_{1,t}^{III.1.TW} = 9,71 \cdot 10^{-9} \text{ МН/м}^{3/2}.$$

Величина  $K_{1,t}^{IV.TW}$ :

– в зимнее время

$$K_{1,t}^{IV.2.TW} = 2 \cdot 9,29 \cdot 10^{-10} (1 + 0,52)^{-1} \sqrt{\pi \cdot 0,02 \sin \frac{5\pi}{6}} \{ 24000(1 + 2,08) \times \\ \times [24000(1 + 2,08) + 12480(1 + 2,81)] \cdot e^{3,51(5\pi/5+\pi)} \} (24000 + 12480 \cdot 2,08) \times \\ \times [12480(1 + 2,81) + 2 \cdot 24000(1 + 2,08)] - 12480(1 + 2,81)(12480 + 24000 \times \\ \times 2,08) (\cos \frac{5\pi}{6} - 2 \cdot 9,29 \cdot 10^{-10} \sin \frac{5\pi}{6}) \cdot e^{-2 \cdot 3,51 \cdot 5\pi/6} = 3,497 \cdot 10^{-4} \text{ МН/м}^{3/2};$$

– в летнее время

$$K_{1,t}^{IV.1.TW} = 3,48 \cdot 10^{-4} \text{ МН/м}^{3/2}.$$

Тогда с учетом процентного содержания пор и капилляров каждого вида (табл. 7.2):

$$K_{1,t}^{2.TW} = \sum_{i=I}^{IV} n_i \cdot K_{1,t}^{i.TW} = 0,54 \cdot 0,2101 + 0,1 \cdot 0,3267 + 0,18 \cdot 9,73 \cdot 10^{-9} + \\ + 0,18 \cdot 3,497 \cdot 10^{-4} = 0,1462 \text{ МН/м}^{3/2};$$

$$K_{1,t}^{1.TW} = \sum_{i=I}^{IV} n_i \cdot K_{1,t}^{i.TW} = 0,54 \cdot 0,2026 + 0,1 \cdot 0,307 + 0,18 \cdot 9,71 \cdot 10^{-9} + \\ + 0,18 \cdot 3,48 \cdot 10^{-4} = 0,1402 \text{ МН/м}^{3/2}.$$

Величины

$$K_{Ic}^1 = 2,235 \cdot 1,6 \sqrt{\pi \cdot 10^{-5} \left(1 + \frac{10^{-5}}{1,5 \cdot 10^{-5}}\right)} = 0,026 \text{ МН/м}^{3/2};$$

$$K_{Ic}^2 = 1,3645 \cdot 1,6 \sqrt{\pi \cdot (5 \cdot 10^{-5} + 10^{-4})} = 0,047 \text{ МН/м}^{3/2};$$

$$K_{Ic}^3 = 1,0513 \cdot 1,6 \sqrt{\pi \cdot 10^{-3} / 2} = 0,066 \text{ МН/м}^{3/2};$$

$$K_{Ic}^4 = 0,3116 \cdot 1,6 \sqrt{\pi \cdot 10^{-3}} = 0,028 \text{ МН/м}^{3/2};$$

$$K_{Ic}^5 = 0,8616 \cdot 1,6 \sqrt{\pi \cdot 10^{-4} / 2} = 0,017 \text{ МН/м}^{3/2};$$

$$K_{Ic}^N = \sum_{i=1}^5 K_{Ic}^i = 0,184 \text{ МН/м}^{3/2}.$$

Тогда

$$t = \frac{2(K_{Ic}^{cr} - K_{Ic}^N)}{|K_{1,t}^{2.TW} - K_{1,t}^{1.TW}| \psi} = \frac{2(0,4017 - 0,184)}{|0,1462 - 0,1402| \cdot 2} = 36,3 \text{ года}.$$

С учетом эксплуатации балок БМ 1 в течение тридцати лет в ближай-  
шие 5-6 лет необходимо предусмотреть мероприятия по их восстановлению и  
усилению.

### Пример 3.

Характеристики балочных образцов и результаты их испытаний по  
схеме изгиба приведены в табл. П1.3. По формулам был выполнен расчет  
трещиностойкости и максимальной несущей способности этих образцов, ре-  
зультаты которого сведены в табл. П1.3.

Т а б л и ц а П1.3.

Характеристики балочных образцов, результаты испытаний и расчета

Марка	Прочность бетона $R_b$ , МПа	Армирование		Размеры $b \times h$	$a$ , м	$a'$ , м	$M$ , кНм	
		Диаметр и класс арматуры	$A_s$ , см				Опыт	Расчет
Б - 2	72,6	2Ø28А-III	12,32	15x30	0,03	0,025	104,1	119,0
		2Ø8А-1	1,01					
Б - 4	72,6	2Ø14Ат-600с	6,15	15x30	0,03	0,025	84,0	82,0
		2Ø8А-1	1,01					

В качестве примера расчета железобетонного изгибаемого элемента  
энергетическим методом ниже приводится расчет максимальной несущей  
способности балки Б2.

Дано:

Постоянные расчета

$$G_{Ib}, G_{If}, G_{IIb}, G_{Ib}^{st}, G_{If}^{st}, E_b, E_s.$$

$$G_I^s = \frac{K_I^2}{E} = \frac{3600 A_s}{b^2 \pi a E} y_1(\alpha_1)^2 = \frac{3600 \cdot (0,001232)^2}{0,0225 \pi \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 40000} \times$$

$$\times \left( \frac{0,93}{\sqrt{1-0,12}} + \frac{1}{\sqrt{1-0,12}^2} - 0,93 \right) = 7,39 \cdot 10^{-5} \text{ МН/м},$$

$$l_{crc}^I = \frac{G_{If}^{st} \cdot E_s \cdot A_s^2}{(K_{crc})^2 \pi^3 \cdot G_I^s \cdot E_b \cdot b^2 \cdot 0,0625d} = 0,2 \text{ Н/м},$$

$$l_{crc}^{II} = \frac{0,5 \cdot \pi^2 \sqrt{G_{If} \cdot G_{II} \cdot E_b^2} \cdot h_w \cdot b \cdot h}{b \sqrt{G_{II} \cdot E_b \cdot 2hl_{bg}} - 3,9 \pi^2 \sqrt[3]{G_{If} \cdot G_{II} \cdot E_b^2} \cdot h_w \cdot b \cdot h} G_{If} = 76 \text{ Н/м};$$

$$G_{If} = 3596 \text{ Н/м}.$$

$$a_{crc}^{II} = \frac{\pi^{\frac{3}{2}} \sqrt{G_{If} \cdot E} \cdot l_{crc}^{II} (1 - \nu^2)}{E_b \sqrt{l_{bg}}} \cdot (1 - 1,1418\lambda^2 - 0,6048\lambda^4)^2 +$$

$$+ \frac{2\sqrt{G_{II} \cdot E_b}}{\pi^{\frac{3}{2}} \sqrt{l_{crc}^{II} \cdot E_b}} \int_{-l_{crc}^{II}}^{l_{crc}^{II}} \Gamma(l_{crc}^{II}, \xi) d\xi;$$

$$\lambda = \frac{-0,087}{0,25} = 0,348;$$

$$\sigma_{sc} = \frac{\sqrt{G_{II} \cdot E_b}}{\pi^2 \sqrt{0,0625 \cdot d_s^c}} = 159,13 \text{ МПа},$$

где  $G_{If}^{stc} = 1811 \text{ Н/м}$ ;

$$N_{sc} = \sigma_{sc} \cdot A_s' = 159,13 \cdot 1,01 \cdot 10^{-4} = 16,07 \text{ кН};$$

$$x = \sqrt{G_{If}^{st} \cdot E_s} \cdot \sqrt{l_{bg}} \cdot A_s \pi^2 b \sqrt{0,0625d} \left[ \sqrt{G_{If}^b E_b} (h - l_{crc}^I) + \sqrt{G_{II}^b E_b} \cdot a_{crc}^{II} \right] +$$

$$+ N_{si} \sqrt{0,0625d \pi l_{bg}} / (\pi^2 b \sqrt{G_{If} E_b} + \sqrt{G_{II} E_b} \cdot \sqrt{0,0625d}) = 0,039 \text{ МПа}.$$

Принимаем  $x = a' = 0,025$  (т.е. горизонтальная трещина на уровне сжатой арматуры).

$$f(\lambda) = \sqrt{\frac{3}{\lambda \cdot l_{crc}^{II}}} \cdot \frac{1,13\lambda + 0,285}{b} = \sqrt{\frac{3}{0,348 \cdot 0,087}} \cdot \left( \frac{0,348 + 0,285}{0,15} \right) = 44,99;$$

$$\begin{aligned}
M &= \frac{\sqrt{G_{IIi}} \cdot E_b \sqrt{\pi}}{\sqrt{l_{bg}}} \times \\
&\times \left[ \pi^{\frac{3}{2}} \cdot b \left( x_i - \frac{a_{crc}^{II}}{2} \right) \cdot \left( h_o - \frac{2x_i - a_{crc}^{II}}{4} \right) + \pi^{\frac{3}{2}} \cdot b \left( x - x_i - \frac{a_{crc}^{II}}{2} \right) \times \right. \\
&\times \left. \left( h_o - \frac{2x + 2x_i + a_{crc}^{II}}{4} \right) + \frac{\pi^{\frac{3}{2}} \cdot h_w (f(\lambda) - 1)(x - d)(h_o - d)}{(x - x_i)f(\lambda)} \right] - \\
&- \frac{\pi^{\frac{3}{2}} b \cdot \sqrt{G_{If}} \cdot E_b}{\sqrt{l_{bg}}} (h - x - l_{crc}^I) \cdot \frac{h - x + l_{crc}^I - a}{2} = 0,119 \text{ MH} \cdot \text{M}.
\end{aligned}$$

Алгоритм  
расчета долговечности бетона изготавливаемых конструкций

1	Исходные данные: а) проектные параметры внешних силовых ( $N, M, Q$ ) и несиловых ( $t, W, P$ , концентрация химических веществ) воздействий; б) характеристики компонентов бетона: цемента ( $R_c$ ), заполнителя ( $R_d$ ), химических добавок		
Требуемый (проектный) срок службы			
↓			
2	Расчет (подбор) состава бетона по прочности ( $R, R_{bt}$ ), деформативности ( $E_b$ ) и трещиностойкости $R_{crc}^0$		
↓			
3	Расчет по подобранному составу бетона его пустотности: общей, гелевой, капиллярной, дифференциальной пористости цементного камня и бетона по формулам таблицы		
↓			
4	Расчет коэффициентов интенсивности напряжений КИН в вершинах дефектов I-V вида при температурно-влажностных воздействиях		
	I температурный диапазон (вода)	II температурный диапазон (лед)	
	III температурный диапазон (пар)		
	$K_{I,t}^{I,1,c} = \frac{4\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{a_c \cdot \cos \theta \left(1 - \frac{t}{t_k}\right)}{\sqrt{g_c \sqrt{l_c} \left[1 - \left(1 - \frac{W}{100}\right)^2\right]}}$ $K_{I,t}^{I,1,w} = \alpha_{t,w} \cdot \Delta t \cdot E_w \sqrt{\frac{\pi \cdot l_c}{2}} \left[1 - \left(\frac{2}{\pi}\right) \arcsin\left(\frac{2b_c}{l_c}\right)\right]$ $K_{I,t}^{I,1,cs} = \alpha_{t,sc} \cdot \Delta t \cdot E_{cs} \sqrt{\frac{\pi \cdot l_c}{2}}$	$K_{I,t}^{I,2,j} = \alpha_{t,w} \cdot \Delta t \cdot E_i \sqrt{\frac{\pi l_c}{2}} \left[1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{2b_c}{l_c}\right)\right]$ $K_{I,t}^{I,2,cs} = \alpha_{t,sc} \cdot \Delta t \cdot E_{cs} \sqrt{\frac{\pi \cdot l_c}{2}}$ $K_{I,t}^{I,1,j,m} = \alpha_{t,j} \cdot \Delta t \cdot E_i \sqrt{\frac{l_c}{2\pi}} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{2b_c}{l_c}\right)\right]$ $K_{I,t}^{II,2,j} = 2\alpha_{t,j} \cdot \Delta t \cdot E_i \sqrt{\frac{l_c}{\pi}} \cdot \arccos\left(\frac{b_c}{l_c}\right) \left[1 + f\left(\frac{b_c}{l_c}\right)\right]$	$K_{I,t}^{I,3,5} = P_0 (1 - \alpha t) \sqrt{\frac{\pi \cdot l_c}{2}}$

$K_{I,t}^{I,1,c,m} = P_c \sqrt{2} / \sqrt{\pi(l^2 - 4b^2)}$ $K_{I,t}^{I,1,w,m} = \alpha_{t,w} \cdot \Delta t \cdot E_w \sqrt{\frac{l_c}{2\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{2b_c}{l_c}\right) \right]}$ $K_{I,t}^{II,1,c} = \frac{\sqrt{2c} \cdot P_c}{\sqrt{\pi l_c \left[ 1 - \left(\frac{b_c}{l_c}\right)^c \right]}}$ $K_{I,t}^{II,1,w} = 2P_w \sqrt{\frac{l_c}{\pi}} \arccos\left(\frac{b_c}{l_c}\right) \left[ 1 + 0,1215 \left(1 - \frac{b_c}{l_c}\right) \right]$ $K_{I,t}^{II,1,cs} = 3,523 \cdot \alpha_{t,cs} \cdot \Delta t \cdot E_{cs} \sqrt{\frac{l_c}{\pi}}$	$K_{I,t}^{II,2,cs} = 3.523 \cdot \alpha_{t,cs} \cdot \Delta t \cdot E_{cs} \sqrt{\frac{l_c}{\pi}}$	
--	--	--

Для каждого из трех диапазонов

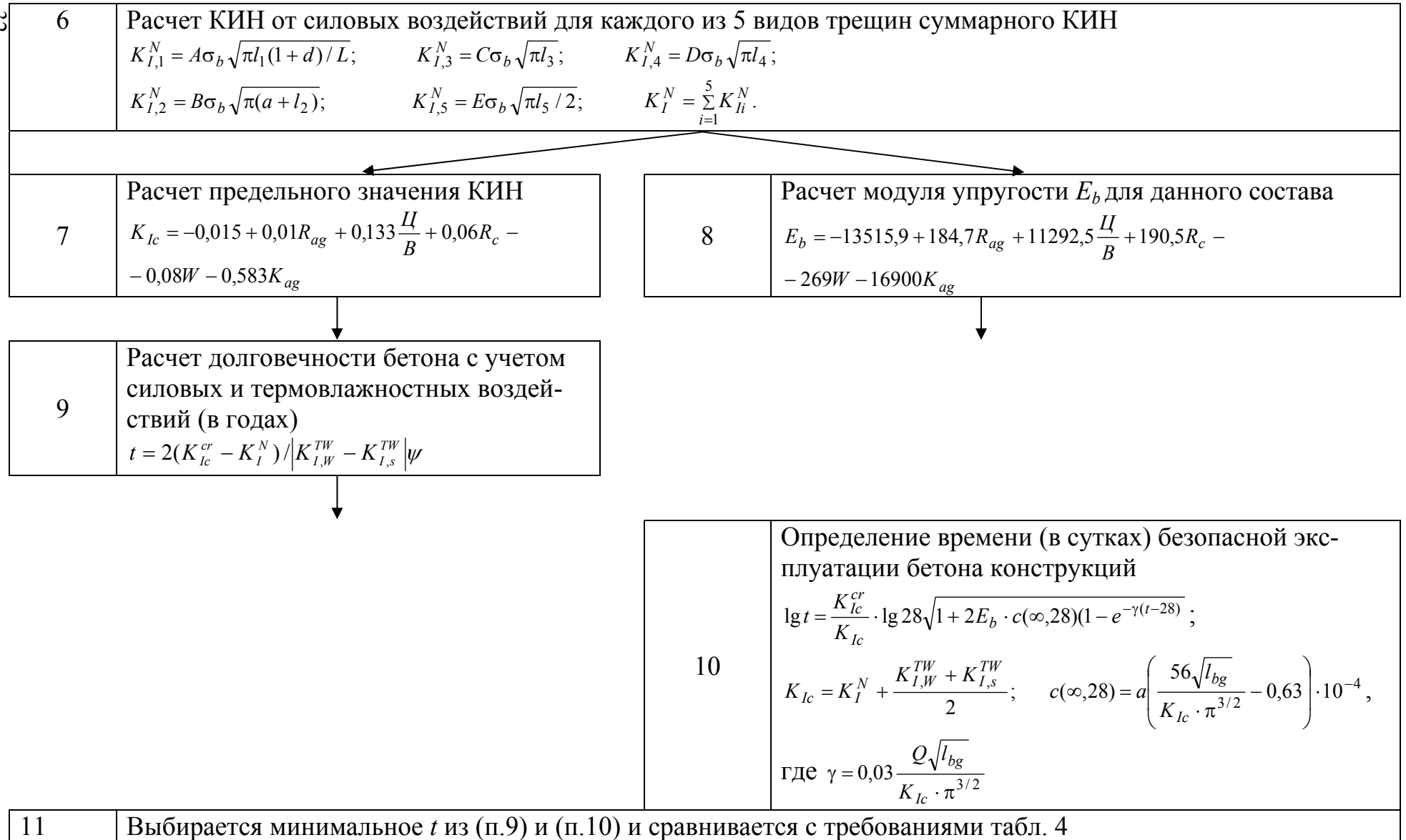
$K_{I,t}^{III} = P\sqrt{\pi l} \left\{ \frac{\left[ 1 - \alpha(r) \right] f\left(\frac{1}{R}\right) (M - R)^2}{\left[ (M - R)^2 - r^2 \right]} \right\}$	$K_{I,t}^{IV} = 2P(1 + \alpha)^{-1} \sqrt{\pi R \sin \theta} \{ G_1(1 + X_2) \times [G_1(1 + X_2) + G_2(1 + X_1)] \cdot e^{\beta(\theta + \pi)} \} / \{ (G_1 + G_2 X_1) \times [G_2(1 + X_1) + 2G_1(1 + X_2)] - G_2(1 + X_1)(G_2 + G_1 X_2) \times (\cos \theta - 2\beta \sin \theta) \cdot e^{-2\beta\theta} \}$	$K_{I,t}^{IV} = 2P(1 + \alpha)^{-1} \sqrt{\pi R \sin \theta} \{ G_1(1 + X_2) \times [G_1(1 + X_2) + G_2(1 + X_1)] \cdot e^{\beta(\theta + \pi)} \} / \{ (G_1 + G_2 X_1) \times [G_2(1 + X_1) + 2G_1(1 + X_2)] - G_2(1 + X_1) \times (G_2 + G_1 X_2) \times (\cos \theta - 2\beta \sin \theta) \cdot e^{-2\beta\theta} \}$
--	---	---



5	<p>Расчет КИН при температурно-влажностном воздействии с учетом распределения пор и капилляров в общем количестве дефектов</p> $K_{I,W}^{TW} = \sum_{i=1}^{IV} n_i K_{I,W}^{iTW} = n_1 K_{I,W}^1 + n_2 K_{I,W}^2 + n_3 K_{I,W}^3 + n_4 K_{I,W}^4 + (1 - n_1 - n_2 - n_3 - n_4) K_{I,W}^5$ $K_{I,s}^{TW} = \sum_{i=1}^{IV} n_i K_{I,s}^{iTW} = n_1 K_{I,s}^1 + n_2 K_{I,s}^2 + n_3 K_{I,s}^3 + n_4 K_{I,s}^4 + (1 - n_1 - n_2 - n_3 - n_4) K_{I,s}^5$
---	--







Учебное издание

**РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА ПРИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ,  
ВЛАЖНОСТНЫХ И СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ  
НА ОСНОВЕ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ**

Составители: ЛЕОНОВИЧ Сергей Николаевич  
ПОПОВ Олег Викторович  
ПИРАДОВ Константин Александрович

Редактор Т.Н. Микулик. Корректор М.П. Антонова  
Компьютерная верстка А.Г. Гармазы

---

Подписано в печать 23.11.2004.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 2, 0. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 100. Заказ 6.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

Лицензия № 02330/0056957 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Ф. Скорины, 65.