



doi: 10.18720/CUBS.70.2

## Методики определения границ микротрещинообразования

### Methods for determining the limits of the microcrack formation

С.Д. Семенюк<sup>1</sup>, Ю.Г. Москалькова<sup>2\*</sup>S.D. Semenyuk<sup>1</sup>, Yu.G. Moskalkova<sup>2\*</sup>

Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь, *Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus*

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

бетон;  
керамзитобетон;  
сталефибробетон;  
отходы производств;  
ваграночный шлак;  
граница микротрещинообразования;

#### KEYWORDS

concrete;  
claydite;  
steel fiber concrete;  
by-products;  
cupola slag;  
limit of microcrack formation;

#### ИСТОРИЯ

Подана в редакцию: 30.05.2018  
Принята: 16.10.2018

#### ARTICLE HISTORY

Submitted: 30.05.2018  
Accepted: 16.10.2018

#### АННОТАЦИЯ

Существующие зависимости для определения относительных значений границ микротрещинообразования в настоящее время теряют свою актуальность, так как они были выведены для традиционного тяжелого бетона, а в строительстве все чаще применяются бетоны с улучшенными показателями прочности и/или деформативности. В данной статье предложены новые эмпирические зависимости для определения относительных значений границ микротрещинообразования. Предложенные зависимости универсальны и могут быть применены для определения границ микротрещинообразования бетонов различных видов (были изучены нормальный бетон, сталефибробетон, керамзитобетон, бетон на основе ваграночного шлака). Вид бетона учитывается эмпирическим коэффициентом  $k_{rc}$ , величина которого зависит от отношения относительных значений нижнего  $\eta_{rc0}$  и верхнего  $\eta_{rcv}$  пределов микротрещинообразования ( $\eta_{rc0}/\eta_{rcv} = \text{const}$ ). Сравнение результатов расчета по предложенным зависимостям с опытными данными показало хорошую сходимость: величина отклонения расчетных значений от опытных составляет 4–7 %.

#### ABSTRACT

Microcracking is one of the fundamental characteristics of concrete behavior. Existing dependencies to determine the relative values of the limits of microcrack formation are currently losing their relevance, since they were derived for conventional concrete, and in construction, concretes of various types improved strength and/or deformability are increasingly used. In this paper new empirical relationships are proposed for determining the relative values of the microcrack formation limits. The proposed formulas are universal and can be applied to determine the limits of microcracks formation for concretes of various types (studied normal concrete, steel fiber concrete, claydite, concrete with the use of a cupola slag as a fine aggregate). The type of concrete is taken into account by the empirical coefficient  $k_{rc}$ . The coefficient value depends on the ratio of the relative values of the lower  $\eta_{rc0}$  and the upper  $\eta_{rcv}$  microcrack formation limits ( $\eta_{rc0} / \eta_{rcv} = \text{const}$ ). The research was carried out within the frame-work of the state program of scientific research in the field of "Physical Materials Science, New Materials and Technologies" at the Belarusian-Russian University. Comparison of the calculation results and experimental data (own and other researchers) showed good convergence: the deviation of the calculated values from the experimental data is 4–7%. Evaluation of the validity and reliability of the proposed mathematical model was performed according to the Eurocode. In conclusion, the prospects for further research are also given.

#### Содержание

1.	Введение	23
2.	Методы	24
3.	Результаты и обсуждение	24
4.	Заключение	27

## 1. Введение

Значения границ микротрещинообразования (нижней  $\eta_{cr0}$  и верхней  $\eta_{crv}$ ) довольно важны для описания особенностей работы бетона, поскольку позволяют сделать вывод о стадии напряженно-деформированного состояния (н.д.с.).

Особое внимание обычно уделяется верхней границе микротрещинообразования, поскольку достижение указанной границы указывает на переход к третьей стадии н.д.с., т. е. свидетельствует о том, что микротрещины сливаются в макротрещины, делят структуру бетона на блоки, которые под нагрузкой смещаются относительно друг друга, что обуславливает разрушение бетонной матрицы [1–4]. Если же уровень нагрузки близок к верхней границе микротрещинообразования, но не превышает ее, пластические деформации в условиях статического нагружения со временем стабилизируются (даже при циклическом изменении нагрузки [5, 6]).

Нижняя граница микротрещинообразования для обычного бетона определяет предел выносливости при многократно повторяющейся нагрузке [5]. Причем в [7] экспериментально доказано, что значение  $\eta_{cr0}$  является практически одинаковым как при одноосном, так и при двухосном сжатии в условиях отсутствия трения по периметру образца, а в условиях двухосного сжатия (с трением по контактным поверхностям образца и испытательной установки) микроразрушения в образце возникают при более высоких напряжениях, чем при одноосном сжатии.

Работы О. Я. Берга стали классикой теории работы бетона и железобетона [8, 9]. О. Я. Берг предложил следующие эмпирические зависимости для определения относительных значений нагрузок, соответствующих нижней и верхней границам микротрещинообразования:

$$\eta_{cr0} = \frac{f_{cr0}}{f_c} = 0.351g f_{cm} - 0.15, \quad (1)$$

$$\eta_{crv} = \frac{f_{crv}}{f_c} = 0.351g f_{cm} + 0.175, \quad (2)$$

где  $f_{cm}$  – средняя призмная прочность бетона на осевое сжатие.

Данными зависимостями при проведении экспериментальных исследований успешно пользовались многие известные ученые на протяжении длительного времени, поскольку они обеспечивали достаточную сходимость с опытными данными.

Однако в современном мире помимо традиционного бетона все чаще применяются другие виды бетонов, имеющие специфические свойства, необходимые для достижения тех или иных целей строительства. Например, широкое применение сегодня находят высокопрочные бетоны, легкие бетоны, бетоны с дисперсным армированием, напрягающие бетоны, бетоны с использованием альтернативных видов заполнителей и т. п. В этих условиях зависимости (1) и (2) теряют свою актуальность, т. к. использование десятичного логарифма не позволяет применять эти зависимости в широком диапазоне прочностей, а использование в расчете только значения средней прочности ограничивает их применение для разных видов бетона. Поэтому выведение новых формул, более универсальных, применимых для бетонов разных видов и классов, на сегодняшний день является актуальным.

В настоящее время различные исследователи проявляют интерес к данному вопросу и предлагают новые зависимости для определения границ микротрещинообразования.

Например, в работе [10] отмечается, что для тяжелого бетона результаты расчета по формулам (1), (2) хорошо согласуются с опытными данными, а для песчаного бетона экспериментальные значения оказались выше расчетных в среднем на 17.3 %.

В работе [7] предложены экспоненциальные зависимости для определения  $f_{cr0}$  и  $f_{crv}$  (как функция от прочности при сжатии  $f_c$ ), а для двухосного напряженного состояния вводятся поправочные коэффициенты.

В работе [11, 12] указано, что зависимости (1), (2) не учитывают такие факторы, определяющие прочность бетона, как условия твердения, характер напряженного состояния, форму и размер железобетонных конструкций, и вносятся предложения по учету указанных факторов путем введения системы поправочных эксцентриситетов.

Известно, что при обработке опытных данных на разброс значений относительных границ микротрещинообразования существенное влияние оказывает пористость цементного камня, что было отмечено в работе [10]. Результаты экспериментов показали, что пропаривание незначительно (на 8-12 %) снижает уровень напряжений  $\eta_{cr0}$ , а отсутствие жесткого заполнителя увеличивает значение  $\eta_{cr0}$  на 10-14 %.

Применение фибровой арматуры существенно снижает образование микротрещин и раскрытие макротрещин. Это относится к любому виду фибрового армирования: стальной фиброй [13–17], полимерной фиброй [18–20].

В результате проведенных исследований в [10] отмечается интересный факт: для призмочной прочности бетона 25 МПа изменение пористости цементного камня с 6.3 до 8.2 % приводит к снижению  $f_{crс}^0$  на 15 %, для призмочной прочности повышение пористости с 4.8 до 6.4 % снижает напряжение  $f_{crс}^0$  на 48 %; существенно снижается также  $f_{crс}^v$ . Таким образом, при одной и той же прочности бетона величина нижней границы микротрещинообразования ( $\eta_{crс}^0$ ) тем меньше, чем выше пористость цементного камня. Но наиболее существенное влияние на интенсивность вторичного поля напряжений оказывает крупный заполнитель.

Т. е. если использовать пористый материал в качестве крупного заполнителя (легкие бетоны), ситуация принципиально меняется.

## 2. Методы

Исследования работы керамзитобетона, проведенные в Белорусско-Российском университете, показывают, что пористость крупного заполнителя также оказывает влияние и на значение верхней границы микротрещинообразования ( $\eta_{crс}^v$ ): чем выше пористость, тем выше нижняя и верхняя границы микротрещинообразования [21]. Связано это с тем, что при использовании пористого крупного заполнителя контакт между заполнителем и цементной матрицей является более плотным: при рассмотрении среза под микроскопом [22–24] четкая линия разделения отсутствует, таким образом, уменьшается количество концентраторов напряжений, вызывающих микроразрушения бетона в процессе приложения нагрузки.

Низкая плотность керамзитобетона учитывается коэффициентом  $k_{c1,2}$ , значение которого принято равным приблизительно 1,2, т. е.  $k_{c1} \approx 1.2$  при плотности бетона  $\rho < 2200 \text{ кг/м}^3$ .

Для других видов бетона (были исследованы нормальный бетон, сталефибробетон, бетон на основе ваграночного шлака) с использованием плотного заполнителя ( $\rho > 2200 \text{ кг/м}^3$ )  $k_{c1} = 1,0$ .

Опытные значения границ микротрещинообразования определялись графическим методом по результатам измерения продольных и поперечных деформаций на стандартных образцах в виде призм с размерами 150×150×600 мм и цилиндров диаметром 150 мм высотой 300 мм. Относительное значение верхней границы микротрещинообразования находилось как пиковая точка зависимости “Уровень нагружения – объемная деформация”, нижняя граница – путем взятия второй производной от зависимости “Уровень нагружения – коэффициент Пуассона” [5, 6].

Авторами статьи были проведены экспериментальные исследования работы различных видов бетона, по результатам которых предложены новые эмпирические зависимости для определения границ микротрещинообразования:

$$\eta_{crс}^0 = 0.33k_{crс} \cdot \ln \frac{f_{cm}}{f_{cm,0}} - 0.15; \quad (3)$$

$$\eta_{crс}^v = 0.33k_{crс} \cdot \ln \frac{f_{cm}}{f_{cm,0}} + 0.1, \quad (4)$$

где  $f_{cm}$  – средняя прочность бетона, МПа;

$f_{cm,0}$  – единичное значение средней прочности бетона,  $f_{cm,0} = 1 \text{ МПа}$ ;

$k_{crс}$  – эмпирический коэффициент.

## 3. Результаты и обсуждение

### 3.1. Результаты экспериментальных исследований

На основании экспериментальных данных было установлено, что между значениями относительных нагрузок для верхнего и нижнего пределов микротрещинообразования существует линейная зависимость [1]. Отношение значений уровня нагрузки, соответствующего нижней границе микротрещинообразования, к значению уровня нагрузки, соответствующего верхней границе, остается постоянным независимо от класса бетона, т. е.  $\eta_{crс}^0/\eta_{crс}^v = \text{const}$ .

Величина отношения  $\eta_{cr}^0/\eta_{cr}^v$  может быть принята:

- $\eta_{cr}^0/\eta_{cr}^v \approx 0.67$  – для нормального бетона [5];
- $\eta_{cr}^0/\eta_{cr}^v \approx 0.70$  – для сталефибробетона (СФБ) на основе фибры «Vulkan Harex» заводского изготовления [5];
- $\eta_{cr}^0/\eta_{cr}^v \approx 0.60$  – для керамзитобетона [21];
- $\eta_{cr}^0/\eta_{cr}^v \approx 0.73$  – для бетона с использованием отходов литейно-металлургических производств в качестве мелкого заполнителя (ОМП-бетона) [25] (возможность применения отходов промышленности для производства бетона обосновано в работах [26, 27]).

Эмпирический коэффициент  $k_{cr}$ , принятый на основании значения  $\eta_{cr}^0/\eta_{cr}^v$ , может быть использован при выполнении расчетов бетонных и железобетонных конструкций:

$$k_{cr} = k_{cl} \cdot \frac{\eta_{cr}^0}{\eta_{cr}^v} \quad (5)$$

В таблице 1 приведены результаты расчета границ микротрещинообразования для рассмотренных видов бетона разных классов по методике О. Я. Берга и по предложенным зависимостям. Обработке подвергались также опытные данные других исследователей [28–32].

**Таблица 1. Результаты расчета относительных значений границ микротрещинообразования**

Вид бетона	Средняя призмачная прочность $f_{cm}$ , МПа	Значения отношения $\eta_{cr}^0/\eta_{cr}^v$		Относительные значения границ микротрещинообразования						Отклонения расчетных значений от опытных, %			
		Опытные	Принятые	Опытные значения		Расчетные значения				По методике О. Я. Берга		По предлагаемой методике	
						по формулам (1), (2)		по формулам (3), (4)					
				$\eta_{cr}^0$	$\eta_{cr}^v$	$\eta_{cr}^0$	$\eta_{cr}^v$	$\eta_{cr}^0$	$\eta_{cr}^v$	$\Delta\eta_{cr}^0$	$\Delta\eta_{cr}^v$	$\Delta\eta_{cr}^0$	$\Delta\eta_{cr}^v$
Нормальный бетон [5, 6, 28]	18.7	0.680	0.67	0.51	0.75	0.295	0.620	0.497	0.747	42.1	17.3	2.5	0.3
	19.4	0.682	0.67	0.58	0.85	0.301	0.626	0.506	0.756	48.1	26.4	12.8	11.1
	22.3	0.667	0.67	0.54	0.81	0.322	0.647	0.536	0.786	40.4	20.1	0.7	2.9
	28.1	0.639	0.67	0.53	0.83	0.357	0.682	0.588	0.838	32.6	17.8	-10.9	-0.9
	28.2	0.679	0.67	0.57	0.84	0.358	0.683	0.588	0.838	37.3	18.7	-3.2	0.2
	29	0.674	0.67	0.58	0.86	0.362	0.687	0.595	0.845	37.6	20.1	-2.5	1.8
[29]	12.7	0.629	0.67	0.44	0.7	0.236	0.561	0.412	0.662	46.3	19.8	6.4	5.4
	28.5	0.631	0.67	0.53	0.84	0.359	0.684	0.591	0.841	32.2	18.5	-11.4	-0.1
[30]	18.3	0.682	0.67	0.58	0.85	0.292	0.617	0.493	0.743	49.7	27.4	15.0	12.6
[31]	26.9	0.667	0.67	0.54	0.81	0.350	0.675	0.578	0.828	35.1	16.6	-7.0	-2.2
Керамзитобетон [21]	9.1	0.577	0.60	0.41	0.71	0.186	0.511	0.375	0.625	54.7	28.1	8.6	12.0
	10.7	0.603	0.60	0.44	0.73	0.210	0.535	0.413	0.663	52.2	26.7	6.1	9.2
	11.2	0.603	0.60	0.44	0.73	0.217	0.542	0.424	0.674	50.6	25.7	3.6	7.7
	15.9	0.667	0.60	0.50	0.75	0.270	0.595	0.507	0.757	45.9	20.6	-1.5	-1.0
	17.7	0.600	0.60	0.45	0.75	0.287	0.612	0.533	0.783	36.3	18.4	-18.4	-4.4
СФБ [5, 6]	20.0	0.700	0.70	0.56	0.80	0.305	0.630	0.542	0.792	45.5	21.2	3.2	1.0
	[32]	21.3	0.625	0.70	0.50	0.80	0.315	0.640	0.557	0.807	37.0	20.0	-11.3
ОМП-бетон [6]	18.8	0.718	0.73	0.61	0.85	0.296	0.621	0.557	0.807	51.5	26.9	8.7	5.1
	26.6	0.742	0.73	0.66	0.89	0.349	0.674	0.640	0.890	47.2	24.3	3.0	0.0
ТЭС [30]	18.5	0.704	0.73	0.57	0.81	0.294	0.619	0.553	0.803	48.5	23.6	3.0	0.9
Среднее отклонение $\overline{\Delta\eta_{cr}} = \sum_{i=1}^n \Delta\eta_{cr,i} / n$										43.5	21.9	0.4	3.0
Среднее отклонение (по абсолютной величине) $\overline{ \Delta\eta_{cr} } = \sum_{i=1}^n  \Delta\eta_{cr,i}  / n$										43.6	22.2	6.9	4.1

Примечание: ТЭС – бетон с использованием шлака ТЭС в качестве мелкого заполнителя.

### 3.2. Оценка надежности предложенной математической модели

Согласно EN 1990 [33, 34] следует применять действительные значения измеренных характеристик в функции сопротивления для получения теоретических значений  $\gamma_{ti}$ , которые сравнивают с экспериментальными значениями  $\gamma_{ei}$ .

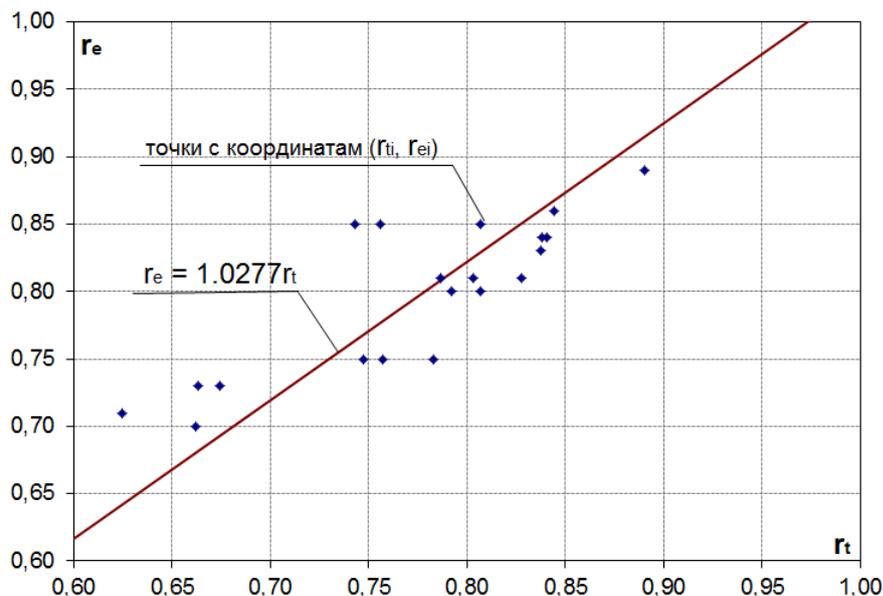
**Таблица 2. Оценка коэффициента вариации вектора ошибок для методики определения верхней границы микротрещинообразования по зависимости (4)**

$r_e = \eta^v_{сгс\ эксп}$	$r_t = \eta^v_{сгс\ расч}$	$r_e \cdot r_t$	$r_t^2$	Ошибка $\delta_i$	Логарифм вектора ошибок $\Delta_i$	$(\bar{\Delta} - \Delta_i)^2$
0.75	0.75	0.5606	0.5588	0.976	-0.0240	0.000832
0.85	0.76	0.6423	0.5710	1.095	0.0904	0.007312
0.81	0.79	0.6370	0.6185	1.002	0.0022	0.000007
0.83	0.84	0.6952	0.7015	0.964	-0.0364	0.001700
0.84	0.84	0.7042	0.7028	0.975	-0.0253	0.000911
0.86	0.84	0.7263	0.7132	0.991	-0.0092	0.000196
0.70	0.66	0.4634	0.4382	1.029	0.0286	0.000562
0.84	0.84	0.7062	0.7067	0.972	-0.0281	0.001088
0.81	0.83	0.6706	0.6854	0.952	-0.0492	0.002920
0.85	0.74	0.6313	0.5516	1.114	0.1076	0.010554
0.71	0.62	0.4435	0.3902	1.106	0.1007	0.009183
0.73	0.66	0.4841	0.4398	1.071	0.0687	0.004074
0.73	0.67	0.4920	0.4543	1.054	0.0524	0.002265
0.75	0.76	0.5680	0.5735	0.964	-0.0370	0.001751
0.75	0.78	0.5871	0.6127	0.932	-0.0701	0.005616
0.80	0.79	0.6336	0.6273	0.983	-0.0173	0.000491
0.80	0.81	0.6452	0.6505	0.965	-0.0355	0.001629
0.85	0.81	0.6858	0.6509	1.025	0.0249	0.000401
0.89	0.89	0.7924	0.7928	0.973	-0.0278	0.001063
0.81	0.80	0.6503	0.6446	0.982	-0.0185	0.000546
Среднее значение экспериментальных результатов					$r_{em} =$	0.79800
Среднее значение результатов расчета					$r_{tm} =$	0.77418
Уклон, определяемый по методу наименьших квадратов					$b =$	1.0277
Значение ошибки для экспериментальных значений					$\delta_m =$	1.0062
Оценочное значение вектора $\Delta$					$\bar{\Delta} =$	0.00485
Выборочная дисперсия вектора $\Delta$					$s_{\Delta}^2 =$	0.0028
Коэффициент вариации для вектора ошибок $\delta$					$V_{\delta} =$	0.0529
Среднее значение теоретической функции сопротивления, рассчитанное с использованием средних значений базисных переменных					$r_m =$	0.80058
Отклонение среднего значения теоретической функции $r_m$ от среднего значения экспериментальных результатов $r_{em}$ , %					$\% \Delta_{rm} =$	-0.32

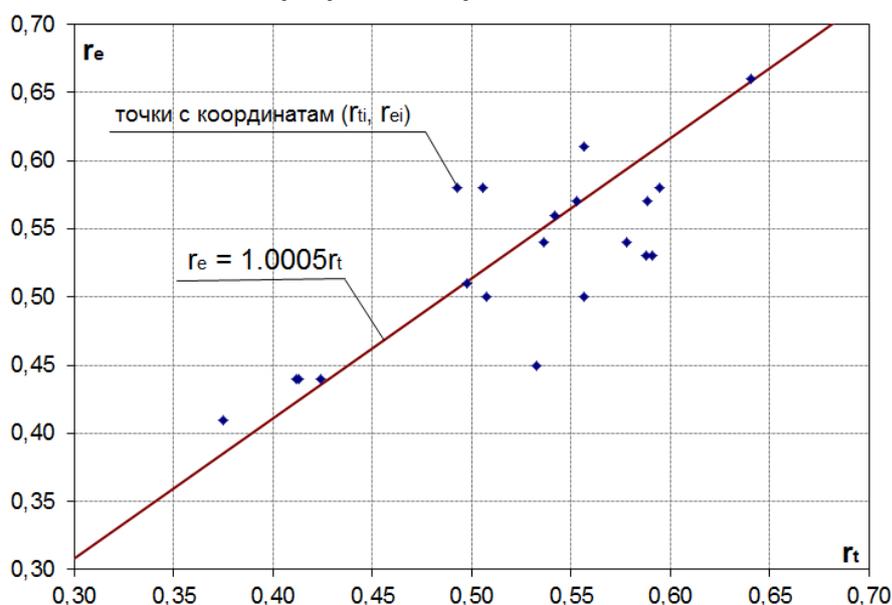
**Таблица 3. Оценка коэффициента вариации вектора ошибок для методики определения нижней границы микротрещинообразования по зависимости (3)**

$r_e = \eta^0_{сгс\ эксп}$	$r_t = \eta^0_{сгс\ расч}$	$r_e \cdot r_t$	$r_t^2$	Ошибка $\delta_i$	Логарифм вектора ошибок $\Delta_i$	$(\bar{\Delta} - \Delta_i)^2$
0.51	0.50	0.2537	0.2475	1.025	0.0244	0.000380
0.58	0.51	0.2933	0.2557	1.147	0.1368	0.017403
0.54	0.54	0.2897	0.2878	1.006	0.0062	0.000002
0.53	0.59	0.3114	0.3452	0.902	-0.1035	0.011747
0.57	0.59	0.3353	0.3461	0.968	-0.0321	0.001366
0.58	0.59	0.3448	0.3534	0.975	-0.0252	0.000902
0.44	0.41	0.1813	0.1697	1.068	0.0654	0.003667
0.53	0.59	0.3131	0.3489	0.897	-0.1088	0.012925
0.54	0.58	0.3121	0.3340	0.934	-0.0683	0.005348
0.58	0.49	0.2858	0.2428	1.177	0.1626	0.024893
0.41	0.37	0.1536	0.1404	1.094	0.0896	0.007182
0.44	0.41	0.1818	0.1707	1.064	0.0624	0.003317
0.44	0.42	0.1866	0.1798	1.037	0.0365	0.001003
0.50	0.51	0.2536	0.2573	0.985	-0.0149	0.000391
0.45	0.53	0.2397	0.2838	0.844	-0.1693	0.030325
0.56	0.54	0.3035	0.2938	1.033	0.0322	0.000747
0.50	0.56	0.2783	0.3098	0.898	-0.1076	0.012654
0.61	0.56	0.3396	0.3100	1.095	0.0908	0.007395
0.66	0.64	0.4226	0.4101	1.030	0.0297	0.000619
0.57	0.55	0.3151	0.3057	1.030	0.0300	0.000633
Среднее значение экспериментальных результатов					$r_{em} =$	0.52700
Среднее значение результатов расчета					$r_{tm} =$	0.52418
Уклон, определяемый по методу наименьших квадратов					$b =$	1.0005
Значение ошибки для экспериментальных значений					$\delta_m =$	1.0104
Оценочное значение вектора $\Delta$					$\bar{\Delta} =$	0.00684
Выборочная дисперсия вектора $\Delta$					$s_{\Delta}^2 =$	0.0075
Коэффициент вариации для вектора ошибок $\delta$					$V_{\delta} =$	0.0869
Среднее значение теоретической функции сопротивления, рассчитанное с использованием средних значений базисных переменных					$r_m =$	0.52991
Отклонение среднего значения теоретической функции $r_m$ от среднего значения экспериментальных результатов $r_{em}$ , %					$\% \Delta_{rm} =$	-0.55

Точки, представляющие пары соответствующих значений ( $r_{ti}$ ,  $r_{ei}$ ), а также прямые  $r_e = b \cdot r_t$  изображены на диаграммах « $r_e - r_t$ » (рисунки 1, 2).



**Рисунок 1. Диаграмма « $r_e - r_t$ » для относительных значений верхней границы микротрещинообразования**



**Рисунок 2. Диаграмма « $r_e - r_t$ » для относительных значений нижней границы микротрещинообразования**

Так как на диаграмме « $r_e - r_t$ » все точки расположены довольно близко к прямой  $r_e = b \cdot r_t$ , а угол наклона прямой составляет примерно  $45^\circ$  ( $\arctan b^{\eta_{\text{vcr}}} = \arctan 1.0277 = 45.78^\circ$ ;  $\arctan b^{\eta_{\text{ocr}}} = \arctan 1.0005 = 45.01^\circ$ ), то можно считать, что рассмотренные функции являются достаточно полными и точными. Т.к. коэффициент вариации не превышает 15 % ( $v^{\eta_{\text{vcr}}} = 0.053 < 0.15$ ;  $v^{\eta_{\text{ocr}}} = 0.087 < 0.15$ ), следовательно, предлагаемую расчетную модель можно считать надежной.

Данные, приведенные в таблице 1 и на диаграммах (рисунки 1, 2), наглядно демонстрируют адекватность применения предлагаемой методики для определения относительных значений границ микротрещинообразования.

#### 4. Заключение

1. В зависимостях, предложенных для определения относительных значений пределов нижнего и верхнего микротрещинообразования, используется натуральный логарифм вместо десятичного, что позволяет рассчитывать  $\eta_{\text{vcr}}^v$  и  $\eta_{\text{ocr}}^0$  в более широком диапазоне прочностей, а введение эмпирического коэффициента  $k_{\text{ocr}}$  делает предложенные зависимости универсальными и

применимыми для бетонов разных видов (были исследованы нормальный бетон, керамзитобетон, сталефибробетон, бетон на основе ваграночного шлака). Данное утверждение подтверждается обработкой собственных экспериментальных данных и данных других исследователей (таблица 1).

2. Коэффициент  $K_{срс}$  также может служить параметром, характеризующим способность бетонной матрицы сопротивляться действию статических малоцикловогом нагрузок: чем выше значение коэффициента  $K_{срс}$ , тем меньшее влияние оказывает статическое малоцикловое нагружение на прочностные и деформативные характеристики бетона.
3. В перспективе целесообразным представляется исследование влияния пористости легких бетонов на величину коэффициента  $K_{с1}$  для уточнения его значения при разных значениях плотности.

## Литература

- [1]. Chini A. R., Villavicencio E. J.. Detection of Microcracks in Concrete Cured at Elevated Temperature / University of Florida, Gainesville, 2006. 86 p.
- [2]. Farhad Ansari. Mechanism of microcrack formation in concrete / ACI Materials Journal, Vol. 86, Issue 5. Pp.459-464.
- [3]. Thomas T. C. Hsu. Fatigue and microcracking of concrete / Materials and Structures. Vol. 17, Issue 1. 1984. Pp 51–54.
- [4]. Villavicencio, Camacho Enrique J. Analysis of Microcrack Behavior in Mass Concrete / University of Florida, 2006. 72 p.
- [5]. Москалькова Ю. Г. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при статическом и малоцикловом нагружениях : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01; Белорус.-Рос. ун-т. Могилев, 2013. 199 с.
- [6]. Семенюк С. Д., Москалькова Ю. Г. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при статическом и малоцикловом нагружениях : моногр. / Белорус.-Рос. ун-т. Могилев, 2017. 274 с. : ил.
- [7]. Истомин А. Д., Беликов Н. А. Зависимость границ микротрещинообразования бетона от его прочности и напряженного состояния // Вестник МГСУ. Строительство. Архитектура, 2011. № 2-1. С. 159–162.
- [8]. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М. : Госстройиздат, 1962. 96 с.
- [9]. Берг О. Я., Щербakov Е. Н., Писанко Г. Н. Высокопрочный бетон. М. : Стройиздат, 1971. 208 с.
- [10]. Ахмедов А. И. Влияние микроразрушений бетона на эксплуатационные качества строительных конструкций : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.01; Московский институт коммунального хозяйства и строительства. М., 2006. 22 с.
- [11]. Бобров В. В. Методы оценки влияния различных факторов на процесс микроразрушений бетона под нагрузкой : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.01; Московский гос. строит. ун-т. М., 2015. 26 с.
- [12]. Бобров В. В. Микроразрушения бетона при центральном сжатии. Архитектура и строительство России. М., 2009. № 10. С. 26–37.
- [13]. Jansson A. Fibres in reinforced concrete structures – analysis, experiments and design / Göteborg, Sweden, 2008. 66 p.
- [14]. Noaman A. T., Abu Bakar B. H., Akil H. M. Experimental investigation on compression toughness of rubberized steel fibre concrete / Construction and Building Materials. Vol. 115, 2016. Pp. 163–170.
- [15]. Yihong Wang, Jiawei Chen, Danying Gao, Huang E. Mechanical Properties of Steel Fibers and Nanosilica Modified Crumb Rubber Concrete / Advances in Civil Engineering. Vol. 2018. Article ID 6715813, 10 pages.
- [16]. Klyuyev S. V., Klyuyev A. V., Lesovik R. V., Netrobenko A. V. High Strength Fiber Concrete for Industrial and Civil Engineering // World Applied Sciences Journal, 2013. No 24 (10). Pp. 1280–1285.
- [17]. Ключев С. В., Ключев А. В., Сопин Д. М., Нетребенко А. В.,

## References

- [1]. Chini A. R., Villavicencio E. J. Detection of Microcracks in Concrete Cured at Elevated Temperature. University of Florida, Gainesville, 2006. 86 p.
- [2]. Farhad Ansari. Mechanism of microcrack formation in concrete. ACI Materials Journal, Vol. 86, Issue 5. Pp. 459–464.
- [3]. Thomas T. C. Hsu. Fatigue and microcracking of concrete. Materials and Structures. Vol. 17, Issue 1. 1984. Pp 51–54.
- [4]. Villavicencio, Camacho Enrique J. Analysis of Microcrack Behavior in Mass Concrete. University of Florida, 2006. 72 p.
- [5]. Moskalkova Yu. G. Prochnost i deformativnost izgibayemykh zhelezobetonnykh elementov usilennykh narashchivaniyem szhatoy zony pri staticheskom i malotsiklovom nagruzheniyakh [Strength and deformability of bendable reinforced concrete elements strengthened by the build-up of a compressed zone, under static and low-cycle loading]. Candidate's thesis: 05.23.01; Belarusian-Russian University. Mogilev, 2013. 199 p. (rus)
- [6]. Semenyuk S. D., Moskalkova Yu. G. Prochnost i deformativnost izgibayemykh zhelezobetonnykh elementov usilennykh narashchivaniyem szhatoy zony pri staticheskom i malotsiklovom nagruzheniyakh [Strength and deformability of bendable reinforced concrete elements strengthened by the build-up of a compressed zone, under static and low-cycle loading]. Mogilev: Belarusian-Russian University, 2017. 274 p. (rus)
- [7]. Istomin A. D., Belikov N. A. Zavisimost granits mikrotreshchinoobrazovaniya betona ot ego prochnosti i napyazhennogo sos-toyaniya [Dependence of the limits of microcrack formation for concrete on its strength and stress state]. Vestnik MGSU. Stroitelstvo. Arkhitektura. 2011. No 2-1. Pp. 159-162. (rus)
- [8]. Berg O. Ya. Fizicheskiye osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona [Physical fundamentals of the theory of the concrete and reinforced concrete strength]. Moscow: Gosstroyizdat. 1962. 96 p. [rus].
- [9]. Berg O. Ya., Shcherbakov E. N., Pisanko G. N. Vysokoprochnyy beton [High-strength concrete]. Moscow: Stroyizdat. 1971. 208 p. (rus)
- [10]. Akhmedov A. I. Vliyanie mikrorazrusheniya betona na ekspluatatsionnyye kachestva stroitelnykh kon-struktsiy [Influence of concrete microfractures on the operational qualities of building structures]: Extended abstract of candidate's thesis: 05.23.01; Moscow: Moscow Institute of Municipal Economy and Construction, 2006. 22 p. (rus)
- [11]. Bobrov V. V. Metody otsenki vliyaniya razlichnykh faktorov na protsess mikrorazrusheniya betona pod nagruzkoj [Methods for evaluating the influence of various factors on the process of microfractures of concrete under load]: Extended abstract of candidate's thesis: 05.23.01; Moscow, 2015. 26 p. (rus)
- [12]. Bobrov V. V. Mikrorazrusheniya betona pri tsentralnom szhatii [Micro deterioration of concrete under axial compression]. Arkhitektura i stroitelstvo Rossii. M., 2009.No. 10. Pp. 26–37. (rus)
- [13]. Jansson A. Fibres in reinforced concrete structures – analysis, experiments and design. Göteborg, Sweden, 2008. 66 p.
- [14]. Noaman A. T., Abu Bakar B. H., Akil H. M. Experimental investigation on compression toughness of rubberized steel fibre concrete. Construction and Building Materials. Vol. 115, 2016.

- Казлитин С. А. Тяжелонагруженные полы на основе мелкозернистых фибробетонов // Инженерно-строительный журнал, 2013. № 3. С. 7–14.
- [18]. Klyuev S. V., Klyuev A. V., Abakarov A. D., Shorstova E. S., Gafarova N. G. The effect of particulate reinforcement on strength and deformation characteristics of fine-grained concrete // Magazine of Civil Engineering, 2017. No. 7. Pp. 66–75.
- [19]. Kolli Ramujee. Strength Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete / International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 2, Issue 8. 2013. Pp. 3409–3413.
- [20]. Pothisiri T., Soklin C. Effects of Mixing Sequence of Polypropylene Fibers on Spalling Resistance of Normal Strength Concrete / Engineering Journal. Vol. 18, No. 3. 2014. Pp. 55–64.
- [21]. Moskalkova Yu. H. Behavior of claydite at the stage of microcrack formation // Наука та будівництво. Київ, 2017. № 3 (13). С. 40–43.
- [22]. Chandra S., Berntsson L. Lightweight aggregate concrete. Science, Technology, and Applications / Norwich, New York, U.S.A.: Noyes Publications / William Andrew Publishing, 2002. 407 p.
- [23]. Clarke, J. L. Structural Lightweight Aggregate Concrete / Glasgow, UK: Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, 2005. 161 p.
- [24]. Gunasekaran Mr. M. Saranya G., Elamaram L., Sakthivel P., Suresh P. Development of Light Weight Concrete by using Autoclaved Aerated Concrete / IJIRST – International Journal for Innovative Research in Science & Technology, Volume 2, Issue 11. 2016. P. 518–522.
- [25]. Семенюк С. Д., Москалькова Ю. Г. Особенности деформирования бетона на основе отходов литейно-металлургических производств при малоцикловом нагружении // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. научн. тр. / Институт БелНИИС ; редкол. : М. Ф. Марковский [и др.]. Минск: СтройМедиаПроект, 2014. Вып. 8. С. 283–297.
- [26]. Цыбакин С. В. Тяжелые бетоны с наполнителем из отходов литейного производства : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05; Московский гос. строит. ун-т. М., 1999. 21 с.
- [27]. Lesovik R. V., Klyuyev S. V., Klyuyev A. V., Tolbatov A. A., Durachenko A.V. The Development of textile fine-grained fiber concrete using technogenic raw materials // Research Journal of Applied Sciences, 2015. No 10 (10). Pp. 701–706.
- [28]. Семенюк С. Д. Прогнозирование работы и расчет железобетонных пространственных конструкций на неравномерно деформируемом основании : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01; 05.23.02. Могилев, 2004. 381 с.
- [29]. Поветкин М. С. Напряженно-деформированное состояние усиленных под нагрузкой железобетонных изгибаемых пред-напряженных элементов : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01; Курский гос. техн. ун-т. Курск, 2009. 213 с.
- [30]. Голуб А. В. Особенности прочностных и деформативных свойств бетона со шлаком ТЭС и их учет при расчете железобетонных конструкций: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Ровно, 1989. 187 с.
- [31]. Бамбура А. М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01; Харківський держ. техн. ун-т буд-ва та архі-ри. Харків, 2006. 379 с.
- [32]. Дробишинець С. Я. Вплив повторних малоциклових навантажень на механічні характеристики сталеві фибробетону та роботу згинальних елементів на його основі : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01; Луцький держ. техн. ун-т. Луцьк, 2005. 174 с.
- [33]. Основы проектирования строительных конструкций: ТКП Pp. 163–170.
- [15]. Yihong Wang, Jiawei Chen, Danying Gao, Huang E. Mechanical Properties of Steel Fibers and Nanosilica Modified Crumb Rubber Concrete. Advances in Civil Engineering. Vol. 2018. Article ID 6715813, 10 pages.
- [16]. Klyuyev S. V., Klyuyev A. V., Lesovik R. V., Netrebenko A. V. High Strength Fiber Concrete for Industrial and Civil Engineering. World Applied Sciences Journal, 2013. No 24 (10). Pp. 1280-1285.
- [17]. Klyuyev S. V., Klyuyev A. V., Sopin D. M., Netrebenko A. V., Kazlitin S. A. Heavy loaded floors based on fine-grained fiber concrete. Magazine of Civil Engineering, 2013. No 3. Pp. 7-14. (rus)
- [18]. Klyuev S. V., Klyuev A. V., Abakarov A. D., Shorstova E. S., Gafarova N. G. The effect of particulate reinforcement on strength and deformation characteristics of fine-grained concrete. Magazine of Civil Engineering, 2017. No. 7. Pp. 66–75.
- [19]. Kolli Ramujee. Strength Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 2, Issue 8. 2013. Pp. 3409–3413.
- [20]. Pothisiri T., Soklin C. Effects of Mixing Sequence of Polypropylene Fibers on Spalling Resistance of Normal Strength Concrete. Engineering Journal. Vol. 18, No. 3. 2014. Pp. 55–64.
- [21]. Moskalkova Yu. H. Behavior of claydite at the stage of microcrack formation. Science and Construction. Kiev, 2017. No 3 (13). Pp. 40–43.
- [22]. Chandra S., Berntsson L. Lightweight aggregate concrete. Science, Technology and Applications. Norwich, New York, U.S.A.: Noyes Publications, William Andrew Publishing. 2002. 407 p.
- [23]. Clarke, J. L. Structural Lightweight Aggregate Concrete / Glasgow, UK: Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, 2005. 161 p.
- [24]. Gunasekaran Mr. M. Saranya G., Elamaram L., Sakthivel P., Suresh P. Development of Light Weight Concrete by using Autoclaved Aerated Concrete. IJIRST – International Journal for Innovative Research in Science & Technology, Volume 2, Issue 11. 2016. P. 518–522.
- [25]. Semenyuk S. D., Moskalkova Yu. G. Osobennosti deformirovaniya betona na osnove otkhodov liteynometallurgicheskikh proizvodstv pri malotsiklovom nagruzhenii [Features of concrete deformation on the basis of by-product under low-cycle loading]. Problems of modern concrete and reinforced concrete. Minsk: StroyMediaProyekt. 2014. No 8. Pp. 283–297. (rus)
- [26]. Tsybakin S. V. Tyazhelye betony s napolnitelem iz otkhodov liteynogo proizvodstva [Heavy concrete with by-product]: Extended abstract of candidate's thesis: 05.23.05; Moscow, 1999. 21 p. (rus)
- [27]. Lesovik R. V., Klyuyev S. V., Klyuyev A. V., Tolbatov A. A., Durachenko A.V. The Development of textile fine-grained fiber concrete using technogenic raw materials. Research Journal of Applied Sciences, 2015. No 10 (10). Pp. 701–706.
- [28]. Semenyuk S. D. Prognozirovaniye raboty i raschet zhelezobetonnnykh prostranstvennykh konstruktсий na neravnomerno deformiruyemom osnovanii [Operation forecasting and design of reinforced concrete spatial structures on non-uniformly deformable bases]. Doctor's thesis: 05.23.01; 05.23.02; Belarusian-Russian University. Mogilev, 2004. 381 p. (rus)
- [29]. Povetkin M. S. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye usilennykh pod nagruzkoy zhelezobetonnnykh izgibayemykh prednapryazhennykh elementov [Stress-strain state of stressed-reinforced concrete flexural pre-stressed members]: Candidate's thesis: 05.23.01; Kursk State Technical University. Kursk, 2009. 213 p. (rus)
- [30]. Golub A. V. Osobennosti prochnostnykh i deformativnykh svoystv betona so shlakom TES i ikh uchet pri raschete zhelezobetonnnykh konstruktсий [Features of strength and deformation

EN 1990-2011 (02250). Еврокод. Введ. 01.07.2012. Минск: М-во архит. и строит. РБ, 2012. 61 с.

- [34]. Eurocode – Basis of structural design. BS EN 1990:2002. UK, 2002. 87 p.
- properties of concrete with slag and their accounting in the calculation of reinforced concrete structures]: Candidate's thesis: 05.23.01; Rovno, 1989. 187 p. (rus)
- [31]. Bambura A. M. Eksperimentalni osnovi prikladnoï deformatsiynoï teorii zalizobetonu [Experimental basis of applied deformation theory]. Doctor's thesis: 05.23.01; Krakow State Technical University of Civil Engineering and Architecture. Krakow, 2006. 379 p. (ukr)
- [32]. Drobishinets S. Ya. Vpliv povtornikh malotsiklovikh navantazhen na mekhanichni kharakteristiki sta-lefibrobetonu ta robotu zginalnikh elementiv na yogo osnovi [Influence of repeated low-cycle loads on the mechanical characteristics of steel fiber concrete and the behavior of flexural members on its basis]. Candidate's thesis: 05.23.01; Lutsk State Technical University. Lutsk, 2005. 174 p. (ukr)
- [33]. Osnovy proyektirovaniya stroitelnykh konstruksiy [Basis of structural design]: ТКР EN 1990-2011 (02250). Eurocode. Minsk, 2012. 61 p. (rus)
- [34]. Eurocode – Basis of structural design. BS EN 1990:2002. UK, 2002. 87 p.

**Контактная информация**

1. +375297433872, skzs@tut.by (Семенюк Слава Денисович, д.т.н., профессор)
- 2.\* +375297429183, julia43@tut.by (Москалькова Юлия Георгиевна, к.т.н., доцент)

**Contact information**

1. +375297433872, skzs@tut.by (Slava Semenyuk, Ph.D., Professor)
- 2.\* +375297429183, julia43@tut.by (Yuliya Moskalkova, Ph.D., Associate Professor)

© Семенюк С.Д., Москалькова Ю.Г. 2018