

Всемирной выставке ЭКСПО-98. Общая протяженность мостового перехода превышает 18 км. Основные несущие конструкции моста пилоны и пролетные строения были выполнены из бетона класса С45 (по старому – марка 600). Гарантированный срок службы моста 120 лет по критерию долговечности бетона. В России же в последнее время большепролетные мосты чаще строятся из стали.

Выдающийся вклад в развитие преднапряженного железобетона принадлежит российским ученым, которые создали и применили принципиально новые, эффективные самонапряженные и непрерывно армированные конструкции. Из самонапряженного железобетона выполнены различные емкости, плавательные бассейны, ледовые стадионы, плиты покрытий и многие другие. Метод непрерывного армирования позволил максимально механизировать и автоматизировать раскладку и напряжение высокопрочной проволоки и канатов в плитных конструкциях перекрытий и покрытий гражданских и промышленных зданий.

Широкое использование преднапряженного железобетона открывает значительные возможности для снижения расхода стали, главным образом, путем уменьшения металлоемкости ряда железобетонных несущих и ограждающих конструкций, а также путем вытеснения металлических конструкций из различных отраслей строительства.

Практических инженерных расчетов долговечности пока еще не существует; в связи с этим степени долговечности конструкций, указываемые в строительных нормах и правилах, условны и используются главным образом для экономических предположений (1-я степень - срок службы более 100 лет; 2-я - более 50 лет; 3-я - более 20 лет).

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Руфферт, Г. Дефекты бетонных конструкций / под ред. В.Б. Семенова, Москва, 1987. – 111 с.
2. ACI 216R-89, Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
3. ECI 1994, Eurocode 1: Basis of Design and Design Actions on Structures, Part 2-2: Actions of Structures Exposed to Fire, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
4. Buchanan, A. H., 2001 (editor), Fire Engineering Design Guide, Center for Advanced Engineering, University of Canterbury, New Zealand.
5. Buchanan, A. H., 2001, Structural Design for Fire Safety, John Wiley and Sons, LTD.
6. Kumahara, S.; Masuda, Y.; and Tanano, Y., 1993, Tensile Strength of Continuous Fiber Bar Under High Temperature, International Symposium on Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, SP-138, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

УДК 624.012

*Семенюк С.Д., Москалькова Ю.Г., Мельянцова И.И.*

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ НАГРУЗОК, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ВЕРХНЕМУ И НИЖНЕМУ ПРЕДЕЛАМ МИКРОТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ КЕРАМЗИТОБЕТОНА**

Бетон и железобетон в различных его модификациях есть и в перспективе будет одним из основных строительных материалов. Легкие бетоны средней прочности на основе керамзита широко используются в промышленном и гражданском строительстве, в частности в монолитном домостроении, а также для производства стеновых панелей сельскохозяйственных, промышленных и гражданских зданий. Комплексное использование легких бетонов позволяет решить проблемы энергоресурсосбережения при строительстве и техническом

обслуживании зданий и инженерных сооружений, повысить их надежность, долговечность и безопасность при эксплуатации.

Важными характеристиками прочности и деформативности бетона являются пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования. При центральном кратковременном сжатии на начальной стадии наблюдается незначительное увеличение числа контактных микротрещин на границе частиц заполнителя и цементного камня до уровня, соответствующего нижней границе микротрещинообразования  $\eta_{\text{м}}^{\circ}$ .

При превышении уровня  $\eta_{\text{м}}^{\circ}$  наблюдается интенсивное увеличение длины, ширины раскрытия и числа контактных микротрещин, что приводит к появлению нелинейного участка на графике зависимости «Напряжения – относительные деформации». Эта стадия характеризуется незначительным количеством микротрещин в цементном камне. Вместе с тем начинают появляться комбинированные микротрещины, объединяющие, главным образом, контактные микротрещины вокруг зерен заполнителя. Следует отметить, что формирование этих трещин, хотя и не нарушает стабильного состояния системы, приводит к скольжению зерен заполнителей относительно матрицы, что обуславливает проявление ярко выраженных неупругих свойств бетона.

При достижении верхней границы микротрещинообразования  $\eta_{\text{м}}^{\circ}$  увеличивается число и суммарная длина комбинированных трещин, возрастает их ширина раскрытия. На этой стадии начинают формироваться ярко выраженные микротрещины в цементном камне.

Интенсивное развитие комбинированных микротрещин не ведет к незамедлительному исчерпанию прочности материала, однако возникает опасность усталостного разрушения при длительном нагружении. В процессе приложения нагрузки в бетоне развиваются псевдопластические деформации, происходит накопление микроразрушений, в результате чего имеет место слияние микротрещин в макротрещины, которые приводят к разрушению бетонной матрицы. Также при действии малоцикловых нагрузок верхняя граница микротрещинообразования является «критической границей», при достижении которой малоцикловое нагружение оказывает негативное влияние на прочностные и деформативные характеристики бетона [1, 2].

Для проведения экспериментальных исследований были заформованы и испытаны 2 серии опытных образцов из керамзитобетона в виде кубов с размерами ребра 150 мм, призм размерами 150×150×600 мм и цилиндров диаметром 150 мм и высотой 300 мм. При этом использовался керамзитовый гравий фракций 5–10 мм и 10–20 мм в качестве крупного заполнителя с относительной прочностью в цилиндре 2,68 МПа и 1,86 МПа соответственно. Для обеих серий в качестве мелкого заполнителя служил кварцевый песок с модулем крупности  $M_{\text{кр}}=1,8$ , вяжущим – портландцемент ОАО «Белорусский цементный завод» марки М 500.

Составы керамзитобетонных смесей: Ц:П:Г=1:2,41:1,37 при водоцементном отношении В/Ц=0,51 (бетон плотностью 1390 кг/м<sup>3</sup>) и Ц:П:Г=1:1,84:0,79 (бетон плотностью 1545 кг/м<sup>3</sup>) при водоцементном отношении В/Ц=0,46.

Испытание призм на кратковременное центральное сжатие проводилось в полном соответствии с требованиями ГОСТ 24452-80. Нагружение призм образцов до их разрушения производилось с постоянной скоростью роста напряжений (0,6±0,2 МПа/с) ступенями, равными 10 % от ожидаемой разрушающей нагрузки. Значение ожидаемой разрушающей нагрузки при испытании призм принималось равным 80–85% от средней разрушающей нагрузки образ-

цов-кубов. При испытании призм измерялись продольные деформации индикаторами часового типа с ценой деления 0,01мм при базе 370–375 мм, установленными вдоль оси по четырем граням. Поперечные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм при базе 110–115 мм. Продольные и поперечные деформации по каждой отдельной призме (по показаниям четырех приборов механического действия) усреднялись. При отдельных отсчетах, резко отличавшихся от среднего, эти отсчеты и соответствующие им деформации по отдельным приборам из обработки опытных деформаций исключались [3–5].

Определение верхнего предела микротрещинообразования производилось по результатам испытания образцов призм с размерами 150×150×600 мм графическим методом по усредненным экспериментальным данным путем построения зависимости «Уровень нагружения  $\eta$  – объемная деформация  $\epsilon^V$ » (рисунок 1). Объемные деформации  $\epsilon^V$  при этом определяются по формуле (1) [2, 6, 7]:

$$\epsilon^V = \epsilon_c - 2\epsilon_v, \quad (1)$$

где  $\epsilon_c$  – продольные относительные деформации;

$\epsilon_v$  – поперечные относительные деформации.

На рисунке 1 изображена зависимость «Уровень нагружения  $\eta$  – объемная деформация  $\epsilon^V$ » для образца из керамзитобетона со средней прочностью 11,17 МПа в возрасте 28 суток при плотности 1390 кг/м<sup>3</sup>.

$$\epsilon^V = \epsilon_c - 2\epsilon_v, \times 10^3$$

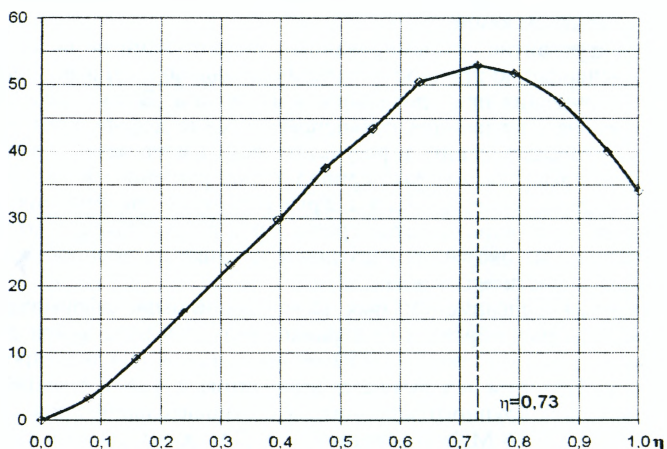


Рисунок 1 – Корреляционные зависимости «Уровень нагружения  $\eta$  – объемная деформация  $\epsilon^V$ » для образца из керамзитобетона прочностью 11,17 МПа в возрасте 28 суток

Определение нижнего предела микротрещинообразования  $\eta_{cr}^*$  также производилось графическим методом по экспериментальным данным. Сначала определялись значения секущих модулей по упругопластическим продольным  $E'_c$  относительным деформациям, для которых были выведены линейные зависимости « $\eta$  –  $E'_c$ » методом линейно-корреляционного анализа [9–11].

Линейный характер зависимости « $\eta$  –  $E'_c$ » был эмпирически обоснован в работе [1]. На основании полученных зависимостей были определены значения коэффициента Пуассона  $\nu$  (рисунок 2).

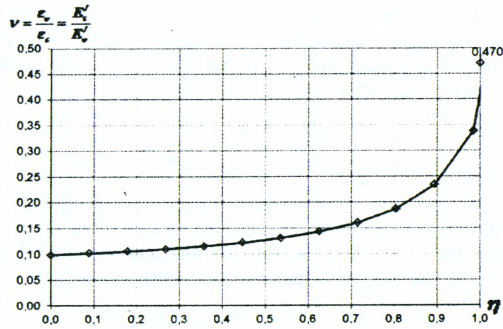


Рисунок 2 – Корреляционные зависимости «Уровень нагружения  $\eta$  – коэффициент Пуассона  $\nu$ » для образца из керамзитобетона прочностью 11,17 МПа в возрасте 28 суток

По корреляционным кривым зависимостей « $\frac{d\nu}{d\eta} - \eta$ » и « $\frac{d^2\nu}{d\eta^2} - \eta$ » были определены соответственно верхняя  $\eta_{crс}^v$  и нижняя  $\eta_{crс}^0$  границы образования и развития продольных микротрещин отрыва при кратковременном сжатии бетона (рисунки 3, 4) [6].

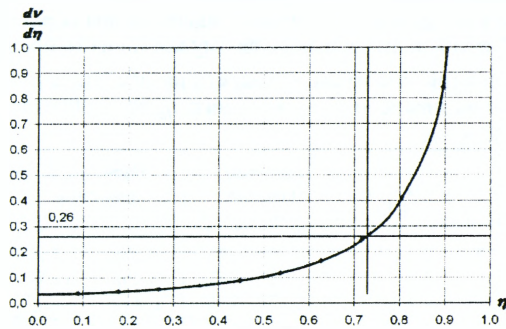


Рисунок 3 – Корреляционные зависимости « $\frac{d\nu}{d\eta} - \eta$ » для образца из керамзитобетона прочностью 11,17 МПа в возрасте 28 суток

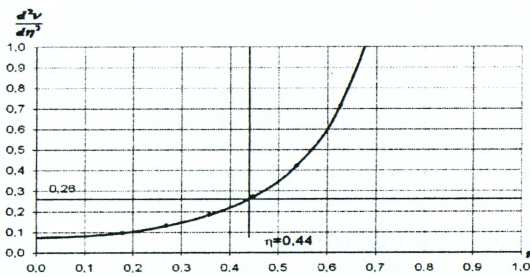


Рисунок 4 – Корреляционная зависимость « $\frac{d^2\nu}{d\eta^2} - \eta$ » для образца из керамзитобетона прочностью 11,17 МПа в возрасте 28 суток

На основании экспериментальных данных установлено, что между верхним и нижним пределами микротрещинообразования существует линейная зависимость. Таким образом, отношение значения нижнего уровня микротрещинообразования к верхнему остается постоянным:

$$k_{crc} = \frac{\eta_{crc}^0}{\eta_{crc}^v}. \quad (2)$$

Для легкого бетона  $k_{crc} \approx 0,60$ .

Для определения нижнего и верхнего пределов микротрещинообразования предложены зависимости (формулы (3), (4)), в которых помимо прочности бетона учтён вид бетона. В формулы (3), (4) введен эмпирический коэффициент  $k_{c1}$ , значение которого для керамзитобетона принято равным  $k_{c1} \approx 1,2$ .

$$\eta_{crc}^0 = 0,33k_{crc}k_{c1} \cdot \ln \frac{f_{lcm}}{f_{lcm,0}} - 0,15; \quad (3)$$

$$\eta_{crc}^v = 0,33k_{crc}k_{c1} \cdot \ln \frac{f_{lcm}}{f_{lcm,0}} + 0,1, \quad (4)$$

где  $\eta_{crc}^v$ ,  $\eta_{crc}^0$  – относительные значениями нагрузок, соответствующих верхнему и нижнему пределам микротрещинообразования;

$f_{lcm}$  – средняя прочность легкого бетона, МПа;

$f_{lcm,0}$  – единичное значение средней прочности бетона,  $f_{lcm,0} = 1$  МПа.

Сравнение опытных данных и расчетных значений для образцов из керамзитобетона в возрасте 28 суток, полученных по формулам (2) и (3), приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение опытных и теоретических значений пределов микротрещинообразования нижнего  $\eta_{crc}^0$  и верхнего  $\eta_{crc}^v$  для образцов из керамзитобетона в возрасте 28 суток

Коэффициент $k_{crc}$	Коэффициент $k_{c1}$	Прочность $f_{cm}$ , МПа	Опытные значения		Расчетные значения		Отклонения расчетных значений от опытных, %	
			$\eta_{crc}^0$ оп	$\eta_{crc}^v$ оп	$\eta_{crc}^0$ расч	$\eta_{crc}^v$ расч	$\Delta \eta_{crc}^0$	$\Delta \eta_{crc}^v$
0,60	1,2	11,17	0,44	0,73	0,423	0,673	3,76	7,66
		9,13	0,41	0,71	0,376	0,626	8,40	12,37
		10,65	0,44	0,73	0,412	0,662	6,36	9,38
		15,83	0,50	0,75	0,506	0,756	-2,28	-0,44
		17,56	0,45	0,75	0,531	0,781	-17,97	-3,51
Среднее отклонение $\overline{\Delta \eta_{crc}} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \eta_{crc,i}}{n}$ , %							-0,35	5,09

Полученные данные не противоречат [12].

Таким образом, для керамзитобетона предложены зависимости, устанавливающие взаимосвязь между относительными значениями нагрузок, соответствующих верхнему и нижнему пределам микротрещинообразования, и средней прочностью бетона. Предложенные зависимости для определения верхнего и нижнего пределов микротрещинообразования обеспечивают удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бабич, С.М. Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень: монографія / С.М. Бабич, Ю.О. Крусь. – Рівне : Вид-во РДТУ, 1999. – 119 с.
2. Москалькова, Ю.Г. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при статическом и малоцикловом нагружении: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Ю.Г. Москалькова. – Могилев, 2013. – 199 с.

3. Мельянцова, И.И. Прочностные и деформативные характеристики керамзитобетона класса 10/12,5 по результатам испытаний / И.И. Мельянцова, Г.А. Дивакова, М.Г. Мамочкина // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апр. 2014 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2014. – С. 289–290.
4. Мельянцова, И.И. Прочностные и деформативные характеристики керамзитобетона класса 16/20 по результатам испытаний / И.И. Мельянцова, Г.А. Дивакова, М.Г. Мамочкина // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апр. 2014 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2014. – С. 291–292.
5. Семенюк, С.Д. Прочность и деформативность керамзитобетона классов 10/12,5 и 16/20 по результатам испытаний / С.Д. Семенюк, И.И. Мельянцова, Г.А. Дивакова, М.Г. Мамочкина. – Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будовлі та споруди: збірник наукових праць. – Ровно, 2014. – Вып. 28. – С. 67–75.
6. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О.Я. Берг. – М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с.
7. Голишев, О.Б. Курс лекцій з основ розрахунку конструкцій і з опору залізобетону / О.Б. Голишев, А.Н. Бамбура. – К.: Логос, 2004. – 340 с.
8. 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 / С.Д. Семенюк. – Могилев, 2004. – 381 с.
9. Блохин, А.В. Теория эксперимента: курс лекций в двух частях. – Ч. 1. Научно-методический центр «Электронная книга БГУ» [Электронный ресурс]. Электрон. текст. дан. (1,1 Мб). – Минск, 2003. – Режим доступа: <http://anubis.bsu.by/publications/elresources/Chemistry/-blohin1.pdf>. – Электрон. версия печ. публикации, 2002.
10. Болошенко, Ю.Г. Определение модуля упругости и упругопластических характеристик бетона методом линейного корреляционного анализа / Ю.Г. Болошенко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. мол. ученых, Могилев, 20–21 нояб. 2008 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2008. – С. 106.
11. Семенюк, С.Д. К определению модуля упругости и упругопластических характеристик бетона при кратковременном центральном сжатии // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест, 2001. – № 1. – С. 40–44.
12. Бабич, Е.М. Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях: учебн. пособие. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1988. – 208 с.

УДК 624.016:624.046.2

*Семко А.В., Воскобойник Е.П., Лазарев Д.Н., Скиба А.В.*

## **К ВОПРОСУ РАСЧЁТА ЛЁГКИХ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ НА КРУЧЕНИЕ С ИЗГИБОМ**

### **Постановка проблемы в общем виде**

Любое современное строительство – индивидуальное, муниципальное или коммерческое – нуждается в новых прогрессивных энергоэкономных проектно-конструктивных решениях с использованием теплоэффективных конструкций. Среди них выгодно отличается применение легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) и использование легких бетонов.

В настоящее время в Украине, России, и Белоруссии увеличивается количество европейских и отечественных производителей холодногнутых и холоднокатаных стальных конструкций, а также производство разнообразных лёгких бетонов. Но применение сочетания таких современных конструкций в качестве несущих, в большинстве случаев, затруднено из-за нерешенного вопроса их проектирования [1].