

УДК 624.12:539.432

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІЦНОСТІ І ДЕФОРМАТИВНОСТІ БЕТОНУ ОБ'ЄМНОЮ ВАГОЮ 24 КН/М³

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ БЕТОНА ОБЪЁМНЫМ ВЕСОМ 24 КН/М³

RESULTS OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF STRENGTH AND DEFORMABILITY OF CONCRETE VOLUME WEIGHT 24 KN/M³

Семенюк С.Д., д.т.н, проф. (Білорусько-Російський університет), **Бабицкий В.В., д.т.н, проф.** (Білоруський Національний технічний університет), **Фролков І.С., асс., Мамочкіна М.Г., Дівакова Г.А., студентки** (Білорусько-Російський університет)

Семенюк С.Д., д.т.н, проф. (Белорусско-Российский университет), **Бабицкий В.В., д.т.н, проф.** (Белорусский национальный технический университет), **Фролков И.С., асс., Мамочкина М.Г., Дивакова Г.А., студентки** (Белорусско-Российский университет)

Semenyuk S.D., doctor of technical sciences, professor (Belarusian-Russian University), **Babickiy V.V., doctor of technical sciences, professor** (Belarusian national technical university), **Frolkov I.S., ass., Mamochkina M.G., Divakova G.A., students** (Belarusian-Russian University)

Наведені результати експериментально-теоретичних досліджень міцності та деформативності бетону середніх класів при короткочасному центральному стиску. По даним випробувань чотирох серій зразків виявлялась кубикова та призмova міцність, визначені модулі поздовжніх і поперечних деформацій модуль зсуву, значення верхнього та нижнього стану мікротріщиноутворення бетонів.

Приведены результаты экспериментально-теоретических исследований прочностных и деформативных свойств бетона средних классов при кратковременном центральном сжатии. По данным испытаний четырёх серий образцов определены кубиковая и призменная прочности, найдены модули продольных и поперечных деформаций, модуль сдвига, пределы микротрещинообразования бетонов.

The article presents the results of experimental and theoretical studies of the strength and deformation properties of concrete middle classes at short central compression. According to tests of four series of samples were determined block and prism strength, was found modules of longitudinal and transverse deformations, and the limits of concrete microcracking formation.

Ключові слова:

Клас бетону, модуль пружності, призма, поздовжні і поперечні деформації, модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона, лінійна кореляція, статистика, границі мікротріщиноутворення бетонів

класс бетона, модуль упругости, призма, продольные и поперечные деформации, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, линейная корреляция, статистика, пределы микротрещинообразования бетонов

grade concrete, modulus, prism, longitudinal and transverse deformations, Poisson's ratio, the linear correlation, statistics, the limits of concrete microcracking formation

Введение. При прогнозировании работы железобетонных конструкций зданий и сооружений, работающих в условиях как элементарного, так и сложного деформирования, необходимо учитывать упругопластические характеристики бетона, такие как модуль продольных и поперечных деформаций, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, верхний и нижний пределы микротрещинообразования бетона. С этой целью были испытаны четыре серии образцов в виде кубов и призм на кратковременное центральное сжатие в соответствии с ГОСТ 24452-80*.

Характеристики опытных образцов и методика экспериментальных исследований. Первая серия образцов испытана в возрасте 28 сут, вторая – 253 сут, третья – 84 сут, четвёртая – 28 сут. Каждая серия состояла из шести кубов с размером ребра 150 мм и трёх призм размером 150x150x600 мм. Средняя кубиковая прочность первой серии образцов составила 23,3 МПа, второй – 36,2 МПа, третьей – 20,04 МПа, четвёртой – 21,25 МПа.

Испытание призмённых образцов на кратковременное центральное сжатие до разрушения проводилось в полном соответствии с требованиями ГОСТ 24452-80 при их ступенчатом нагружении по следующему режиму: 30 с на поднятие нагрузки и снятие отсчётов по измерителям деформаций; 4,5 – минутная выдержка нагрузки на каждой ступени со снятием отсчётов по деформациям. Всего было принято 13 ступеней нагрузки – для первой серии образцов и 12 ступеней – для второй. Продольные и поперечные деформации замерялись по всем боковым граням призм при помощи индикаторов часового типа. При этом продольные деформации измерялись по четырём боковым граням призмы приборами механического действия с ценой деления 0,001 мм при базе 120 – 125 мм. Средняя призмённая прочность испытанных образцов первой серии составила 18,7 МПа; второй – 28,65 МПа; третьей –

16,22 МПа, четвёртой – 17,2 МПа, а коэффициенты призмной прочности – 0,8; 0,78; 0,81 и 0,81 соответственно.

Продольные и поперечные деформации по каждой отдельной призме (по показаниям четырёх приборов механического действия) усреднялись. При отдельных расчётах, резко отличающихся от средних, эти отсчёты и соответствующие им деформации по отдельным приборам из обработки опытных деформаций исключались.

Экспериментально-статистическая оценка деформативных характеристик бетона исследуемых классов. В [1, 2] показано, что зависимость «секущий модуль продольных деформаций – напряжение или уровень напряжений» ($E_{c(\sigma)}$), ($E_{c(\eta)}$) при кратковременном центральном сжатии бетонных призм до разрушения с постоянной скоростью роста напряжений с большой достоверностью описывается линейной опытно-корреляционной зависимостью (1), а непосредственно вытекающая из неё зависимость «напряжение – деформация» – корреляционной зависимостью (2) гиперболического вида:

$$E_{c(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{c(\sigma)}} = E_{c(0)} [1 - \lambda_{\sigma} \cdot \eta], \quad (1)$$

$$\varepsilon_{c(\sigma)} = \frac{\sigma}{E_{fc}} = \frac{\sigma}{E_{c(0)} \left[1 - \lambda_{fc} \cdot \frac{\sigma}{fc} \right]}, \quad (2)$$

где η – уровень напряжений $\eta = \frac{\sigma}{fc}$; $E_{c(0)}$ – истинный модуль упругости бетона (секущий модуль деформаций при $\sigma = 0$); λ_{fc} – предельное значение коэффициента пластичности бетона при $\sigma = fc$.

Приведенная статистическая обработка результатов испытаний бетонных призм показала, что линейные корреляционные зависимости «секущие модули деформаций – напряжения или уровень напряжений» имеют место для поперечных и сдвиговых деформаций:

$$E_{v(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{v(\sigma)}} = E_{v(0)} [\lambda_{v(fc)} \cdot \eta]; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{v(\sigma)} = \frac{\sigma}{E_{v(\sigma)}} = \frac{\sigma}{E_{v(0)} \left[1 - \lambda_{v(fc)} \cdot \frac{\sigma}{fc} \right]} \quad (4)$$

$$G_{\sigma} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{G(\sigma)}} = \frac{\sigma}{2[\varepsilon_{c(\sigma)} + \varepsilon_{v(\sigma)}]} = G_0 \left[1 - \lambda_{G(fc)} \cdot \frac{\sigma}{fc} \right]; \quad (5)$$

$$\varepsilon_{G(\sigma)} = \frac{\sigma}{G_{\sigma}} = \frac{\sigma}{G_0 \left[1 - \lambda_{G(fc)} \cdot \frac{\sigma}{fc} \right]} \quad (6)$$

где $E_{\nu(\sigma)}, G_{\sigma}$ – секущие модули поперечных упругопластических деформаций и деформаций сдвига; $\mathcal{E}_{\nu(\sigma)}, \mathcal{E}_{G(\sigma)}$ – соответствующие вышеуказанным секущим модулям деформаций упругопластические поперечные деформации и деформации сдвига при сжатии; $E_{\nu(0)}, G_0$ – испытанные значения модулей упругих поперечных и сдвиговых деформаций; $\lambda_{\nu(f_c)}, \lambda_{G(f_c)}$ – коэффициенты пластичности по поперечным и сдвиговым деформациям при напряжении $\sigma = f_c$.

$$\lambda_{\nu(f_c)} = \frac{E_{\nu(0)} - E_{\nu(f_c)}}{E_{\nu(0)}}; \quad (7)$$

$$\lambda_{G(f_c)} = \frac{G_0 - G_{f_c}}{G_0}; \quad (8)$$

$$\mathcal{E}_{G(\sigma)} = 2[\mathcal{E}_{c(\sigma)} + \mathcal{E}_{\nu(\sigma)}]. \quad (9)$$

Численные значения параметров линейных корреляционных зависимостей (1), (3), (5) устанавливаются статистически методами линейной корреляции [3].

Наиболее простым способом первичного определения связи между двумя свойствами является **способ графического изображения** результатов вычислений. Откладывая по оси абсцисс данные одного свойства (напряжения), а по оси ординат соответствующие им значения другого свойства (относительные деформации ε и E'), получаем группу точек (рис. 1 и 2).

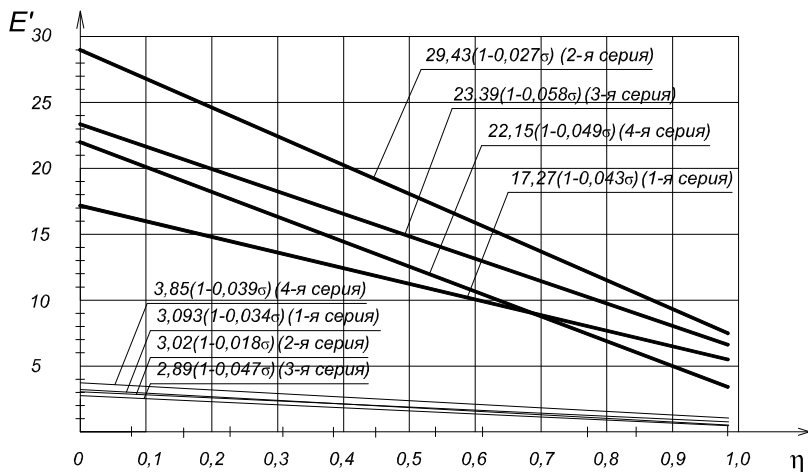


Рис. 1 – Опытные и теоретические зависимости «Секущие модули продольных и поперечных деформаций – уровень нагружения» для четырех серий образцов.

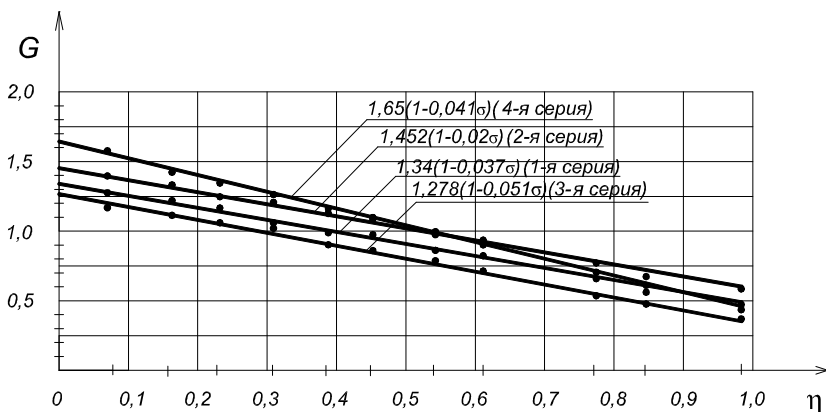


Рис. 2 – Опытные и теоретические зависимости «Модуль сдвига – уровень нагружения» для четырёх серий образцов.

Величиной, выражающей прямолинейную зависимость между двумя свойствами, является **коэффициент корреляции**. Чем ближе коэффициент корреляции к единице, тем больше связь между изучаемыми свойствами.

Коэффициент корреляции r вычисляют по формуле

$$r = \frac{\sum_1^n (X_c \cdot Y_c)}{\sqrt{\sum_1^n X_c^2 \cdot Y_c^2}} \quad (10)$$

где $\sum_1^n (X_c \cdot Y_c)$ – сумма произведений отклонений отдельных вариант V_x^1, V_y от соответствующих им средних арифметических M_x и M_y .

$$\sum_1^n (X_c \cdot Y_c) = \sum_1^n [(V_x - M_x) \cdot (V_y - M_y)]; \quad (11)$$

$$\sum_1^n X_c^2 = \sum_1^n (V_x - M_x)^2, \quad \sum_1^n Y_c^2 = \sum_1^n (V_y - M_y)^2, \quad (12)$$

$$M_x = \frac{\sum_1^n V_x}{n}, \quad M_y = \frac{\sum_1^n V_y}{n}, \quad (13)$$

где n – число наблюдений (вариант каждого ряда).

Средняя ошибка коэффициента корреляции m_r :

$$m_r = \pm \frac{1 - r^2}{\sqrt{n}}. \quad (14)$$

Достоверность коэффициента корреляции (линейного корреляционного уравнения или связи) оценивается отношением коэффициента корреляции r к его средней ошибке m_r . Если это отношение равно 4 или больше, то

коэффициент корреляции считается достоверным и наличие связи между двумя свойствами доказано, в противном случае – нельзя сделать заключение о достоверности связи между изучаемыми свойствами. Итак, линейная корреляционная зависимость достоверна, если

$$\frac{|r|}{m_r} \geq 4. \quad (15)$$

r и r/m_r показывают на количественную оценку связи между двумя величинами, но не выражают эту связь в виде уравнения.

Линейное корреляционное уравнение представлено следующей формулой:

$$Y = M_y + r \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cdot (X - M_x) = M_y + r \sqrt{\frac{\sum_1^n Y_c^2}{\sum_1^n X_c^2}} \cdot (X - M_x), \quad (16)$$

где σ_x , σ_y - средние квадратические отклонения:

$$\sigma_x = \pm \sqrt{\frac{\sum_1^n X_c^2}{n-1}}, \quad \sigma_y = \pm \sqrt{\frac{\sum_1^n Y_c^2}{n-1}}. \quad (17)$$

Статистика линейных корреляционных зависимостей по усреднённым показателям для испытанных призм показала, что достоверность линейности корреляционных зависимостей довольно высока (коэффициент корреляции r_x близок к единице, а его достоверность r/m_r , значительно больше четырёх).

Для выявления зависимостей и получения линейных уравнений были обработаны опытные данные, представленные в таблицах 1 и 2 (для первой, третьей и четвёртой серий образцов вычисления проводились аналогично).

Таблица. 1

. Сопоставление опытных и теоретических (опытно-корреляционных) значений продольных относительных деформаций ε , секущего модуля деформаций E' , касательного модуля деформаций E и коэффициента упругости бетона ν для второй серии образцов.

Опытные величины (по показаниям приборов)						Теоретические величины (корреляционные)				Отклонение		
σ , МПа	Уров. нагрузки	ε , 10^{-5} , МПа	E' , 10^{-4} , МПа	E , 10^{-4} , МПа	ν	ε , 10^{-5} , МПа	E' , 10^{-4} , МПа	E , 10^{-4} , МПа	ν	$\Delta\varepsilon$, %	$\frac{\Delta E'}{\Delta \nu}$, %	ΔE , %
0	0	0	-	3,204	1	0	3,204	3,204	1	0	0	0
2,19	0,077	7,02	3,1197	3,0376	0,9737	7,12	3,0765	2,9542	0,9602	1,4	-1,4	-2,7
4,39	0,153	14,95	2,9365	2,6913	0,9165	14,89	2,9485	2,7134	0,9203	-0,4	0,4	0,8
6,58	0,23	23,79	2,7659	2,3877	0,8633	23,32	2,8210	2,4839	0,8805	-2,0	2,0	4,0

Продолжение табл. 1

8,78	0,306	32,85	2,6728	2,2297	0,8342	32,60	2,6930	2,2635	0,8405	-0,8	0,8	1,5
10,97	0,383	42,81	2,5625	2,0494	0,7998	42,76	2,5655	2,0543	0,8007	-0,1	0,1	0,2
13,16	0,459	53,35	2,4667	1,8991	0,7699	53,98	2,4381	1,8553	0,7610	1,2	-1,2	-2,3
15,44	0,539	66,36	2,3267	1,6896	0,7262	66,97	2,3054	1,6588	0,7195	0,9	-0,9	-1,8
17,55	0,613	78,98	2,2221	1,5411	0,6935	80,41	2,1826	1,4868	0,6812	1,8	-1,8	-3,5
19,92	0,695	98,23	2,0279	1,2835	0,6329	97,42	2,0447	1,3048	0,6382	-0,8	0,8	1,7
21,94	0,766	113,33	1,9359	1,1697	0,6042	113,85	1,9271	1,1591	0,6015	0,5	-0,5	-0,9
24,13	0,842	136,98	1,7616	0,9686	0,5498	134,08	1,7996	1,0108	0,5617	-2,1	2,2	4,4
28,13	0,982	178,63	1,5748	0,7740	0,4915	179,53	1,5668	0,7662	0,4890	0,5	-0,5	-1,0

Таблица. 2

. К вычислению коэффициента корреляции

$V_x(\sigma)$, МПа	ε	V_y	X_c	X_c^2	Y_c	Y_c^2	Z_c	Z_c^2
2,19	7,02	3,1197	12,2417	149,8592	-0,7553	0,5704	11,4864	131,9383
4,39	14,95	2,9365	10,0417	100,8357	-0,5721	0,3272	9,4696	89,6742
6,58	23,79	2,7659	7,8517	61,6492	-0,4015	0,1612	7,4502	55,5060
8,78	32,85	2,6728	5,6517	31,9417	-0,3084	0,0951	5,3433	28,5513
10,97	42,81	2,5625	3,4617	11,9834	-0,1981	0,0392	3,2636	10,6512
13,16	53,35	2,4667	1,2717	1,6172	-0,1023	0,0105	1,1694	1,3674
15,44	66,36	2,3267	-1,0083	1,0167	0,0377	0,0014	-0,9706	0,9421
17,55	78,98	2,2221	-3,1183	9,7238	0,1423	0,0203	-2,9760	8,8565
19,92	98,23	2,0279	-5,4883	30,1214	0,3365	0,1132	-5,1518	26,5410
21,94	113,33	1,9359	-7,5083	56,3746	0,4285	0,1836	-7,0798	50,1241
24,13	136,98	1,7616	-9,6983	94,0570	0,6028	0,3634	-9,0955	82,7276
28,13	178,63	1,5748	-13,6983	187,6434	0,7896	0,6235	-12,9087	166,6336

Результаты проведенных исследований отражены в табл. 3.

Таблица. 3

. Характеристика бетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей

Номер серии	Возраст, сут	$f_{c, cube}$, МПа	f_{ck} , МПа	f_{cr}^v		f_{cr}^0		Зависимость	Уравнение, МПа	r	r/m_r
				η	МПа	η	МПа				
1	28	23,3	18,7	0,75	14,0	0,48	8,95	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$3,093(1 - 0,034 \sigma)$	-0,9795	86,952
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$7,27(1 - 0,043 \sigma)$	-0,9855	123,32
								$G_c - \eta$	$1,34(1 - 0,037 \sigma)$	-0,9883	152,52

Продолжение таблицы. 3

2	253	36,2	28,65	0,842	24,13	0,57	6,33	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$3,02(1 - 0,018 \sigma)$	$-0,9979$	832
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$29,43(1 - 0,027 \sigma)$	$-0,8381$	9,7
								$G_c - \eta$	$1,452(1 - 0,02\sigma)$	$-0,9901$	173,7
3	84	20,04	16,22	0,73	11,85	0,47	7,62	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$2,89(1 - 0,047\sigma)$	$-0,7949$	7,48
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$23,39(1 - 0,058\sigma)$	$-0,9028$	16,9
								$G_c - \eta$	$1,278(1 - 0,051\sigma)$	$-0,9947$	328
4	28	21,25	17,2	0,74	12,70	0,473	8,56	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$3,85(1 - 0,039 \sigma)$	$-0,9896$	168
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$22,15(1 - 0,049 \sigma)$	$-0,9631$	46,1
								$G_c - \eta$	$1,65(1 - 0,041\sigma)$	$-0,9879$	143

При нагружении бетонного образца длительным напряжением, меньшим либо равным нижней границе микротрещинообразования, в бетоне не возникает микроразрушения. При действии напряжений в пределах границ нижнего и верхнего микротрещинообразований в бетоне возникают микроразрушения, но их количество не приводит к разрушению материала. Если длительное напряжение больше верхней границы микротрещинообразования, в бетоне происходит накопление и развитие микроразрушений вплоть до его полного разрушения. Поэтому за предел прочности при длительном сжатии принимают напряжение несколько ниже верхней границы микротрещинообразования (рис. 3).

Верхний предел микротрещинообразования f_{crc}^v (т. н. «критическая» граница, при достижении которой наблюдается активный прирост пластических деформаций) находился графическим методом по усреднённым экспериментальным данным для двух призм, испытанных кратковременным нагружением по стандартной методике – путём построения зависимости «уровень нагружения – объёмная деформация». Объёмные деформации при этом определялись по формуле

$$\varepsilon^v = \varepsilon_{c(\sigma)} - 2\varepsilon_{v(\sigma)} \quad (18)$$

где $\varepsilon_{c(\sigma)}$ – продольные относительные деформации, $\varepsilon_{v(\sigma)}$ – поперечные относительные деформации.

По пиковой точке диаграммы $\varepsilon^v - \eta$ находился верхний предел микротрещинообразования бетона – f_{crc}^v .

В качестве примера приводится нахождение верхней границы микротрещинообразования для образцов второй серии (для остальных серий вычисления проводятся аналогично).

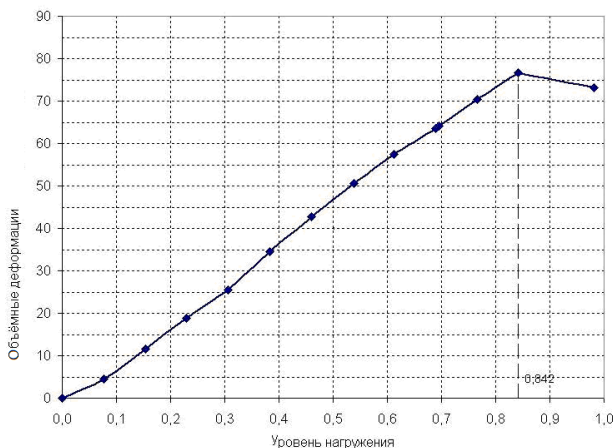


Рис. 3 – Определение верхней границы микротрещинообразования для второй серии образцов

Определение нижнего предела микротрещинообразования f_{cr}^0 также производилось графическим методом по экспериментальным данным. Сначала по опытным данным была построена зависимость «уровень нагружения η - коэффициент Пуассона ν », при этом коэффициент Пуассона определялся как отношение поперечных относительных деформаций к продольным или как отношение поперечного модуля деформаций к продольному для каждой ступени нагружения (рис. 4).

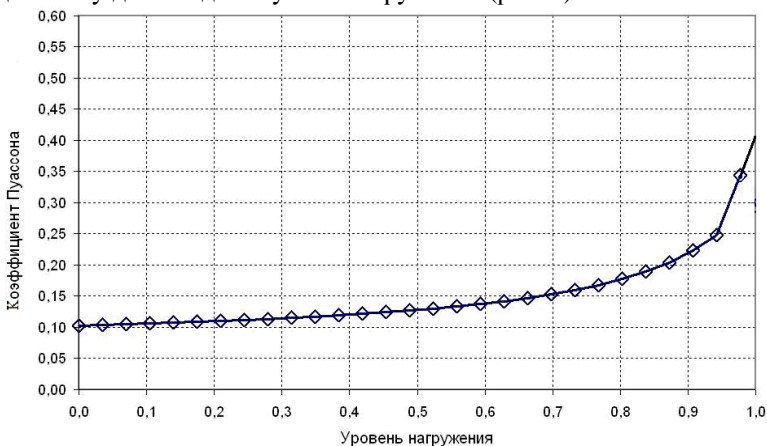
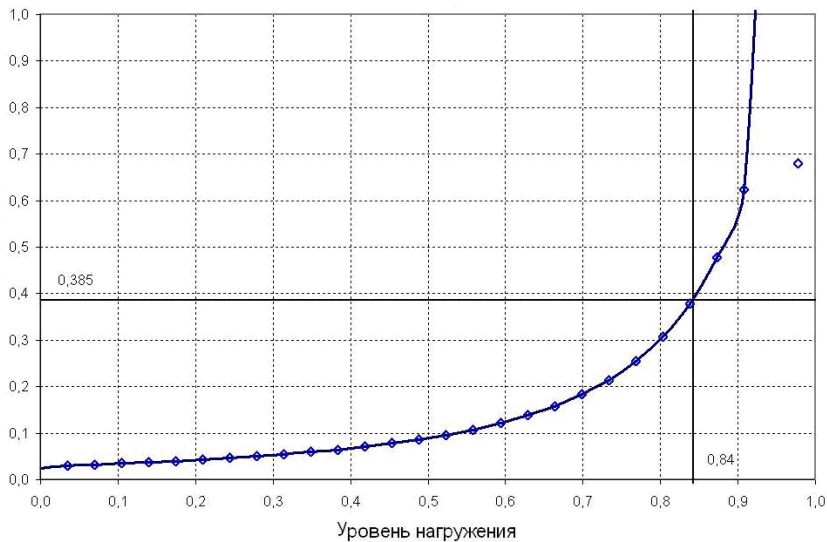


Рис. 4 – Корреляционная зависимость «Уровень нагружения – Коэффициент Пуассона» для второй серии образцов

Путём нахождения первой $\frac{dv}{d\eta}$ и второй $\frac{dv^2}{d\eta^2}$ производных был графически определён предел нижнего микротрещинообразования бетона (рис. 5).
 а)



б)

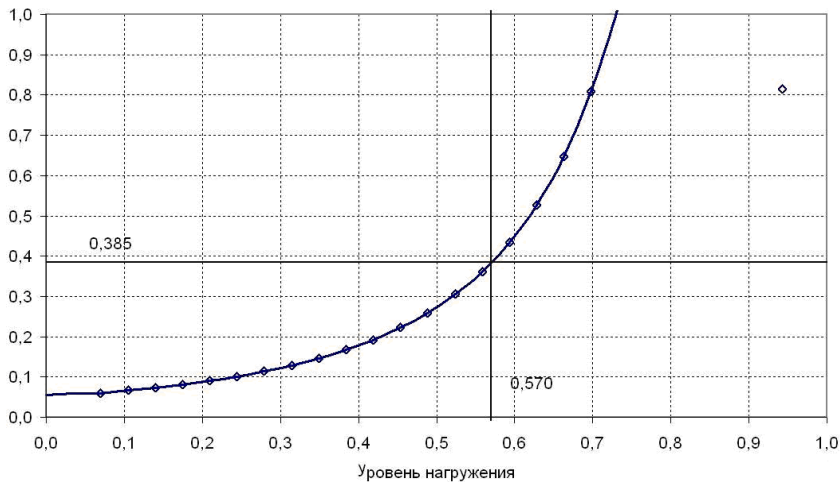


Рис. 5 – Корреляционные зависимости:

а) первая производная второй серии; б) вторая производная второй серии.

Аналитические выводы зависимости, полученные методом линейного корреляционного анализа: модуль продольных деформаций – уровень нагружения, модуль поперечных деформаций – уровень нагружения, модуль сдвига – уровень нагружения; пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования бетона можно использовать при прогнозировании работы железобетонных конструкций, работающих в условиях как элементарного, так и сложного деформирования.

1. Семенюк, С.Д. К определению модуля упругости и упругопластических характеристик бетона при кратковременном центральном сжатию // Вестн. БГТУ. Строительство и архитектура. – 2001. – №1. – С.40–44.
2. Семенюк, С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформируемом основании: монография / С.Д.Семенюк – Могилёв: Беларус.-Рос. ун, 2003. – 269с.
3. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е.Гмурман – М.: Высш. шк., 1977. – 479с.