

## ПРОЧНОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КОЛЬЦЕВЫХ ЦЕНТРИФУГИРОВАННЫХ БАЛОК С СОСРЕДОТОЧЕННЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Впервые испытания центрифугированных балок кольцевого сечения были проведены профессором Михайловым В.В. [1]. Начиная с 1975 года в Республике Беларусь в тесном сотрудничестве с Россией ведутся комплексные исследования по созданию новых эффективных железобетонных конструкций, в том числе изготавливаемых центробежным способом [2, 3, 4, 5]. На протяжении ряда лет учеными БГПА выполнен большой объем исследований этого типа конструкций с целью совершенствования методики их расчета по двум группам предельных состояний [6, 7, 8, 9, 10]. Накопленный экспериментальный и теоретический материал был использован для проверки новых методов расчета, положенных в основу проекта национальных норм СНБ 5.03.010-98 [1]. С помощью программы «ВЕТА», разработанной специалистами Полоцкого Государственного университета, был осуществлен расчет центрифугированных железобетонных балок, испытанных в условиях косоугольного изгиба с использованием специально созданной уникальной установки [12]. Расчет прочности и трещиностойкости балок выполнялся с учетом диаграмм деформирования бетона и арматуры и фактической геометрии сечения. Опытные образцы представляли собой центрифугированные балки длиной 9,6 м и имели кольцевое сечение с эксцентричной внутренней полостью.

Геометрические параметры опытных балок измерялись в критических сечениях после их разрушения (рис. 2).

Фактические координаты рабочей и конструктивной арматуры, величины контролируемых и установившихся напряжений приведены в работе [13].

При построении моделей сечений центрифугированных балок внутреннее и наружное кольцо заменялось 24-угольниками. Бетонное сечение представлялось двумя несвязанными областями, состыкованными по линиям торцов (рис. 1).

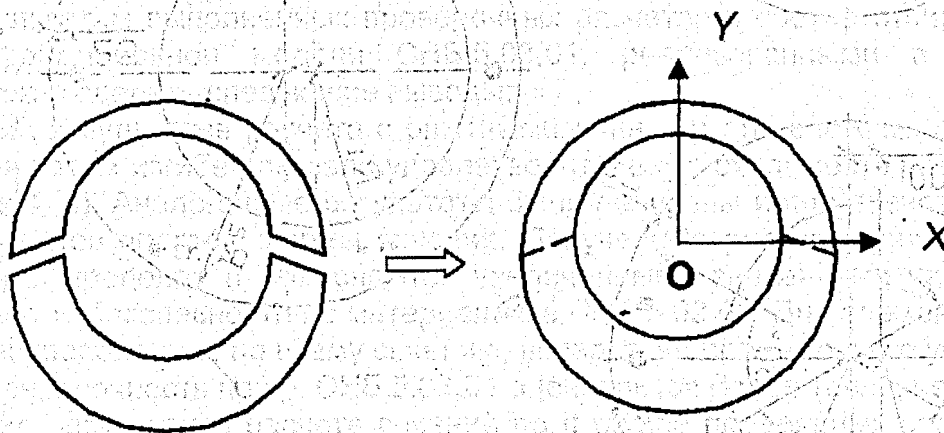


Рис. 1.

Схема аппроксимации кольцевого сечения

Балки армированы предварительно напряженными семипроволочными канатами К7  $\varnothing$  15 мм. Основные механические характеристики канатов были установлены по результатам испытаний арматурных образцов (МПа):

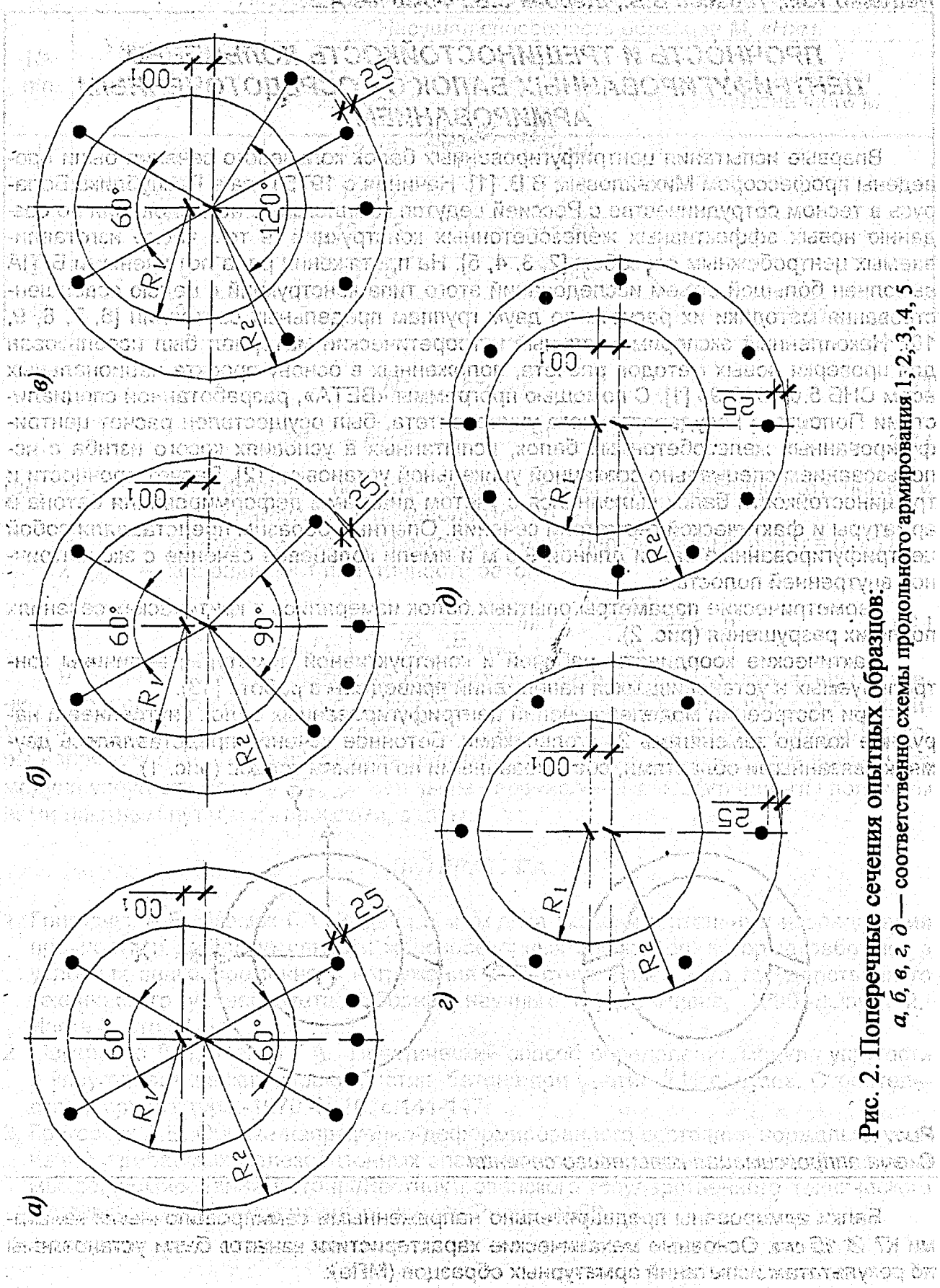


Рис. 2. Поперечные сечения опытных образцов:  
а, б, в, г, д — соответственно схемы продольного армирования 1, 2, 3, 4, 5

модуль упругости  $E_s$  — 198400

условный предел текучести  $\sigma_{0.2}$  — 1470

предел прочности  $\sigma_u$  — 1699

При выполнении расчетов учтено конструктивное продольное армирование из 6 стержней класса А-I  $\varnothing 6$  мм со следующими механическими характеристиками (МПа):

модуль упругости  $E_s$  — 210000

физический предел текучести  $\sigma_y$  — 285

а фактические размеры кольцевых сечений даны в табл. 1. Схемы армирования и обозначения размеров сечений приведены на рис. 2.

Балки были изготовлены из бетона марки М600. Прочностные и деформационные характеристики центрифугированного бетона, установленные по результатам испытаний выпиленных образцов ( $E_b$ ,  $\sigma_{cu}$ ,  $\sigma_{cut}$ ), приведены в табл. 2. Предельная сжимаемость бетона  $\sigma_{cu}$  определена по методике EUROCODE 2. Предельная растяжимость  $\sigma_{cut}$  вычислена по формуле

$$\epsilon_{cut} = \frac{2\sigma_{cut}}{E_b}$$

Расчет сечений производился по I и по II группам предельных состояний на действие комбинации изгибающих моментов  $M_x$  и  $M_y$ , соотношения между которыми устанавливались по углу между силовой плоскостью и осью OY. Результаты расчетов приведены в табл. 3, 4 и на рис. 3, 4.

Анализ результатов показал, что при расчете по I группе предельных состояний по методике СНБ 5.03.01 прочность нормальных сечений недооценивается и оказалась в среднем на 4,4 % ниже по сравнению с прочностью, вычисленной по методике СНиП II-21-75.

Трещиностойкость нормальных сечений по СНБ 5.03.01 в среднем на 5 % выше опытной, что указывает на необходимость корректировки программы по критериям образования трещин.

### ВЫВОДЫ

По результатам выполненных проверочных расчетов в соответствии с положениями деформационной модели СНБ 5.03.01, реализованными в программе «ВЕТА», можно сделать следующие выводы:

1. Сравнение результатов расчета с опытными данными для сложных сечений при плоском и косом изгибе показало удовлетворительную сходимость результатов (в пределах 4 %). Аналогичные результаты были получены и при расчетах изгибаемых элементов простой формы сечения. Полученные расхождения находятся в допустимых пределах и объясняются увеличенными значениями частотных коэффициентов безопасности по материалам в СНБ 5.03.01. Для элементов с арматурой, распределенной по всему сечению, вследствие более точного учета усилий в арматуре, прочность по пр. СНБ 5.03.01 оценивается более точно, чем по СНиП.
2. Сравнение результатов расчета сечений по II группе предельных состояний, полученных по программе «ВЕТА», показало, что моменты образования трещин, установленные по программе и по расчетным формулам СНиП, имеют отклонения (в ряде случаев существенные), как в большую, так и в меньшую сторону. Такие результаты возможно связаны с несовершенством применяемой в алгоритме программы диаграммы деформирования для растянутого бетона и ее параметрических точек, которая не нормирована в проекте СНБ 5.03.01.

Таблица 1.

Геометрические характеристики кольцевых сечений

№ образца	Шифр* (армирование)	Радиус		Смещение OO <sub>1</sub> , мм	№ образца	Шифр* (армирование)	Радиус		Смещение OO <sub>1</sub> , мм
		R <sub>2</sub> , мм	R <sub>1</sub> , мм				R <sub>2</sub> , мм	R <sub>1</sub> , мм	
1	БЦ 1-6-45(2) (рис. 2а)	305	221,5	1,5	13	БЦ 1-6-30(5) (рис. 2а)	305	216,5	13,5
2	БЦ 3-6-15(1) (рис. 2е)	305	231,0	-1,0	14	БЦ 4-8-0(1) (рис. 2а)	305	218,0	-3,0
3	БЦ 2-8-45(2) (рис. 2б)	305	217,5	-2,5	15	БЦ 2-10-15(2) (рис. 2б)	305	200,5	-4,5
4	БЦ 3-10-30(1) (рис. 2а)	305	209,0	-14,0	16	БЦ 1-6-0(6) (рис. 2а)	305	240,5	-5,5
5	БЦ 2-10-0(1) (рис. 2б)	305	205,0	5,0	17	БЦ 1-10-30(1) (рис. 2а)	305	194,5	-4,5
6	БЦ 3-6-30(3) (рис. 2а)	305	225,5	-8,5	18	БЦ 2-8-30(1) (рис. 2б)	305	227,0	10,0
7	БЦ 2-10-30(3) (рис. 2б)	305	192,5	7,5	19	БЦ 1-6-45(4) (рис. 2а)	305	228,0	-5,0
8	БЦ 5-8-0(1) (рис. 2д)	305	223,0	2,0	20	БЦ 1-6-30(8) (рис. 2а)	305	216,0	6,0
9	БЦ 3-10-45(2) (рис. 2в)	305	197,0	-2,0	21	БЦ 3-8-0(1) (рис. 2е)	305	208,0	13,0
10	БЦ 1-6-15(7) (рис. 2а)	305	232,0	7,0	22	БЦ 1-6-45(3) (рис. 2а)	305	231,0	-2,0
11	БЦ 2-6-30(1) (рис. 2б)	305	228,0	-3,0	23	БЦ 3-8-30(2) (рис. 2е)	305	214,5	0,0
12	БЦ 1-8-15(1) (рис. 2а)	305	214,5	-9,5	24	БЦ 3-6-45(2) (рис. 2е)	305	245,0	10,0

\* Шифр опытных образцов БЦ s-t-a(n) состоит из групп, которые обозначают:  
 БЦ - балка центрифугированная;  
 s - номер схемы армирования на рис. 4.2;  
 t - номинальная толщина стенки, см;  
 a - угол между силовой плоскостью и осью OY, град;  
 n - порядковый номер среди серии балок-близнецов

Таблица 2.

Прочностные характеристики центрифугированного бетона

№ образца	Шифр	Призмная прочность S <sub>cu</sub> , МПа	Предел прочности при растяжении S <sub>cut</sub> , МПа	Модуль упругости E <sub>b</sub> 10 <sup>3</sup> , МПа	Предельная сжимаемость e <sub>cu</sub> 10 <sup>3</sup>	Предельная растяжимость e <sub>sut</sub> 10 <sup>3</sup>
1	БЦ 1-6-45(2)	48,2	3,66	31,4	3,00	0,233
2	БЦ 3-6-15(1)	54,2	4,15	31,1	2,88	0,267
3	БЦ 2-8-45(2)	51,3	3,90	36,3	2,93	0,215
4	БЦ 3-10-30(1)	48,6	3,66	32,2	2,99	0,228
5	БЦ 2-10-0(1)	50,0	3,85	38,3	2,96	0,201
6	БЦ 3-6-30(3)	54,1	3,50	32,2	2,88	0,218
7	БЦ 2-10-30(3)	66,3	4,37	45,8	2,63	0,191
8	БЦ 5-8-0(1)	56,6	4,03	34,2	2,83	0,235
9	БЦ 3-10-45(2)	47,5	3,43	35,4	3,01	0,194
10	БЦ 1-6-15(7)	52,7	4,21	31,7	2,91	0,266
11	БЦ 2-6-30(1)	43,0	3,54	35,4	3,10	0,200
12	БЦ 1-8-15(1)	41,9	3,55	40,4	3,12	0,176
13	БЦ 1-6-30(5)	47,4	3,56	29,1	3,01	0,245
14	БЦ 4-8-0(1)	48,1	3,53	31,5	3,00	0,224
15	БЦ 2-10-15(2)	43,2	3,96	34,9	3,10	0,227
16	БЦ 1-6-0(6)	43,6	2,93	27,0	3,09	0,217
17	БЦ 1-10-30(1)	49,7	4,03	34,8	2,97	0,232
18	БЦ 2-8-30(1)	44,9	3,03	28,0	3,06	0,217
19	БЦ 1-6-45(4)	45,7	3,51	32,5	3,05	0,216
20	БЦ 1-6-30(8)	45,0	3,74	34,0	3,06	0,220
21	БЦ 3-8-0(1)	48,5	4,27	29,7	2,99	0,287
22	БЦ 1-6-45(3)	42,6	2,66	30,9	3,11	0,172
23	БЦ 3-8-30(2)	52,6	3,97	35,2	2,91	0,226
24	БЦ 3-6-45(2)	44,9	3,46	31,6	3,06	0,219

Таблица 3.

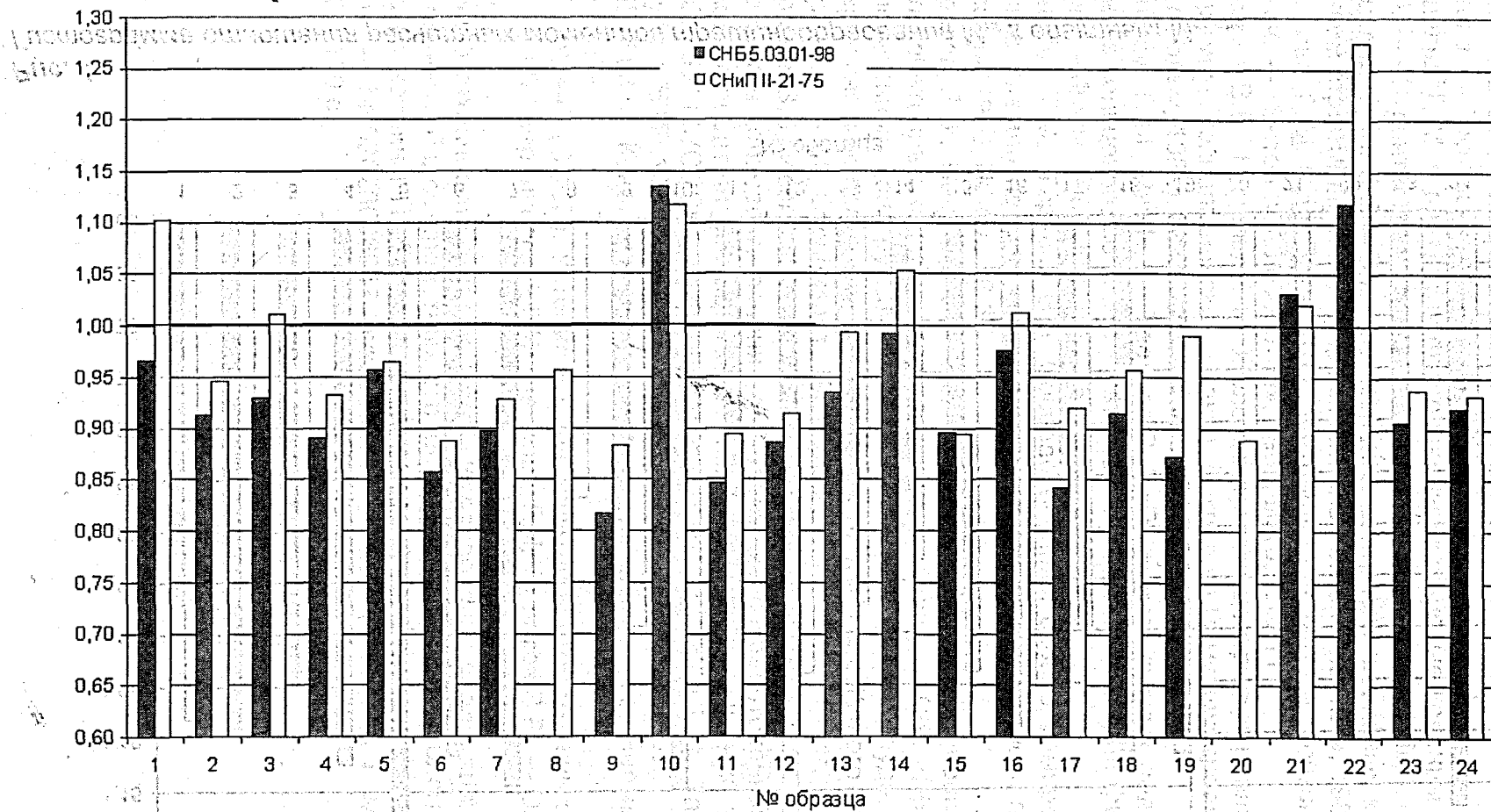
## Результаты расчета по I группе предельных состояний

№	Шифр	Разрушающий момент (кНм)					опыт- ный $M_{d,obs}$	$M_{d,СНБ}$	$M_{d,СНИП}$	Вид разрушения			
		вычисленный по								$M_{d,obs}$	$M_{d,obs}$	по СНБ 5.03.01-98	опытный
		СНБ 5.03.01-98			СНИП								
		$M_{xd}$	$M_{yd}$	$M_{d,СНБ}$	II-21-75 $M_{d,СНИП}$								
1	БЦ 1-6-45(2)	333,7	333,7	471,9	538,5	488,6	0,966	1,102	по бет.	по бет.			
2	БЦ 3-6-15(1)	132,2	493,0	510,4	528,9	559,0	0,913	0,946	по бет.	по бет.			
3	БЦ 2-8-45(2)	336,6	336,6	476,0	518,1	512,3	0,929	1,011	по бет.	по бет.			
4	БЦ 3-10-30(1)	244,4	423,2	488,7	511,9	549,3	0,890	0,932	по бет.	по бет.			
5	БЦ 2-10-0(1)	0	555,3	555,3	560,2	580,5	0,957	0,965	по бет.	по бет.			
6	БЦ 3-6-30(3)	244,5	423,4	488,9	506,2	570,3	0,857	0,888	по бет.	по бет.			
7	БЦ 2-10-30(3)	263	455,5	526,0	544,2	586,5	0,897	0,928	по бет.	по ар-ре			
8	БЦ 5-8-0(1)	Решений нет			603,29	630,6	-	0,957	-	по бет.			
9	БЦ 3-10-45(2)	322	322	455,4	493,1	558,0	0,816	0,884	по бет.	по бет.			
10	БЦ 1-6-15(7)	149,2	556,5	576,2	567,5	507,7	1,135	1,118	по бет.	по бет.			
11	БЦ 2-6-30(1)	253,5	439,1	507,0	535,5	599,0	0,846	0,894	по бет.	по бет.			
12	БЦ 1-8-15(1)	160,8	537,8	561,3	579,5	633,3	0,886	0,915	по бет.	по бет.			
13	БЦ 1-6-30(5)	260,8	451,7	521,6	554,2	557,6	0,935	0,994	по бет.	по бет.			
14	БЦ 4-8-0(1)	0	326,5	326,5	346,4	329,1	0,992	1,053	по бет.	по бет.			
15	БЦ 2-10-15(2)	142,3	530,6	549,4	548,1	613,3	0,896	0,894	по бет.	по бет.			
16	БЦ 1-6-0(6)	0	551,6	551,6	572,2	564,9	0,976	1,013	по бет.	по бет.			
17	БЦ 1-10-30(1)	261,3	452,5	522,5	570,7	620,0	0,843	0,921	по бет.	по бет.			
18	БЦ 2-8-30(1)	248,2	430	496,5	519,7	543,0	0,914	0,957	по бет.	по бет.			
19	БЦ 1-6-45(4)	332,4	332,4	470,1	534,1	539,0	0,872	0,991	по бет.	по бет.			
20	БЦ 1-6-30(8)	Решений нет			549,0	617,9	-	0,889	-	по бет.			
21	БЦ 3-8-0(1)	0	515,9	515,9	510,9	500,2	1,031	1,021	по бет.	по бет.			
22	БЦ 1-6-45(3)	330,9	330,9	468,0	533,4	418,0	1,119	1,276	по бет.	по бет.			
23	БЦ 3-8-30(2)	246,1	426,2	492,2	509,5	543,2	0,906	0,938	по бет.	по бет.			
24	БЦ 3-6-45(2)	307,9	307,9	435,4	441,3	473,4	0,920	0,932	по бет.	по бет.			
Среднее значение							0,932	0,976					
Коэффициент вариации $v$							0,081	0,095					

Таблица 4.

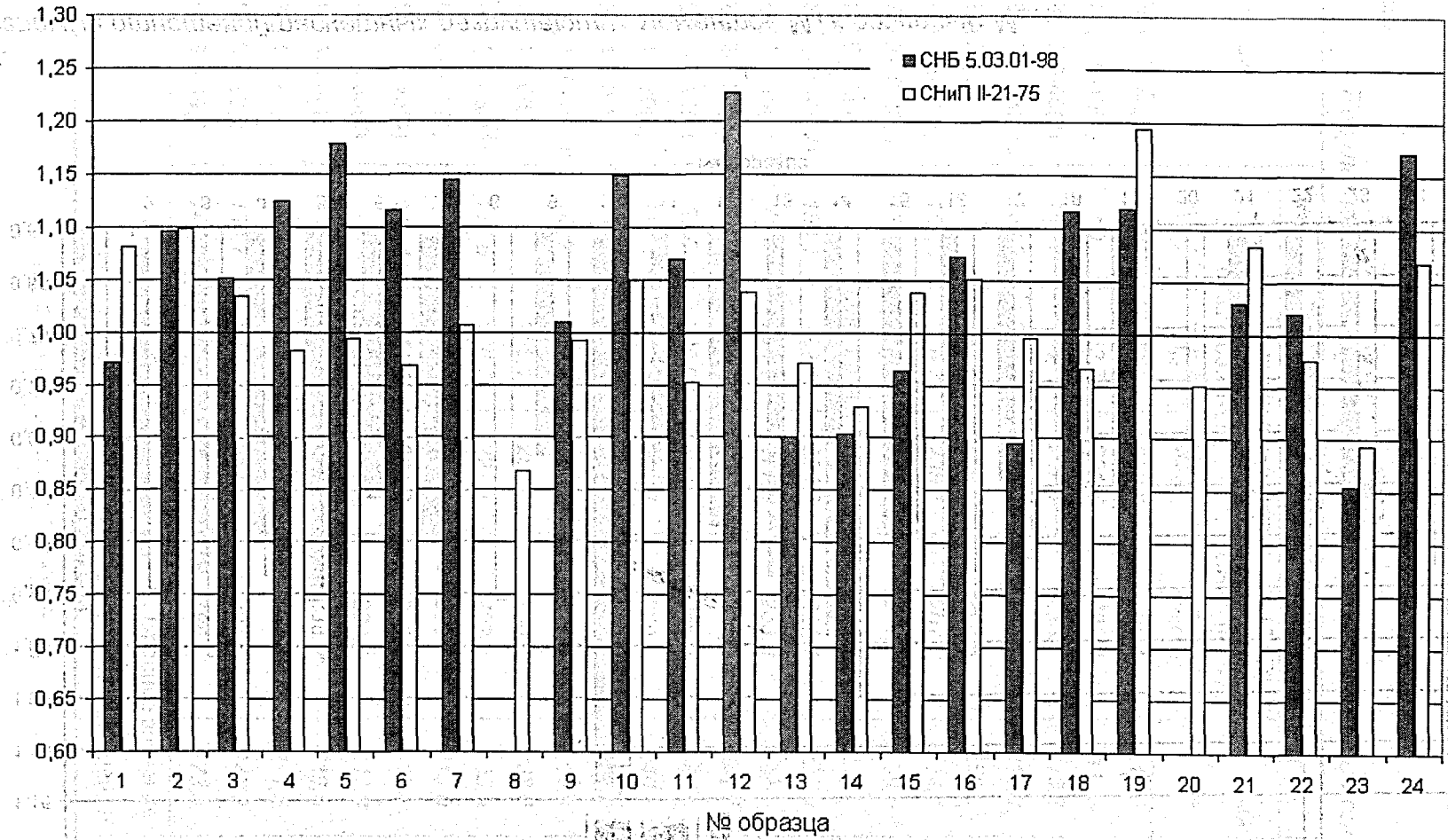
## Результаты расчета по II группе предельных состояний

№ образца	Шифр	Момент трещинообразования (кНМ)					опытный $M_{cr,obs}$	$M_{cr,СНБ}$ $M_{cr,obs}$	$M_{cr,СНиП}$ $M_{cr,obs}$
		вычисленный по							
		СНБ 5.03.01-98			СНиП II-21-75				
		$M_{хсr}$	$M_{усr}$	$M_{сr,СНБ}$	$M_{сr,СНиП}$				
1	БЦ 1-6-45(2)	147,5	147,5	208,6	232,4	215,0	0,970	1,081	
2	БЦ 3-6-15(1)	60	223,7	231,6	232,2	211,54	1,095	1,098	
3	БЦ 2-8-45(2)	160,8	160,8	227,4	223,6	216,3	1,051	1,034	
4	БЦ 3-10-30(1)	123,2	213,4	246,4	215,2	219,3	1,124	0,982	
5	БЦ 2-10-0(1)	0	294,8	294,8	248,8	250,3	1,178	0,994	
6	БЦ 3-6-30(3)	119,3	206,7	238,7	207,1	214,1	1,115	0,968	
7	БЦ 2-10-30(3)	137,0	237,2	273,9	241,1	239,5	1,144	1,007	
8	БЦ 5-8-0(1)	Решений нет			212,0	244,4	-	0,867	
9	БЦ 3-10-45(2)	159,1	159,1	225,0	221,4	223,0	1,009	0,993	
10	БЦ 1-6-15(7)	71,9	268,1	277,6	253,8	241,7	1,148	1,050	
11	БЦ 2-6-30(1)	129,7	224,7	259,4	231,2	242,7	1,069	0,953	
12	БЦ 1-8-15(1)	87,0	290,9	303,6	256,9	247,5	1,227	1,038	
13	БЦ 1-6-30(5)	111,1	192,5	222,3	239,3	246,7	0,901	0,970	
14	БЦ 4-8-0(1)	0	141,0	141,0	145,2	156,2	0,903	0,930	
15	БЦ 2-10-15(2)	62,9	234,4	242,7	261,5	251,9	0,963	1,038	
16	БЦ 1-6-0(6)	0	255,1	255,1	250,1	238,0	1,072	1,051	
17	БЦ 1-10-30(1)	113,6	196,7	227,1	252,5	253,9	0,895	0,994	
18	БЦ 2-8-30(1)	118,8	205,8	237,6	205,9	213,0	1,116	0,967	
19	БЦ 1-6-45(4)	144,4	144,4	204,2	218,1	182,7	1,118	1,194	
20	БЦ 1-6-30(8)	Решений нет			234,7	247,0	-	0,950	
21	БЦ 3-8-0(1)	0	226,0	226,0	238,0	219,6	1,029	1,084	
22	БЦ 1-6-45(3)	152,4	152,4	215,5	206,4	211,5	1,019	0,976	
23	БЦ 3-8-30(2)	105,7	183,1	211,4	221,0	247,3	0,855	0,894	
24	БЦ 3-6-45(2)	143,5	143,5	202,9	185,1	173,3	1,171	1,068	
Среднее значение							1,053	0,976	
Коэффициент вариации $v$							0,104	0,074	



**Рис. 3.** Гистограмма отношений расчетных разрушающих моментов  $M_d$  к опытным  $M_{d,obs}$





**Рис. 4.**  
 Гистограмма отношения расчетных моментов трещинообразования  $M_{cr}$  к опытным  $M_{cr,obs}$



## ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов В. В. Теория и практика центробежного напряженно-армированного бетона. — Госстройиздат, 1939, 188 с.
2. Пецольд Т. М. и др. Центрифугированные кольцевые колонны каркаса промзданий. — «Строительство и архитектура Белоруссии», 1977, №4, с. 7, 8.
3. Пецольд Т. М. и др. Опыт применения центрифугированных колонн в промышленном строительстве. — «Промышленное строительство», 1980, № 4, с. 32, 33.
4. Пецольд Т. М. и др. Эстакады с центрифугированными стойками кольцевого сечения. — «Бетон и железобетон», 1981, №10, с.10,11.
5. Тарасов В.В., Пецольд Т.М. Железобетонные центрифугированные конструкции надземных технологических эстакад. Доклад на IX международном конгрессе FIP (Стокгольм, 1982). — М., Минск, Польша, 1982, 14 с.
6. Пецольд Т. М., Рак Н. А., Тарасов В. В. Прочность сжатых железобетонных элементов кольцевого сечения. — «Известия АН БССР. Серия физико-технических наук». — Минск, 1980, №1, с.10-15.
7. Пецольд Т.М., Тарасов В.В. Сосредоточенный способ армирования железобетонных элементов кольцевого сечения. — «Строительство и архитектура Белоруссии», 1976, № 4, с. 36-38.
8. Тарасов В.В., Пецольд Т.М. Нерославский О.М. Проектирование оптимальных железобетонных конструкций кольцевого сечения. — Сб.: «Проектирование железобетонных конструкций по наименьшим затратам труда, материальных и энергетических ресурсов». — Тезисы докладов всесоюзного совещания. Владимир 1981. — М., Строиздат, 1981, с. 58-60.
9. Тарасов В.В. Исследование центрифугированных железобетонных изгибаемых элементов кольцевого сечения с продольным сосредоточенным армированием. — Автореферат диссертации канд. техн. наук. — Киев, НИИСК, 1983, 24 с.
10. А. С. 855111 (СССР), Трубопроводный мост / Пецольд Т.М., Тарасов В.В. и др. — Оpubл. в Б.И., 1981, №30.
11. СНБ 5.03.01 Конструкции бетонные и железобетонные. Нормы проектирования (проект).
12. А. С. 896447 (СССР). Устройство для испытания строительных элементов на косоизгиб / Бердичевский Г.И., Пецольд Т.М., Тарасов В.В. — Оpubл. в Б.И., 1982, №1.
13. Научно-технический отчет по теме: «Исследование преднапряженных центрифугированных балок пролетных строений эстакад под технологические трубопроводы т колонны П-образного сечения для одноэтажных бескрановых промзданий». — № 02828006937, руководитель темы — Пецольд Т. М., — Минск, БПИ, 1981, 130 с.