

УДК 691.328

**Цирулев Игорь Викторович,**  
Саратовский государственный технический  
университет им. Гагарина Ю.А.

**Раткин Василий Викторович,**  
Саратовский государственный технический  
университет им. Гагарина Ю.А.

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЦИКЛОВ ЗАМОРАЖИВАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ НА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ЧАСТЬ 2: АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

**Аннотация:** Приведены экспериментальные данные по влиянию циклов замораживания-оттаивания на физико-механические характеристики бетона, механические характеристики стальной арматуры. Установлены факторы, влияющие на процесс и результаты воздействия ЦЗО на конструкции: вид среды (газообразная, жидкая, твердая), свойства материала (характеристики бетона – пористость, вид цемента, наличие добавок к цементу, технология и качество изготовления бетона, и другие), условия контакта среды с материалом (полное или частичное погружение конструкции в среду, работа конструкции в зоне брызг агрессивной среды или капиллярного подсоса, попеременное увлажнение конструкции средой и высушивание). Приведены экспериментальные данные по деформированию бетона в условиях ЦЗО, проведен анализ диаграмм  $\sigma - \varepsilon$  бетона при одноосном сжатии и влияния на их форму циклов замораживания и оттаивания.

**Ключевые слова:** бетон, железобетон, цикл замораживания-оттаивания, прочность, деформация

### **Введение**

В настоящее время железобетон широко используется в строительстве. Одним из ключевых характеристик строительных сооружений является их надежность, определяемая в соответствии с [1] как способность здания выполнять свои функции в течение предполагаемого срока службы. Одной из основных причин снижения надежности является изменение характеристик и состояния материала конструкции под воздействием не только эксплуатационных нагрузок, но и воздействия агрессивных сред.

В условиях России одним из самых существенных естественных внешних факторов, вызывающих деградацию бетона, являются низкие и знакопеременные температуры, что обусловлено географическим положением нашей страны. Северная строительно-климатическая зона страны, отличающаяся от остальной территории более суровым климатом, занимает более половины территории России.

Изучение влияния циклов замораживания-оттаивания на железобетонные конструкции позволит прогнозировать наступление неблагоприятных ситуаций и тем самым избежать возможного наступления аварийного состояния и организовать проведение ремонта в оптимальное время.

### **1. Экспериментальные данные по влиянию ЦЗО на физико-механические характеристики бетона**

#### **1.1 Влияние ЦЗО на прочность бетона**

В НИИЖБе, под руководством профессора Миронова С.А [2] исследовали стойкость бетона при колебании температур от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $-50^{\circ}\text{C}$  в течение 30–40 циклов (с добавками и



без). Как показали результаты эксперимента, циклические колебания температур оказали разрушающее действие на бетон. Кубиковая прочность бетона снизилась с 7% до 25%, морозостойкость снизилась в 1,5–2 раза в зависимости от степени водонасыщения.

В своей диссертации Мазур Б.М [3] представил результаты испытаний призм размером 10x10x40 см на центральное сжатие. Оказалось, что прочность призмы при влажности  $W=3,05\%$  уменьшилась на 2...9%, а при  $W=4,93\%$  после 25 циклов замораживания и оттаивания снизилась на 13%. После 40 и 60 циклов это падение составило 30% и 40% соответственно по сравнению с базовым (сухим) образцом.

В работе [4] выполнены экспериментальные исследования прочности железобетонных элементов на опытных образцах размерами 100x100x300мм разделенных на 2 серии по видам температурно-влажностных воздействий. При изготовлении образцов использован бетон состава 1:1,24:3,1 (по массе), В/Ц=0,5. Портландцемент Ангарского завода марки 400.

Таблица 1

Характеристика условий испытания образцов приведена в таблице 1.

Серия	Цели испытаний	Начальная весовая влажность бетона, %	Условия хранения, температура $t$ и влажность $\varphi$ среды
I	Моделирование ЦЗО	4,90–5,30	ЦЗО в воде от +20°C до –50°C, $\varphi = 100\%$
II		2,65–2,87	ЦЗО в воздушной среде от +20°C до –50°C, $\varphi = 50 - 55\%$

Влияние низких отрицательных температур на прочностные характеристики бетона оценивалось по изменениям прочности бетона на осевое сжатие

( $R$  и  $R_b$ ), прочности на растяжение  $R_{bt}$ .

После 30 ЦЗО образцов при температурах от 20 °С до – 50°C наибольшие изменения прочностных характеристик наблюдались в образцах серии I. Анализ результатов испытаний показывает, что наибольшее влияние на снижение прочности бетона оказывает степень водонасыщения. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2

Серия	Начальная влажность $W$ %	Начальная прочность бетона, МПа		Прочность после ЦЗО, МПа		Модуль упругости $E_b \times 10^{-4}$ , МПа
		$R_b$	$R_{bt}$	$R_b(t)$	$R_{bt}(t)$	
I	4,02-4,32	27,5/0,873	2,0/0,80	26,24/0,833	1,74/0,696	2,75/0,85
II	1,96-2,01	31,5/1,00	2,5/1,00	30,27/0,96	2,08/0,832	3,00/0,925

В числителе приведена средняя величина прочности бетона, в знаменателе – отношение прочности бетона к начальной прочности образцов серии II.

В работе [5] С.Н. Леоновичем выполнены экспериментальные исследования изменения прочности на сжатие бетонных образцов при циклическом замораживании и оттаивании. Исследования производились на образцах с размерами 100x100x100мм изготовленных на портландцементе марки 500 и разделенных на 3 серии в зависимости от состава смеси. Пределы прочности при сжатии и изгибе равны 53,2 МПа и 6,2 МПа. В таблице 3 приведены составы бетонных смесей.



Таблица 3

Серия	Расход составляющих, кг/м <sup>3</sup>				(В/Ц)
	Ц	П	Щ	В	
1	480	680	1100	180	0,375
2	465	655	1160	165	0,355
3	528	620	1100	195	0,369

Моделирование ЦЗО при испытании образцов было выполнено согласно схеме на рис. 1.

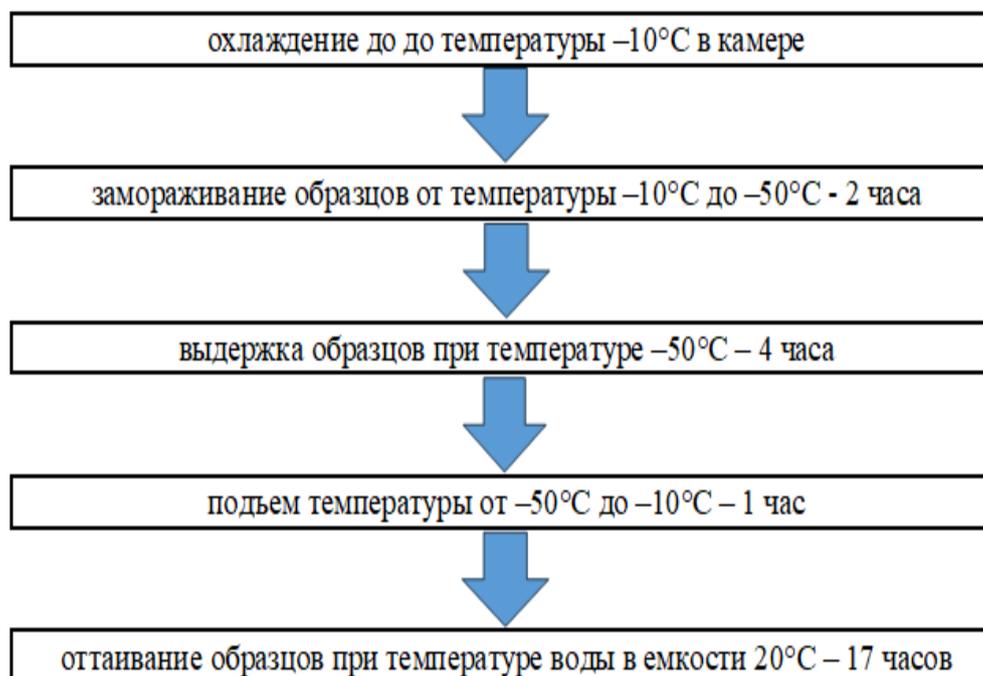


Рисунок 1 – Условия испытаний образцов

Во время низкотемпературных циклических испытаний через каждые 5 циклов производилось извлечение образцов для проверки на осевое сжатие с целью оценки изменения прочности бетона. Данные испытаний представлены в таблице 4 и на рисунке 2.

Таблица 4

Кол-во циклов	Серия 1	Серия 2	Серия 3
0	34,0	44,5	40,3
5	35,5	46,5	44,5
10	37,0	48,4	48,6
15	31,5	41,2	47,7
20	26,5	34,7	42,7
25	23,2	30,4	41,4
27	-	-	38,2



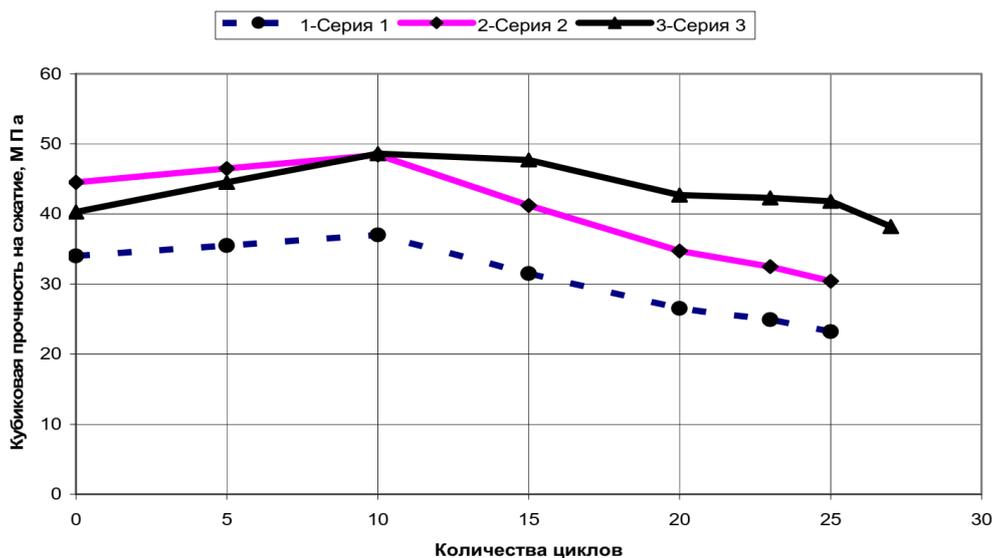


Рисунок 2 – Изменение прочности на сжатие образцов кубов при увеличении количества циклов замораживания–оттаивания

Так же в этой работе производилось испытание образцов размером 100x100x400мм на прочность при растяжении при изгибе. Образцы изготавливались и подвергались ЦЗО аналогично образцам для испытаний на сжатие. Испытание на изгиб проводилось по четырёхточечной схеме согласно [6,7].

Результаты испытаний приведены в таблице 5 и на рисунке 3.

Таблица 5

Кол-во циклов	Серия 1	Серия 2	Серия 3
0	2,76	3,12	3,18
15	2,46	3,0	2,88
20	2,44	2,40	2,64
35	2,40	2,20	2,55
45	2,32	2,12	2,34
60	1,95	1,55	1,67

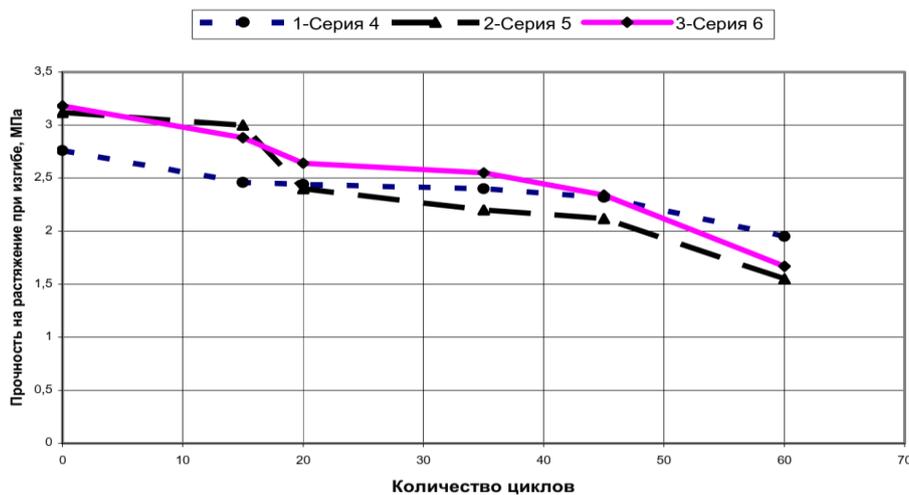


Рисунок 3 – Изменение прочности на растяжение при изгибе при увеличении количества циклов замораживания–оттаивания



В работе [8] представлены испытания бетонных кубов (100x100x100мм) и призм (100x100x400мм). Образцы изготавливались на портландцементе марки 42,5 с пропорциями Ц:Щ:П:В = 380:1073:758:152 кг/м<sup>3</sup>. После 28 дней образцы сначала погружали в сульфатно-хлоридный раствор (3,5% NaCl+ 3,5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) на 4 дня, затем подвергали ЦЗО от -20°C до +20°C в специальной установке, при этом каждый цикл длился 4 часа. После каждых 25 циклов образцы переворачивали и помещали в емкости для образцов, которые заполняли новым раствором.

После каждых 25 циклов образцы испытывали на прочность на сжатие, прочность на изгиб, измеряли потерю массы и модуль упругости. Испытания на изгиб осуществляли по схеме 2-точечного изгиба. Результаты испытаний приведены в таблицах 6-7.

Таблица 6

Масса образцов, г								
0	25	50	75	100	125	150	175	200
2333.3	2327.2	2317.2	2306.7	2287.1	2267.5	2257.2	2239.5	2217.6
Модуль упругости, ГПа								
0	25	50	75	100	125	150	175	200
35,67	36,12	33,53	31,16	28,97	27,91	25,66	23,59	21,44

Таблица 7

Прочность на сжатие, МПа				
0	50	100	150	200
48,28	53,79	42,44	30,51	18,79
Прочность на изгиб, МПа				
0	50	100	150	200
5,81	6,93	5,14	2,64	1,60

В статье [9] проводились исследования бетонных образцов в условиях воздействия ЦЗО. Было изготовлено 17 бетонных цилиндрических образцов диаметром 100 мм и высотой 200 мм. Использовалась смесь на обыкновенном портландцементе с пропорциями В:Ц:П:Щ – 160:320:777:1165.

Формы извлекали через 2 дня после отливки, а образцы выдерживали в воде в течение 23 дней. Когда возраст образцов 50 дней, начинались испытания на замораживание и оттаивание в климатической камере. Один цикл замораживания-оттаивания состоял из понижения температуры со +20°C до -25°C в течение одного часа, выдержки при -25°C в течение трех часов, размораживания до +15°C в течение одного часа, повышения температуры до +20°C в течение двух часов. Для поддержания содержания влаги в образцах их опрыскивали водой в течение 15 минут, когда температура достигала 20°C во время оттаивания каждого ЦЗО.

После 50, 100, 200, 300 циклов замораживания и оттаивания к образцам была приложена сжимающая нагрузка для испытания на прочность. По три образца были испытаны на каждое число ЦЗО. Результаты испытаний представлены в таблице 8.

Таблица 8

Прочность на сжатие, МПа / Относительное значение				
0	50	100	200	300
49,8 / 100%	44,7 / 89,7%	40,0 / 80,3%	35,4 / 71,0%	29,8 / 59,8%

В диссертации [10] производили лабораторные исследования на образцах кубах размерами 10x10x10см с различным водоцементным отношением. Образцы исследовались в возрасте 360 дней. Характеристики исходных материалов, примененных при изготовлении бетонных образцов, приведены в таблице 9.



Таблица 9

Состав	Расход материалов, кг			В/Ц	R <sub>сж</sub> , МПа, 28 сут.	R <sub>сж</sub> , МПа, 360 сут.
	Цемент	Песок	Щебень			
C1	427	1082	657	0,5	19,0	37,0
C2	400	1140	640	0,44	35,0	55,0
C3	400	1110	700	0,4	43,3	55,0

Для определения влияния температурных режимов на характер разрушения бетона в лабораторных условиях образцы каждой партии были разделены на 3 группы и испытаны по следующим режимам:

- замораживание в морозильной камере при температуре -18°C – 2 часа, оттаивание при температуре +18°C в 5%-ном солевом растворе NaCl – 2,5 часа (20 образцов) – базовый метод;
- замораживание в климатической камере при температуре -35°C – 4 часа, оттаивали при + 18°C в 5%-ном солевом растворе NaCl – 4 часа (20 образцов);
- замораживание при температуре -35°C – 4 часа, с дальнейшим повышением температуры до -5°C (20 образцов).

Все образцы перед замораживанием насыщали 98 часов в 5%-ном солевом растворе NaCl.

Результаты изменения прочностных показателей бетонов (средние значения), испытываемых составов C1-C3, представлены в таблице 10.

Таблица 10

Состав	В/Ц	R <sub>сж</sub> , МПа	Режим испытания, °C	Циклы	R <sub>сж</sub> , МПа	Снижение прочности, %
C1	0,50	37,0	-18...+18 NaCl 5%	0	37,0	
				10	36,4	
				15	34,9	
				25	33,8	
				45	31,6	14,6
			-35...-5	0	37,0	
				10	39,8	
				45	35,8	
				100	35,1	
				115	34,1	7,83
			-35...+18 NaCl 5%	0	37,0	
				10	35,1	
				15	33,8	
				25	31,3	
				45	25,4	31,3
			C2	0,44	55,0	-18...+18 NaCl 5%
10	54,3					
15	53,8					
25	52,3					
45	50,1	7,7				
-35...-5	0	55,0				
	10	55,6				
	45	54,1				
	90	52,1				
	115	51,3				6,7



			-35...+18 NaCl 5%	0	55,0	
				10	53,6	
				15	52,0	
				25	45,3	
				45	40,6	26,2
СЗ	0,4	55,0	-18...+18 NaCl 5%	0	55,0	
				10	54,6	
				15	54,1	
				25	52,9	
				45	51,9	5,6
			-35...-5	0	55,0	
				10	55,4	
				45	54,0	
				90	52,9	
				115	52,0	5,2
			-35...+18 NaCl 5%	0	55,0	
				10	53,8	
				15	52,8	
				25	50,4	
				45	47	15,0

Анализ результатов экспериментальных данных показал значительное снижение прочности бетонных образцов всех составов, прошедших циклические температурные воздействия. Более значительное снижение прочности бетона наблюдалось при более низкой начальной прочности образцов и более высоком водоцементном соотношении. Так же по некоторым экспериментам можно увидеть, что разрушение бетона происходит интенсивней при одновременном действии ЦЗО и солей.

Разрушающие напряжения при замерзании воды в порах бетона возникают при их заполнении водой на 85% и более. Такое высокое водонасыщение практически невозможно при эксплуатации или хранении железобетонных конструкций в обычных условиях. Но, при охлаждении бетона по его объёму возникает градиент температуры, способствующий миграции водных растворов из внутренних более тёплых слоёв в наружные более холодные части конструкции. Концентрация водных растворов в зоне замерзания увеличивается и достигает критических значений, приводящих к разрушающим растягивающим напряжениям. Скорость замерзания зависит не только от температуры, но и от размера пор. По мере уменьшения линейных размеров пор температура замерзания снижается. Во время оттаивания направление движения водных растворов меняется на противоположное – от нагревающихся наружных слоёв к внутренним, имеющим более низкую температуру. Рост количества ЦЗО увеличивает пористость бетона и его способность к водонасыщению. Это приводит к увеличению заполненности внутренних пор водой и ускорению разрушения структуры бетона, что в свою очередь приводит к увеличению водонасыщения.

Таким образом, воздействие ЦЗО и влаги на бетон имеют тесную взаимосвязь. Исходя из условий водонасыщения можно определить следующие условия замораживания и оттаивания бетона [Берг О. Я. Высокопрочный бетон / О. Я. Берг, Е. Н. Щербаков, Г. Н. Писанко // М.:Стройиздат, 1971. – 208 с]:

- замораживание в воздушной среде, оттаивание в воде;
- циклы замораживания и оттаивания бетона влажность которого обусловлена постоянным капиллярном подсосе воды;



- циклы замораживания и оттаивания при полном погружении в воду.

Наиболее разрушающе действуют на бетон условия капиллярного подсоса и погружения в воду, так как при этом водонасыщение пор бетона максимально.

Заморзание бетона в воздушной среде может так же приводить к его разрушению в следующих случаях:

- быстрое повышение и понижение температуры относительно не массивной железобетонной (бетонной) конструкции, приводящее к разрушению, вызванному различием коэффициентов температурного расширения компонентов бетона вне зависимости от влажности конструкции;

- длительное действие низкой температуры на одну сторону массивной конструкции или не массивной ограждающей конструкции с положительной температурой на противоположной стороне. В этом случае возникают описанные выше процессы тепломассопереноса, вызванные градиентов температуры и приводящие к разрушению структуры бетона;

- быстрое охлаждение всей поверхности не массивной тонкостенной конструкции что приводит к промерзанию наружных слоёв и резком повышении давления водных растворов во внутренней части. Данный процесс может привести к отслоению поверхностных слоёв бетона.

### 1.2 Деформирование бетона в условиях ЦЗО

Изучение и анализ многочисленных исследований бетонов позволяет считать, что в отсутствие апробированной теории прочности бетона, экспериментальные зависимости  $\sigma - \varepsilon$  являются наиболее приемлемой оценкой их конструктивных свойств.

В работе [11] выполнено исследование диаграмм  $\sigma - \varepsilon$  бетона при одноосном сжатии и влияния на их форму циклов замораживания и оттаивания. Для эксперимента изготовлены 36 образцов сечением 100x100мм класса прочности на сжатие В30. Часть образцов (14 шт., серия «ЦЗО») выдерживались до полного насыщения в солевом растворе (5% водный раствор хлорида натрия) и после этого помещались в полиэтиленовые пакеты, которые предотвращали высыхание образцов в камере тепла-холода в процессе ЦЗО. Один цикл включал в себя замораживание до  $-50^{\circ}\text{C}$ , выдержку при этой температуре, поднятие температуры до  $-20^{\circ}\text{C}$  с выдержкой при данной температуре, нагрев до  $+20^{\circ}\text{C}$  и размораживание образцов. Остальные 22 образца ЦЗО не подвергались (серия В30). На рисунке 4 приведены полученные диаграммы.

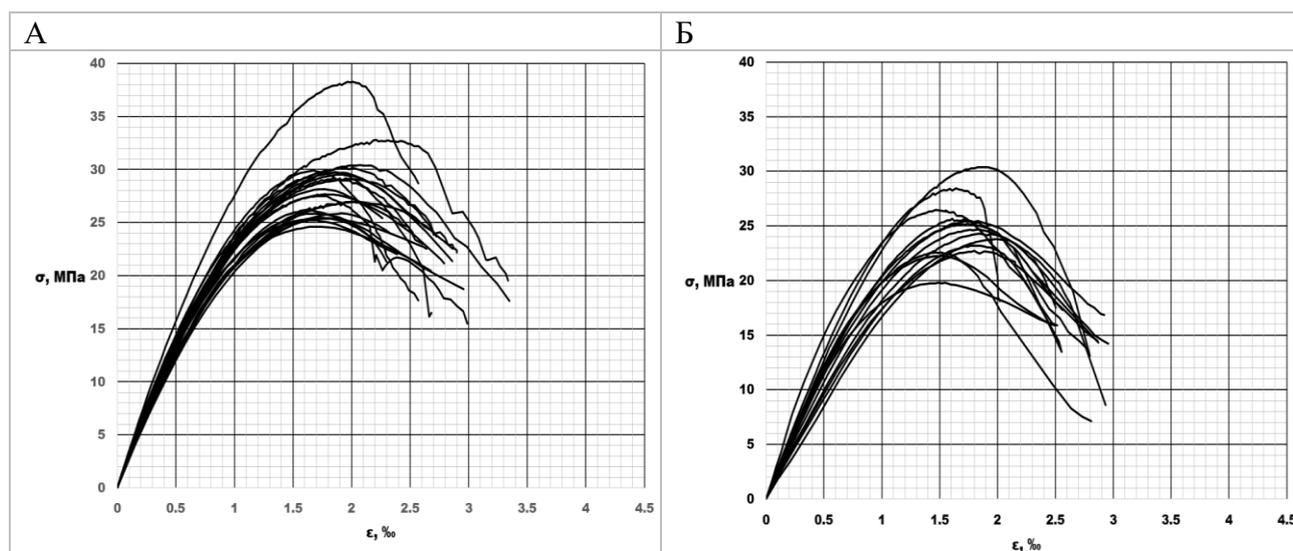


Рисунок 4 – Экспериментальные диаграммы сжатия бетона:  
А – серия В30, Б – серия «ЦЗО»



Значения максимальных напряжений, предельных деформаций и модуля упругости для испытанных образцов приведены в таблице 6.

Таблица 6

№ п/п	Максимальные напряжения, $\sigma_{max}$ , МПа	Предельные деформации, $\epsilon_{b0}$ , %	Начальный модуль упругости, $E_b$ , ГПа
Серия «ЦЗО»			
1	25.5	1.516	26.31
2	23.8	1.538	24.33
3	28.5	1.770	23.26
4	25.2	1.976	16.86
5	25.7	1.639	27.37
6	30.4	1.743	24.40
7	24.3	1.721	23.48
8	22.6	1.885	25.55
9	26.5	1.843	20.09
10	24.7	1.513	25.26
11	23.2	1.465	33.12
12	22.7	1.842	21.70
13	22.3	1.834	18.54
14	19.8	1.800	19.43
Среднее значение	24.6	1.720	23.55
Серия «В30»			
1	27.5	1.766	29.72
2	32.8	2.210	28.16
3	29.9	1.677	29.16
4	30.2	1.877	27.35
5	38.3	2.014	32.58
6	29.8	1.860	30.97
7	29.2	1.948	29.71
8	30.4	2.070	27.39
9	29.2	1.844	28.16
10	27.0	2.000	27.11
11	29.7	1.854	29.92
12	26.2	1.646	27.89
13	25.4	1.844	25.32
14	28.2	1.748	27.44
15	25.9	1.921	25.02
16	26.9	2.026	26.44
17	29.5	1.922	28.04
18	25.3	1.601	28.6
19	25.9	1.685	27.76
20	24.6	1.660	25.73
21	27.7	1.773	28.45
22	25.5	1.763	26.28
Среднее значение	28.4	1.850	28.05



В работе [10] проведены испытания опытных образцов размером 50x50x200мм изготовленных из бетона одного состава (Ц:Щ:П:В = 480:1230:496:153 кг/м<sup>3</sup>).

В дальнейшем все образцы были разбиты на три группы в зависимости от режима воздействий:

1. серия контрольная (нормальные естественно-лабораторные условия хранения);
2. подверженные температурно-влажностным воздействиям в водонасыщенном состоянии: замораживание до температуры  $-18^{\circ}\text{C} \pm 2$  (2 часа), оттаивание при температуре  $+18^{\circ}\text{C} \pm 2$  (2,5 часа) в 5%-ном солевом растворе NaCl (Серия ЦЗО);

Образцы групп 2а и 2б прошли по 45 циклов до момента механических испытаний. На рисунке 5 приведены полученные для 3-х серий диаграммы сжатия бетона.

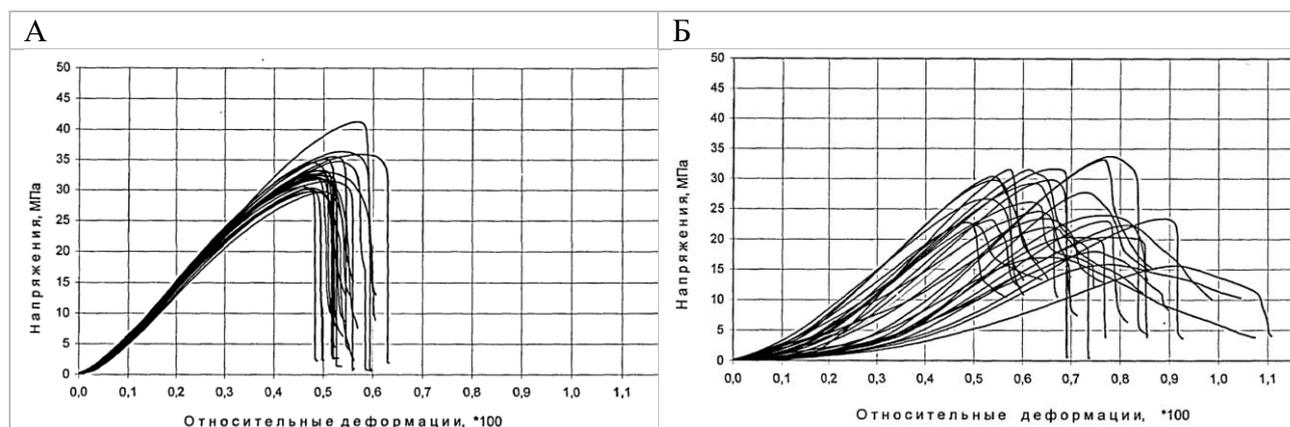


Рисунок 5 – Экспериментальные диаграммы сжатия бетона:  
А – серия контрольная, Б – серия «ЦЗО»

В статье [12] приведены исследования образцов с размерами 100x100x300мм, подвергавшихся циклам замораживания-оттаивания, изготовленных из бетона одного состава (Ц:Щ:П:В = 420:649:707:211 кг/м<sup>3</sup>). Были получены диаграммы при одноосном сжатии образцов после 0, 25, 50, 75 и 100 ЦЗО (рис. 6). Максимальное напряжение при сжатии после 100-го цикла снизилось на 81,2% по сравнению с 0-м циклом, а модуль упругости на 93,5%.

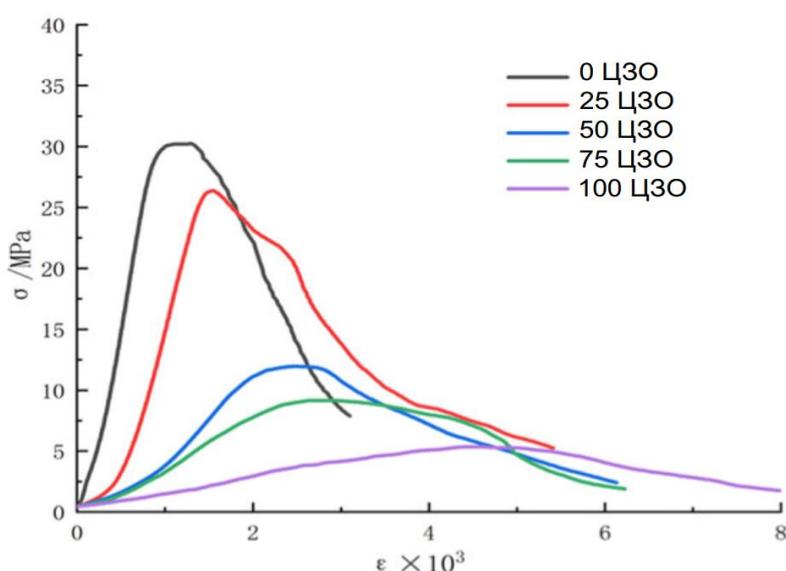


Рисунок 6 – Экспериментальные диаграммы сжатия бетона



В статье [13] проведены испытания бетонных призм размерами 100x100x300мм, подвергавшихся ЦЗО. Пропорции смесей и измеренная на 28-й день прочность образцов на сжатие приведены в таблице 8.

Таблица 8

Серия	В/Ц	Ц	В	П	Щ	Прочность на сжатие на 28-й день, МПа
1	0,60	317	190	760	1,077	33,1
2	0,54	352	190	669	1,126	37,5
3	0,48	396	190	633	1,108	46,8

Образцы извлекали из формы через 48 часов после отливки. Затем их выдерживали в воде в течение 7 дней, а затем в лаборатории на воздухе. В возрасте 24 дней призмы погружали в воду температурой 15–20°C для насыщения и максимального накопления повреждений в ходе испытаний. Затем образцы подвергались ЦЗО по следующей методике: за один цикл температура образцов понижалась с 8 до -17°C, а затем повышалась до 8°C примерно за 3,5 часа. Каждая серия была разделена на 4–6 групп, и каждая группа подвергалась определённому кол-ву ЦЗО. В таблице 9 приведены результаты образцов.

Таблица 9

Серия	Кол-во ЦЗО	Максимальные напряжения, $\sigma_{max}$ , МПа	Предельные деформации ( $10^{-6}$ )
1	0	28,73	1,627
1	75	17,67	4,438
1	100	14,13	4,965
1	125	10,90	6,299
1	150	6,76	7,798
2	0	39,18	1,872
2	100	25,72	3,533
2	175	20,02	4,066
2	200	17,62	4,508
3	0	41,54	1,781
3	50	38,36	1,912
3	75	35,12	1,976
3	100	32,83	2,102
3	125	30,45	2,217
3	150	29,09	2,382

В статье [14] были проведены испытания образцов из бетона С40 (Ц:В:П:Щ = 1:0,49:1,55:3,15 кг/м<sup>3</sup>) размерами 100x100x100мм. Образцы выдерживали 28 дней для полного набора прочности. Перед замораживанием и оттаиванием образцы погружали в воду на четыре дня, а затем помещали в морозильную камеру при температуре -18°C не менее чем на четыре часа. После замораживания при добавлении воды температурой 20°C время таяния должно было составлять не менее четырех часов. После каждых 25 ЦЗО образцы испытывали на сжатие и растяжение с помощью специальной установки HUT1000k, при этом скорость нагружения при сжатии составляла 1мм/мин, при растяжении 0,1мм/мин. Полученные диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  бетона при сжатии и растяжении приведены на рисунке 7.



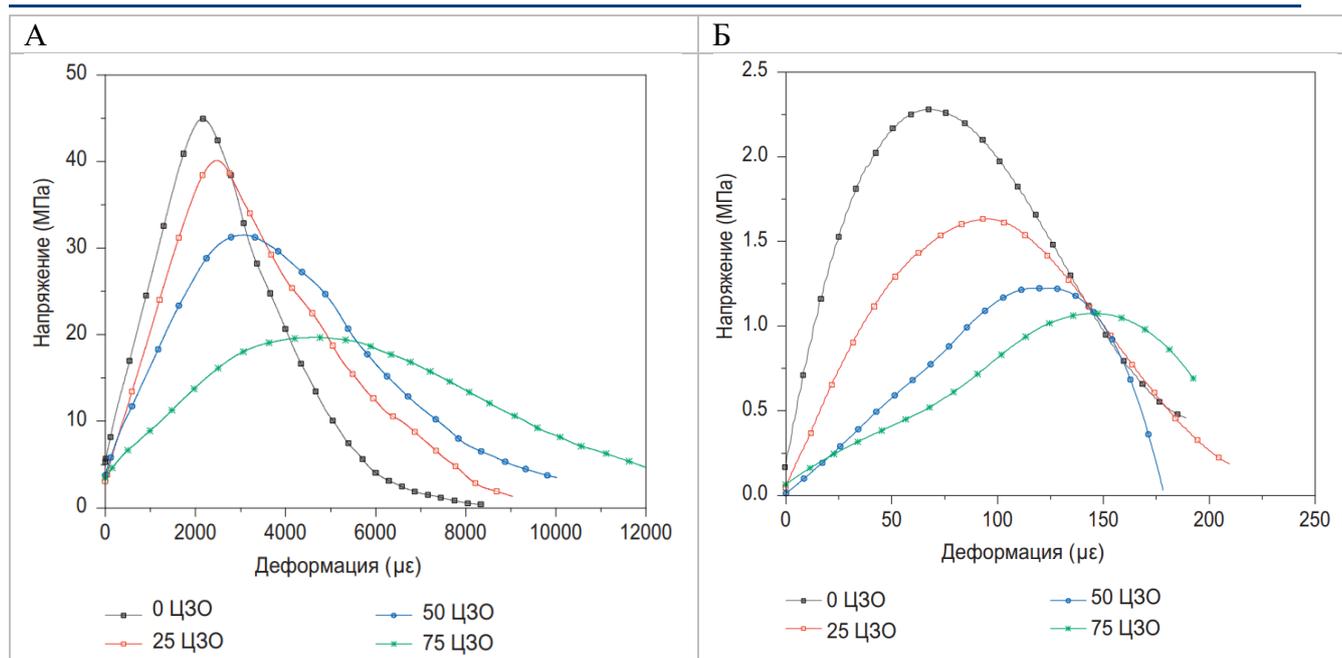


Рисунок 7 – Диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  бетона: А – сжатие, Б – растяжение

В таблице 10 приведены максимальные напряжения и деформации испытываемых образцов после различного кол-ва ЦЗО.

Таблица 10

Кол-во ЦЗО	Начальный модуль упругости, ГПа	Максимальные напряжения при сжатии, МПа	Пиковые деформации при сжатии, ( $10^{-6}$ )	Максимальные напряжения при растяжении, МПа	Пиковые деформации при растяжении, ( $10^{-6}$ )
0	30,7	44,93	2150,3	2,27	67,75
25	21,6	40,10	2482,0	1,63	95,07
50	18,9	31,57	3095,0	1,22	119,1
75	10,2	19,67	4696,7	1,07	146,2

В работе [15] для изучения закономерностей изменения соотношения напряжений и деформации бетона после воздействия ЦЗО были подготовлены бетонные кубы размером 100x100x100мм. Образцы изготавливались на портландцементе марки 42,5 с пропорциями Ц:В:П:Щ = 325:140:145:1160 кг/м<sup>3</sup>. После достижения образцами возраста 28 дней, прочность на сжатие составляла 50 Мпа. Результаты сжатия образцов после различного кол-ва ЦЗО приведены в таблице 11.

Таблица 11

Кол-во ЦЗО	Максимальные напряжения, $\sigma_{max}$ , МПа	Пиковые деформации ( $10^{-4}$ )	Начальный модуль упругости, 10xГПа
0	43,12	18,35	3,25
100	35,41	16,07	3,18
150	32,82	15,18	3,01
200	31,57	16,02	2,75
250	29,03	20,23	1,96



**Выводы.**

Влияние ЦЗО на форму диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  бетона при сжатии выражается в снижении максимальных напряжений, уменьшении начального модуля упругости.

1. Воздействие сульфатсодержащей среды на железобетон носит объемный характер, приводя к появлению наведенной, изменяющейся с течением времени неоднородности механических свойств.

2. Экспериментальному исследованию влияния сульфатсодержащих сред на физико-механические свойства бетонов посвящено довольно большое количество публикаций, однако подавляющее большинство экспериментальных данных получено на бетонных образцах, имеющих неоднородные механические свойства бетона для различных объемов образца. Поэтому эти данные дают только некоторую качественную характеристику кинетики коррозионных процессов и не позволяют их использовать для идентификации моделей, достаточно корректно описывающих изменение физико-механических свойств материала с учетом неоднородности их распределения по объему элемента.

3. В результате анализа экспериментальных данных по влиянию сульфатсодержащих сред на физико-механические свойства бетонов установлено, что на начальных стадиях взаимодействия бетона со средой происходит ее временное упрочнение. Величина упрочнения зависит как от свойств бетона, так и от свойств сульфатсодержащей среды.

4. Из анализа экспериментальных данных и результатов натурных обследований установлено, что при коррозионном износе арматуры в бетоне имеет место коррозионное «распухание» арматурных стержней, вызванное тем, что продукты коррозии арматуры занимают больший объем, чем объем «съеденного» коррозией металла. Результатом этого эффекта является появление в защитном слое бетона коррозионных трещин, ориентированных вдоль арматуры. При дальнейшем развитии коррозии арматуры происходит отслаивание защитного слоя бетона, при этом изменяется характер сцепления арматуры и возможно ее продергивание.

*Список литературы:*

1. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения = Reliability for constructions and foundations. General principles: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. N 1974-ст: введен впервые: дата введения 2015-07-01 / подготовлен Открытым акционерным обществом "Научно-исследовательский центр "Строительство" (ОАО "НИЦ "Строительство") и Центральным научно-исследовательским институтом строительных конструкций имени В.А.Кучеренко (ЦНИИСК им.В.А.Кучеренко). – Москва: Стандартинформ, 2015. – IV, 7, [1] с.; 29 см. – Текст: непосредственный.

2. Миронов С. А., Иванова О. С, Журавлева Л. Е. Стойкость бетона при циклических колебаниях низких температур // Бетон и железобетон. – 1982.–№3.–С.42-43

3. Мазур Б.М. Температурные деформации бетонов при низких отрицательных температурах и их влияние на долговечность железобетона: Автореф, дис.... канд. техн. наук. М, 1964. – 24 с

4. Кажарский В.В. Прочность изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям после действия отрицательных температур: автореф. дис. канд. тех. наук: 05.23.01. – Улан-Удэ, 2000. – 22 с.

5. Леонович С. Н. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: монография: в 2 ч. / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский, О. Ю. Чернякевич, А. Степанова. – Минск: БНТУ, 2016. – 393 с



6. Леонович, С.Н. Оценка морозостойкости тяжелого бетона с использованием коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге / С.Н. Леонович, О.А.М. Аль-Факих // Вестник Брестского государственного технического университета. 1, 2004. – С. 93–96.

7. Леонович, С.Н. Практическая методика экспериментального определения остаточной морозостойкости бетона, эксплуатируемых конструкций / С.Н. Леонович, О.А.М. Аль-Факих // Вестник Брестского государственного технического университета. 1, 2004. – С.125–128.

8. Xia, Dongtao & Yu, Shiting & Yu, Jiali & Feng, Chenlu & Li, Biao & Zheng, Zhi & Wu, Hao. (2023). Damage characteristics of hybrid fiber reinforced concrete under the freeze-thaw cycles and compound-salt attack. *Case Studies in Construction Materials*. 18. e01814. 10.1016/j.cscm.2022.e01814.

9. M. Hasan, H. Okuyama, Y. Sato, T. Ueda Stress-Strain Model of Concrete Damaged by Freezing and Thawing Cycles // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2004. – №1. – С. 89-99.

10. Хомякова И.В. Особенности работы железобетонных конструкций в условиях замораживания и оттаивания: дис. канд. тех. н. наук: 05.23.01. – Нерюнгри, 2003. – 138 с.

11. Плюсин М.Г. Обеспеченность несущей способности сжатых железобетонных элементов в условиях замораживания и оттаивания: дис. канд. тех. наук: 2.1.1. – СПб., 2022. – 149 с.

12. Li, W., Wang, H. & Zhang, W. Damage and Deterioration Mechanism of Coal Gangue Mixed Pumice Aggregate Concrete Under Freeze-Thaw Cycles. *Int J Concr Struct Mater* **17**, 57 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00619-y>

13. Duan, An & Jin, Wei & Qian, Jiaru. (2011). Effect of freeze-thaw cycles on the stress-strain curves of unconfined and confined concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 44. 1309-1324. 10.1617/s11527-010-9702-9.

14. Yang, Xiaolin & Wang, Genhui & Li, Hongzhao & Fan, Jiang. (2020). Numerical Simulation of Static Stress-Strain Relationship and Failure Mode for Freeze-Thaw Concrete. *Advances in Civil Engineering*. 2020. 1-9. 10.1155/2020/1921598.

15. Wang Y. Analysis on effects of freeze-thaw cycle on mechanical properties of concrete // *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. – 2014. – №6 (7). – С. 216-222.

