

УДК 691.32

Исследование стойкости бетонов анизотропной и вариатропной структур к попеременному увлажнению и высушиванию

Л. Р. Маилян¹, С. А. Стельмах¹, Е. М. Щербань¹, А. Д. Петрушин²,
А. Л. Маилян¹, Д. М. Ельшаева², Н. А. Щербань², Ю. В. Жеребцов²

¹ Донской государственный технический университет, Россия, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

² Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Исследование стойкости бетонов анизотропной и вариатропной структур к попеременному увлажнению и высушиванию / Маилян Л. Р., Стельмах С. А., Щербань Е. М., Петрушин А. Д., Маилян А. Л., Ельшаева Д. М., Щербань Н. А., Жеребцов Ю. В. // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 61–75. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-61-75

Аннотация

Цель: исследование влияния ряда эксплуатационных факторов на итоговую стойкость вариатропного бетона к попеременным циклам увлажнения и высушивания. В данной работе обозначена проблема стойкости бетонов к циклическому увлажнению и высушиванию, а также сформулирован научный дефицит, заключающийся в неполноценности существующей базы знаний касемо взаимосвязи между типом структуры бетона и его стойкостью к циклическим воздействиям, в том числе к попеременному увлажнению и высушиванию. **Методы:** тестовые образцы изготавливались по трем разным технологиям: вибрирование, центрифугирование, виброцентрифугирование. Исследовались следующие основные характеристики: прочность на сжатие, прочность на растяжение при изгибе, водонепроницаемость. Проведенные экспериментальные исследования показали, что бетоны вариатропной структуры (центрифугирование и виброцентрифугирование) имеют более высокую стойкость к попеременному увлажнению и высушиванию, нежели бетоны анизотропной структуры (вибрирование). После 500 циклов увлажнения-высушивания и высокой степени агрессивности водной среды насыщения по содержанию солей сульфатов, хлоридов и нитратов потери прочности на сжатие и растяжение при изгибе для вибрированных бетонов составили 28,7 и 32,7% соответственно, для центрифугированных — 26,2 и 27,8% соответственно и для виброцентрифугированных — 19,6 и 21,4% соответственно. **Результаты:** виброцентрифугированные вариатропные бетоны показали наибольшую стойкость к воздействию попеременного увлажнения в водной среде с различной степенью агрессивности и высушиванию по сравнению с центрифугированными вариатропными и вибрированными анизотропными бетонами.

Ключевые слова: бетон, вариатропная структура, анизотропная структура, циклы увлажнения и высушивания, прочность.

Введение

В настоящее время вопрос стойкости бетона к различным циклическим воздействиям встает все более остро в научных исследованиях и практическом строительстве. Это обусловлено разницей в условиях эксплуатации между различными строительными конструкциями, зданиями и сооружениями из бетона и железобетона [1]. Наиболее подверженными такого типа воздействиям являются конструкции зданий и сооружений, которые эксплуатируются в условиях попеременного климата с различными переходами через ноль [2]. При таких обстоятельствах научные исследования и изучение с точки зрения эксперимента и теории стойкости различных бетонов к циклическим воздействиям представляют большой интерес и являются актуальными [3, 4].

Исследования, посвященные оценке стойкости бетонов к различным видам агрессивных воздействий, представлены в работах [4–10]. Например, в работе [4] авторами была выполнена оценка коррозионной стойкости порошкового бетона, где по результатам экспериментов было установлено, что применение надсернистого аммония в качестве агрессивного раствора позволит значительно ускорить процесс испытаний цементных композитов на сульфатостойкость. Оценка стойкости железобетонных конструкций различного типа, эксплуатируемых в условиях попеременной влажности в прибрежной зоне Черного моря, выполненная в работе [5], показала, что у всех наблюдаемых конструкций было зафиксировано снижение прочности в диапазоне от 4 до 10%. В исследовании [6] авторами оценивалась коррозионная стойкость цементных композитов, модифицированных минеральной и пластифицирующей добавками, подвер-

гнутых воздействию агрессивной сульфатной среды. По итогам работы установлено, что применение данной комплексной добавки обеспечивает стабильность показателя плотности бетонов, что в дальнейшем положительно скажется на долговечности бетона. В работах [7, 8] авторами исследовались бетоны, подверженные попеременному замораживанию и оттаиванию. Применение обогащенной золы теплоэлектростанций, пластифицирующих и воздухововлекающих добавок в бетонах позволило получить бетонные композиты с улучшенной морозостойкостью и более высокой коррозионной стойкостью. Исследования стойкости бетонов, подверженных воздействию агрессивных сред во время циклов увлажнения и высушивания, проведенные в работе [9], показали, что прочность бетона на сжатие на начальном этапе при циклическом увлажнении и высушивании сначала увеличивается, а затем снижается. Что касается сульфатного воздействия, то здесь зависимость изменения прочности носит прямо пропорциональный характер, а именно с увеличением концентрации раствора сульфата натрия возрастает скорость потери прочности на сжатие. Исследование [10] имеет схожую с [9] тематику, однако отличие состоит в том, что изучались бетоны, армированные стальной фиброй. В целом изменение прочностных характеристик в зависимости от воздействия циклов увлажнения и высушивания и степени агрессивности среды носят аналогичный характер [9, 10].

Целью данной работы является исследование влияния ряда эксплуатационных факторов на итоговую стойкость вариатропного бетона к попеременным циклам увлажнения и высушивания.

Задачами исследования являются:

- анализ литературы, посвященной оценке влияния различных факторов на характеристики долговечности бетонов;
- разработка методики определения стойкости бетона, подвергнутого попеременному увлажнению и высушиванию, в зависимости от технологии его изготовления;
- проведение экспериментальных исследований и оценка стойкости вариатропных бетонов в сравнении с анизотропным бетоном.

Материалы и методы. В данном исследовании в качестве вяжущего применялся портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н (АО «Себряковцемент», Михайловка, Россия). В качестве мелкого заполнителя ис-

пользовался кварцевый песок Астаховского карьера (ООО «Кварц», Шахты, Россия). Также применялся плотный крупный заполнитель в виде щебня из песчаника фракции 10–20 мм (ООО «Донщебень», Ростов-на-Дону, Россия). Характеристики сырьевых компонентов для бетонной смеси представлены в табл. 1.

Насыщение образцов проводилось в водной среде с различной степенью агрессивности. Условия агрессивной водной среды насыщения осуществлялись путем растворения в дистиллированной воде солей сульфатов, хлоридов и нитратов ($MgSO_4$, $NaCl$, NH_4NO_3). Согласно ГОСТ 31384–2017 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии», для бетонов с маркой по водонепроницаемости W8 слабоагрессивная

ТАБЛИЦА 1. Характеристики сырьевых компонентов для бетонной смеси

Свойство	Фактическое значение
Портландцемент марки ЦЕМ I 42.5Н	
Нормальная густота, %	25,3
Плотность, кг/м ³	3128
Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, МПа	46,1
Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток, МПа	5,6
Щебень из песчаника	
Насыпная плотность, кг/м ³	1356
Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, % по массе	5,4
Марка щебня по дробимости согласно ГОСТ 8267-93	1000
Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе	0,14
Песок кварцевый	
Модуль крупности	1,75
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	0,16
Истинная плотность зерен, кг/м ³	2598
Насыпная плотность, кг/м ³	1353

среда характеризуется суммарным содержанием солей сульфатов, хлоридов и нитратов св. 50 000 до 60 000 мг/дм³, среднеагрессивная среда характеризуется содержанием солей св. 60 000 до 70 000 мг/дм³, сильноагрессивная — св. 70 000 мг/дм³.

Испытания портландцемента, песка и щебня осуществлялись по методикам ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ», ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ» и ГОСТ 30744–2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка».

Составы бетонных смесей для изготовления вибрированных, центрифугированных и виброцентрифугированных бетонных образцов представлены в табл. 2.

Приготовление образцов осуществлялось по трем технологиям: вибрирование, центрифугирование и виброцентрифугирование. Основные этапы изготовления образцов бетона и примененное технологическое оборудование представлены в табл. 3.

Экспериментальные исследования осуществлялись с применением методов математического планирования — метод ортогонального композиционного планирования 2-го порядка Бокса – Уильсона. Всего в процессе эксперимента было изготовлено 42 образца-куба и 42 образца-призмы по технологии вибрирования и 6 образцов-цилиндров для контроля водонепроницаемости.

Для проверки водонепроницаемости центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов из бетонной смеси, предназначенной для их изготовления, также отдельно было изготовлено 6 образцов-цилиндров. Изготовление стандартных образцов-кубов и образцов-призм из центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов осуществлялось путем из распиловки. Схема выпиливания образцов из центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов представлена в исследовании [12]. Всего из центрифугированных и виброцентрифугированных элементов было выпилено 84 образца-куба и 84 образца-призмы.

Испытание образцов на воздействие переменного увлажнения и высушивания производилось с интенсивностью около 60 циклов в месяц. Ввиду отсутствия нормативных методик проведения этого испытания режим был следующий: высушивание образцов при температуре +50...+55 °С в течение 5 часов; увлажнение в воде при температуре +15...+20 °С в течение 7 часов. Температура сушки была назначена из условий разогрева бетона в естественных условиях при солнечной радиации. Продолжительность увлажнения и высушивания, установленная в результате предварительных опытов, обеспечила колебание влажности в пределах 25–75 % от величины начального водопоглощения после двухсуточного увлажнения [13, 14].

ТАБЛИЦА 2. Составы бетонных смесей

Технология изготовления	Цемент, кг/м ³	Вода, кг/м ³	Песок, кг/м ³	Щебень, кг/м ³
Вибрирование	375	190	725	1053
Центрифугирование	387	180	685	1147
Виброцентрифугирование				

ТАБЛИЦА 3. Этапы изготовления образцов бетона

Наименование технологического этапа	Технология изготовления (структура)	
	Вибрирование (анизотропная)	Центрифугирование и виброцентрифугирование (вариатропная)
Дозировка сырьевых компонентов	Цемент, песок, щебень и вода дозировались на весах VK-3000.1 («Масса-К», Санкт-Петербург, Россия) в соответствии с рецептурой для каждого вида бетона, представленной в табл. 2	
Приготовление бетонной смеси	Приготовление бетонной смеси осуществилось в лабораторном бетоносмесителе БЛ-10. Сначала в смеситель загружались сухие цемент и песок и перемешивались в течение 60 секунд. После этого в сухую цементно-песчаную смесь вводили воду затворения и вся эта смесь перемешивалась еще в течение 60 секунд. Далее в цементно-песчаную смесь вводили щебень и перемешивали до получения однородного состояния	
Формовка образцов	Полученная бетонная смесь заливалась в формы-кубы 2ФК-100 и формы-цилиндры ФЦ-150. Затем формы с бетонной смесью вибрировались на лабораторной виброплощадке СМЖ-739М (РНПО «РусПрибор», Санкт-Петербург, Россия) в течение 60 секунд. Далее поверхность смеси заглаживалась, выравнивалась с краями формы и помещалась в камеру нормального твердения КНТ-1 (РНПО «РусПрибор», Санкт-Петербург, Россия) на 1 сутки	Бетонная смесь загружалась в формы для центрифугирования. Затем формы для центрифугирования устанавливались на лабораторную виброцентрифугу [11]. Параметры центрифугирования были следующие: скорость вращения — 156 рад/с, продолжительность формования — 12 мин. Параметры вибрирования: высота выступов хомутов — 5 мм, длина выступов — 20 мм, шаг между выступами — 30 мм. После центрифугирования и виброцентрифугирования с форм сливался шлам и образцы в формах помещались в камеру нормального твердения КНТ-1 (РНПО «РусПрибор», Санкт-Петербург, Россия) на 1 сутки
Распалубка образцов	Через 1 сутки после формования образцы вибрированных, центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов извлекались из камеры нормального твердения и распалубливались	
Хранение	Хранение всех распалубленных образцов осуществлялось в камере нормального твердения в течение 28 суток	

Определение прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе осуществлялось в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 «Методы определения прочности по контрольным образцам». Контроль водонепроницаемости бетонов осуществлялся в соответствии с требованиями ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости».

Основная часть

Расчеты прочностных характеристик бетонов в зависимости от количества циклов увлажнения и высушивания, а также степени агрессивности среды производились

методом ортогонального композиционного планирования 2-го порядка с использованием программы MathCAD [15]. В качестве выходящих целевых функций экспериментальной модели были выбраны прочность кубика на сжатие (R) и прочность на растяжение при изгибе (R_{ib}).

В качестве входных переменных факторов, влияющих на прочностные характеристики активированных бетонов, рассматривались:

- X_1 — количество циклов увлажнения и высушивания от 50 до 550 циклов;
- X_2 — степень агрессивности жидкой среды насыщения по содержанию солей

сульфатов, хлоридов и нитратов. Уровни входных факторов и интервалы их варьирования для планирования 2-го порядка представлены в табл. 4.

Число опытов ортогонального центрального композиционного планирования 2-го порядка равно:

$$N = 2^2 + 2 \cdot 2 + 5 = 13.$$

Результаты определения прочностных характеристик вибрированных, центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов представлены в табл. 5–8.

Согласно результатам испытаний образцов бетона, изготовленных по трем различным технологиям, виброцентрифугированные бетоны имеют наиболее высокие прочностные характеристики. Также все бетоны соответствуют требованиям по водонепроницаемости и имеют марку W8.

По результатам расчета коэффициентов и проверки значимости данных коэффициентов по критерию Стьюдента (t_{α} , (f_2)) были получены следующие регрессионные уравнения:

– для вибрированных бетонов:

$$R = 35,69 - 3,18X_1 - 0,67X_2 - 1,45X_1X_2 - 0,03X_1^2 + 1,15X_2^2$$

$$R_{fb} = 4,26 - 0,44X_1 - 0,11X_2 - 0,2X_1X_2 - 0,01X_1^2 + 0,11X_2^2$$

– для центрифугированных бетонов:

$$R = 43,07 - 3,23X_1 - 0,82X_2 - 2,1X_1X_2 - 0,26X_1^2 + 1,02X_2^2$$

$$R_{fb} = 5,04 - 0,44X_1 - 0,11X_2 - 0,25X_1X_2 - 0,01X_1^2 + 0,11X_2^2$$

– для виброцентрифугированных:

$$R = 49,93 - 3,07X_1 - 0,38X_2 - 1,78X_1X_2 - 0,59X_1^2 + 0,88X_2^2$$

$$R_{fb} = 5,8 - 0,37X_1 - 0,07X_2 - 0,25X_1X_2 - 0,08X_1^2 + 0,12X_2^2$$

ТАБЛИЦА 4. Уровни входных факторов и интервалы их варьирования для планирования 2-го порядка

Входные факторы	Уровень варьирования					Интервал варьирования, δ
	-1,414	-1	0	1	1,414	
X_1	50	200	350	500	550	50 и 150
X_2	50 000	55 000	65 000	75 000	80 000	5000 и 10 000

ТАБЛИЦА 5. Результаты определения физико-механических характеристик вибрированных, центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов контрольного состава

Вид бетона	R , МПа	R_{fb} , МПа	Водонепроницаемость образцов, МПа
Вибрированный	42,8	5,2	0,8
Центрифугированный	48,9	5,8	0,9
Виброцентрифугированный	54,6	6,4	

ТАБЛИЦА 6. Результаты определения характеристик вибрированных бетонов

№ п/п	В виде переменных		R, МПа	R _{тв} , МПа
	X ₁	X ₂		
1	1	1	30,5	3,5
2	-1	1	40,1	4,8
3	1	-1	36,8	4,4
4	-1	-1	40,6	4,9
5	1,414	0	31,2	3,6
6	-1,414	0	39,7	4,8
7	0	1,414	38,3	4,5
8	0	-1,414	37,3	4,4
9	0	0	35,4	4,2
10	0	0	36,1	4,4
11	0	0	35,0	4,1
12	0	0	36,7	4,4
13	0	0	35,2	4,2

ТАБЛИЦА 7. Результаты определения характеристик центрифугированных бетонов

№ п/п	В виде переменных		R, МПа	R _{тв} , МПа
	X ₁	X ₂		
1	1	1	36,1	4,2
2	-1	1	47,3	5,6
3	1	-1	44,5	5,2
4	-1	-1	47,3	5,6
5	1,414	0	38,4	4,4
6	-1,414	0	46,8	5,6
7	0	1,414	45,8	5,3
8	0	-1,414	44,5	5,2
9	0	0	41,9	4,9
10	0	0	43,8	5,2
11	0	0	42,6	4,9
12	0	0	44,1	5,2
13	0	0	42,9	5,0

ТАБЛИЦА 8. Результаты определения характеристик виброцентрифугированных бетонов

№ п/п	В виде переменных		R, МПа	R _{тв} , МПа
	X ₁	X ₂		
1	1	1	43,9	5,0
2	-1	1	53,5	6,2
3	1	-1	50,6	6,0
4	-1	-1	53,1	6,2
5	1,414	0	44,3	5,1
6	-1,414	0	53,1	6,2
7	0	1,414	52,8	6,2
8	0	-1,414	50,5	5,9
9	0	0	48,9	5,7
10	0	0	50,5	5,9
11	0	0	49,6	5,7
12	0	0	51,1	5,9
13	0	0	49,5	5,8

Проверка адекватности уравнений регрессии проводилась по критерию Фишера и показала, что все полученные модели уравнений адекватны.

Изменения прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе в графическом виде представлены на рис. 1 и 2.

Рис. 1 и 2 иллюстрируют изменения прочностных характеристик вибрированных, центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов в зависимости от количества циклов увлажнения и высушивания и степени агрессивности водной среды. Наибольшие снижения прочностных характеристик зафиксированы у вибрированных бетонов. Центрифугированные бетоны имеют меньшие проценты снижения прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе, нежели вибрированные, а наименьшие потери прочностных характеристик зафиксированы у виброцентрифугированных бетонов.

Анализируя влияние рассмотренных факторов, можно заключить, что наибольший процент снижения прочности для всех видов бетонов наблюдается при количестве циклов увлажнения и высушивания, равном 500, и высокой степени агрессивности водной среды насыщения по содержанию солей сульфатов, хлоридов и нитратов. Так, у вибрированных бетонов потеря прочности на сжатие составила 28,7 и 32,7% для прочности на растяжение при изгибе, у центрифугированных — 26,2 и 27,8%, а у виброцентрифугированных — 19,6 и 21,4% соответственно. Наименьший же процент снижения прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе наблюдался для всех видов бетонов при количестве циклов увлажнения и высушивания, равном 200, и низкой степени агрессивности во-

дной среды насыщения по содержанию солей сульфатов, хлоридов и нитратов. У вибрированных бетонов потери прочности на сжатие составили 5,1 и 5,8% для прочности на растяжение при изгибе, у центрифугированных — 3,3 и 3,4%, а у виброцентрифугированных — 2,8 и 2,5% соответственно. Что же касается исследований, проведенных при значениях факторов, где количество циклов увлажнения и высушивания равнялось 350, а водная среда насыщения имела среднюю степень агрессивности, то здесь средние потери прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе для вибрированных бетонов составили 16,6 и 18,1%, для центрифугированных — 11,9 и 13,2% и для виброцентрифугированных бетонов — 8,6 и 9,3% соответственно.

Наибольшая стойкость виброцентрифугированных и центрифугированных вариатропных бетонов по сравнению с вибрированными анизотропными бетонами, выраженная в меньших потерях прочностных характеристик при равных факторах агрессивного воздействия, в первую очередь объясняется наиболее плотным внешним слоем у бетонов, полученных по технологии центробежного уплотнения [16–18]. Рассмотренные особенности изменения механических свойств бетона в процессе попеременного увлажнения и высушивания по принятой методике следует объяснить тем, что при циклической миграции влаги происходят перенос и отложение новообразований на стенках пор и капилляров, что приводит к их сужению и снижению вследствие этой проницаемости бетона, что изначально может благоприятно сказываться на его стойкости. Однако дальнейшее снижение прочности происходит вследствие нарушения сцепления цементного камня с заполнителем. Как известно, зона

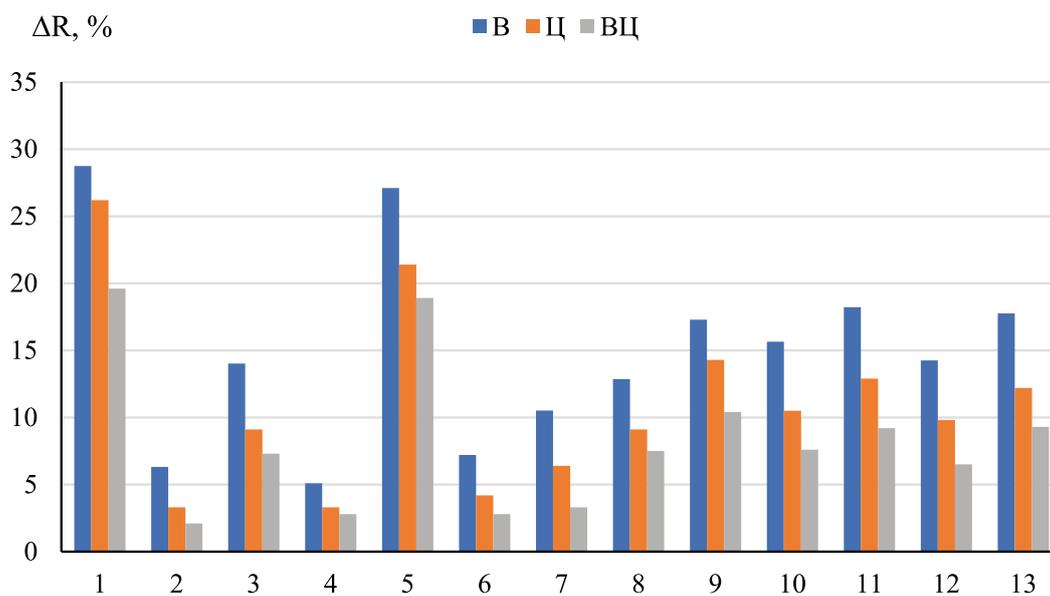


Рис. 1. Изменения прочности на сжатие вибрированных (В), центрифугированных (Ц) и виброцентрифугированных (ВЦ) в зависимости от количества циклов увлажнения и высушивания и степени агрессивности водной среды

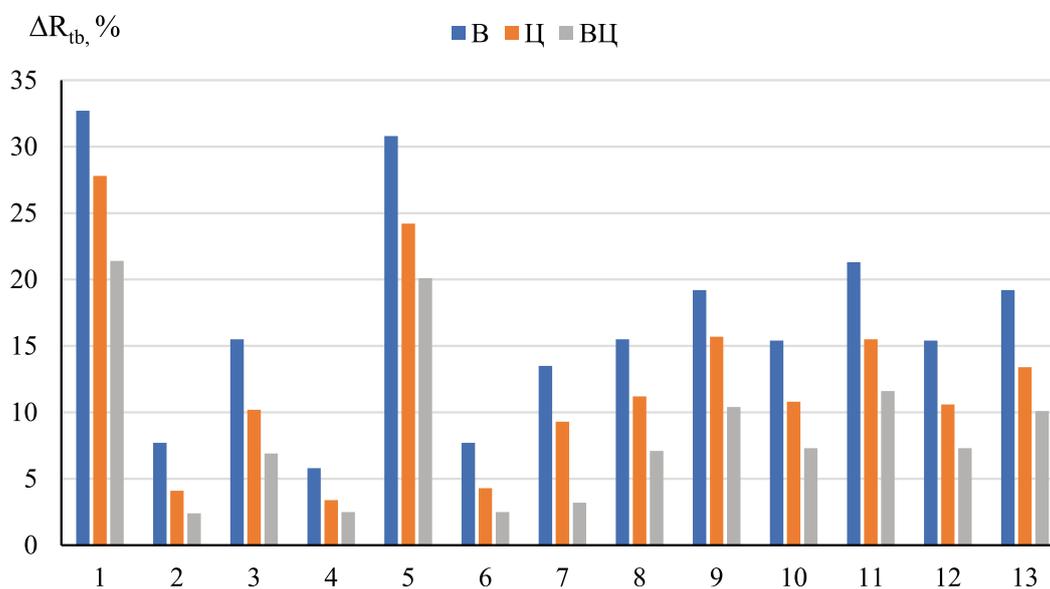


Рис. 2. Изменения прочности на растяжение при изгибе вибрированных (В), центрифугированных (Ц) и виброцентрифугированных (ВЦ) бетонов в зависимости от количества циклов увлажнения и высушивания и степени агрессивности водной среды

контакта является основным путем проникновения и миграции влаги в бетоне [19, 20]. В дальнейшем в соответствии с [21] происходит растворение связей между цементным камнем и заполнителем, а также снижение прочности их взаимного сцепления. Таким образом, можно считать, что одной из основных причин снижения прочности бетона в процессе циклического увлажнения и высушивания является нарушение прочной связи цементного камня с заполнителем. При этом развитие микро- и макротрещин происходит при высыхании.

При увлажнении нагретого бетона чередование циклов подобно удару, который вызывает напряжения меняющегося знака, приводящие к появлению микротрещин, а затем к их развитию. Накопление таких нарушений сопровождается увеличением внешнего объема и пористости, уменьшением прочности, а также изменением других физико-механических свойств материала. Соответственно, чередующиеся воздействия увлажнения и высушивания приводят к потере эксплуатационных свойств материала конструкций или элементов инженерных сооружений.

Выводы

По результатам оценки влияния попеременного увлажнения и высушивания, а также степени агрессивности водной среды насыщения на бетоны, которые изготовлены по различным технологиям (вибрирования, центрифугирования и виброцентрифугирования) и имеют различную структуру (анизотропную и вариатропную), можно сделать следующие выводы.

1. С увеличением числа циклов увлажнения и высушивания прочность на сжатие

и на растяжение при изгибе для всех видов бетонов уменьшается.

2. Наибольшие падения прочности на сжатие и на растяжение при изгибе для всех видов бетонов зафиксированы там, где водная среда насыщения имела высокий уровень агрессии по содержанию солей сульфатов, хлоридов и нитратов.

3. Виброцентрифугированные вариатропные бетоны показали наибольшую стойкость к воздействию попеременного увлажнения в водной среде с различной степенью агрессивности и высушивания по сравнению с центрифугированными вариатропными и вибрированными анизотропными бетонами. Потери прочностей после 500 циклов у виброцентрифугированных вариатропных бетонов составили от 19 до 22 %, что на 6–7 % меньше, чем у центрифугированных вариатропных бетонов, и на 9–12 % меньше, чем у вибрированных анизотропных бетонов.

Таким образом, в ходе проведения исследования ликвидирован определенный научный дефицит в отношении взаимосвязи между типом структуры бетона, варьируемой технологией изготовления, и его стойкостью к попеременному увлажнению и высушиванию. Направление развития исследования лежит в проведении масштабных экспериментов с переходом к натурным исследованиям в реальных конструкциях. Практическая перспектива применения полученных результатов заключается в получении опытной базы данных для районов строительства, характеризующихся попеременным увлажнением и высушиванием, и различным уровнем агрессивности водной среды насыщения реальных строительных конструкций зданий и сооружений из бетона и железобетона.

Библиографический список

1. Леонович С. Н., Зикеев Л. Н. Долговечность центрифугированных железобетонных стоек. Обзорная информация. М.: Информэнерго, 1991. 64 с.
2. Низина Т. А., Низин Д. Р., Селяев В. П. и др. Большие данные при прогнозировании климатической стойкости строительных материалов. I. Температура и влажность воздуха // Строительные материалы и изделия. 2023. Т. 6, № 3. С. 18–30. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-3-18-30.
3. Толстой А. Д., Лесовик В. С., Новиков К. Ю. и др. Коррозионная стойкость изделий из порошкового бетона // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 11. С. 43–46.
4. Сергушина Е. С., Ерофеев В. Т., Кабанов О. В. и др. Стойкости тяжелых бетонов в условиях переменной влажности // Вестник Приволжского территориального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук: сб. научных трудов. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. 2022. С. 126–141.
5. Терешкин И. П. Исследование коррозионной стойкости модифицированных бетонных композитов в сульфатных средах // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8036
6. Петрик И. Ю., Зайченко Н. М., Зайченко В. М. и др. Морозостойкость и коррозионная стойкость тяжелого бетона с повышенным содержанием обогащенной золы ТЭС // Современное промышленное и гражданское строительство. 2021. № 4. С. 225–234.
7. Корсун А. М., Батыновский Э. И. Морозостойкость цементного бетона во взаимосвязи с искусственно создаваемой пористостью // Проблемы современного бетона и железобетона. 2018. № 10. С. 169–184.
8. Li L., Shi J., Kou J. Experimental Study on Mechanical Properties of High-Ductility Concrete against Combined Sulfate Attack and Dry-Wet Cycles // *Materials*. 2021. No. 14. 4035. DOI: 10.3390/ma14144035.
9. Liu J., Zang S., Yang F., et al. Fracture Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete under Dry-Wet Cycle Sulfate Attack // *Buildings*. 2022. No. 12. 1623. DOI: 10.3390/buildings12101623.
10. Marcos-Meson V., Fischer G., Solgaard A., et al. Mechanical Performance of Steel Fibre Reinforced Concrete Exposed to Wet-Dry Cycles of Chlorides and Carbon Dioxide // *Materials*. 2021. No. 14. 2642. DOI: 10.3390/ma14102642.
11. Стельмах С. А., Холодняк М. Г., Щербань Е. М. и др. Устройство для изготовления изделий из виброцентрифугированного бетона // Пат. на изобретение 197610, Россия, МПК В28В 21/30, ДГТУ. № 2020103753; заявл. 29.01.2020; опубл. 18.05.2020, Бюл. № 14. 4 с.
12. Маилян Л. Р., Виноградова Е. В., Ельшаева Д. М. и др. Исследование интегральных прочностных и деформативных характеристик центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов на активированном порландцементе // *Строительство и архитектура*. 2021. № 3. С. 46–50. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-46-50 (дата обращения: 07.12.2023).
13. Невский В. А., Юндин А. Н., Кончичев М. П. и др. Долговечность железобетонных лотков и пути ее повышения // *Гидротехника и мелиорация*. 1971. № 2. С. 57–64.
14. Shcherban' E. M., Stel'makh S. A., Beskopylny A. N., et al. The Influence of Recipe-Technological Factors on the Resistance to Chloride Attack of Variotropic and Conventional Concrete // *Infrastructures*. 2023. No. 8. 108. DOI: 10.3390/infrastructures8070108.
15. Лесниченко Е. Н., Чернышева Н. В., Дребезгова М. Ю. и др. Разработка многокомпонентного гипсоцементного вяжущего с применением метода математического планирования эксперимента // *Строительные материалы и изделия*. 2022.

Т. 5, № 2. С. 5–12. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-2-5-12.

16. Poursae A., Ross B. The Role of Cracks in Chloride-Induced Corrosion of Carbon Steel in Concrete-Review // *Corros. Mater. Degrad.* 2022. No. 3. 258–269. DOI: 10.3390/cmd3020015

17. Beskopylny A. N., Shcherban E. M., Stel'makh S. A., et al. Influence of Variatropy on the Evaluation of Strength Properties and Structure Formation of Concrete under Freeze-Thaw Cycles // *J. Compos. Sci.* 2023. No. 7. 58. DOI: 10.3390/jcs7020058.

18. Ахвердов И. Н. Вопросы теории центробежного формования и уплотнения бетонной смеси. Республиканское научно-техническое совещание: Технология формования железобетонных изделий. 1979. С. 3–12.

19. Трофимов Б. Я., Шудьяков К. В., Махмудов А. М. Влияние на долговечность бетона на микроструктуры гидратных фаз цементного камня // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова.* 2021. № 3. С. 8–18.

20. Москвин В. М., Иванов Ф. М., Алексеев С. Н. и др. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М.: Стройиздат, 1960. С. 536.

21. Клюев А. В., Кашапов Н. Ф., Клюев С. В. и др. Экспериментальные исследования процессов

структурообразования композиционных смесей с техногенным механоактивированным кремнеземистым компонентом // *Строительные материалы и изделия.* 2023. Т. 6, № 2. С. 5–18. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18.

Дата поступления: 08.12.2023

Решение о публикации: 14.02.2024

Контактная информация:

МАИЛЯН Левон Рафаэлович — докт. техн. наук, профессор; lrm@aanet.ru

СТЕЛЬМАХ Сергей Анатольевич — канд. техн. наук, доцент; sergej.stelmax@mail.ru

ЩЕРБАНЬ Евгений Михайлович — канд. техн. наук, доцент; au-geen@mail.ru

ПЕТРУШИН Александр Дмитриевич — докт. техн. наук, профессор; eps@rgups.ru

МАИЛЯН Александр Леонович — докт. техн. наук, профессор; mailyan_a@sroufo.ru

ЕЛЬШАЕВА Диана Михайловна — аспирант; diana.elshaeva@yandex.ru

ЩЕРБАНЬ Наталья Александровна — аспирант; natalya_1998_dotsenko@mail.ru

ЖЕРЕБЦОВ Юрий Владимирович — аспирант; yuri.zherebtsov@gmail.com

Study of the resistance of concrete of anisotropic and varitropic structures to alternating wetting and drying

L. R. Mailyan¹, S. A. Stel'makh¹, E. M. Shcherban'¹, A. D. Petrushin²,
A. L. Mailyan¹, D. M. El'shaeva², N. A. Shcherban'², Yu. V. Zherebtsov²

¹ Don State Technical University, 1, sq. Gagarina, Rostov-on-Don, 344000, Russia

² Rostov State Transport University, 2, sq. Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, Rostov-on-Don, 344038, Russia

For citation: Study of the durability of concrete anisotropic and variatropic structures to alternate moistening and drying / Mailyan L. R., Stel'makh S. A., Shcherban' E. M., Petrushin A. D., Mailyan A. L., El'shaeva D. M., Shcherban' N. A., Zherebtsov Yu. V. // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 61–75 (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-61-75.

Abstract

Objective: study of the influence of a number of operational factors on the final resistance of varitropic concrete to alternating cycles of wetting and drying. This work identifies the problem of concrete resistance to cyclic wetting and drying, and also formulates a scientific deficiency consisting in the inadequacy of the existing knowledge base regarding the relationship between the type of concrete structure and its resistance to cyclic influences, including alternating wetting and drying. **Methods:** test samples were made using three different technologies: vibration, centrifugation, and vibration centrifugation. The following main characteristics were studied: compressive strength, tensile strength in bending, water resistance. Experimental studies have shown that concretes with a varitropic structure (centrifugation and vibration centrifugation) have higher resistance to alternating wetting and drying than concretes with an anisotropic structure (vibration). After 500 cycles of wetting-drying and a high degree of aggressiveness of the saturated aqueous environment in terms of the content of sulfate, chloride and nitrate salts, the loss of compressive and tensile strength in bending for vibrated concrete was 28.7 and 32.7 respectively, for centrifuged concrete — 26.2 and 27.8%, respectively, and for vibrocentrifuged ones — 19.6 and 21.4 %, respectively. **Results:** Vibrocentrifuged varitropic concretes showed the greatest resistance to the effects of alternating wetting in an aqueous environment with varying degrees of aggressiveness and drying compared to centrifuged varitropic and vibrated anisotropic concretes.

Keywords: concrete, variatropic structure, anisotropic structure, wetting and drying cycles, strength.

References

1. Leonovich S. N., Zikeev L. N. Dolgovechnost' centrifugirovannykh zhelezobetonnykh stoek. Obzornaya informatsiya. M.: Informenergo, 1991. 64 s. (In Russian)
2. Nizina T. A., Nizin D. R., Selyaev V. P. i dr. Bol'shie dannye pri prognozirovanii klimaticheskoy stojkosti stroitel'nykh materialov. I. Temperatura i vlazhnost' vozduha // Stroitel'nye materialy i izdeliya. 2023. T. 6, no. 3. S. 18–30. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-3-18-30. (In Russian)
3. Tolstoj A. D., Lesovik V. S., Novikov K. Yu., et. al. Korrozionnaya stojkost' izdelij iz poroshkovogo betona // Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova. 2016. no. 11. S. 43–46. (In Russian)
4. Sergushina E. S., Erofeev V. T., Kabanov O. V., et. al. Stojkosti tyazhelykh betonov v usloviyakh peremennoj vlazhnosti // Vestnik Privolzhskogo territorial'nogo otdeleniya Rossijskoj akademii arhitektury i stroitel'nykh nauk: sb. nauchnykh trudov. Nizhnij Novgorod: Nizhegorodskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet. 2022. S. 126–141. (In Russian)
5. Tereshkin I. P. Issledovanie korrozionnoj stojkosti modifitsirovannykh betonnykh kompozitov v sul'fatnykh sredah // Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. No. 11.

URL: ivdon.ru/magazine/archive/n11y2022/8036
(In Russian)

6. Petrik I. Yu., Zajchenko N. M., Zajchenko V. M., et al. Morozostojkost' i korrozionnaya stojkost' tyazhelogo betona s povyshennym sodержaniem obogashchennoj zoly TES // *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2021. No. 4. S. 225–234. (In Russian)

7. Korsun A. M., Batyanovskij E. I. Morozostojkost' cementnogo betona vo vzaimosvyazi s iskusstvenno sozdavaemoj poristost'yu // *Problemy sovremenno-go betona i zhelezobetona*. 2018. No. 10. S. 169–184. (In Russian)

8. Li L., Shi J., Kou J. Experimental Study on Mechanical Properties of High-Ductility Concrete against Combined Sulfate Attack and Dry-Wet Cycles. *Materials*. 2021. No. 14. 4035. DOI: 10.3390/ma14144035.

9. Liu J., Zang S., Yang F., et al. Fracture Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete under Dry-Wet Cycle Sulfate Attack. *Buildings*. 2022. No. 12. 1623. DOI: 10.3390/buildings12101623.

10. Marcos-Meson V., Fischer G., Solgaard A., et al. Mechanical Performance of Steel Fibre Reinforced Concrete Exposed to Wet-Dry Cycles of Chlorides and Carbon Dioxide. *Materials*. 2021. No. 14. 2642. DOI: 10.3390/ma14102642.

11. Stel'mah S. A., Holodnyak M. G., Shcherban' E. M., et al. Ustrojstvo dlya izgotovleniya izdelij iz vibrocentrifugirovannogo betona // Pat. na izobretenie 197610, Rossiya, MPK B28B 21/30, DGTU. № 2020103753; zayavl. 29.01.2020; opubl. 18.05.2020, Byul. No. 14. 4 s. (In Russian)

12. Mailyan L. R., Vinogradova E. V., El'shaeva D. M. i dr. Issledovanie integral'nyh prochnostnyh i deformativnyh harakteristik centrifugirovannyh i vibrocentrifugirovannyh betonov na aktivirovannom portlandcemente // *Stroitel'stvo i arhitektura*. 2021. No. 3. S. 46–50. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-46-50 (data obrashcheniya: 07.12.2023). (In Russian)

13. Nevskij V. A., Yundin A. N., Konchichev M. P., et al. Dolgovechnost' zhelezobetonyh lotkov i puti ee povysheniya // *Gidrotehnika i melioraciya*. 1971. No. 2. S. 57–64. (In Russian)

14. Shcherban' E. M., Stel'makh S. A., Beskopylny A. N., et al. The Influence of Recipe-Technological Factors on the Resistance to Chloride Attack of Variotropic and Conventional Concrete. *Infrastructures*. 2023. No. 8. 108. DOI: 10.3390/infrastructures8070108.

15. Lesnichenko E. N., Chernysheva N. V., Drezbegova M. Yu., et al. Razrabotka mnogokomponentnogo gipsocementnogo vyazhushchego s primeneniem metoda matematicheskogo planirovaniya eksperimenta // *Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2022. T. 5, no. 2. S. 5–12. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-2-5-12. (In Russian)

16. Poursae A., Ross B. The Role of Cracks in Chloride-Induced Corrosion of Carbon Steel in Concrete-Review. *Corros. Mater. Degrad.* 2022. No. 3. P. 258–269. DOI: 10.3390/cmd3020015.

17. Beskopylny A. N., Shcherban E. M., Stel'makh S. A., et al. Influence of Variatropy on the Evaluation of Strength Properties and Structure Formation of Concrete under Freeze-Thaw Cycles. *J. Compos. Sci.* 2023. No. 7. 58. DOI: 10.3390/jcs7020058.

18. Ahverdov I. N. Voprosy teorii centrobezhnogo formovaniya i uplotneniya betonnoj smesi. *Respublikanskoe nauchno-tehnicheskoe soveshchanie: Tekhnologiya formovaniya zhelezobetonyh izdelij*. 1979. S. 3–12. (In Russian)

19. Trofimov B. Ya., Shuldyakov K. V., Mahmudov A. M. Vliyanie na dolgovechnost' betona mikrostruktury gidratnyh faz cementnogo kamnya // *Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova*. 2021. No. 3. S. 8–18. (In Russian)

20. Moskvina V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. N., et al. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ih zashchity. M.: Strojizdat, 1960. S. 536. (In Russian)

21. Klyuev A. V., Kashapov N. F., Klyuev S. V., et al. Eksperimental'nye issledovaniya processov strukturoobrazovaniya kompozitsionnyh smesey s tekhn.

nogennym mekhanoaktivirovannym kremnezemistym komponentom // Stroitel'nye materialy i izdeliya. 2023. T. 6, no. 2. S. 5–18. (In Russian)

Received: 08.12.2023

Accepted: 14.02.2024

Author's information:

Levon R. MAILYAN — Grand PhD in Engineering, Professor; lrm@aaanet.ru

Sergei A. STEL'MAKH — PhD in Engineering, Associate Professor; sergej.stelmax@mail.ru

Evgenii M. SHCHERBAN' — PhD in Engineering, Associate Professor; au-geen@mail.ru

Aleksandr D. PETRUSHIN — Grand PhD in Engineering, Professor; eps@rgups.ru

Aleksandr L. MAILYAN — Grand PhD in Engineering, Professor; mailyan_a@sroufo.ru

Diana M. EL'SHAEVA — Postgraduate Student; diana.elshaeva@yandex.ru

Natal'ya A. SHCHERBAN' — Postgraduate Student; natalya_1998_dotsenko@mail.ru

Yurii V. ZHEREBTSOV — Postgraduate Student, yuri.zherebtsov@gmail.com