

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА



УДК 693.547.32

В.В. МОЛОДИН, А.Е. АНУФРИЕВА, А.Х. НАВОЯН

ФОРСИРОВАННЫЙ РАЗОГРЕВ СМЕСИ, КАК ФАКТОР УВЕЛИЧЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ БЕТОНОВ, ПОДВЕРГШИХСЯ КОРРОЗИИ

Для бетонов, подвергавшихся длительному воздействию агрессивной среды, характерно снижение сцепления с вновь уложенным бетоном или его отсутствие. Причиной этого при традиционных способах укладки является разрушение волокнистых кристаллов, формирующих структуру цементного камня и осложняющих процессы диффузии. Установлено, что форсированный разогрев смеси при укладке ее на охлажденную карбонизированную поверхность инициирует и усиливает поток влаги с продуктами растворения цемента из «нового» бетона в «старый» и продавливает его через поврежденный коррозией слой. В результате формируется прочная структура и соединяются вновь уложенный и неповрежденные слои карбонизированного бетона, обеспечивая их надежное сцепление.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бетоны, сцепление, коррозия, карбонизация, цементный камень, бетонная смесь, разогрев, температурные градиенты, разница парциального давления.

DOI 10.32683/0536-1052-2020-734-2-56-71

Введение. Исключительная стойкость железобетона к агрессивным воздействиям окружающей среды, вместе с высокой прочностью, технологической универсальностью и возможностью широкого использования местных материалов сделали его самым широко распространенным материалом для строительства. Однако воздействие содержащейся в воздухе, особенно приморских районов, углекислоты и ионов хлора существенно ускоряет процесс его деградации [1, 2]. Основным и наиболее часто встречающимся фактором разрушения бетона является карбонизация – агрессивное воздействие кислотных газов CO_2 , заключающееся в нейтрализации поверхностного слоя и образовании в нем соединений, изменяющих его свойства.

Контактируя с бетоном, углекислый газ соединяется с растворенным гидроксидом кальция, нейтрализуя его. Это вызывает потерю бетоном защитных свойств поверхностного слоя. Легко проникая через поры и капилляры защитного слоя, углекислый газ достигает арматуры. Там, при накоп-

© Молодин В.В., Ануфриева А.Е., Навоян А.Х., 2020

лении CO_2 в количестве, превышающем критическое, происходит переход стали из пассивного состояния в активное. Слой оксида железа, защищающий арматуру, разрушается и начинается ее безудержная коррозия. Возникающий объем продуктов коррозии арматуры значительно превышает объем корродирующего металла. Он вызывает повышенное давление на защитный слой бетона со стороны арматуры. Вдоль арматуры возникают трещины, которые впоследствии станут причиной отслоения защитного слоя [3]. Коррозия арматуры ничем не сдерживается и разрушение сооружения неизбежно.

Обследование портовых сооружений на Дальнем Востоке, вызванное необходимостью их восстановления, показало, что разрушительное проникновение углекислого газа в глубь бетона за последние сто лет достигло 70–90 мм [4, 5]. Арсенал традиционных способов восстановления подобных разрушений невелик. Это заделка трещин путем инъектирования в них под давлением цементной смеси, торкретирование с предварительной очисткой поверхности бетона и арматуры от продуктов коррозии и обетонирование конструкций с устройством дополнительного арматурного каркаса [6].

Однако опыт восстановления работоспособности разрушенных сооружений показывает, что при достижении «новым» бетоном необходимой прочности сцепление его со «старым» происходит не всегда. Монолитность сооружения в подобных случаях определяется помимо адгезии проникновением в поры и капилляры «старого» бетона жидкости затвердения – воды с продуктами растворения цемента. Из этих продуктов формируются кристаллические сростки, являющиеся частью «нового» бетона, и это служит важным фактором, определяющим сцепление [7].

Очевидно, что неизбежное появление на поверхности пор и капилляров бетона, долго эксплуатировавшегося в агрессивных условиях, слоя продуктов коррозии цементного камня препятствует качественному соединению кристаллических сростков «нового» бетона с неповрежденной структурой «старого». И это серьезно влияет на качество их сцепления.

Задачей настоящего исследования является определение влияния наиболее часто встречающегося случая коррозии бетона – карбонизации поверхностей – на качество соединения с укладываемым на него свежим бетоном при восстановлении работоспособности конструкций и способов повышения сцепления.

Карбонизация цементного камня. В работах В.И. Москвина, Ф.М. Иванова, С.Н. Алексеева, Н.К. Розенталя и др. [1, 8, 9] исследованы причины появления и собственно процессы коррозии бетона. Установлено, что стойкость цементного камня к коррозионным воздействиям определяется его фазовым составом и видом новообразований, возникающих при гидратации цемента. При этом размер и формы первичных частиц минералов, слагающих цементный камень, имеют важное значение [8].

Нужно заметить, что основной компонент бетона – цементный камень, определяющий его прочность и долговечность, является результатом сложных физико-химических процессов, происходящих при взаимодействии воды и цемента. Силикаты кальция, взаимодействуя с водой, образуют гидросиликаты и гидроксид кальция. В ранние сроки, до приобретения цемент-

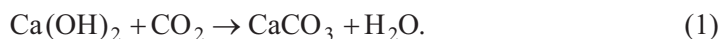
ным тестом жесткости, количество продуктов гидратации незначительно. Образовавшиеся гидросульфатоалюминаты кальция типа этtringита, гипса и гексагональных кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не способны сформировать прочную структуру, но между ними возникают коагуляционные связи. Затем происходит резкий рост пластической прочности, вследствие усиленного образования кристаллов этtringита призматической формы и игольчатых гидросиликатов кальция, выделяющихся в форме устойчивого геля [10]. Кристаллы трехкальциевого гидроалюмината и кристаллы гидроксида кальция образуют переплетающуюся игольчатую структуру наподобие войлока, сцементированную гелем гидросиликата кальция. Благодаря такой структуре прочность затвердевшего цемента и бетона очень высока.

Важным фактором, от которого зависят коррозионные процессы, является капиллярно-пористая структура цементного камня, определяющая интенсивность взаимодействия между бетоном и внешней средой. Пористая структура цементного камня обеспечивает его способность под действием различных градиентов пропускать через себя газы, содержащие агрессивные компоненты [1].

Коррозионные процессы начинаются на поверхности и развиваются в порах и капиллярах материала. Степень воздействия газовых сред на цементный камень определяется видом и концентрацией кислоты, конденсирующейся на его поверхности и в порах. Агрессивное действие кислого газа CO_2 зависит от технологических факторов и условий эксплуатации. Оно состоит в нейтрализации поверхностного слоя бетона и образовании в нем соединений, меняющих его свойства. Взаимодействие углекислого газа с гидроксидом кальция нейтрализует последний, и защитный слой бетона теряет свои свойства.

Капитальными исследованиями в области коррозии бетонов установлено, что под действием агрессивного вещества минералы гидратированного цементного камня перерождаются в конгломерат нерастворимых соединений. Продукты реакции выделяются в твердой фазе в виде рыхлых осадков или плотных пленок. Эти новообразования создают нарастающее сопротивление диффузии в поверхностном слое бетона, в том числе на поверхности пор и капилляров [1].

В процессе карбонизации углекислота, содержащаяся в воздухе, проникает в поры бетона, где растворяется в содержащейся там воде и вступает в реакцию с гидроксидом кальция. В результате реакции образуется карбонат кальция



Карбонат кальция осаждается в виде нерастворимых кристаллов, образуя на поверхности бетона пленку [11], герметично «запечатывая» поры. При этом объем образующегося карбоната кальция примерно на 12 % превышает объем исходного гидроксида кальция, что еще больше уплотняет карбонатный слой и существенно затрудняет диффузионные процессы.

Далее агрессивная углекислота, вступая в реакцию с карбонатом кальция, преобразует его с образованием растворимого бикарбоната



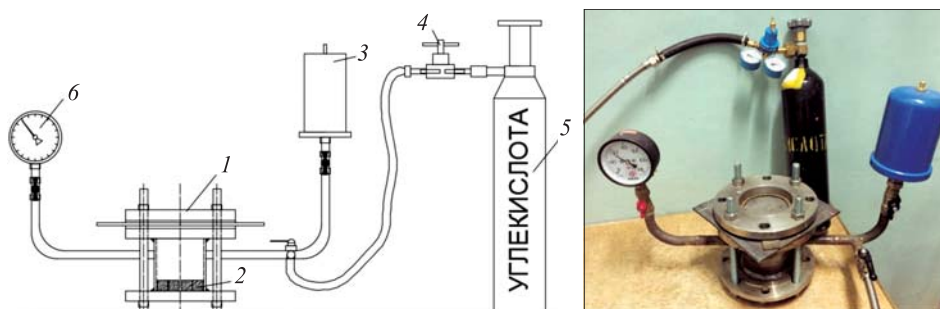


Рис. 1. Установка для испытаний бетона в среде углекислого газа

1 – герметичный контейнер; 2 – образцы из пескобетона в форме куба 20×20×20 мм; 3 – ресивер; 4 – углекислотный редуктор с манометрами; 5 – баллон с CO₂; 6 – манометр

Частично вымываясь из бетона, бикарбонат увеличивает объем пор. При этом внутренняя поверхность пор, капилляров и всего поверхностного слоя бетона сохраняет низкую прочность и диффузионную непроницаемость для жидкостей и газов.

Экспериментальные исследования последствий карбонизации. Определение глубины карбонизации бетона, подвергнутого воздействию углекислого газа, выполнялось по стандартной методике ГОСТ 31383–2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний» на экспериментальной установке (рис. 1), прототипом которой являлась установка Н.К. Розенталя и П.В. Язева [12].

Образцы из пескобетона В15, приготовленные с В/Ц = 0,52, размером 20×20×20 мм после приобретения проектной прочности помещались в герметичный контейнер, где при температуре +20±5 °С и относительной влажности 75±3 % выдерживались под давлением углекислого газа 0,3 МПа. С периодичностью в 7 сут один образец извлекался из газовой среды и раскалывался. На поверхность скола наносился индикатор рН среды 0,1%-й раствор фенолфталеина в этиловом спирте. Фенолфталеиновые пробы изменяют окраску от бесцветной до малиновой в кислой и щелочной среде соответственно. На рис. 2 области пескобетона, не тронутые углекислотой, ярко окрашены. Пострадавшие зоны сохраняют естественный цвет.

Глубина фактического проникновения углекислоты в бетон, в соответствии с ГОСТ 31383–2008, определялась путем измерения, с точностью до 1,0 мм, толщины нейтрализованного слоя, не изменившего цвет при обработке фенолфталеином через каждые 10,0 мм периметра поверхности. Затем рассчитывалось среднее арифметическое значение. Одновременно, опираясь на первый закон Фика, по методике, изложенной в Приложении В к ГОСТ

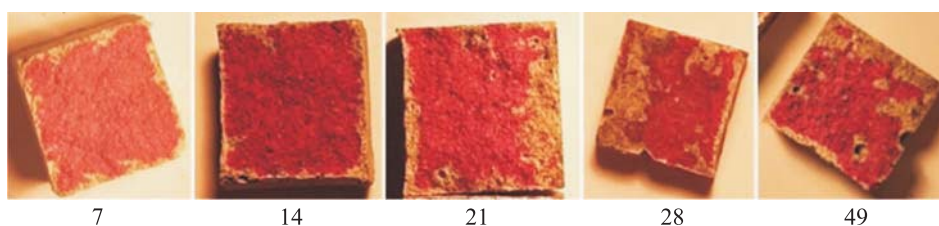


Рис. 2. Фенолфталеиновая проба сколов образцов из пескобетона, выдержанных в среде углекислого газа в течение разного времени (сутки)

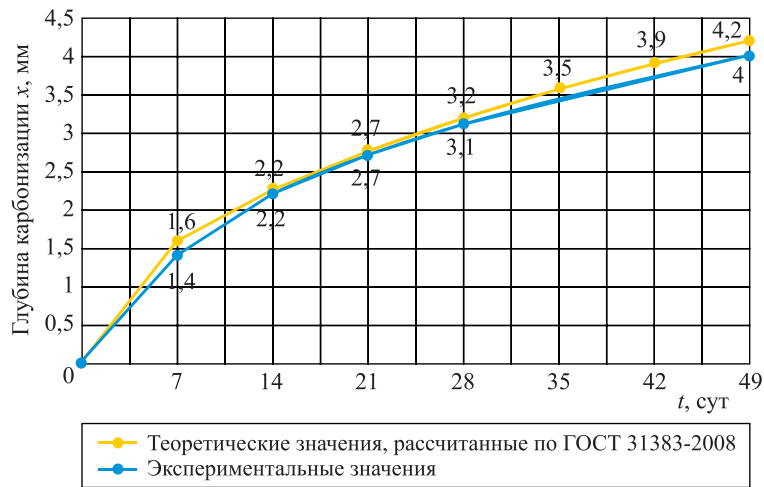


Рис. 3. Скорость карбонизации образцов из пескобетона М200

31383–2008, вычислялась расчетная глубина нейтрализации бетона в зависимости от времени и концентрации агрессивной среды

$$x = \sqrt{2DC_0\tau / m_0}, \quad (3)$$

где x – глубина карбонизированного слоя;
 D – эффективный коэффициент диффузии CO_2 в бетоне;
 C_0 – концентрация CO_2 в воздухе;
 τ – срок эксплуатации;
 m_0 – реакционная емкость бетона.

Расчетные и фактические значения карбонизации поверхности образцов пескобетона демонстрируют хорошую сходимость (рис. 3) и подтверждают достоверность полученных результатов.

Особенности изменения структуры цементного камня под действием углекислоты были исследованы с помощью электронного сканирующего микроскопа ТМ-1000 в Институте химии твердого тела и механохимии (ИХТТМ) СО РАН. Исследования структуры осуществлялись в трех характерных точках образца, выдержанного в течение 28 сут в среде углекислого газа – на поверхности, на границе проникновения CO_2 и в зоне, не подвергшейся карбонизации (рис. 4).

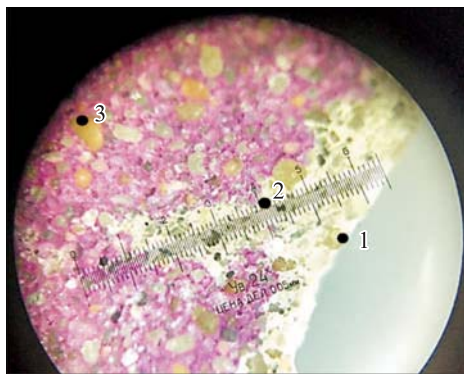


Рис. 4. Микрофотография (увеличение в 24 раза) участка поверхности скола образца, подвергавшегося в течение 28 сут воздействию углекислого газа
 1 – точка на поверхности образца; 2 – точка на границе зоны карбонизации в 2 мм от поверхности; 3 – точка в зоне, не тронутой карбонизацией, в 6 мм от поверхности

Результаты исследований показывают, что в глубине образца, не тронутой карбонизацией (рис. 5, а), наблюдаются гидросиликаты кальция в виде волокнистых субмикрористаллов, надежно сшивающих минералы, образующие цементный камень, и обеспечивающих его монолитность и прочность [10].

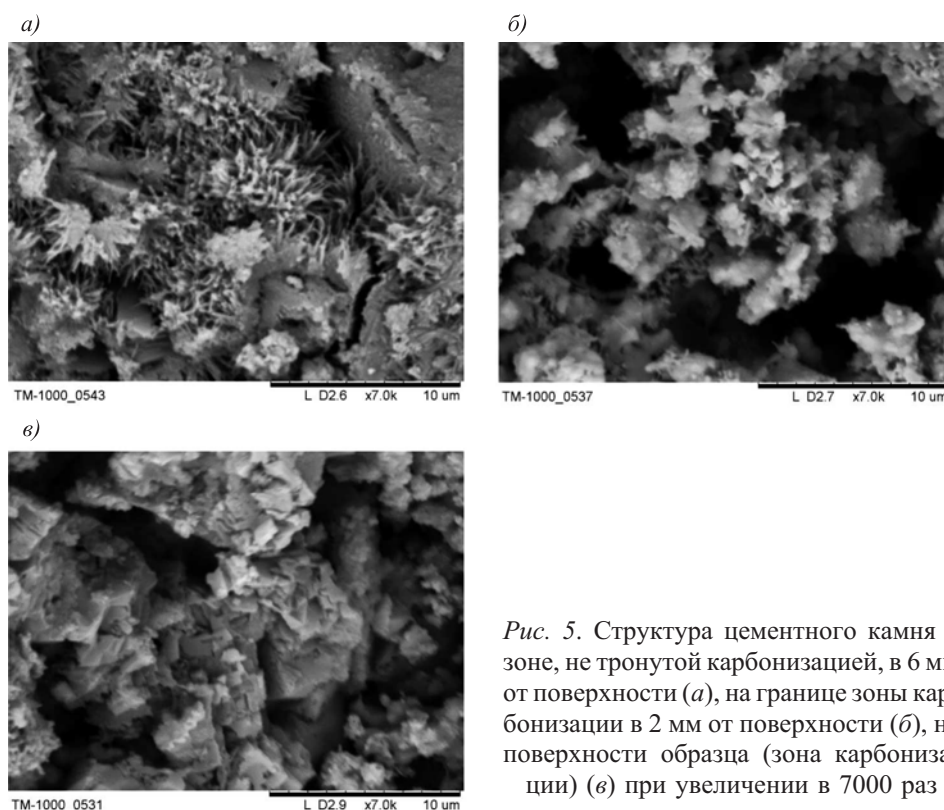


Рис. 5. Структура цементного камня в зоне, не тронутой карбонизацией, в 6 мм от поверхности (а), на границе зоны карбонизации в 2 мм от поверхности (б), на поверхности образца (зона карбонизации) (в) при увеличении в 7000 раз

Структура цементного камня в пограничной зоне (рис. 5, б) серьезно меняется. Повсюду видны результаты разрушительной работы углекислоты. Комковатые образования лишь местами сшиты волокнистыми субмикросталлами. Да и те уже серьезно пострадали. От плотной структуры цементного камня остались только очаги, частично обеспечивающие былую монолитность.

На поверхности образца (рис. 5, в), первой принявшей на себя удар углекислоты, нет и следов волокнистых кристаллов. Они разрушены полностью. Налицо только руины бывшей надежно сшитой структуры – рыхлые осадки продуктов коррозии, завалившие поры и входы в капилляры.

Экспериментальные исследования карбонизации бетона, включая микрофотографии образцов, показали, что под действием углекислоты поверхностный слой толщиной 4 мм и более претерпевает серьезные изменения. Волокнистые образования разрушаются, и карбонизированный объем представляет собой груду слабосвязанных рыхлых новообразований и пленок, перекрывающих входы в капиллярную систему бетона. Они не являются основой для сцепления «нового» и «старого» бетонов и препятствуют проникновению жидкости, содержащей продукты растворения цемента, из «нового» бетона в капилляры здоровой структуры «старого» для их надежного соединения.

Сцепление разогретого бетона с карбонизированными бетонными поверхностями. Исследования сцепления зрелого бетона с бетоном, форсированно разогретым при укладке, показывают его превышение против сцепления бетонов, твердеющих в нормальных условиях на 30–100 % [13, 14]. Также установлено, что механическая обработка поверхности «старого» бе-

тона благотворно влияет на сцепление и при наличии градиента температур увеличивает его на 33 % в сравнении с необработанной поверхностью [15].

Представляется разумным предположить, что форсированный электро-разогрев смеси, укладываемой на карбонизированную поверхность, создаст условия, при которых под действием разницы парциальных давлений влага с растворенными в ней продуктами гидратации цемента, в отличие от нормальных условий выдерживания, через капилляры проникнет сквозь пораженную карбонизацией прослойку в неповрежденные зоны. После отверждения цементные сростки прошьют карбонизированный слой бетона и надежно свяжут вновь формируемый бетон со здоровой частью «старого».

Для проверки выдвинутой гипотезы были проведены испытания миграции влаги и сцепления бетона, уложенного с форсированным разогревом смеси, с образцами, поверхность которых:

- подвергнута концентрированному воздействию CO_2 ;
- не тронута коррозией.

В каждом случае испытывались четыре образца, изготовленные из бетона В 22,5 (табл. 1) в форме куба с размерами 100×100×100 мм. Три для исследования сцепления и один – для исследования миграции влаги.

Для испытаний были изготовлены формы с двумя отсеками. Один для формирования базового кубика, которому по окончании стандартного твердения предстояло «состариться», другой – для укладки в него разогретой смеси «нового» бетона. Внутри форм, предназначенных для исследования сцепле-

Таблица 1. Состав бетона, принятого для исследований

Материалы	Расход материалов на 1 м ³ стандартного бетона В 20, кг
Вода техническая ГОСТ 17.1.1.04–80	324
Портландцемент М 400. ГОСТ 31108–2016	450
Песок кварцевый речной Мкр = 2.3. ГОСТ 22551–2019	1350
Объемная масса бетона, кг/м ³	2124



Рис. 6. Изготовление базовых образцов для испытания сцепления

а – формы для изготовления образцов с установленными анкерными болтами; б – забетонированные образцы

ния, с обеих сторон фиксировались металлические, строго отцентрированные анкерные болты М8 с крестообразной анкеровкой на конце из стальной проволоки диаметром 6 мм. Анкеровка предусматривалась для лучшей совместной работы анкерного болта с бетоном при испытании на разрыв. Анкерный болт выступал за внешнюю грань образца, для крепления в разрывной машине, на 30 мм (рис. 6).

Изготовленные образцы выдерживались в нормальных условиях 28 сут. После приобретения проектной прочности четыре образца для чистоты эксперимента хранились изолированно от воздействия окружающего воздуха. Четыре других на 28 сут помещались в герметичный контейнер установки (рис. 7), где выдерживались под давлением углекислого газа в 0,2 МПа.

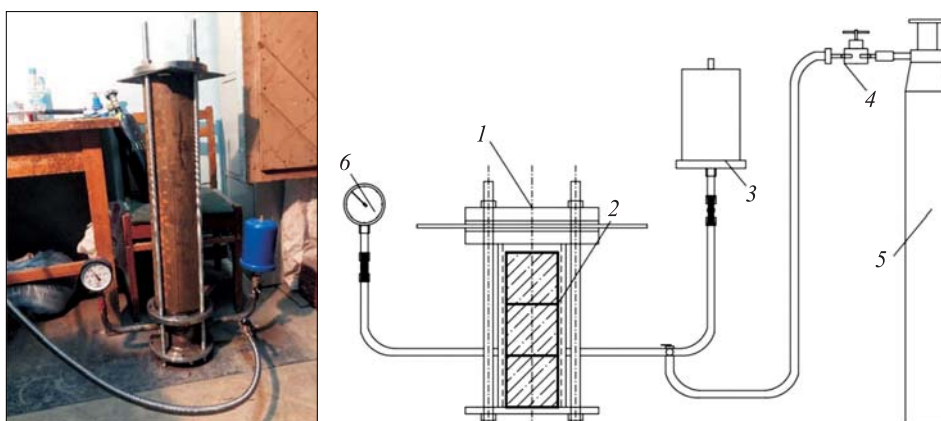


Рис. 7. Установка для испытаний бетона в среде углекислого газа
1 – герметичный контейнер; 2 – образцы из бетона; 3 – ресивер; 4 – углекислотный редуктор с манометрами; 5 – баллон с CO₂; 6 – манометр

Спустя 28 сут, все образцы на 72 ч помещались в климатическую камеру с температурой -20°C . По окончании выдерживания, формы извлекались из холодильника. В отсек, соседний с охлажденным кубиком, укладывалась бетонная смесь, предварительно разогретая до $+80^{\circ}\text{C}$ (рис. 8).

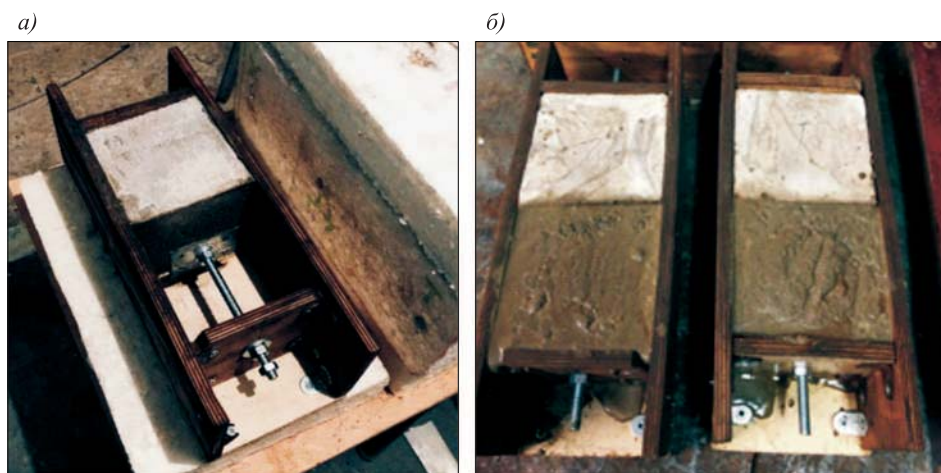


Рис. 8. Процесс укладки разогретой смеси в формы с замороженными кубиками
а – подготовленная форма; б – формы после укладки разогретой смеси

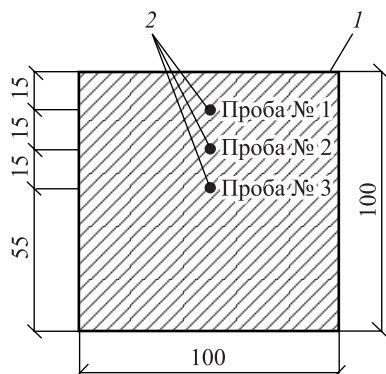


Рис. 9. Схема расположения проб зрелого бетона для рентгеноструктурного анализа

1 – поверхность контакта охлажденного образца с разогретой бетонной смесью; 2 – пробы цементного камня на содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Это делалось для создания перепада температур в 100° и градиента температур в момент укладки $80\text{--}100^\circ\text{C}/\text{см}$, которые формируют значительную разницу парциального давления и инициируют интенсивный поток массы из зоны высоких температур (разогретая бетонная смесь) в зону низких (охлажденный бетонный кубик). При этом в четырех образцах путь потоку преграждал карбонизированный слой, а в четырех других его не было.

Затем образцы, предназначенные для исследования миграции влаги, извлекали из форм, раскалывали по плоскости, перпендикулярной плоскости контакта, и брали по три пробы цементного камня (рис. 9) у каждого образца. Пробы немедленно отправлялись на рентгеноструктурный анализ, который

выполнялся на приборе Bruker D8 ADVANCE, оснащенный программой SEARCH, позволяющим выбрать те фазы рентгенограммы, в которых имеют место отклики на гидроксид кальция – промежуточную фазу гидратации цемента, существующую самостоятельно только в твердеющем цементном камне [10]. В зрелом цементном камне $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не обнаруживается.

На рентгенограмме проб, взятых у образца, выдерживавшегося в среде углекислого газа (рис. 10, а), проба № 1 показала дифракционный максимум, т.е. наличие гидроксида кальция. В пробах № 2 и 3 отклика на $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не обнаружено. Значит, новообразования из «нового» бетона проникли в «старый» только на глубину 15 мм.

Все пробы рентгенограммы образца, выдерживавшегося изолированно, пиковыми скачками интенсивности подтвердили наличие гидроксида кальция (рис. 10, б) на глубине 45 мм и возможно глубже.

Результаты эксперимента показали, что в образцах с карбонизированной поверхностью, под действием температурного градиента в $80\text{--}100^\circ\text{C}/\text{см}$, новообразования просочились в глубь «старого» бетона только на 15 мм от плоскости контакта. Некорродированная поверхность под действием температурного градиента пропустила по своей капиллярной системе влагу с продуктами растворения цемента на глубину более 45 мм. Можно смело утверждать, что карбонизированная поверхность резко тормозит проникновение влаги в толщу зрелого бетона и тем самым снижает сцепление «старого» бетона с «новым».

Образцы, предназначенные для исследования сцепления, отправлялись на 28-суточное стандартное выдерживание во влажной среде при температуре $+20^\circ\text{C}$.

Спустя 28 сут, образцы извлекались из камеры нормального твердения и в соответствии с требованиями ГОСТ 10180–2012 «Методы определения прочности по контрольным образцам» испытывались на растяжение. Анкерные болты образцов закреплялись в захваты разрывной машины МИ40КУ и нагружались до разрушения при постоянной скорости нарастания нагрузки $0,05\text{ МПа}/\text{с}$ (рис. 11).

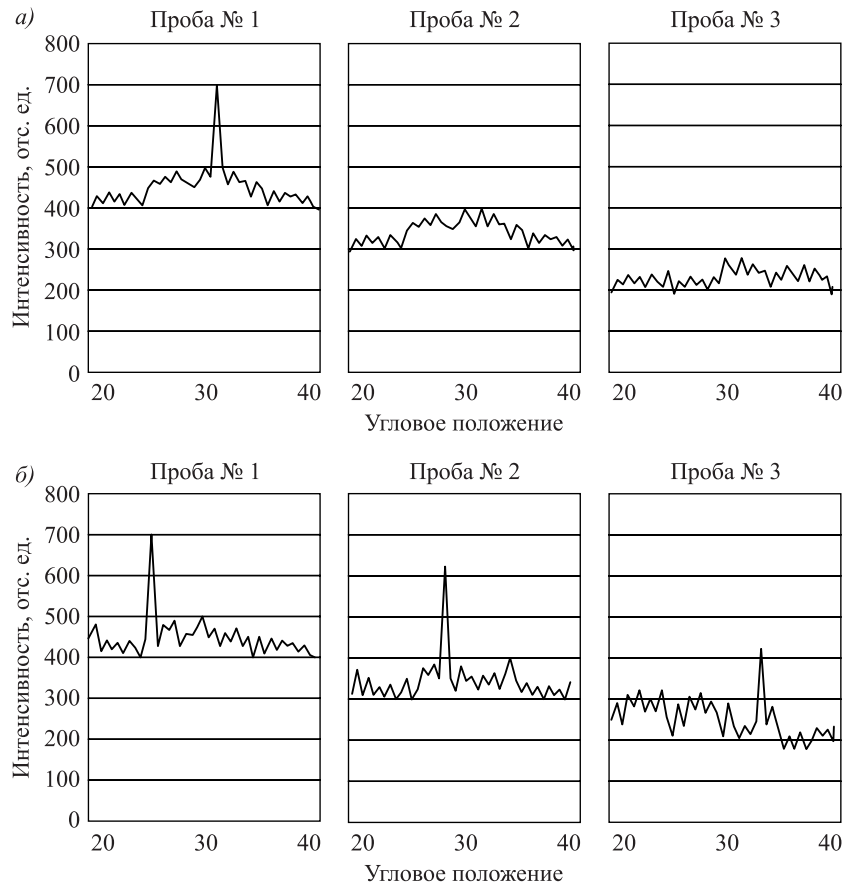


Рис. 10. Рентгенограммы, фиксирующие наличие $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в пробах, взятых у образцов, выдерживавшихся в среде углекислого газа (а) и изолированно (б)

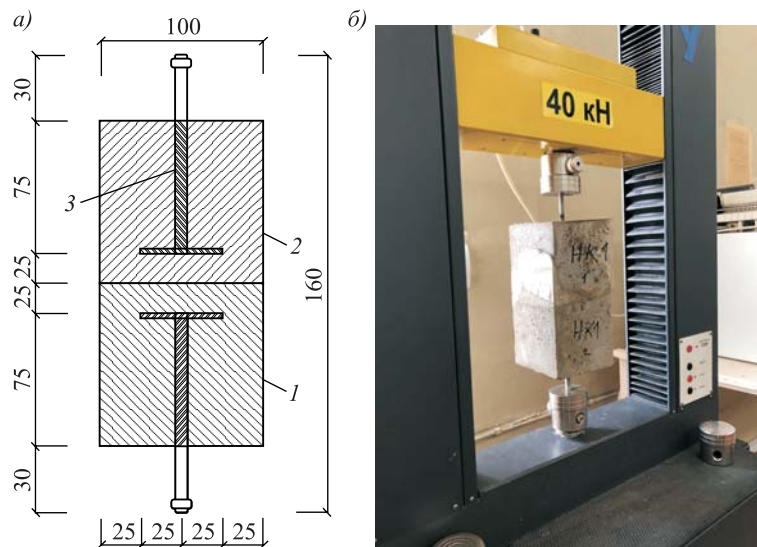


Рис. 11. Испытание образцов на растяжение
 а – схема образца, подготовленного к испытанию; б – общий вид образца в разрывной машине
 1 – зрелый бетон, 2 – свежий бетон, 3 – анкер

Т а б л и ц а 2. Результаты испытания образцов на осевое растяжение

№ образца	Маркировка	Максимальное усилие, кН	Линейная деформация, мм
1	Образцы, выдержанные в среде углекислого газа		
1.1	КК1	1,1	1,12
1.2	КК2	1,05	1,1
1.3	КК3	2,1	2,12
Средний показатель		1,44	1,66
2	Образцы, выдержанные в герметичной среде		
2.1	НК1	3,2	2,78
2.2	НК2	1,6	1,72
2.3	НК3	2,64	2,45
Средний показатель		2,44	2,32

Результаты испытания образцов на осевое растяжение фиксировались персональным компьютером (табл. 2). Программное обеспечение К40 позволяет одновременно с испытаниями строить график зависимости линейных деформаций от усилия растяжения (рис. 12). Для полноты картины график «линейная деформация – усилие» для образцов, изготовленных с форсированным разогревом смеси, дополнен ранее полученным [7] графиком «линейная деформация – усилие» для образцов, приготовленных в нормальных условиях без термообработки.

Визуальный осмотр поверхностей контакта образцов после разрушения показал (рис. 13), что разрыв во всех случаях происходит по плоскости контакта. На поверхности образцов «старого» бетона, не подвергавшихся дли-

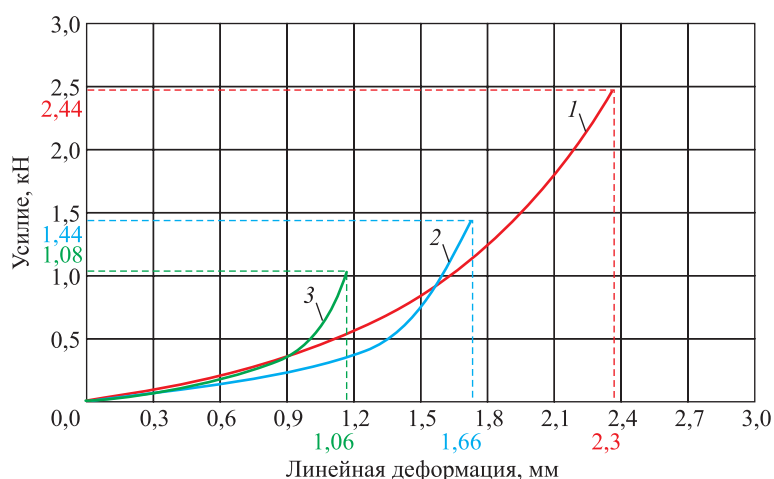


Рис. 12. График зависимости линейных деформаций от усилия растяжения

1 – образцы, подвергшиеся термообработке и твердевшие без воздействия углекислого газа; 2 – образцы, подвергшиеся термообработке и твердевшие под воздействием углекислого газа; 3 – образцы, изготовленные и твердевшие в нормальных условиях [7]

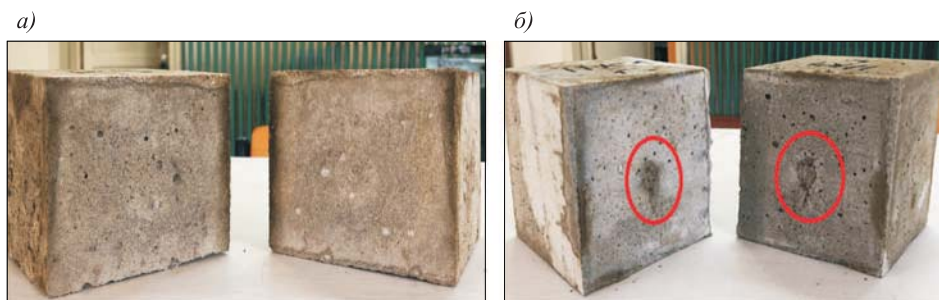


Рис. 13. Внешний вид поверхностей образцов до бетонирования, выдержанных под воздействием углекислого газа (а) и без его воздействия (б) (красным обозначены ореолы разрушения поверхности бетона)

тельному воздействию углекислого газа, наблюдаются каверны площадью 15–20 см², глубиной до 2,0 мм. На ответной стороне «нового» бетона видны выступающие за плоскость контакта конусообразные наросты – бетонные призмы, вырванные из «старого» бетона. Поверхности разрыва образцов, длительное время подвергавшихся кислотной агрессии, ярко выраженных следов взаимопроникновения не имеют.

Обобщая результаты эксперимента, можно констатировать факт существенного, в 2,26 раза или на 126 %, роста силы сцепления «старого» и «нового» бетона в случае форсированного разогрева смеси при ее укладке на замороженный образец против сцепления, возникающего при укладке бетонной смеси с температурой 20 °С на образец с той же температурой. Форсированный разогрев смеси, уложенной на охлажденный образец, выдержанный ранее в среде углекислого газа и имеющий на поверхности карбонизированный слой, дал превышение силы сцепления против образцов, твердевших в нормальных условиях, в 1,33 раза или на 33 %.

Изложенные факты подтверждают сделанное ранее предположение о том, что форсированный разогрев смеси при укладке создает разницу парциальных давлений, вызывающих мощный поток цементного молока, который пробивается через слой продуктов коррозии, достигает неповрежденных карбонизацией здоровых слоев бетона и создает новую структуру, сшивающую «старый» и «новый» бетоны, обеспечивая увеличение сцепления.

С целью подтвердить или опровергнуть предложенное объяснение в ИХТТМ СО РАН были проведены дополнительные исследования структуры цементного камня вблизи поверхности образца, подвергнутого ранее длительной обработке углекислым газом. Проведенные ранее исследования показали полное разрушение и отсутствие в этой зоне волокнистых субмикрористаллов гидросиликата кальция (см. рис. 5, б, в).

После укладки горячей бетонной смеси на охлажденный, карбонизированный образец 28-суточного выдерживания и проведения испытания на растяжение, куб «старого» бетона раскалывался и в плоскости скола исследовался электронным сканирующим микроскопом ТМ-1000 на глубине 1,0 мм от поверхности. Снимки, сделанные с увеличением в 7000 раз (рис. 14), позволили разглядеть среди рыхлых осадков, являющихся результатом коррозии цементного камня, наличие типичных игольчатых образований, явно не под-

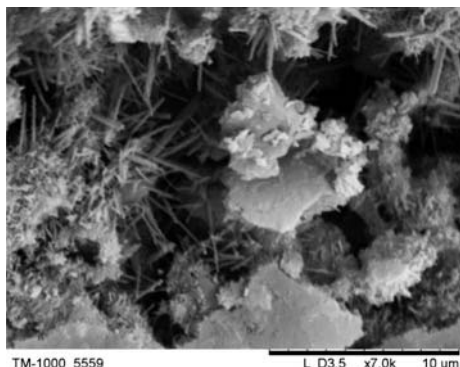


Рис. 14. Структура цементного камня в карбонизированной зоне в 1 мм от поверхности с волокнистыми новообразованиями в левой части снимка при увеличении в 7000 раз

тур «старого» бетона и тем самым создали основу для гарантированного увеличения сцепления.

После сканирования образца микроскопом, фрагмент контактной поверхности и плоскость раскола, перпендикулярную плоскости контакта, обработали раствором фенолфталеина. Ожидалось, что на этих плоскостях в пораженной коррозией неокрасившейся зоне могут появиться малиновые маркеры щелочной среды, обозначающие появление в кислой среде цементных новообразований. Однако в обеих плоскостях фенолфталеиновая проба дала практически сплошную малиновую окраску (рис. 15), свидетельствующую о массовом присутствии здесь, в ранее карбонизированном слое бетона, новообразований, прошивших ее насквозь и обеспечивших увеличение сцепления.

Таким образом, можно считать установленным, что форсированный разогрев бетонной смеси при укладке ее на охлажденное бетонное основание вызывает в начальный период выдерживания температурный градиент в пределах 80–100 °С/см с последующим постепенным снижением. Возникающая разница парциального давления формирует мощный поток влаги с содержащимися в ней продуктами растворения цемента через разрушенный коррозией слой зрелый бетон на глубину до 15,0 мм. Отверждаясь среди рыхлых осадков и пленок, появившихся после разрушительной работы углекислоты, игольчатые гидросиликаты кальция создают новую, работоспособную структуру, объединяющую «старый» и «новый» бетоны. Она позволяет не только обеспечить надежное соединение, но и на 33 % увеличить сцепление против сцепления бетонов, формирующихся в нормальных условиях.

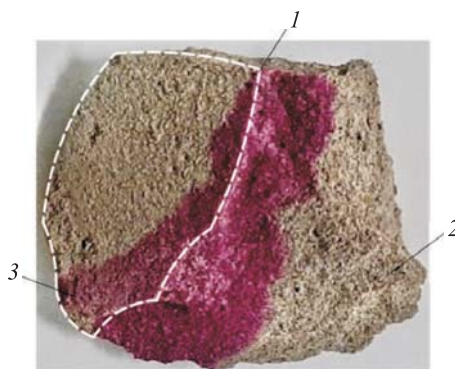


Рис. 15. Фенолфталеиновая проба «старого» ранее карбонизированного бетона в контактной зоне

1 – контактная зона; 2 – старый бетон; 3 – элементы проникновения в новый бетон

Заключение. 1. Опыт восстановления работоспособности строительных конструкций, долгое время эксплуатировавшихся в агрессивной среде, выявил проблему низкого сцепления «старого» и «нового» бетона или его отсутствие.

2. Исследования карбонизации бетона показали, что в поверхностном слое толщиной 4,0 мм и более, под действием углекислоты, волокнистая структура цементного камня, отвечающая за его прочность и долговечность, разрушается. Связи между минералами, слагающими цементный камень, практически отсутствуют. Поверхностный слой не является надежной основой для сцепления «нового» и «старого» бетонов. Он препятствует проникновению через него новообразований для соединения с неповрежденной структурой «старого» бетона.

3. Установлено, что форсированный разогрев бетонной смеси при укладке ее на охлажденное бетонное основание, в силу возникающего градиента температур в 80–100 °С/см и разницы парциального давления, вызывает мощный поток влаги с содержащимися в ней продуктами растворения цемента на глубину 15,0 мм. После отверждения продуктов растворения, в толще карбонизированного слоя формируется новая кристаллическая структура, создающая качественное соединение «нового» и «старого» бетонов и обеспечивающая надежное сцепление, на 33 % выше, чем при их твердении в нормальных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеева Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
2. Backus J., Mersolin D., Basheer M. et al. Exposure of mortars to cyclic chloride ingress and carbonation // *Advances in Cement Research*. 2013. February.
3. Леонович С.Н. и др. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: Моногр.: В 2 ч. Ч. 2. Минск: БНТУ, 2016. 204 с.
4. Шалый Е.Е., Ким Л.В., Леонович С.Н., Степанова А.В. Вероятностный расчет глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 106–113.
5. Шалый Е.Е. Анализ деградации бетона сооружений на острове Сахалин // *Вестник ИШ ДВФУ*. 2018. № 1. С. 65–76.
6. Philip N. Perkins concrete structures: repair, waterproofing and protection // *Applied science publishers LTD, London*, 1976. 256 p.
7. Молодин В.В., Иванов Д.А. Сцепление зрелого и твердеющего бетона, уложенного с термообработкой, в зимних условиях // *Изв. вузов. Строительство*. 2019. № 4. С. 82–93.
8. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. М.: Стройиздат, 1976. 208 с.
9. Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 36 с.
10. Мчедлов-Петросян О.П. Химия неорганических строительных материалов. М.: Стройиздат, 1971. 224 с.
11. Овчинников И.И., Мигунов В.Н., Овчинников И.Г. Моделирование кинетики деформирования армированных конструкций в специальных эксплуатационных средах: Моногр. Пенза: ПГУАС, 2014. 280 с.

12. А.с. № 388227 (СССР). Установка для определения кинетики карбонизации бетона / Н.К. Розенталь, П.В. Язев. Оpubл. в Б.И. 1973. № 28.
13. У т е н к о в В.Ф., В л а с о в а М.А. Заделка стыков сборных железобетонных конструкций в зимних условиях. М.: Госстройиздат, 1958. 62 с.
14. М о л о д и н В.В. Замоноличивание стыков сборных железобетонных конструкций в зимних условиях с термообработкой смеси в процессе укладки: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: НИСИ, 1984. 251 с.
15. М о л о д и н В.В. Механизм сцепления твердеющего бетона с мерзлым бетонным основанием // Труды НГАСУ. 2020. № 1.

Молодин Владимир Викторович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: molodin@sibstrin.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
Ануфриева Александра Евгеньевна, студ.; E-mail: anufrieva_ae@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
Навоян Армен Хачатурович, студ.; E-mail: navoyan_armen@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 15.01.2020

Molodin Vladimir Viktorovich, DSc, Professor; E-mail: molodin@sibstrin.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Anufrieva Alexandra Evgenievna, Student; E-mail: anufrieva_ae@mail.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Navoyan Armen Khachaturovich, Student; E-mail: navoyan_armen@mail.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

FORCED HEATING OF THE MIXTURE AS AN INCREASING FACTOR OF CONCRETE COUPLING AFTER CORROSION

Concretes, subjected to prolonged exposure to an aggressive environment, are characterized by a decrease in adhesion to newly concrete or its absence. The reason is fibrous crystals destruction that forms the structure of cement stone and complicate diffusion processes with traditional laying methods. It was found that forced heating of the mixture, laying it on a cooled carbonized surface, initiates and enhances the flow of moisture with the cement dissolution products from the "new" concrete to the "old" and pushes it through the layer damaged by corrosion. As a result, a strong structure is formed and the newly laid and undamaged layers of carbonized concrete are combined, ensuring their reliable adhesion.

Key words: concrete, adhesion, corrosion, carbonization, cement stone, concrete mixture, heating, temperature gradients, difference in partial pressure.

REFERENCES

1. М о с к в и н В.М., И в а н о в Ф.М., А л е к с е е в С.Н., Г у з е е в а Е.А. Коррозија бетона и железобетона, metody ikh zashchity [Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods for their protection]. Moscow, Stroyizdat, 1980. 536 p. (in Russian)
2. B a c k u s J., М с р о л и н D., B a s h e e r M. et al. Exposure of mortars to cyclic chloride ingress and carbonation. *Advances in Cement Research*. 2013. February.
3. L e o n o v i c h S.N. and others. Prochnost', treshchinostoykost' i dolgovechnost' konstruktsionnogo betona pri temperaturnykh i korrozionnykh vozdeystviyakh [Strength, crack resistance and durability of structural concrete at temperature and corrosion influences]. Minsk, BNTU, 2016. 204 p. (in Russian)

4. Shalyu E.E., Kim L.V., Leonovich S.N., Stepanova A.V. Veroyatnostnyy raschet glubiny i rasprostraneniya fronta karbonizatsii v betone gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [A probabilistic calculation of the depth and spread of the carbonization front in concrete of hydraulic structures]. Nauka i tekhnika [Science and Technology]. 2018. Vol. 17, No. 2. Pp. 106–113. (in Russian)
5. Shalyu E.E. Analiz degradatsii betona sooruzheniy na ostrove Sakhalin [Analysis of the degradation of concrete structures on the island of Sakhalin]. Vestnik ISH DVFU [Vestnik ISH FEFU]. 2018. No.1. Pp. 65–76. (in Russian)
6. Philip H. Perkins concrete structures: repair, waterproofing and protection. Applied science publishers LTD, London, 1976. 256 p.
7. Molodin V.V., Ivanov D.A. Stsepleniye zrelogo i tverdeyushchego betona, ulozhennogo s termoobrabotkoy, v zimnikh usloviyakh [Grip of mature fresh concrete with heat treatment in winter conditions]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2019. No. 4. Pp. 82–93. (in Russian)
8. Alekseev S.N., Rosenthal N.K. Korroziionnaya stoykost' zhelezobetonnykh konstruksiy v agressivnoy promyshlennoy srede [Corrosion resistance of reinforced concrete structures in an aggressive industrial environment]. Moscow, Stroyizdat, 1976. 208 p. (in Russian)
9. Rosenthal N.K. Korroziionnaya stoykost' tsementnykh betonov nizkoy i osobo nizkoy pronitsayemosti: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Corrosion resistance of cement concretes of low and especially low permeability. Extended abstract of candidate's thesis]. Moscow, 2005. 36 p. (in Russian)
10. Mchedlov-Petrosyan O.P. Khimiya neorganicheskikh stroitel'nykh materialov [Chemistry of inorganic building materials]. Moscow, Stroyizdat, 1971. 224 p. (in Russian)
11. Ovchinnikov I.I., Migunov V.N., Ovchinnikov I.G. Modelirovaniye kinetiki deformirovaniya armirovannykh konstruksiy v spetsial'nykh ekspluatatsionnykh sredakh [Modeling the kinetics of deformation of reinforced structures in special operating environments]. Penza, PGUAS, 2014. 280 p. (in Russian)
12. A.S. No. 388227 (USSR). Ustanovka dlya opredeleniya kinetiki karbonizatsii betona [Installation for determining the kinetics of concrete carbonization]. N.K. Rozental, P.V. Yazev. Publ. in B.I. 1973. No. 28. (in Russian)
13. Utenkov V.F., Vlasova M.A. Zadelka stykov sbornykh zhelezobetonnykh konstruksiy v zimnikh usloviyakh [Sealing joints of prefabricated reinforced concrete structures in winter conditions]. Moscow, 1958. 62 p. (in Russian)
14. Molodin V.V. Zamonolichivanie stykov sbornykh zhelezobetonnykh konstruksiy v zimnikh usloviyakh s termoobrabotkoy smesi v protsesse ukladki: Dis. ... kand. tekhn. nauk [Monolithic joints of prefabricated reinforced concrete structures in winter conditions with heat treatment of the mixture during installation: Candidate, thesis]. Novosibirsk: NISI, 1984. 251 p. (in Russian)
15. Molodin V.V. Mekhanizm stsepleniya tverdeyushchego betona s merzlym betonnyy osnovaniem [Mechanism of adhesion of hardening concrete with frozen concrete foundation]. Trudy NGASU [Transactions of NGASU]. 2020. No. 1. (in Russian)