Научно-теоретические и практические аспекты воздействия агрессивных сред на железобетонные конструкции транспортных сооружений

Тарасеева Нелли Ивановна
кандидат технических наук, доцент кафедры «Геотехника и дорожное строительство», Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, gds@pguas.ru,

Раткин Василий Викторович
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры «Транспортное строительство», Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., tst@sstu.ru,

Цирулев Игорь Викторович
аспирант кафедры «Транспортное строительство», tst@sstu.ru,

Туманян Виталий Карникович
аспирант кафедры «Транспортное строительство», tst@sstu.ru

Выполнен всесторонний анализ базовых теоретических понятий и практических результатов влияния агрессивных факторов эксплуатации как природных, так и техногенных на железобетонные транспортные сооружения на автомобильных дорогах. Изучена электрохимическая природа коррозии стальных элементов и конструкций моста, анодное окисление и катодное восстановление на поверхности арматурных элементов как этапы формирования новообразований гидратированных окислов железа – ржавчины. Приведены данные о процессе карбонизации бетона на основе лабораторно-практических испытаний и натурных исследований поведения образцов бетона в различных агрессивных средах. Выявлено влияние химических компонентов окружающей среды (газов, кислот, растворов солей), температурно-влажностного режима на изменение плотности бетона и, как результат, ухудшение прочностных показателей несущих конструкций. Показано, что комплексная оценка процессов и явлений карбонизации, развития ее параметров во времени имеет важное значение для прогнозирования изменения технического состояния транспортных сооружений с момента изготовления и в течение срока эксплуатации.

Ключевые слова: автомобильные дороги, транспортные сооружения, железобетон, арматура, агрессивная среда, коррозия, карбонизация, прочность.

Введение

С момента появления и по настоящее время железобетон является широко распространенным материалом в промышленно-гражданских и транспортных сооружениях. Предполагалось, что найден тот самый материал, сроки службы которого, будут измеряться столетиями, однако, первые десятилетия показали вероятность разрушения данного конструкционного материала под воздействиями окружающих агрессивных сред уже в первые десятилетия.

Транспортные сооружения – важнейшие элементы авто- и железнодорожной инфраструктуры, обеспечивающие беспрерывное перемещение по пересеченной местности. К категории инженерных сооружений, которые оказывают влияние на экономику государства, безопасность и комфорт населения, относят, в первую очередь, автомобильные, железнодорожные, пешеходные и совмещенные мосты. Большое количество типовых проектов, доказывает массовое распространение железобетона, но внушительный срок службы в совокупности с растущими нагрузками, влияние агрессивных сред создают риск деформаций, преждевременного износа, аварий и крушений мостов и путепроводов.

Задачу данной работы определила необходимость исследовать процессы взаимодействия основных элементов с агрессивными средами, поскольку опыт наблюдения за дефектами и изменениями в железобетонных конструкциях показывает существенное влияние физических и химических факторов воздействий на возникновение коррозии различных видов.

1. Электрохимическая природа коррозии

Процесс коррозии стальных элементов и конструкций в подавляющем большинстве имеет электрохимический механизм, действие которого происходит в присутствии влаги на поверхности стальных элементов с образованием анодных и катодных участков: при этом на первых осуществляется растворение металла (анодное окисление), ионизация атомов, переходящих в виде гидратированных анионов в раствор. Образовавшиеся свободные электроны остаются в кристаллической решетке металла, перемещаются к катодным участкам его поверхности, где протекает ассимиляция либо атомами растворенного кислорода, либо ионами водорода (катодное восстановление). Электрическая цепь замыкается через раствор электролита, в котором происходит перемещение гидратированных ионов.

Установлено, что продукты коррозии являются результатом вторичных процессов взаимодействия гидратированных ионов с кислородом. При этом наблюдаются следующие зависимости: хорошо растворимы, могут переноситься от места их образования; труднорастворимые, какими являются, как правило, продукты коррозии стали, откладываются на поверхности, образуя более или менее четко выраженный растущий слой ржавчины, состоящий из оксидов и гидроксидов железа.

В [1] указаны необходимые условия для протекания процесса электрохимической коррозии:

наличие активных участков поверхности металла, способных к анодному растворению, т.е. переходу атомов в растворимые ионы по реакции:

$$Fe^{2+} + 2e \leftarrow Fe \quad (1)$$

наличие веществ, необходимых для протекания катодной реакции, например, с восстановлением кислорода:

$$O_2 + 4e + 2H_2O \rightarrow 4OH^- \quad (2)$$

наличие электролита, в котором может осуществляться движение ионов между анодом и катодом.

В качестве электролита выступают растворы солей, попадающие на конструкции моста в составе противоморозных смесей с проезжей части или из эксплуатируемой среды. Катодный и анодный процессы проявляются на разных участках железобетонных опор или пролетных строений, при этом в растворе происходит направленное перемещение ионов: электроны, избыточные у анодов, передвигаются в металле к катодам (рис. 1). Возникает электрический ток, называемый током коррозии. Продукты коррозии образуются в результате вторичных реакций в электролите:

$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 \quad (3)$$

$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3 \quad (4)$$

Очевидно, что повышенное увлажнения, к примеру, мостовое сооружение через водное препятствие, приводит к насыщению бетона солями и активации процессов карбонизации. Возможным способом уменьшения коррозии может выступить катодная защита, реализуемая при увеличении защитного слоя в месте расположения арматуры и максимально возможной плотности бетона.

2. Коррозия бетона и железобетона

На железобетонные конструкции мостовых сооружений оказывают негативное влияние следующие физические и химические воздействия: влага, температурные перепады, грунтовые воды, среды с содержанием агрессивных химических элементов. Установлено, что совокупность этих факторов

приводит к ухудшению состояния и разрушению основных конструкций от действия коррозии (рис. 2).

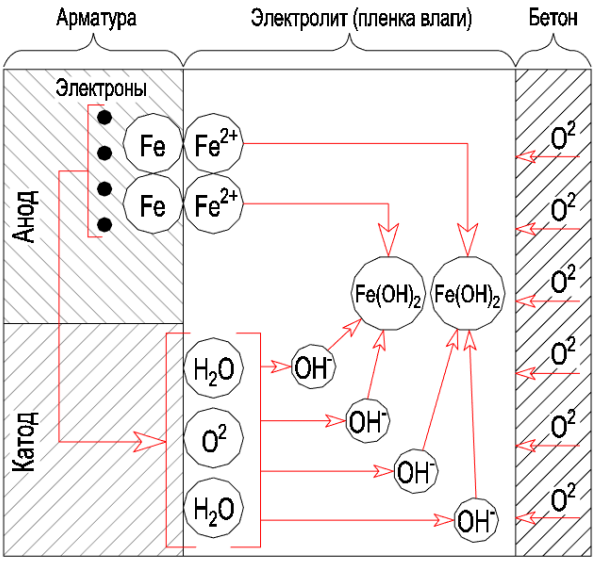


Рисунок 1 – Схема процесса коррозии в железобетоне



Рисунок 2 – Характерные дефекты и повреждения элементов моста:

а – разрушение защитного слоя и коррозия арматуры плиты сталежелезобетонного пролетного строения моста; б – то же, балок путепровода; в – то же, ригеля и тела опоры моста; г – разрушение конструкции перильного ограждения моста.

В [2] указана классификация коррозии бетона и железобетона в жидких средах:

- I вид – коррозия, связанная с воздействием водных сред с малым содержанием солей с преимущественно нейтральной реакцией (pH=6,8÷7,2);
- II вид – коррозия при воздействии весьма агрессивных сред, например, кислот, щелочей, некоторых солей, таких, как хлориды натрия или магния;
- III вид – коррозия, обусловленная проникновением в поры бетона жидких сред, содержащих компоненты, образующие с поровой жидкостью или цементным камнем нерастворимые кристаллические соединения.

Карбонизация бетона

Карбонизация бетона является основным видом коррозии в воздушных средах. Углекислый газ является наиболее распространенным из агрессивных: среднее содержание в атмосфере сельской местности составляет 0,03%, в промышленных районах и в воздухе заводских цехов его содержание может быть гораздо выше. Карбонизация приводит к изменению физико-химических характеристик цементного камня, структурным преобразованиям, уменьшению защитных свойств по отношению к арматуре, развитию разрушительных процессов различной степени интенсивности в металле конструкций и, как результат – снижение несущей способности железобетона [3].

Интерес и стимул для более глубоких исследований поведения бетона в агрессивной воздушной среде представляют уточненные в работе [4] результаты 25-летних измерений концентрации CO_2 в атмосфере на станции «Иссык-Куль», которые показывают увеличение средней месячной концентрации CO_2 с 341 до 382 млн$^{-1}$.

Пористая структура активно поглощает углекислоту, вследствие чего происходят реакции щелочных компонентов цементного камня с диоксидом углерода с образованием карбонатов. Процесс карбонизации протекает в три ступени: сначала диффундирует из воздуха CO_2, проникает через поверхность бетона в систему пор; далее углекислый газ превращается частично в угольную кислоту; последним шагом являются реакции CO_2 с щелочными компонентами цементного камня, растворенными в поровой влаге. Упрощенно карбонизацию гидроксида кальция можно представить в форме:

$$Ca(OH)_2 + C_2O + O_2 \xrightarrow{H_2O} CaCO_3 + H_2O \quad (5)$$

Все исследования изменения свойств бетона во времени базируются на основном уравнении, которое выведено авторами работы [1]:

$$x = A\sqrt{\tau} \quad (6)$$

где x – толщина нейтрализованного слоя по фенолфталеиновой пробе, см;

τ – время службы конструкции, с;

A – коэффициент, определяемый по формуле:

$$A = \sqrt{\frac{2D'C}{m_0}} \quad (7)$$

где D' – эффективный коэффициент диффузии CO_2, см^2/с;

C – концентрация CO_2 в атмосфере в относительных единицах по объему;

m_0 – реакционная емкость бетона, см^3.

В работе [5] приводится анализ исследований на предварительно напряженных балках с размерами 10х10х150см, армированных высокопрочной сталью использованы 6 видов цемента с расходом 300 кг/м^3 и В/Ц=0,56÷0,65; толщина защитного слоя 5, 10, 15 и 20 мм. Для оценки влияния кислых газов воздушной среды балки установили в 5 различных местах:

а) в центре промышленного города;

б) в районе металлургического завода (Рур);

в) на берегу Северного моря;

г) в помещении с высокой влажностью воздуха и содержанием углекислого газа от 5 до 30%;

д) контрольные образцы – в лабораторном помещении при относительной влажности воздуха 65% и температуре 20°С.

Глубину карбонизации оценивали после 4х лет хранения в агрессивной среде (табл. 1).

Таблица 1
Глубина карбонизации бетона

Тип цемента	Глубина карбонизации, мм				
	Место расположения балок (см. выше)				
	а	*б*	*в*	*г*	*д*
Портландцемент PZ475	0-1	3-6	1	0-2	1-3
Портландцемент PZ375	0-1	4-6	1-5	3-6	2-3
Сульфатостойкий	2-4	2-5	3-6	3-8	3-6
Шлакопортландцемент EPZ	1-3	4-7	6-10	4-7	3-6
Шлакопортландцемент (50% шлака)	2-4	7-12	6-10	8-11	8-10
Шлакопортландцемент (80% шлака)	2-5	5-8	7-10	12-18	9-12

Из таблицы следует, что:

- карбонизация идет наиболее быстро в сухом помещении; во влажном, несмотря на повышенное содержание CO_2, ее значения не превышают полученные в сухой комнате при нормальном содержании углекислого газа;
- независимо от условий наименьшая глубина карбонизации образцов на портландцементе средняя – у бетона на сульфатостойком и шлакопортландцементах, наибольшая – на шлакопортландцементе с содержанием шлака 50 и 80%.

Сделаны выводы

•коррозия арматуры начинается, как только зона карбонизации распространится до поверхности арматуры;

•поверхность металлических стержней со стороны защитного слоя обычно поражена сильнее, чем противоположная;

•даже там, где карбонизация отсутствовала или была незначительной, защитный слой толщиной 5-7 мм недостаточен, поскольку возникают локальные очаги поражения со значительными потерями металла в местах, где имеются сквозные капиллярные поры от поверхности бетона до стали;

•от начальных очагов (поры или места глубокой карбонизации) коррозия распространяется как в глубь арматуры, так и по ее поверхности, а именно: первое наблюдается в медленно карбонизирующем бетоне (особенно у капиллярных пор) и при агрессивных условиях, второе – в быстро карбонизирующем бетоне.

Воздействие различных агрессивных сред на железобетон

В процессе эксплуатации конструктивных элементов моста арматура относительно долгое время находится под защитой слоя бетона. Со временем частицы агрессивной среды мигрируют к поверхности металлических стержней через структурные дефекты (поры и микротрещины), образующиеся при разрушении конструктивных элементов [1]. При взаимодействии со средами, содержащими хлорид-ионы, образуется растворимый хлорид кальция:

$$Ca(OH)_2 + 2HCl \rightarrow CaCl_3 + H_2O \quad (8)$$

Как известно, добавка хлорида кальция в количестве, соответствующем нормативным требованиям, позволяет улучшать противоморозные свойства, однако длительное воздействие агрессивной среды с образованием подобных солей увеличивает осадку бетона, уменьшает прочность на изгиб, в том числе, за счет образования коррозии арматуры.

В атмосфере городов и многих промышленных предприятий широко распространен и содержится в значительном количестве сернистый газ. Принципиально его действие на бетон не отличается от действия CO_2; продуктом реакции является обычно двуводный гипс:

$$Ca(OH)_2 + SO_2 + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \rightarrow CaSO_4 + 2H_2O \quad (9)$$

В исследовании [7] проверялось действие различных газовых сред на призматические образцы армированных бетонов различной плотности сечением 5x5x15 см. Бетон готовился на речном песке и известняковом щебне с расходом портландцемента 250, 300 и 500 кг/м^3, водоцементное отношение составило 0,736, 0,55 и 0,38 соответственно. Толщина защитного слоя 15 мм.

После трехмесячного хранения в нормальных условиях образцы поместили в различные газовые среды:

воздушно-сухая (помещение лаборатории);

воздушно-влажная (относительная влажность 80% при температуре 30°С с повышенным содержанием углекислоты и кислорода);

то же, с переменной температурой (относительная влажность 100% при температуре от 20°С до 70°С);

то же, с содержанием хлористого водорода концентрации 10 мг/л (относительная влажность 36%)

то же, с содержанием хлористого водорода концентрации 100 мг/л (относительная влажность 21%);

то же, с содержанием сернистого газа концентрации 100 мг/л (влажность 100%)

то же, с содержанием сернистого газа концентрации 500 мг/л (относительная влажность 99,4%).

В процессе эксперимента концентрации агрессивных газов создавались в замкнутом объеме над раствором соответствующей летучей кислоты, который меняли один раз в месяц. Образцы периодически осматривали, проверяли глубину нейтрализации бетона путем пробы фенолфталеином на свежем изломе, оценивали состояние арматуры. Установлено, что карбонизация бетона идет тем быстрей, чем меньше его плотность. Также наиболее быстро данный процесс протекает при относительной влажности 80% (среда №2). В воздушных средах (№1–3) арматура не подверглась коррозии, за исключением среды №3, где поражение металлических стержней наблюдалось в образце с наименее плотным бетоном.

Установлено: газовая среда с хлористым водородом более агрессивна к бетону. Процесс разрушения композиционного материала идет неравномерно и тем быстрее, чем меньше его плотность. С величиной разрушения бетона и плотностью прямо связана степень коррозии арматуры (таблица 2).

Таблица 2
Состояние образцов после хранения в среде №5

Продолжительность хранения в месяцах	Расход цемента, кг/м^3	Состояние бетона	Площадь повреждения поверхности арматуры, %
10	250	Крошение	4
10	350		2
10	500		0
19	250	Полное разрушение	35
19	350	Разрушение на 13,5 мм	40
19	500	Разрушение на 11 мм	10

Процесс коррозии арматуры зависит от состояния *бетона* и активизируется с увеличением пористости *материала* и степени его повреждения (табл. 2). При повышении концентрации агрессивного газа значительно возрастает скорость разрушения: образцы, находящиеся в среде №5 полностью разрушились через 19 месяцев, в то время как в среде №4 – через 31месяц.

Действие SO_2 на бетон и арматуру значительно отличается от действия HCl: в течение первых 9 месяцев испытания идет непрерывное повышение динамического модуля упругости и только к 10-му месяцу наступает некоторое снижение. Как и в случае с хлористым водородом, увеличение концентрации SO_2 приводит к увеличению глубины диффузии газа и усилению коррозионного процесса, следует отметить, что при одинаковой концентрации HCl и SO_2 более агрессивное воздействие оказывает кислота.

Как показывает анализ вышеприведенного исследования, именно действие хлоридов на железобетон наиболее агрессивно, поэтому рассмотрим следующий опыт [7]. В качестве агрессивной среды был принят 1%-й раствор соляной кислоты HCl, показатель pH=0,56, концентрация ионов хлора 10,09 г/л; изготовлено 4 образца для оценки влияния разных видов окружающей среды:

•всестороннее воздействие раствора соляной кислоты;

•воздействие раствора соляной кислоты со стороны растянутой и сжатой зон сечения;

•воздействие раствора соляной кислоты только на сжатую часть сечения;

•нормальные температурно-влажностные условия.

Образцы в агрессивный раствор погружались полностью, концентрация соляной кислоты поддерживалась неизменной и постоянно контролировалась. Через 28 суток (затем через 180, 360, 540 и 720) проводилась оценка прочностных показателей.

Результаты испытаний бетонных кубов и призм показали, что при длительном воздействии жидкой хлоридсодержащей среды вследствие диффузии агрессивных реагентов происходит изменение свойств основного материала. Средние опытные значения для каждого временного этапа воздействия хлоридсодержащей среды приведены в табл. 3

Таблица 3
Изменение свойств бетона в 1%-ном растворе HCl

Среда	Время, суток	Кубиковая прочность бетона R, МПа	Призменная прочность бетона R_b, МПА	Модуль упругости бетона E_b, МПА	Глубина проникания хлоридов в бетон $L_{хл}$, см
Воздух	28	40,2	33,4	35500	0,00
1% раствор HCl	180	42,4	35,7	34100	0,90
	360	37,3	32,4	31900	1,40
	540	34,2	30,7	30600	1,85
	720	33,6	29,5	28200	2,30

Нами рассмотрено действие NaCl на 5 различных составов цементно-песчаных композитов при двух значениях подвижности растворной смеси (125–130 и 150–160 мм соответственно), определяемой расплывом на встряхивающемся столике [7]. После предварительного твердения в течение 28 суток во влажной среде образцы испытывали при следующих условиях: сначала их погружали на сутки одну серию в воду, вторую – в 10%-й раствор поваренной соли; затем вынимали из раствора и сушили в течение суток при температуре +40°С, обдувая воздухом. Периодически взвешивали, а после 100, 200 и 400 циклов попеременного увлажнения / высушивания (тепло-влажностной обработки (ТВО)) испытывали на прочность при сжатии и изгибе.

Таблица 4
Изменение прочности на сжатие образцов после ТВО (в течение одного года)

Состав раствора	Относительная прочность на сжатие, %, после … циклов ТВО			
	в воде, после		в 10% растворе NaCl, после	
	200	400	200	400
Средний состав	97,3	89,0	79,2	71,3
Состав на цементе «грубого помола»	-	-	-	73,5
Составы на цементах «тонкого помола»: среднее				
1:2	-	-	-	69
1:2,5	-	-	-	75
1:3	-	-	-	73
	-	-	-	63,1

По результатам испытаний установлено, что после 100 циклов ТВО прочность образцов практически не изменилась; после 200 и, особенно, 400 циклов, наблюдается значительное снижение показателей прочности. Полученные данные позволяют сделать вывод о влиянии агрессивных воздействий, в частности: многократное насыщение в растворах NaCl и высушивание образцов приводит к более интенсивному разрушению последних, чем такое же испытание в воде.

Снижение прочности цементного камня после 400 циклов увлажнения и высушивания достигает 30% (табл. 4).

Таким образом, на основе анализа научно-теоретических данных и результатов выполненных авторами натурных исследований [1…8], установлено существенное влияние хлоридной коррозии на механические и эксплуатационные свойства конструкционного материала транспортных сооружений.

Заключение

В данной статье проанализированы и изучены физические и механические основы явлений коррозии железобетонных элементов мостов.

Выполненные исследования лабораторно-экспериментальных образцов и опыта эксплуатации реальных сооружений позволили выполнить оценку физико-химических процессов и явлений взаимодействия окружающей / эксплуатационной среды на технологические характеристики железобетонных элементов.

Установлены зависимости прочностных характеристик от концентрации агрессивных элементов в воздухе атмосферы, изменения температуры и влажности, а также технологических характеристик бетона и арматуры, климатических и географических условий расположения сооружения.

Показана необходимость изучения процесса влияния агрессивных сред на железобетонные элементы транспортных сооружений с целью разработки пассивных и активных способов защиты и повышения долговечности транспортных сооружений на автомобильных дорогах.

Литература

1. Долговечность железобетона в агрессивных средах: Совм. Изд. СССР-ЧССР-ФРГ/ С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шиссль. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.: ил. – ISBN 5-274-00923-9
2. Овчинникова, Т. С. Коррозия и антикоррозионная защита железобетонных мостовых конструкций / Т. С. Овчинникова, А. Н. Маринин, И. Г. Овчинников // Интернет-журнал Науковедение. – 2014. – № 5(24). – С. 11. – EDN TKELFZ.
3. Васильев, А. А. Оценка карбонизации и развития ее параметров во времени по сечению бетонов для различных эксплуатационных условий / А. А. Васильев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2021. – № 8. – С. 43-52. – EDN KUXFDI.
4. Содержание углекислого газа в толще атмосферы центральной части Евразии (станция мониторинга "ИССЫК-КУЛЬ") / Ф. В. Кашин, В. Н. Арефьев, Н. Е. Каменоградский [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 43, № 4. – С. 521-530. – EDN IANKXZ.
5. Маринин А.Н. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций транспортных сооружений с учетом хлоридной коррозии и карбонизации: дис. канд. тех. наук: 05.11.23. - Вологорад, 2007. - 383 с.
6. Раткин В.В., Черных В.К., Тарасов А.А. Разрушительное действие хлоридсодержащей среды на примере обследования железобетонного моста в Новгородской области // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2015. № 1 (9); URL: trts.esrae.ru/15-62.
7. Тарасеева Н.И., Крылов А.С., Кузнецов Д.А. Физико-химические процессы и основы разрушения транспортных сооружений на автомобильных дорогах // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 2 (51). С. 82-88.

Scientific, theoretical and practical aspects of the impact of aggressive environments on reinforced concrete structures of transport structures

Taraseeva N.I., Ratkin V.V., Tsirulev I.V., Tumanyan V.K.

Penza State University of Architecture and Construction, Yuri Gagarin Saratov State Technical University

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

A comprehensive analysis of the basic theoretical concepts and practical results of the influence of aggressive operating factors, both natural and man-made, on reinforced concrete transport structures on highways has been carried out. The electrochemical nature of corrosion of steel elements and bridge structures, anodic oxidation and cathodic reduction on the surface of reinforcing elements as stages of the formation of new formations of hydrated iron oxides - rust - have been studied. Data are presented on the process of carbonization of concrete based on laboratory and practical tests and field studies of the behavior of concrete samples in various aggressive environments. The influence of chemical components of the environment (gases, acids, salt solutions), temperature and humidity conditions on changes in the density of concrete and, as a result, deterioration in the strength parameters of load-bearing structures has been revealed. It is shown that a comprehensive assessment of the processes and phenomena of carbonization, the development of its parameters over time is important for predicting changes in the technical condition of transport structures from the moment of manufacture and during their service life.

Keywords: highways, transport structures, reinforced concrete, reinforcement, aggressive environment, corrosion, carbonization, strength.

References

1. Durability of reinforced concrete in aggressive environments: Sovm. Ed. USSR-Czechoslovakia-Germany / S.N. Alekseev, F.M. Ivanov, S. Modry, P. Schiessl. – M.: Stroyizdat, 1990. – 320 p.: ill. – ISBN 5-274-00923-9
2. Ovchinnikova, T. S. Corrosion and anti-corrosion protection of reinforced concrete bridge structures / T. S. Ovchinnikova, A. N. Marinin, I. G. Ovchinnikov // Internet Journal of Science. – 2014. – No. 5(24). – P. 11. – EDN TKELFZ.
3. Vasiliev, A. A. Assessment of carbonization and the development of its parameters over time along the cross-section of concrete for various operating conditions / A. A. Vasiliev // Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Science. – 2021. – No. 8. – P. 43-52. – EDN KUXFDI.
4. Content of carbon dioxide in the atmosphere of the central part of Eurasia (monitoring station "ISSYK-KUL") / F. V. Kashin, V. N. Arefiev, N. E. Kamenogradsky [and others] // News of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean. – 2007. – T. 43, No. 4. – P. 521-530. – EDN IANKXZ
5. Marinin A.N. Forecasting the stress-strain state of reinforced concrete structures of transport structures, considering chloride corrosion and carbonation: dis. candidate of Technical Sciences: 05.11.23. - - Volgograd, 2007. - 383 p.
6. Ratkin V.V., Chernykh V.K., Tarasov A.A. Destructive effect of a chloride-containing environment on the example of an inspection of a reinforced concrete bridge in the Novgorod region // Technical regulation in transport construction. 2015. No. 1 (9); URL: trts.esrae.ru/15-62.
7. Taraseeva N.I., Krylov A.S., Kuznetsov D.A. Physico-chemical processes and fundamentals of destruction of transport structures on highways // Regional architecture and construction. 2022. No. 2 (51). pp. 82-88.