

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ СЕМИНАР

**ВОПРОСЫ ВНЕДРЕНИЯ НОРМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И
СТАНДАРТОВ ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

(г. Минск, БНТУ — 22–23.05.2013)

УДК 624.01/. 04

**О НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ НАЦИОНАЛЬНОГО
НОРМАТИВНОГО ДОКУМЕНТА ПО ОЦЕНКЕ
КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА**

ВАСИЛЬЕВ А.А.

Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь

Введение. Основную долю конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых в настоящее время, составляют железобетонные элементы (ЖБЭ) различных типов. Большинство ЖБЭ эксплуатируются в различных воздушных средах, их долговечность во многом определяется концентрацией и степенью агрессивности содержащихся в них компонентов. Поврежденность ЖБЭ в них определяют в основном физические и химические процессы (размораживание бетона, выщелачивание, карбонизация, сульфатная коррозия и др.), обусловливаемые агрессивностью эксплуатационной среды, а также коррозия стальной арматуры, являющаяся, в первую очередь, следствием снижения защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре под воздействием различных агрессивных факторов. Основным видом коррозии бетона в различных воздушных средах, способствующим развитию коррозии стальной арматуры различной степени интенсивности и определяющим, в целом, техническое состояние ЖБЭ, является карбонизация бетона. При

карбонизации бетона происходят структурные изменения цементного камня, вызывающие деградацию бетона и снижение его защитных свойств по отношению к стальной арматуре. Значительная толщина защитного слоя и щелочная среда самого бетона обеспечивают ему наличие защитных свойств по отношению к стальной арматуре сразу после изготовления бетона. Однако, в процессе эксплуатации химические свойства цементного камня бетона постоянно изменяются, приводя к постепенному снижению щелочности от поверхности вглубь конструкции. Таким образом, процесс коррозионного разрушения строительной конструкции начинается с ее поверхности. В первую очередь теряет свои эксплуатационные свойства бетон защитного слоя. Изменение его структуры происходит без видимых повреждений, коррозия арматуры начинается внутри бетона. Образующиеся продукты коррозии стали занимают в 2–2,5 раза больший объем, чем слой прокорродировавшего металла, и вызывают развитие растягивающих напряжений в бетоне, превышающих его прочность, в результате чего образуются трещины в защитном слое, ориентированные вдоль корродирующих стержней. Их образование облегчает доступ агрессивных агентов к стальной арматуре и ускоряет, как правило, ее коррозию. В дальнейшем, при отсутствии защитных и восстанавливающих мероприятий, развитие коррозии стальной арматуры приводит к отслаиванию и разрушению защитного слоя, нарушению сцепления арматуры с бетоном и падению несущей способности конструкции. Для изгибаемых элементов потеря несущей способности от нарушения сцепления стальной арматуры с бетоном составляет 30–35 % [1]. Последующее интенсивное коррозионное разрушение стальной арматуры приводит к полной потере несущей способности конструкции (при практически сохранившемся бетоне в более глубоких слоях) и созданию аварийной ситуации.

Существующие методы оценки карбонизации. Для оценки карбонизации бетона в Европе сегодня используются нормативные документы EN 13295: 2004 «Продукты и системы защиты и ремонта бетонных конструкций. Методы испытания. Определение стойкости и карбонизации», EN 14630: 2006 «Продукты и системы для защиты и восстановления бетонных конструкций. Метод тестирования. Определение глубины карбонизации в затвердевшем бетоне фенолфталеиновым методом». При их использовании карбонизация бето-

на оценивается индикаторным методом – фенолфталеиновым тестом (ФФТ). Его применение считается возможным, поскольку в соответствии с общепринятыми представлениями карбонизация развивается линейно с поверхности вглубь бетона, при этом реакция карбонизации происходит в узкой (около 1 мм) зоне. Скорость карбонизации определяется диффузионными процессами. Процесс карбонизации рассматривается как конечный во времени и по сечению бетона [2]. На основе определения толщины нейтрализованного слоя бетона фенолфталеиновым тестом выведено основное уравнение карбонизации бетона и построена модель карбонизации [2].

До настоящего времени не удалось предотвратить отрицательное воздействие CO_2 на бетонные и железобетонные конструкции. Поэтому изучению карбонизации уделялось и уделяется большое внимание. Влияние карбонизации на физико-химические характеристики бетона и зависимость скорости карбонизации от различных факторов изучалось и изучается различными авторами. При изучении процессов карбонизации были использованы разнообразные методы исследования: оптические, порометрические, сорбционные, индикаторные, электрохимические, физико-химические, аналитические и др. Значительная доля исследований проведена в лабораторных условиях, при этом краткосрочность экспериментов пытались уравновесить огромными концентрациями CO_2 (5, 10, 20 %), что абсолютно не соответствует реальным условиям эксплуатации ЖБЭ. И, только, отдельные исследования проводились на ЖБЭ, эксплуатировавшихся длительные сроки в реальных условиях. Результаты исследований по этой теме в наиболее полной форме обобщены в работе [2].

Результаты исследований ряда ученых и практиков не только значительно отличаются, но и зачастую носят противоречивый характер, что не позволяет прийти к единому мнению о механизме карбонизации, модели ее развития во времени по сечению бетона, и, соответственно о способах ее оценки и прогнозирования.

Многолетние авторские исследования ЖБЭ как в реальных условиях эксплуатации, так и в лабораторных условиях [2] позволили сделать следующие выводы:

- карбонизация не развивается широким фронтом с жесткой границей, делящей бетон на карбонизированный и «здоровый», а продолжается все время эксплуатации ЖБЭ и развивается с поверх-

ностных слоев вглубь бетона конструкций по сложной экспоненциальной зависимости. Причем, независимо от способа оценки – по карбонатной составляющей (показателю КС) либо по количеству поглощенного CO_2 . Степень карбонизации бетона максимальна в поверхностных слоях и достигает более 90 %;

- карбонизация бетона изменяет щелочность поровой жидкости

- показатель рН. Его изменение по сечению бетона также происходит по сложной зависимости: медленное снижение из глубины в сторону поверхности бетона и затем резкое падение. Показатель щелочности значительный промежуток времени остается постоянным, либо снижается очень незначительно. Этот период длится в течение 2–10 лет, а иногда достигает нескольких десятилетий (при незначительном изменении показателя рН), и его можно отнести к инкубационному периоду. Он зависит от концентрации CO_2 в атмосфере, пористости бетона, его структуры (т. е. В/Ц, характера заполнителей и добавок, вида и расхода вяжущих), условий твердения и, главное, – от условий эксплуатации.

Лабораторные исследования авторами [3] образцов бетона (пошкков, полученных из различных длительно эксплуатируемых конструкциях) показывают, что значение границы перехода окраски карбонизированного слоя соответствует показателю рН $\approx 10,3$. Таким образом, по ФФТ бетон нейтрализуется при рН $\approx 10,3$. Многочисленные исследователи считают, что бетон нейтрализуется и теряет свои защитные свойства при рН = 9,0. По исследованиям В. И. Бабушкина бетон теряет свои защитные свойства по отношению к арматуре при рН < 11,8 [4]. Приведенное выше показывает, что значение рН = 10,3 по ФФТ не является граничной величиной и очень условно определяет границу карбонизации и состояние защитных свойств бетона по отношению к арматуре, что подтверждают авторские исследования бетона защитного слоя конструкций, эксплуатирующихся длительные сроки в различных атмосферных средах, в результате которых достаточно часто в слое бетона, в котором по ФФТ он находится в удовлетворительном состоянии наблюдается коррозия стальной арматуры различной степени интенсивности.

Необходимо отметить, что при использовании ФФТ линия, ограничивающая фронт карбонизации получается извилистой, поэтому

значения средней глубины карбонизации отличаются от максимальной на двести и более процентов. А с учетом приведения полученного результата к граничным значениям $pH=9,0$ либо $11,8$, разница измерения глубины карбонизированного бетона достигает 500 и более процентов, что просто не позволяет говорить о какой-либо, тем более, приемлемой точности измерения глубины карбонизации ФФТ.

В нашей стране в соответствии с п.8.3.17 ТКП 45-1.04-37-2008 (02250) «Обследование строительных конструкций зданий и сооружений. Порядок проведения» состояние бетона по степени карбонизации также определяется фенолфталеиновой пробой, а единственным нормативным документом в данной области – СТБ 1481-2011 «Бетоны конструкций мостовых сооружений. Методы определения содержания хлоридов и степени карбонизации».

Однако при его внимательном прочтении возникают серьезные вопросы:

1. Степень карбонизации бетона характеризуется содержанием химически связанного цементным камнем диоксида углерода (CO_2) в виде карбоната кальция, т.е. его количеством.

Во-первых, в любой науке понятие степень подразумевает отношение каких-либо параметров, но не их количество.

Во-вторых, в результате анализа определяется количество поглощенного CO_2 . Если заявлено определение степени карбонизации, то соответственно, не только целесообразно, но и необходимо определять карбонатную составляющую (КС), т.е., количество образовавшегося карбоната кальция ($CaCO_3$), а по ней – степень карбонизации бетона.

2. В результате анализа определяют «Степень карбонизации бетона?» с точностью до 0,2 %. А что дальше? Получили 5 или 25 % – о чем это говорит? Каково состояние бетона и его защитных свойств по отношению к стальной арматуре? Как оно влияет на техническое состояние ЖБЭ в целом?

Отсутствуют критерии оценки состояния бетона и, как следствие, неясен смысл проведения анализа.

Кроме того, необходимо отметить, что анализ сложен, необходима очень большая масса цементно-песчаной фракции, что подразумевает отбор бетона на значительном протяжении, а это при применении существующей теории карбонизации бетона,

резко делящей бетон на карбонизированный и «здоровый» – просто не имеет смысла.

Т.о. данный документ, заявленный на определение степени карбонизации бетона – очень необходимый анализ для существующих ЖБЭ!, не определяет ни степень карбонизации бетона, ни его состояние, ни состояние его защитных свойств по отношению к стальной арматуре.

Необходима разработка нового нормативного документа, но только, на основании реального изучения карбонизации во времени по сечению бетона и ее влияния на изменение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре. При этом не должны использоваться индикаторные тесты (ничего не показывающие и, соответственно, не определяющие карбонизацию).

Постановка задачи. Целью данной работы явилось установление взаимосвязи изменения при карбонизации физико-химических свойств бетона в зоне расположения арматуры с состоянием стальной арматуры для возможности использования полученных данных при разработке нормативного документа для оценки карбонизации бетона и ее влияния на изменение технического состояния ЖБЭ. В основу исследований положено использование методов рН- и карбометрии, поскольку показатель рН является основной количественной характеристикой перерождения цементного камня в карбонаты под воздействием внешней среды, и является универсальной характеристикой состояния бетона и его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, а показатель КС характеризует количественное содержание карбонатов в цементно-песчаной фракции бетона в массовых процентах и его влияние на изменение показателя рН.

Объектами исследования служили ЖБЭ различных типов, эксплуатировавшиеся длительные сроки в различных воздушных средах. Исследования проводились в лабораторных условиях на образцах, отобранных из эксплуатируемых конструкций. Для анализа отбирались образцы бетона в зоне расположения арматуры, а также выбуриванием до глубины 100 мм. Отдельно, для определения начальных параметров карбонизации, исследовались бетонные кубики сечением 100×100×100 мм, выполненные в заводских условиях из бетонов основных классов по прочности $C^{12/15}$, $C^{16/20}$, $C^{18/22,5}$.

$C^{20}/_{25}$, $C^{25}/_{30}$ и $C^{30}/_{37}$ различных составов, сразу после стандартной ТВО.

Отбор проб, показатели карбонизации и состояние стальной арматуры определялись по методикам [2,5]. Статистическую обработку экспериментальных данных производили при помощи табличного процессора «Excel».

На основании выполненных исследований были получены расчетно-экспериментальные модели изменения карбонатной составляющей во времени по сечению бетонов классов по прочности $C^{12}/_{15}$ – $C^{30}/_{37}$ для различных условий эксплуатации и степеней агрессивности эксплуатационной среды [5]. Поскольку величина карбонатной составляющей зависит в первую очередь от количества использованного цемента, для объективной оценки состояния бетона вследствие карбонизации в [5] было предложено понятие степени карбонизации и построены расчетно-экспериментальные модели изменения степени карбонизации во времени для аналогичных бетонов и условий эксплуатации.

Поскольку карбонизация бетона не определяет коррозионное состояние стальной арматуры, но влияет на изменение показателя pH, определяющего состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, необходимо определить качественную и количественную зависимость изменения состояния бетона, его защитных свойств по отношению к стальной арматуре от величины карбонизации.

Для оценки состояния арматуры, выявляемой после вскрытия защитного слоя бетона, предложена система оценки по степени коррозии, приведенная в таблице 1.

Для определения показателя щелочности поровой жидкости и установления его связи с коррозионными повреждениями стальной арматуры отбирали пробы бетона ЖБЭ, эксплуатировавшихся от 10 до 40 лет в основном в атмосферных условиях и условиях сельскохозяйственных помещений. Исследовали более двухсот проб бетона в зоне расположения стальной арматуры с показателями щелочности поровой жидкости бетона $pH = 12,40 \dots 8,60$.

Таблица 1. Оценка состояния стальной арматуры ЖБЭ

Степень коррозии стальной арматуры	Внешние признаки коррозии арматуры
0	Чистая поверхность
I	Сплошная коррозия до 50 % поверхности стержня
II	То же более 50 %
III	Пластинчатая коррозия малой степени интенсивности (уменьшение площади сечения на величину до 25 %)
IV	То же средней степени интенсивности (уменьшение площади сечения на 25–50 %)
V	То же высокой степени интенсивности (уменьшение площади сечения стержня более 50 %)

На основании результатов исследований, для каждой степени коррозии стальной арматуры получили области изменения показателя рН бетона, находящегося в зоне расположения стальной арматуры (таблица 2). Границы областей назначены на основании результатов опытных исследований и общепринятых представлений.

Таблица 2. Взаимосвязь степени коррозии арматуры с показателями рН

Степень коррозии стальной арматуры	Граничные значения рН
0	> 11,80
I	11,80–10,90
II	<10,90–10,20
III	< 10,20–9,50
IV	< 9,50–9,00
V	< 9,00

По результатам многолетних исследований состояния стальной арматуры в зависимости от показателя рН защитного слоя в зоне расположения арматуры предложено шесть категорий оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре (таблица 3).

Ранее, в [5] приведено определение карбонизации бетона по показателям КС и СК. Предложены категории оценки состояния бетона по степени карбонизации. Необходимо отметить, что величина СК показывает степень карбонизации цементно-песчаной фракции бетона, в которой прогидратировал цемент. В оставшейся части гидратация цемента (с образованием $\text{Ca}(\text{OH})_2$), обеспечивающая создание щелочной среды и, как, следствие, сохранение стальной ар-

матуры в пассивном состоянии) будет продолжаться длительный период времени.

Таблица 3. Категории состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре

Категория состояния защитных свойств бетона	Граничные значения рН	Состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре
0	>11,80	Бетон полностью сохраняет защитные свойства по отношению к стальной арматуре
I	11,80–10,90	Начало деградации бетона
II	<10,90–10,20	Деградация бетона малой степени интенсивности
III	<10,20–9,50	Деградация бетона средней степени интенсивности
IV	<9,50–9,00	Деградация бетона повышенной степени интенсивности
V	<9,00	Полная деградация бетона

В [2] показано, что при исследовании физико-химических характеристик бетона защитного слоя различных типов ЖБЭ, хранившихся на складе готовой продукции, сразу после изготовления с применением ТВО, в поверхностных слоях толщиной 10–20 мм в результате карбонизации во всех ЖБЭ с расходом цемента менее 500 кг/м³ нейтрализовался максимальный запас Са(ОН)₂, достигающий 15 %, в остальных в поверхностных слоях сохранился некоторый избыток кристаллического Са(ОН)₂. Однако во всех случаях рН поровой влаги осталось постоянным (рН = 12,05...12,30), что обеспечивало длительный промежуток времени (от 2 до 10 лет) сохранение бетоном своих защитных свойств по отношению к стальной арматуре. Такое постоянство обусловлено достаточно высокой буферной емкостью бетона, под которой понимается содержание СаО в единице всего объема. Таким образом, степень карбонизации бетона определяет деградацию бетона вследствие перерождения цементного камня в карбонат кальция, но не определяет состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, поскольку в карбонизированном бетоне остается часть (от значительной, сразу после изготовления бетона, до незначительной, после длительной эксплуатации) некарбонизированного цементного камня. Дальнейшее сохранение защитных свойств бетона будет обеспе-

чиваться наличием не полностью прогидратировавших частичек цементного клинкера и части $\text{Ca}(\text{OH})_2$, а также цементного камня, который не подвергся карбонизации, и скорость изменения показателя рН не будет напрямую зависеть от изменения показателя СК.

Для возможности оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре вследствие карбонизации необходимо введение такого показателя, который бы учитывал общее состояние защитных свойств бетона (в карбонизированной и некарбонизированной частях). Таким показателем является степень потери защитных свойств бетона при карбонизации (СПЗ_k). СПЗ_k рассчитывается из пропорции, как процентное отношение величины карбонатной составляющей и ПВК [5]. Расчетно-экспериментальные модели изменения показателя СПЗ_k во времени по сечению бетонов классов по прочности $\text{C}^{12}/_{15} - \text{C}^{30}/_{37}$ для различных условий эксплуатации и степеней агрессивности эксплуатационной среды приведены в [5].

Для определения количественных и качественных характеристик данного показателя необходимо установить его соотношение с показателем рН. Ранее, в многочисленных работах было показано, что по сечению бетона карбонизация развивается с поверхности вглубь по сложной экспоненциальной зависимости, при этом уже сразу после изготовления бетона в поверхностных слоях в зависимости от состава бетона, величина КС составляет до 12 %, а в глубине – 3–5 %. При этом показатель щелочности поровой жидкости сразу после изготовления бетона (с применением ТВО) достигает значений $\text{pH} = 12,3 \dots 12,5$. Его развитие по сечению диаметрально противоположно – максимальные значения в глубине бетона и их снижение во времени в поверхностных слоях [2,5]. Независимо от классов бетона по прочности, сроков и условий эксплуатации кривые распределения показателей рН и КС по сечению бетона взаимосвязаны, что позволяют использовать их для установления взаимосвязи степени потери защитных свойств бетона при карбонизации и состояния его защитных свойств по отношению к стальной арматуре.

В соответствии с полученными моделями изменения во времени по сечению бетона показателя КС [5] для бетонов классов по прочности $\text{C}^{16}/_{20} - \text{C}^{25}/_{30}$ сразу после изготовления с применением ТВО в зоне расположения арматуры (приняв среднее значение толщины защитного слоя 15 мм) значения начальной карбонизации состав-

ляют $КС_0 = 3,4 \dots 4,6$ %. Пересчитав их в соответствии с приведенной выше методикой, получаем, что сразу после изготовления бетона в заводских условиях степень потери его защитных свойств составляет $СПЗ_k = 13,4 \dots 14,9$ %.

В связи с тем, что для различных классов бетона по прочности начальный период эксплуатации, когда при постоянном развитии карбонизации значения показателя рН в зоне расположения арматуры остаются постоянными либо снижаются незначительно, в соответствии с [2] составляет 2–10 лет, принимая среднее значение срока эксплуатации 5 лет, после которого гарантированно начнется изменение показателя рН в зоне расположения арматуры и взяв за основные условия эксплуатации – атмосферные, область обычной карбонизации, в соответствии с полученными моделями карбонизации определяем, что через 5 лет эксплуатации для бетонов классов по прочности $C^{16}/_{20} - C^{25}/_{30}$ величина КС составит 8,1–9,3 %, следовательно, показатель $СПЗ_k$ будет равен 26,3–36,8 %.

Для установления взаимосвязи показателей рН и $СПЗ_k$ принимаем, с некоторым (начальным) запасом, за верхнее граничное усредненное значение для различных классов бетона по прочности $СПЗ_k = 40$ % (соответствующее граничному значению рН = 12,30) для начальной карбонизации, обеспечивающее сохранение бетоном своих защитных свойств по отношению к стальной арматуре длительный промежуток времени и за нижнее граничное значение $СПЗ_k = 80$ % (соответствующее граничному значению рН = 9,00, с учетом того, данное значение общепринято [1] для полной карбонизации бетона), а за 15 лет исследования карбонизации для атмосферных условий эксплуатации минимальные значения щелочности поровой жидкости в зоне расположения арматуры составили рН = 7,3...7,5, взяв за основу области изменения показателя рН, и проведя линии, параллельные оси абсцисс из точек, ограничивающих области изменения рН на ось $СПЗ_k$, получаем границы областей изменения степени потери защитных свойств бетона при карбонизации (рисунок 1).

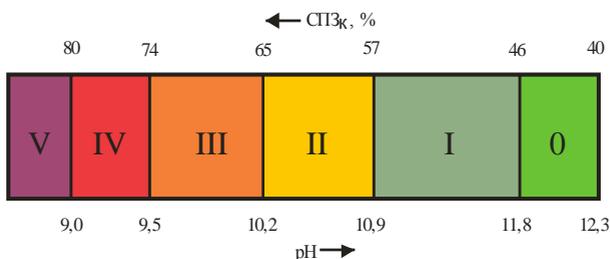


Рисунок 1. Взаимосвязь параметров pH и СПЗ_к по сечению бетона:

0 – V – степени потери защитных свойств бетона при карбонизации (категории состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре)

Возможность применения данной зависимости оценивали на основе исследования проб бетона, отобранных из ЖБЭ (колонн и балок), эксплуатировавшихся различные сроки в атмосферных средах. Степень потери защитных свойств бетона по критерию «СПЗ_к» однозначно определяется значением pH, граничные значения которых были назначены (см. п. 5.3.1) следующим образом: 12,30–11,80; 11,80–10,90; 10,90–10,20; 10,20–9,50; 9,50–9,00. Соответствующим образом все исследуемые объекты были распределены по вышеуказанным классам.

Стала задача определения граничных значений «СПЗ_к» x_{ij} , соответствующих различным объектам с учетом вероятностного характера «СПЗ_к». Среди возможных критериев выбора граничных значений «СПЗ_к» применим (предложим) следующий: «объект, для которого СПЗ_к равен граничному значению x_{ij} для двух соседних классов i и j , с одинаковой вероятностью может быть отнесен к каждому из них».

Следовательно, если СПЗ_к объекта больше граничного значения x_{ij} между классами i и j , то с большей вероятностью он может быть отнесен к классу $j = i + 1$.

Для формального отыскания граничных значений x_{ij} необходимо решить графическое уравнение:

$$\widehat{F}_i(x_{ij}) = 1 - \widehat{F}_j(x_{ij}), \quad (1)$$

где $\widehat{F}_i(x_{ij})$ – эмпирическая функция распределения значений «СПЗ_к» объектов i -го класса; x_{ij} – граничное значение «СПЗ_к» между объектами i -го и j -го классов, $j = i + 1$.

По результатам расчетов с применением пакета статистического анализа данных «Statgraphiks Centurion» были найдены граничные значения x_{ij} : $X_{12} = 46,7$; $X_{23} = 56,0$; $X_{34} = 65,1$; $X_{45} = 73,1$ %. Кроме того, в данной программе были найдены межквартильные размахи значений СПЗ_к для объектов каждого класса (таблица 4).

Таблица 4. Взаимосвязь параметров рН и СПЗ_к по сечению бетона

Область значений показателя рН	Межквартильный размах показателя СПЗ _к , % с вероятностью 0,5
12,30–11,80	40,4–45,4
11,80–10,90	48,1–54,7
10,90–10,20	57,9–63,9
10,20–9,50	66,8–72,6
9,50–9,00	73,9–79,9

Области значений рН и СПЗ_к и их границы приведены на рисунке 2.

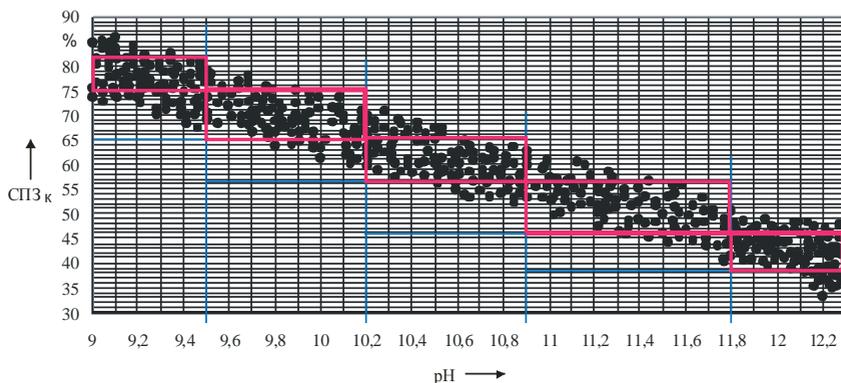


Рисунок 2. Области значений параметров рН и СПЗ_к

Таким образом, полученная взаимосвязь состояния стальной арматуры, состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре со степенью потери защитных свойств бетона при карбонизации для любой точки по сечению бетона представлена в таблице 5.

Таблица 5. Взаимосвязь состояния стальной арматуры, параметров рН и СПЗ_к по сечению бетона

Степень коррозии стальной арматуры	Категория состояния защитных свойств бетона	Граничные значения показателя рН	Степень потери защитных свойств бетона при карбонизации, СПЗ _к	Граничные значения показателя СПЗ _к
0	0	> 11,80	0	< 47
I	I	11,80–10,90	I	47–56
II	II	< 10,90–10,20	II	> 56–65
III	III	< 10,20–9,50	III	> 65–73
IV	IV	< 9,50–9,00	IV	> 73–80
V	V	< 9,00	V	> 80

Предлагаемая зависимость иллюстрирует изменение состояния бетона и его защитных свойств по отношению к стальной арматуре по сечению бетона, состояния стальной арматуры при карбонизации бетона.

Заклучение. Существующие методы оценки карбонизации бетона и его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, основанные на индикаторных тестах, несмотря на их постоянное усовершенствование, не позволяют объективно оценивать и прогнозировать процессы карбонизации, и, как следствие, техническое состояние ЖБЭ и их долговечность.

Приведенные результаты исследований могут быть использованы для разработки критериев оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре и оценки технического состояния ЖБЭ и ЖБК, что позволит значительно повысить не только объективность детального обследования ЖБЭ и ЖБК, но и эффективность выбора мероприятий по их восстановлению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь. – М.: Стройиздат, 1976. – 205 с.
2. Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.

3. Кудрявцев И.А., Богданов В.П. Исследование карбонизации железобетонных конструкций с длительным сроком эксплуатации // *Материалы, технологии, инструменты.*– 2000.– Т.5, № 3.– С. 97–100.
4. Бабушкин, В.И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона / В.И. Бабушкин.– М.: Стройиздат, 1968. – 187 с.
5. Васильев, А. А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : [монография] / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 304 с.