

УДК 691.32.001.5

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Д. Н. ШЕВЧЕНКО, кандидат технических наук, Е. О. БЛОЦКАЯ, магистр технических наук, Е. В. ЕВТУХОВА, магистр технических наук, Л. В. ПЛИКУС, магистрант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА ПО ОТНОШЕНИЮ К СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЕ

По результатам лабораторных исследований образцов бетона железобетонных элементов (ЖБЭ), эксплуатируемых в различных по степени агрессивности условиях, оценки состояния бетона и стальной арматуры для оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре вследствие карбонизации предложен показатель – степень потери защитных свойств бетона при карбонизации (СПЗ_к). На основании полученных ранее моделей карбонизации бетона и с учетом полученных результатов предложены расчетно-экспериментальные модели изменения защитных свойств по отношению к стальной арматуре во времени по сечению бетона.

Введение. Под воздействием агрессивных факторов эксплуатационной среды в бетоне и стальной арматуре развиваются коррозионные процессы различной степени интенсивности. Приведенные в [1] результаты исследований показывают, что в ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся длительные сроки в различных атмосферных условиях, коррозионные повреждения стальной арматуры и бетона составляют более 70 %. Логично предположить, что начало коррозии арматуры возможно только после потери бетоном своих защитных свойств по отношению к стальной арматуре (при соответствующих физико-химических показателях эксплуатационной среды), а интенсивность коррозионных процессов в стальной арматуре будет напрямую зависеть от степени коррозии бетона. Следовательно, состояние стальной арматуры будет напрямую зависеть от состояния бетона и его защитных свойств в зоне расположения арматуры.

При карбонизации бетона основными физико-химическими показателями бетона защитного слоя являются:

– карбонатная составляющая (показатель КС), показывающая в процентном отношении количество образовавшегося карбоната кальция (CaCO_3) в цементно-песчаной фракции бетона, поскольку именно его образование вызывает структурные изменения бетона, приводя к его деградации;

– водородный показатель водной вытяжки цементного камня (показатель рН), определяющий защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре и стабильное состояние минералов цементного камня при воздействии на него воды, углекислого газа и перепадов температур.

Изменяясь во времени, данные показатели и определяют возможность начала коррозионных процессов в стальной арматуре и интенсивность уже происходящих. Исследование их изменения во времени, влияния на изменение состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, состояния стальной арматуры и ЖБЭ в целом позволяет оценить влияние карбонизации бетона на состояние эксплуатируемых ЖБЭ и критерии оценки технического состояния ЖБЭ по физико-химическим показателям бетона защитного слоя.

Поскольку карбонизация бетона не определяет коррозионное состояние стальной арматуры, но влияет на

изменение показателя рН, имеет смысл определить качественную и количественную зависимость изменения состояния бетона, его защитных свойств по отношению к стальной арматуре от величины карбонизации.

Ранее дано определение карбонизации бетона по показателям КС и СК. Предложены категории оценки состояния бетона по степени карбонизации [2].

Необходимо отметить, что величина СК показывает степень карбонизации цементно-песчаной фракции бетона, в которой прогидратировал цемент. В оставшейся части гидратация цемента (с образованием Ca(OH)_2 , обеспечивающая создание щелочной среды и, как следствие, сохранение стальной арматуры в пассивном состоянии) будет продолжаться длительный период времени.

В [1] 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/м^3 нейтрализовался максимальный запас Ca(OH)_2 , достигающий 15 %, в остальных в поверхностных слоях сохранился некоторый избыток кристаллического Ca(OH)_2 . Однако во всех случаях рН поровой влаги осталось постоянным ($\text{pH} = 12,05 \dots 12,30$), 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 обеспечиваться наличием не полностью прогидратированных частичек цементного клинкера и части Ca(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_к).

Показатель СПЗ_к рассчитывается из пропорции

$$\% \text{ ППВ} - 100 \% \text{ СПЗ}_k;$$

$$\% \text{ КК} - X \% \text{ СПЗ}_k;$$

$$X \% \text{ СПЗ}_k = \frac{\% \text{ КК} \cdot 100}{\% \text{ ППВ}}. \quad (1)$$

Ранее в [1] были получены регрессионные зависимости изменения во времени карбонатной составляющей по сечению бетонов классов по прочности $C^{12/15} - C^{30/37}$ для различных условий эксплуатации.

Поскольку любой класс бетона по прочности можно

получить различными составами, для расчета СПЗ_к определяли значения ПВК для различных составов бетона на один класс по прочности, после чего полученные значения ПВК усредняли. Для дальнейших исследований были приняты следующие усредненные значения ПВК: для бетона класса по прочности $C^{12/15} - 24,0$; $C^{16/20} - 25,3$; $C^{18/22,5} - 26,5$; $C^{20/25} - 29,2$; $C^{25/30} - 30,8$; $C^{30/37} - 33,2$ %.

С учетом приведенных данных, расчетно-экспоненциальных зависимостей изменения карбонатной составляющей [2] и приведенных данных [зависимость (1)] получены регрессионные зависимости изменения показателя СПЗ_к во времени по сечению бетонов классов по прочности $C^{12/15} - C^{30/37}$ для различных условий эксплуатации. В качестве примера рассмотрим регрессионные зависимости изменения показателя СПЗ_к во времени по сечению бетонов классов по прочности $C^{12/15} - C^{30/37}$ для различных степеней агрессивности среды эксплуатационных условий сельскохозяйственных зданий (таблицы 1 и 2).

Таблица 1 – Регрессионные зависимости изменения показателя СПЗ_к для различных классов бетона по прочности и условий повышенной агрессивности среды сельскохозяйственных зданий

Класс бетона по прочности на сжатие	Область ускоренной карбонизации
$C^{12/15}$	$\text{СПЗ}_k(l, t) = 2,42 + (0,38 + 4,00\sqrt{t}) e^{\left(2,43 - \left(\frac{l-1,00}{3,50}\right)^{0,65}\right)} / 24,0$
$C^{16/20}$	$\text{СПЗ}_k(l, t) = 2,86 + (0,64 + 3,93\sqrt{t}) e^{\left(2,83 - \left(\frac{l+2,00}{3,00}\right)^{0,60}\right)} / 25,3$
$C^{18/22,5}$	$\text{СПЗ}_k(l, t) = 3,31 + (0,51 + 3,59\sqrt{t}) e^{\left(3,09 - \left(\frac{l+3,00}{2,75}\right)^{0,60}\right)} / 26,5$
$C^{20/25}$	$\text{СПЗ}_k(l, t) = 3,47 + (0,77 + 3,27\sqrt{t}) e^{\left(2,99 - \left(\frac{l+4,00}{2,60}\right)^{0,55}\right)} / 29,2$
$C^{25/30}$	$\text{СПЗ}_k(l, t) = 3,60 + (0,94 + 2,92\sqrt{t}) e^{\left(2,95 - \left(\frac{l+4,10}{2,30}\right)^{0,51}\right)} / 30,8$
$C^{30/37}$	$\text{СПЗ}_k(l, t) = 3,87 + (1,13 + 2,65\sqrt{t}) e^{\left(3,06 - \left(\frac{l+4,70}{2,10}\right)^{0,50}\right)} / 33,2$

Таблица 2 – Регрессионные зависимости изменения показателя СПЗ_к для различных классов бетона по прочности и условий повышенной агрессивности среды сельскохозяйственных зданий

Класс бетона по прочности на сжатие	Область ускоренной карбонизации
$C^{12/15}$	$\text{СПЗ}_k(l, t) = 2,42 + (0,38 + 2,65\sqrt{t}) e^{\left(2,43 - \left(\frac{l-1,00}{3,50}\right)^{0,65}\right)} / 24,0$
$C^{16/20}$	$\text{СПЗ}_k(l, t) = 2,86 + (0,63 + 2,49\sqrt{t}) e^{\left(2,84 - \left(\frac{l+2,00}{3,00}\right)^{0,60}\right)} / 25,3$
$C^{18/22,5}$	$\text{СПЗ}_k(l, t) = 3,31 + (0,47 + 2,14\sqrt{t}) e^{\left(3,09 - \left(\frac{l+3,00}{2,75}\right)^{0,60}\right)} / 26,5$
$C^{20/25}$	$\text{СПЗ}_k(l, t) = 3,47 + (0,76 + 1,84\sqrt{t}) e^{\left(2,99 - \left(\frac{l+4,00}{2,60}\right)^{0,55}\right)} / 29,2$
$C^{25/30}$	$\text{СПЗ}_k(l, t) = 3,60 + (0,98 + 1,55\sqrt{t}) e^{\left(2,95 - \left(\frac{l+4,10}{2,30}\right)^{0,51}\right)} / 30,8$
$C^{30/37}$	$\text{СПЗ}_k(l, t) = 3,87 + (1,13 + 1,32\sqrt{t}) e^{\left(3,06 - \left(\frac{l+4,70}{2,10}\right)^{0,50}\right)} / 33,2$

На основании приведенных регрессионных зависимостей построены расчетно-экспериментальные модели изменения во времени по сечению бетонов классов по прочности $C^{12/15} - C^{30/37}$ показателя СПЗ_к для различных степе-

ней агрессивности среды эксплуатационных условий сельскохозяйственных зданий. Данные модели представлены в качестве примера для бетонов классов по прочности $C^{12/15}$ и $C^{30/37}$ на рисунках 1 и 2, соответственно.

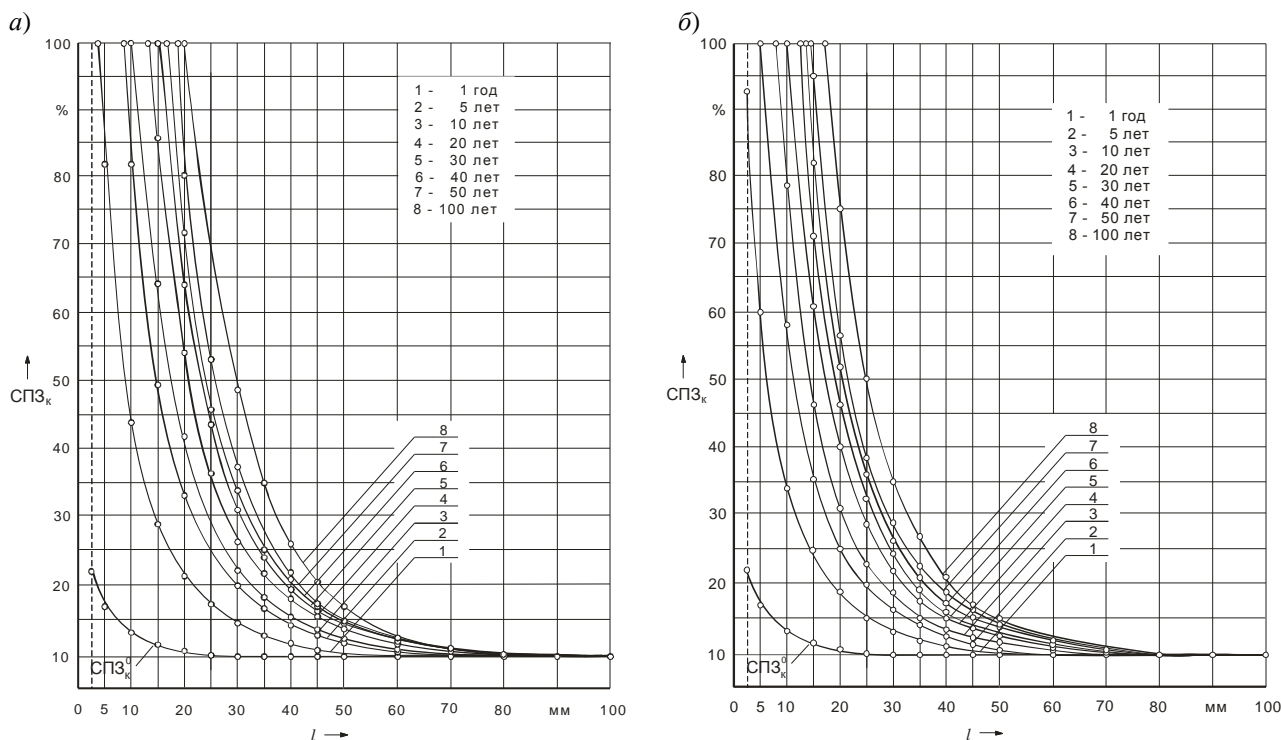


Рисунок 1 – Расчетно-экспериментальная модель изменения защитных свойств по отношению к стальной арматуре во времени по сечению бетона класса по прочности $C^{12/15}$ для условий среды сельскохозяйственных зданий
 СПЗ_к⁰ – степень потери защитных свойств бетона сразу после изготовления с применением ТВО:
 а – область ускоренной карбонизации, б – область обычной карбонизации

Приведенные модели показывают изменение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре с момента его изготовления до возраста 100 лет по сечению бетона до глубины 100 мм. Они построены для дискретных значений возраста бетона. Для получения величин СПЗ_к промежуточных значений возраста бетона необходимо интерполировать значения двух ближайших к искомому возрасту.

Для определения количественных и качественных характеристик данного показателя необходимо установить его соотношение с показателем pH. Ранее, в многочисленных работах [1–7] 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 $pH = 12,3 \dots 12,5$. Его развитие по сечению диаметрально противоположно – максимальные значения в глубине бетона и их снижение во времени в поверхностных слоях. Независимо от классов бетона по прочности, сроков и условий эксплуатации кривые распределения показателей pH и КС по сечению бетона взаимосвязаны, что позволяет использовать их для установления взаимосвязи степени потери защитных свойств бетона при карбонизации и состояния его защитных свойств по отношению к стальной арматуре.

Ранее, в [2] на основании исследования карбонизации по сечению бетонов разных составов и классов по прочности как сразу после изготовления с применением ТВО, так и в процессе длительной эксплуатации, получены модели развития карбонизации бетона для различных условий эксплуатации. В соответствии с ними, для бетонов классов по прочности $C^{16/20} - C^{25/30}$ сразу после изготовления с применением ТВО в зоне расположения арматуры (приняв среднее значение толщины защитного слоя 15 мм) значения начальной карбонизации составляют $KC_0 = 3,4 \dots 4,6$ %. Пересчитав их в соответствии с приведенной выше методикой, получаем, что сразу после изготовления бетона в заводских условиях степень потери его защитных свойств составляет $СПЗ_к = 13,4 \dots 14,9$ %.

В связи с тем, что для различных классов бетона по прочности начальный период эксплуатации, когда при постоянном развитии карбонизации значения показателя pH в зоне расположения арматуры остаются постоянными либо снижаются незначительно, в соответствии с [1] составляет 2–10 лет, принимаем среднее значение срока эксплуатации 5 лет, после которого гарантированно начнется изменение показателя pH в зоне расположения стальной арматуры. 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_к будет равен 26,3–36,8 %.

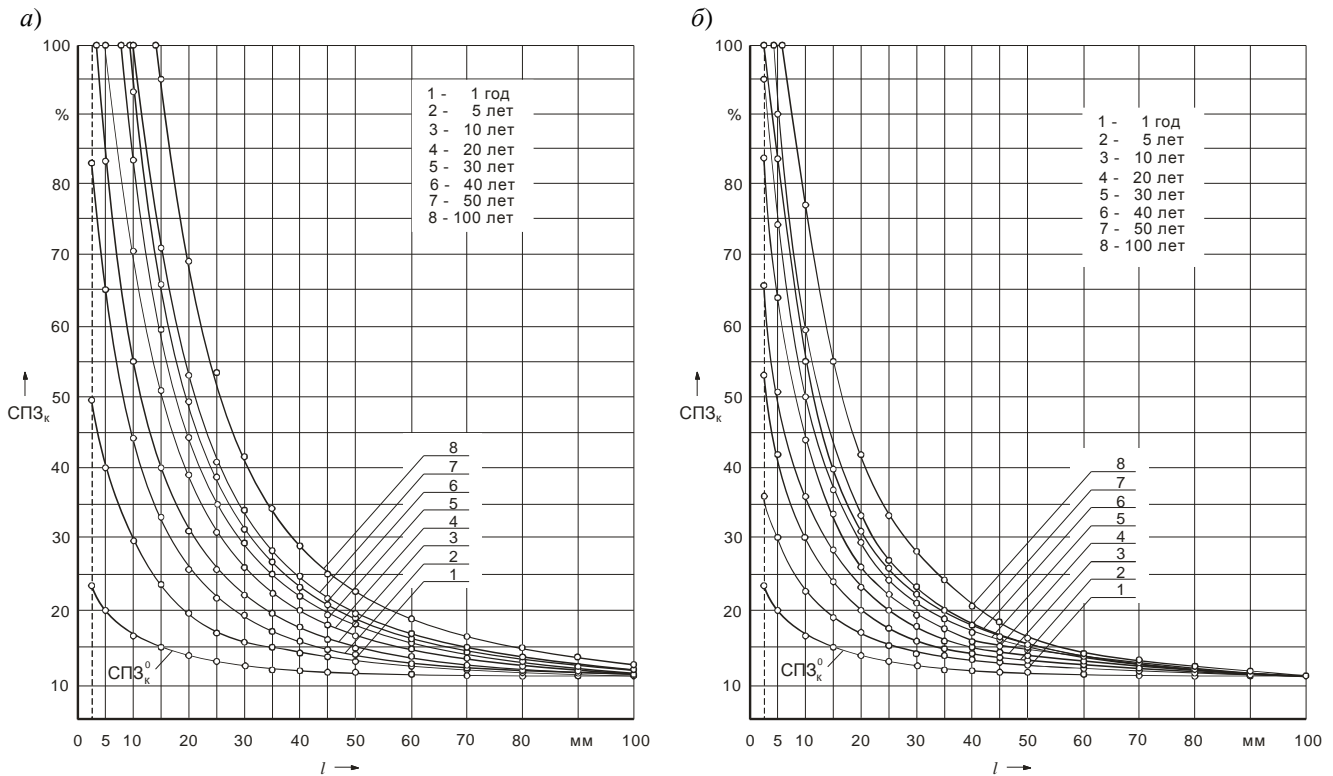


Рисунок 2 – Расчетно-экспериментальная модель изменения защитных свойств по отношению к стальной арматуре во времени по сечению бетона класса по прочности $C^{30/37}$ для условий среды сельскохозяйственных зданий $СПЗ_k^0$ – степень потери защитных свойств бетона сразу после изготовления с применением ТВО:
 а – область ускоренной карбонизации, б – область обычной карбонизации

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 $pH = 12,30$) для начальной карбонизации, обеспечивающее сохранение бетоном своих защитных свойств по отношению к стальной арматуре длительный промежуток времени (зависящий в первую очередь от условий эксплуатации), и за нижнее граничное значение $СПЗ_k = 80\%$ (соответствующее граничному значению $pH = 9,00$, с учетом того, что данное значение общепринято [8] для полной карбонизации бетона), а за 15 лет исследования карбонизации для атмосферных условий эксплуатации минимальные значения щелочности поровой жидкости в зоне расположения арматуры составили $pH = 7,3 \dots 7,5$, 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 3).

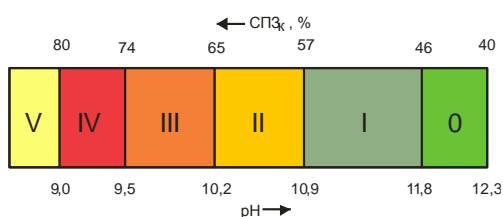


Рисунок 3 – Взаимосвязь параметров рН и $СПЗ_k$ по сечению бетона: 0–V – степени потери защитных свойств бетона при карбонизации (категории состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре)

Возможность применения данной зависимости оценивали на основе исследования проб бетона, отобранных из ЖБЭ (колонн и балок), эксплуатировавшихся различных сроки в атмосферных средах. Показатели рН и КС и степень карбонизации рассчитывали в соответствии с методикой [2].

Степень потери защитных свойств бетона по критерию « $СПЗ_k$ » однозначно определяется значением рН, граничные величины которых были назначены 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 « $СПЗ_k$ » x_{ij} , соответствующих различным объектам с учетом вероятностного характера « $СПЗ_k$ ». Среди возможных критериев выбора граничных значений « $СПЗ_k$ » применим (предложим) следующий: «объект, для которого $СПЗ_k$ равен граничному значению x_{ij} для двух соседних классов i и j , с одинаковой вероятностью может быть отнесен к каждому из них». Следовательно, если $СПЗ_k$ 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:

$$\hat{F}_i(x_{ij}) = 1 - \hat{F}_j(x_{ij}), \quad (2)$$

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

По результатам расчетов с применением пакета статистического анализа данных «Statgraphics 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 3). Области значений рН и СПЗ_к и их границы приведены на рисунке 4.

Полученная взаимосвязь состояния стальной арматуры, защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре со степенью потери защитных свойств бетона при карбонизации представлена в таблице 4.

Таблица 3 – 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

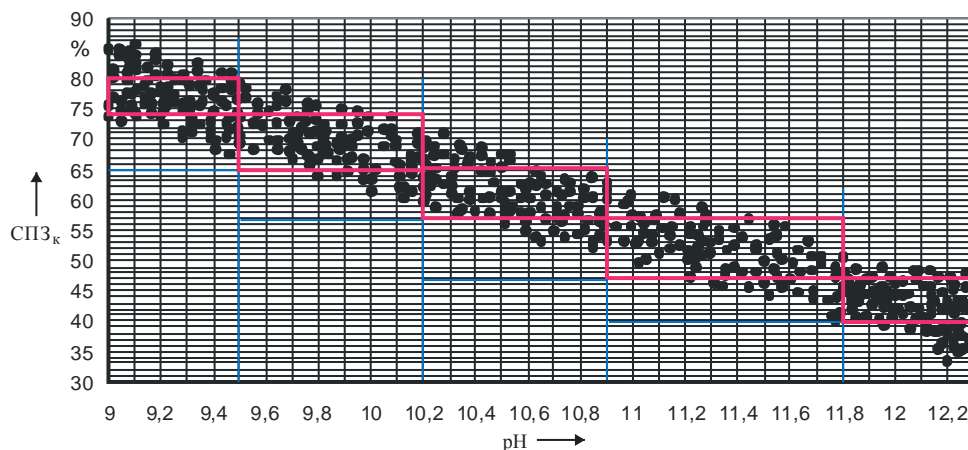


Рисунок 4 – Области значений параметров рН и СПЗ_к

Таблица 4 – 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 и может быть использована при проведении детального обследования ЖБЭ и ЖБК.

Список литературы

- 1 Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
- 2 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.
- 3 Васильев, А. А. Оценка технического состояния железобетонных конструкций на основе физико-химического анализа бетона / А. А. Васильев // Проблемы современного бетона и железобетона : материалы Междунар. симп. – Минск, 2009. – С. 563–578.

Получено 03.07.2013

A. A. Vasilyev, D. N. Shevchenko, E. O. Blotskaya, E. V. Evtuchova, L. V. Plikus. Model of concrete protective properties change relative to steel reinforcement.

According to the results of laboratory investigation of reinforced concrete elements samples (RCE) exploited in different aggressiveness conditions, the estimation of concrete and steel reinforcement condition for estimation of concrete protective properties relative to steel reinforcement as a result of carbonation, it was suggested parameter – degree of protective properties loss of concrete owing to carbonation (DPPL). On the basis of previously obtained models of concrete carbonation and taking into account results received there are suggested calculation-experimental models of protective properties change relative to steel reinforcement against time and concrete cross-section.

- 4 Комплексная оценка состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций : практ. пособие / Т. М. Пецольд [и др.] ; под ред. А. А. Васильева. – Гомель : БелГУТ, 2005. – 31 с.

- 5 Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, на основе методов рН- и карбометрии / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2006. – № 4 (7). – С. 81–88.

- 6 Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование долговечности железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушной среде : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / А. А. Васильев ; БНТУ. – Минск, 2007. – 175 с.

- 7 Васильев, А. А. Дополнительный способ оценки технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушной среде / А. А. Васильев // Проблемы современного бетона и железобетона : материалы Междунар. симп. – Минск, 2007. – С. 113–129.

- 8 Corrosion protection of reinforcing steels: technical report. – Task Group 9.7 : February 2009, bulletin 49. – 2009. – 116 p.