

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ
ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНДАРТОВ
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

(г. Минск, БНТУ — 27-28.05.2014)

УДК 624.01/. 04

**К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
НА ОСНОВЕ ИНДИКАТОРНОГО МЕТОДА**

ВАСИЛЬЕВ А.А.

Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь

Важнейшими факторами, определяющими долговечность эксплуатирующихся железобетонных элементов (ЖБЭ) являются коррозионные процессы в бетоне и стальной арматуре, являющиеся в первую очередь, следствием воздействия агрессивности внешней среды. При практически одинаковом внешнем виде бетона, техническое состояние ЖБЭ, за счет различного течения коррозионных процессов может разительно отличаться (рисунки 1–4).

Основным видом коррозии бетона ЖБЭ, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, является карбонизация. 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 бетона. Таким образом, процесс коррозионного разрушения ЖБЭ начинается с ее поверхности. В первую очередь теряет свои эксплуатационные свойства бетон защитного слоя. Изменение его структуры происходит без видимых повреждений, коррозия стальной арматуры начинается внутри бетона.



Рис. 1. Фрагмент колонны крайнего ряда

Условия эксплуатации – общественное здание. Срок эксплуатации – 10 лет. Стальная арматура находится в пассивном состоянии, следы коррозии отсутствуют



Рис. 2. Фрагмент колонны крайнего ряда

Условия эксплуатации – сельскохозяйственное здание. Срок эксплуатации – 18 лет. Поверхностная коррозия стальной арматуры, на отдельных участках интенсивная



Рис. 3. Фрагмент

продольных ребер плит покрытия
Условия эксплуатации – сельскохозяйственное здание. Срок эксплуатации – 30 лет. Поверхностная коррозия стальной арматуры высокой степени интенсивности



Рис. 4. Фрагмент балки покрытия

Условия эксплуатации – промышленное здание. Срок эксплуатации – 25 лет. Пластинчатая коррозия стальной арматуры высокой степени интенсивности

Образующиеся продукты коррозии стали занимают в 2–2,5 раза больший объем, чем слой прородированного 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.

Для оценки карбонизации бетона в Европе сегодня используются такие нормативные документы как 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».

В соответствии с ними карбонизация бетона 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. На основе определения толщины нейтрализованного слоя бетона фенолфталеиновым тестом выведено основное уравнение карбонизации бетона и построена модель карбонизации [1].

При использовании ФФТ на скол бетона с помощью капельницы или пипетки наносят 0,1%-ый раствор фенолфталеина в этиловом спирте. При изменении pH от 8,3 до 14 окраска индикатора изменяется от бесцветной до ярко-малиновой. Свежий излом образца бетона в карбонизированной зоне после нанесения на него раствора фенолфталеина имеет серый цвет, а в некарбонизированной зоне приобретает ярко-малиновую окраску. Считается, что бетон в не-

окрашенной зоне нейтрализован и потерял свои защитные свойства по отношению к арматуре, а в окрашенной – находится в удовлетворительном состоянии. Примерно через минуту после нанесения индикатора измеряют линейкой с точностью до 0,5 мм расстояние от поверхности образца до границы ярко окрашенной зоны в направлении, нормальном к поверхности. Измеренная величина есть глубина карбонизации бетона.

На сегодняшний день нет единого мнения о граничном значении показателя рН при котором бетон можно считать карбонизированным. Большинство исследователей считают, что бетон полностью карбонизируется при $\text{pH} \approx 9$, однако в научной литературе приводятся и другие значения [2]. По исследованиям В. И. Бабушкина бетон теряет свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре при $\text{pH} < 11,8$ [4]. Лабораторные исследования авторами [5] фенолфталеиновым тестом (ФФТ) образцов бетона (порошков, полученных из различных длительно эксплуатируемых конструкций) показывают, что значение границы перехода окраски карбонизированного слоя соответствует показателю $\text{pH} \approx 10,3$, т.е., по ФФТ бетон нейтрализуется при $\text{pH} \approx 10,3$.

Необходимо отметить, что при использовании ФФТ линия, ограничивающая фронт карбонизации, даже при достаточной однородности бетона, получается извилистой, поэтому значения средней глубины карбонизации зачастую отличаются от максимальной до двухсот и даже более процентов (рисунок 5). А коррозионные процессы различной интенсивности в стальной арматуре присутствуют в зоне, в которой по индикаторному тесту бетон сохраняет свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре (рисунок 6).

Многолетние авторские исследования ЖБЭ как в реальных условиях эксплуатации, так и в лабораторных условиях [2,3] позволили сделать следующие выводы:

– карбонизация не развивается широким фронтом с жесткой границей, делящей бетон на карбонизированный и «здоровый», а продолжается все время эксплуатации конструкций и развивается с поверхностных слоев вглубь бетона конструкций по сложной экспоненциальной зависимости (степень карбонизации бетона максимальна в поверхностных слоях и достигает 90 %);

– изменение показателя рН 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.



Рис. 5. Скол бетона
Неоднородная (по толщине) линия, определяющая границу карбонизации бетона по ФФТ



Рис. 6. Фрагмент ЖБЭ
Сплошная поверхностная коррозия конструктивной стальной арматуры на участках, где по ФФТ бетон сохранил свои защитные свойства

В качестве примера оценки защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре различными методами на рисунке 7 приведены результаты исследования изменения во времени по сечению бетона показателя рН однотипных элементов – крайних и средних колонн коровника, эксплуатировавшегося в течение 35 лет.

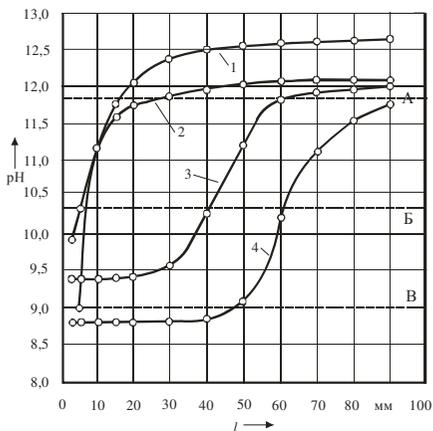


Рис. 7. Экспериментальные зависимости $l - \text{pH}$ для колонн крайних и средних рядов:

- 1– колонна №1 крайнего ряда (сеч. 200×200 мм);
- 2– колонна №2 крайнего ряда (сеч. 200×200 мм);
- 3– колонна №3 среднего ряда (сеч. 400×400 мм);
- 4– колонна №4 крайнего ряда (сеч. 400×400 мм)

При анализе полученных графиков по рН-метрии (см. рис. 7, линию «А») видно, что бетон колонн потерял защитные свойства на глубину: № 1 – ≈ 15 , № 2 – ≈ 20 , № 3 – ≈ 55 , № 4 – ≈ 90 мм. Анализируя графики по ФФТ (см. рис. 7, линию «Б»), получаем, что бетон колонн потерял защитные свойства на глубину: № 1 – ≈ 5 , № 2 – ≈ 8 , № 3 – ≈ 42 , колонны № 4 – ≈ 62 мм.

При анализе графиков в соответствии с общепринятыми воззрениями (бетон карбонизируется и теряет свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре при $\text{pH}=9$) получаем, (см. рис. 7, линию «В») что бетон колонн потерял защитные свойства на глубину: № 2 – ≈ 5 , № 4 – ≈ 50 мм, а бетон колонн №1 и 3 сохранил свои защитные свойства по всему сечению.

Приведенные кривые показывают, что разница в определении толщины нейтрализованного бетона составляет до 300 % (колонна №2), а для колонны №4, несмотря на то, что бетон прокарбонизировал на большую часть сечения, ее в процентном отношении определить невозможно.

В качестве примера определения состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре на рисунках 8 – 10 представлены результаты исследования изменения показателя рН как сразу после ТВО, так и после хранения образцов бетона в различных атмосферных условиях.

Исследовали кубики сечением 100×100×100 мм, выполненные в заводских условиях из бетонов классов по прочности $C^{20}_{/25}$ и $C^{30}_{/37}$. Составы бетонов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Составы образцов бетона

Ориентировочный класс бетона по прочности на сжатие	Состав смеси, кг/м ³				
	Ц	П	Щ	В	С-3, К=10,0 %
C ³⁰ / ₃₇	540	610	1270	135	34
C ²⁵ / ₃₀	420	620	1270	135	12
C ²⁰ / ₂₅	365	750	1270	135	15

После изготовления кубики подвергали тепловлажностной обработке (ТВО) по стандартному режиму. Затем их хранили в различных атмосферных условиях: в эксикаторе (Э), в помещении лаборатории (П), при $t = 16 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ и $w = 45...55 \%$. Атмосферные условия (А) в помещении лаборатории были созданы следующим образом: два раза в день кубики погружались в воду, после чего устанавливались на деревянные подставки под вентилятор, таким образом, кубики ежедневно проходили двойной цикл увлажнения и высыхания.

Было испытано по три серии образцов для каждого класса бетона по прочности.

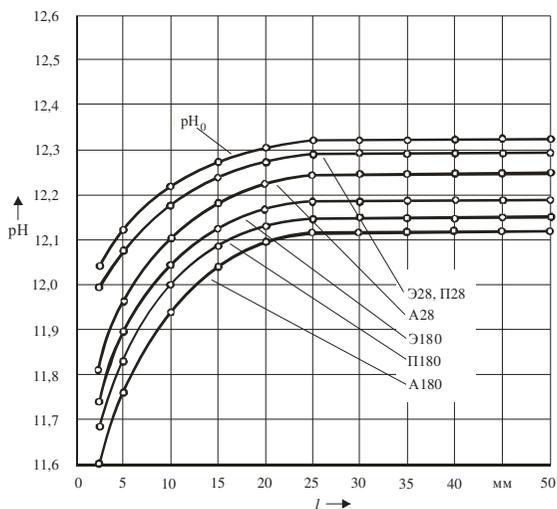


Рис. 8. Усредненные значения изменения показателя pH по сечению бетона класса по прочности C²⁰/₂₅:

pH₀ — сразу после ТВО; Э28, П28, А28 — после хранения 28 суток, соответственно, в эксикаторе, в помещении, в условиях открытой атмосферы; Э180, П180, А180 — после хранения 180 суток, соответственно, в эксикаторе, в помещении, в условиях открытой атмосферы

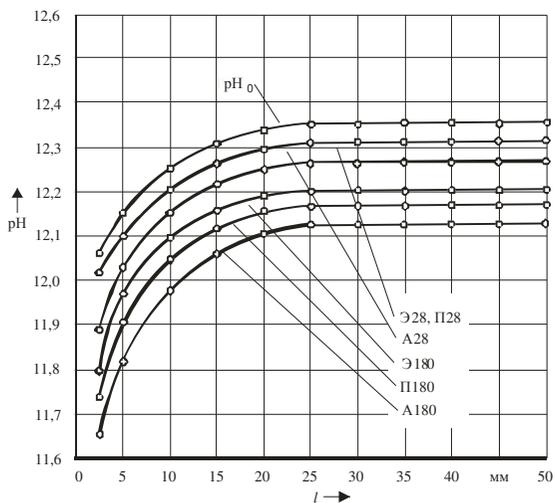


Рис. 9. Усредненные значения изменения показателя pH по сечению бетона класса по прочности $C^{25}/_{30}$: pH_0 – сразу после ТВО; Э28, П28, А28 – после хранения 28 суток, соответственно, в эксикаторе, в помещении, в условиях открытой атмосферы; Э180, П180, А180 – после хранения 180 суток, соответственно, в эксикаторе, в помещении, в условиях открытой атмосферы

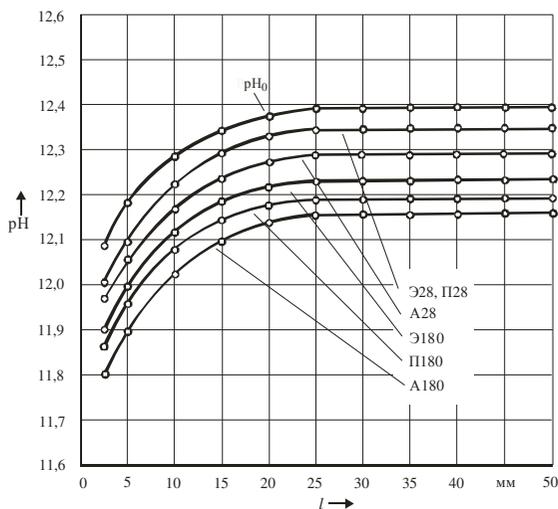


Рис. 10. Усредненные значения изменения показателя pH по сечению бетона класса по прочности $C^{30}/_{37}$: pH_0 – сразу после ТВО; Э28, П28, А28 – после хранения 28 суток, соответственно, в эксикаторе, в помещении, в условиях открытой атмосферы; Э180, П180, А180 – после хранения 180 суток, соответственно, в эксикаторе, в помещении, в условиях открытой атмосферы

Анализ полученных зависимостей показал:

– по ФФТ бетон не карбонизирован и по всему сечению сохраняет свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре;

– характер распределения показателя рН по сечению бетона сразу после его изготовления с применением ТВО и последующим хранением в различных атмосферных условиях идентичен для различных классов бетона по прочности (составов бетона);

– распределение показателя рН по сечению бетона подчиняется сложной экспоненциальной зависимости;

– на глубине более 25 мм независимо от класса бетона по прочности и условий хранения образцов показатели щелочности поровой жидкости стремятся к постоянным значениям. В поверхностных слоях (0–20 мм) наблюдается резкое снижение показателя рН;

– сразу после изготовления бетона (с применением ТВО) в зоне расположения арматуры (20–25 мм) бетон сохраняет защитные свойства по отношению к стальной арматуре ($\text{pH} > 11,8$);

– условия хранения значительно сказываются на изменении показателя щелочности поровой жидкости. Так, через 180 суток хранения бетонных образцов для различных классов бетона по прочности при хранении в эксикаторе значения показателя рН в зоне расположения арматуры (20–25 мм) уменьшились на 0,13–0,16, а при хранении в атмосферных условиях – на 0,20–0,24.

Приведенное выше показывает, что применение ФФТ позволяет очень условно определять глубину карбонизации бетона. Индикаторный метод не дает возможности количественно оценивать показатель рН в зоне расположения стальной арматуры, детально судить об его изменении в нейтрализованной зоне и за ее пределами и, как следствие, – о состоянии защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре. Таким образом, он не позволяет объективно оценивать и прогнозировать карбонизацию, и, следовательно, тем более, техническое состояние ЖБЭ.

Для объективной оценки карбонизации бетона и ее влияния на изменение состояния его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, требуется не только и не столько внедрение существующих европейских стандартов, а разработка Национальных приложений с методиками оценки и прогнозирования карбонизации бетона, основанными на результатах исследования изменения физических свойств бетона во времени и по сечению реальных ЖБЭ,

эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах. В основе методик должен быть положен физический метод (рН-метрия), позволяющий оценивать состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре не только в зоне ее расположения, но и по сечению бетона, что даст возможность с высокой степенью точности анализировать коррозионные свойства бетонов, как стандартных составов, так и вновь создаваемых, модифицированных комплексными добавками и значительно повысить объективность оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ, эксплуатирующихся в различных воздушных средах и 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. – 263с. – ISBN 978-985-468-978-4/.
3. 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.
4. Бабушкин, В.И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона / В. И. Бабушкин. – М. : Стройиздат, 1968. – 187 с.
5. Кудрявцев, И.А. Исследование карбонизации железобетонных конструкций с длительным сроком эксплуатации / И. А. Кудрявцев, В. П. Богданов // Материалы, технологии, инструменты. – 2000. – Т. 5, № 3. – с. 97–100.