

## НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 691.32.001.5

Л. В. ПЛИКУС, магистрант, А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

### ФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЕТОНА (рН-МЕТРИЯ) – ОСНОВА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА ПО ОТНОШЕНИЮ К СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЕ

Выполнен анализ оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре индикаторным методом. Приведена методика выполнения физического анализа бетона (рН-метрии). На основе анализа оценки защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре различными методами и анализа бетонов разных составов показаны преимущества рН-метрии.

**В**ведение. Современные методы технической диагностики позволяют с достаточной степенью точности оценивать основные параметры, определяющие несущую способность элементов и конструкций: прочность бетона на сжатие, физико-механические характеристики и степень коррозионных повреждений стальной арматуры. И прочностные характеристики бетона, и состояние стальной арматуры определяются внутренними процессами, происходящими как в бетоне, так и в арматуре, которые, развиваясь во времени, в зависимости от условий эксплуатации, степени агрессивности

среды и структурных характеристик бетона изменяются в различной степени.

Важнейшими факторами, определяющими долговечность эксплуатирующихся железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК) являются коррозионные процессы в бетоне и стальной арматуре, вызванные, в первую очередь, воздействием агрессивности внешней среды. При практически одинаковом внешнем виде бетона техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) за счет различного течения коррозионных процессов может разительно отличаться (рисунки 1–3).



Рисунок 1 – Фрагмент колонны крайнего ряда  
Условия эксплуатации – общественное здание. Срок эксплуатации – 10 лет.  
Стальная арматура находится в пассивном состоянии, следы коррозии отсутствуют



Рисунок 2 – Фрагмент продольных ребер плит покрытия  
Условия эксплуатации – сельскохозяйственное здание. Срок эксплуатации – 30 лет.  
Поверхностная коррозия стальной арматуры высокой степени интенсивности



Рисунок 3 – Фрагмент балки покрытия  
Условия эксплуатации – промышленное здание. Срок эксплуатации – 25 лет.  
Пластинчатая коррозия стальной арматуры высокой степени интенсивности

**Основная часть.** Основным видом коррозии бетона ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, является карбонизация. При карбонизации изменяется содержание карбонатной составляющей (КС) в бетоне, по мере накопления которой происходят структурные изменения цементного камня, приводящие к деградации бетона и снижению его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, способствуя развитию ее коррозии с последующим разрушением защитного слоя бетона.

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». 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].

В Республике Беларусь в соответствии с ТКП 45-1.04-37-2008 (02250) «Обследование строительных конструкций зданий и сооружений. Порядок проведе-

ния» состояние бетона по степени карбонизации также определяется фенолфталеиновой пробой. А единственный нормативный документ в данной области – СТБ 1481-2011 «Бетоны конструкций мостовых сооружений. Методы определения содержания хлоридов и степени карбонизации». Однако данный документ определяет не степень карбонизации, а значение поглощенного углекислого газа, в нем отсутствуют критерии оценки полученного результата, что вообще лишает смысла проведение анализа. Кроме того, необходимо отметить, что анализ сложен, необходима очень большая масса цементно-песчаной фракции, которую невозможно отобрать без причинения значительного ущерба ЖБЭ (ЖБК).

Долговечность ЖБЭ и ЖБК определяется состоянием защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре сразу после их изготовления и его изменением во времени. Сама по себе карбонизация не вызывает коррозии стальной арматуры, однако, развиваясь во времени, она изменяет щелочность бетона, измеряемую показателем pH – водородным показателем водной вытяжки цементного камня.

На сегодняшний день нет единого мнения о граничном значении показателя pH, 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  $\text{pH} < 11,8$  [3].

Лабораторные исследования авторами [4] 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  $\text{pH} \approx 10,3$ . Таким образом, значение  $\text{pH} = 10,3$  по ФФТ не является граничной величиной и очень условно определяет границу карбонизации и состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре. Кроме того, исследования [2] показывают, что при оценке степени карбонизации бетона значения толщины слоя, в котором он потерял защитные свойства по отношению к стальной арматуре, определенные индикаторным тестом и физическим методом (методом pH-метрии), могут отличаться в несколько раз. 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.

Индикаторный метод не позволяет количественно оценивать показатель pH в зоне расположения арматуры, детально судить о его изменении в нейтральной 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 и ЖБК. Для оценки карбонизации бетона и ее влияния на изменение состояния его защитных свойств по отношению к стальной арматуре требуется разработать методики, основанные на результатах исследования изменения физических свойств бетона во времени и по сечению ре-

альных ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах. В основе методик должен быть положен физический метод (метод pH-метрии), позволяющий оценивать состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре не только в зоне ее расположения, но и по сечению бетона.

**Физический анализ бетона.** При выполнении физического анализа для приготовления проб отбираются образцы бетона эксплуатируемых ЖБЭ (ЖБК) в зоне (по сечению бетона), выбранной для оценки защитных свойств бетона суммарным объемом не менее  $10 \text{ см}^3$ . Отдельные фрагменты объединяются в единичные пробы. Количество проб определяется в зависимости от вида и эксплуатационного состояния элементов (конструкций). Единичную пробу измельчают в фарфоровой ступке ударами, не растирая, отделяя крупный заполнитель. Из измельченной единичной пробы бетона формируется смешанная проба, которую квартованием сокращают до лабораторной пробы массой  $(10 \pm 2) \text{ г}$ . Лабораторную пробу сушат при температуре  $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 1 часа (за это время навеска приобретает постоянную массу), после чего порошок охлаждается в эксикаторе с прокаленным хлористым кальцием, затем дополнительно измельчается в фарфоровой ступке для отделения цементного камня от заполнителя. После этого из нее формируют среднюю аналитическую пробу массой  $2,5 \pm 0,005 \text{ г}$  путем просеивания через сито с сеткой № 01 по ГОСТ 6613.

При взвешивании порошков применяются весы не ниже 2-го класса точности (типа ВЛР-200) с погрешностью  $0,005 \text{ г}$ . Подготовленную пробу для защиты от воздействия окружающей среды хранят в стеклянной бюксе с притертой крышкой. Аналогично готовятся навески из проб, отобранных по сечению бетона ЖБЭ высверливанием с шагом 5–10 мм сверлом диаметром не менее  $\varnothing 28 \text{ мм}$ , только без операции дробления.

Величину показателя pH водных вытяжек цементного камня можно определять любым pH-метром, позволяющим оценивать значения pH в диапазоне не менее 7–13 pH и точностью не ниже  $0,01 \text{ pH}$ . На рисунке 4 приведено измерение водородного показателя поровой жидкости анализатором жидкости «ЭКСПЕРТ-001-1» со стеклянным электродом ЭС-10601 в НИЛ «СКОиФ» им. д.т.н., профессора И. А. Кудрявцева. Электродом сравнения служит электрод ЭВЛ-1МЗ.1. Ионмер позволяет измерять показатель pH в диапазоне от минус 20 до плюс 20 с точностью  $0,001 \text{ pH}$ .



Рисунок 4 – Исследование образца цементно-песчаной фракции анализатором жидкости «ЭКСПЕРТ-001-1»

Измерения pH проводят в следующем порядке:

- в мерную колбу вместимостью 50 см<sup>3</sup> засыпается навеска исследуемого порошка массой 2,5 г и заливается дистиллированной водой до метки. Полученная суспензия выстаивается в течение 1 ч при постоянном перемешивании через 10–15 мин;
- в стеклянный стакан вместимостью 50 см<sup>3</sup> заливается 30 см<sup>3</sup> исследуемого раствора водной вытяжки;
- в раствор погружаются электроды;
- значения показателя pH фиксируются после 3 мин выдержки индикаторного электрода в растворе.

Замеры производятся на неотфильтрованных растворах. Обычно анализируются две пробы (основная и контрольная) из образцов бетона рассматриваемого сечения (чаще в зоне расположения арматуры). В качестве зачетного принимается среднее значение pH из обеих проб.

В качестве примера оценки защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре различными методами на рисунке 5 приведены результаты исследования изменения во времени по сечению бетона показателя pH однотипных элементов – крайних и средних колонн коровника, эксплуатировавшегося в течение 35 лет.

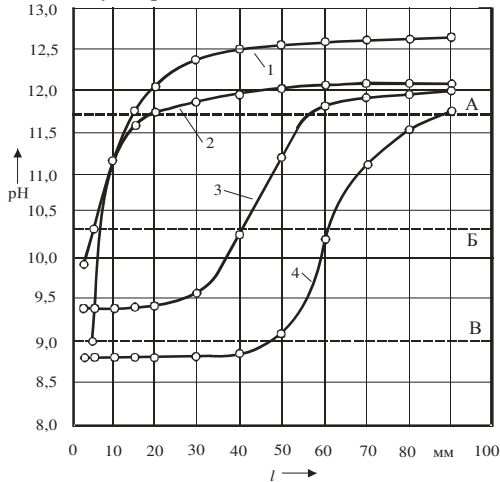


Рисунок 5 – Экспериментальные зависимости  $l$  – pH для колонн крайних и средних рядов:

- 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 pH-метрии (см. рисунок 5, 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. рисунок 5, линию «В»), 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 pH = 9) получаем (см. рисунок 5, 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 № 3, несмотря на то, что бетон прокарбонизировал на боль-

шую часть сечения, ее в процентном отношении определить невозможно.

В качестве примера определения состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре на рисунках 6 и 7 представлены результаты исследования изменения показателя pH как сразу после ТВО, так и после хранения образцов 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.

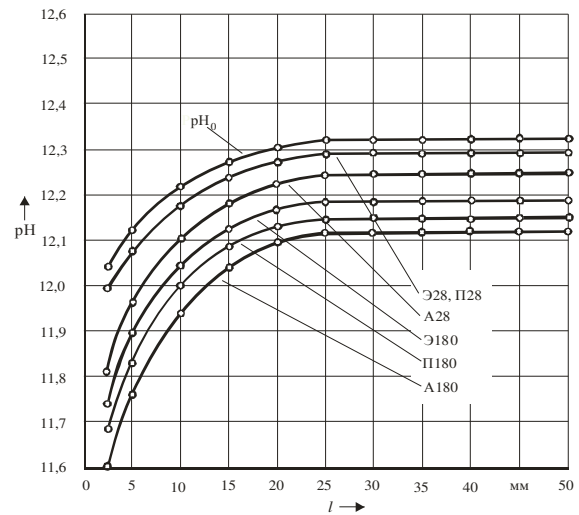


Рисунок 6 – Усредненные значения изменения показателя pH по сечению бетона класса по прочности  $C^{20}/_{25}$ : pH<sub>0</sub> – сразу после ТВО; Э28, П28, А28 – после хранения 28 суток, соответственно, в эксикаторе, помещении, условиях открытой атмосферы; Э180, П180, А180 – после хранения 180 суток, соответственно, в эксикаторе, помещении, условиях открытой атмосферы

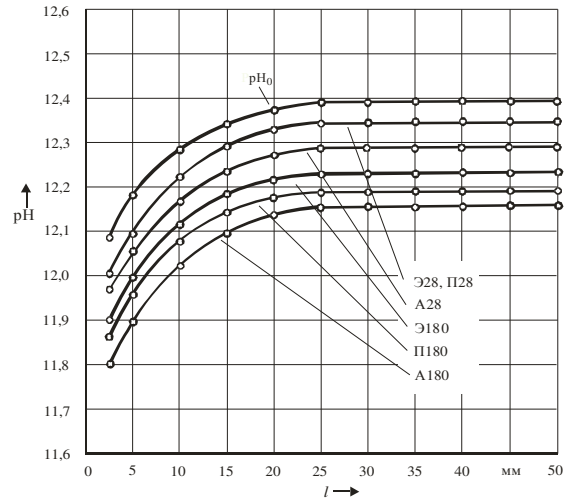


Рисунок 7 – Усредненные значения изменения показателя pH по сечению бетона класса по прочности  $C^{30}/_{37}$ : pH<sub>0</sub> – сразу после ТВО; Э28, П28, А28 – после хранения 28 суток, соответственно, в эксикаторе, помещении, условиях открытой атмосферы; Э180, П180, А180 – после хранения 180 суток, соответственно, в эксикаторе, помещении, условиях открытой атмосферы

Таблица 1 – Составы образцов бетона

Ориентировочный класс бетона по прочности на сжатие	Состав смеси, кг/м <sup>3</sup>				
	Ц	П	Щ	В	С-3, К=10, %
$C^{30}/_{37}$	540	610	1270	135	34
$C^{20}/_{25}$	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  $t = 16 \pm 2$  °С 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.

Анализ полученных зависимостей показывает:

- 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;

- 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 показателя 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 ( $\text{pH} > 11,8$ );

- независимо от условий хранения происходит снижение во времени показателя щелочности поровой жидкости. С увеличением класса бетона по прочности скорость снижения показателя рН уменьшается;

- в атмосферных условиях уже через 28 суток происходит значительное снижение показателя щелочности поровой жидкости независимо от класса бетона по прочности;

Получено 31.05.2014

**L. V. Plikus, A. A. Vasilyev.** Concrete physical analysis (pH-measurement) – the basis for estimation of concrete protective properties conditions relative to steel reinforcement.

It was made the analysis of protective properties conditions estimation relative to steel reinforcement by indicator method. It is given the method of concrete physical analysis (pH-measurement) performance. On the basis of estimation analysis of concrete protective properties relative to steel reinforcement by different methods and analysis of different composition concretes there were shown advantages of pH-measurement.

- 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.

**Заключение.** Физический анализ бетона (рН-метрия) позволяет не только наиболее точно определять границу потери бетоном своих защитных свойств по отношению к стальной арматуре, но и проследить ее изменение по сечению бетона:

- с высокой степенью точности анализировать коррозионные свойства бетонов как стандартных составов, так и вновь создаваемых, модифицированных комплексными добавками;

- на основании разработанных методик [2] значительно повысить объективность оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов и конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах и выбора мероприятий по их восстановлению.

#### Список литературы

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 **Бабушкин, В. И.** Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона / В. И. Бабушкин. – М. : Стройиздат, 1968. – 187 с.

4 **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.