

<https://doi.org/10.23746/2017-9-10>

**Васильев Александр Анатольевич**, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель (Беларусь)

**Alexander Vasilyev**, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department, Gomel (Belarus)

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В РАЗЛИЧНЫХ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ**

## **PERFECTION OF ESTIMATION AND PROGNOSTICATION OF THE TECHNICAL STATE OF THE REINFORCE-CONCRETE ELEMENTS AND CONSTRUCTIONS, EXPLOITED IN DIFFERENT ATMOSPHERIC TERMS**

### **АННОТАЦИЯ**

*По результатам многолетних исследований карбонизации бетона, как сразу после изготовления с применением тепловлажностной обработки, так и в железобетонных элементах (ЖБЭ) и конструкциях (ЖБК), эксплуатируемых различные длительные сроки в разных атмосферных условиях, разработаны системы расчетно-экспериментальных зависимостей изменения карбонатной составляющей во времени по сечению бетонов различных классов по прочности для разных эксплуатационных сред.*

*На основе изучения карбонизации бетонов различных составов предложены: понятие степени карбонизации бетона, методика ее определения и системы расчетно-экспериментальных зависимостей изменения степени карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности для разных эксплуатационных сред.*

По результатам исследований карбонизации бетона защитного слоя выявлена зависимость потери защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре и коррозионного состояния стальной арматуры от физико-химических показателей защитного слоя бетона.

Итоги многолетних обследований различных типов ЖБЭ с оценкой состояния стальной арматуры от значений физико-химических показателей цементно-песчаной фракции бетона защитного слоя позволили назначить количественные критерии качественной оценки технического состояния ЖБЭ и ЖБК с учетом карбонизации бетона.

По результатам исследования карбонизации от количества использованного цемента в поверхностном слое бетона в совокупности с исследованием карбонизации во времени по сечению бетонов различных составов получены системы регрессионных зависимостей для определения изначального содержания цемента в ЖБЭ и ЖБК. Предложены графические зависимости, диаграммы и номограммы для определения изначального содержания цемента в бетоне ЖБЭ и ЖБК, эксплуатируемых в различных атмосферных условиях.

Разработан комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, с учетом карбонизации бетона. Для автоматизации расчетов и повышения удобства использования полученными результатами предложен программный продукт – вычислительный комплекс «ОКАВА».

## **ABSTRACT**

*On results long-term researches of carbonating of concrete, both right after making with the use of menловлажностной treatment and in reinforce-concrete elements (FCE) and constructions (FCC), on-the-road the different protracted terms in different atmospheric terms are worked out systems of calculation-experimental dependences of change of carbonate constituent in time on the section of concretes of different classes on durability for different operating environments.*

*On the basis of study of carbonating of concretes of different compositions offer: concept of degree of carbonating of concrete, methodology of*

her determination and system of calculation-experimental dependences of change of carbonating degree in time on the section of concretes of different classes on durability for different operating environments.

On results researches of carbonating of concrete of protective layer dependence of loss of protective properties of concrete in relation to a gagers and corrosive state of gagers is educed on physical and chemical indexes.

The results of long-term inspections of different types of FCE with the estimation of the state of gagers from the values of physical and chemical indexes of cement-sandy faction of concrete of protective layer allowed to appoint the quantitative criteria of quality estimation of the technical state of FCE and FCC taking into account carbonating of concrete.

On results research of carbonating from the amount of the used cement in the superficial layer of concrete in totality by research of carbonating in time on the section of concretes of different compositions the systems of regressive dependences are got for determination of primordial maintenance of cement in FCE and FCC. Graphic dependences, diagrams and nomograms, offer for determination of primordial maintenance of cement in the concrete of FCE and FCC on-the-road in different atmospheric terms.

The complex method of estimation and prognostication of the technical state of FCE and FCC exploited in different air environments is worked out, taking into account carbonating of concrete. For automation of calculations and increase of comfort of the use a software product—calculable complex «OKAVA» offers the got results.

**Ключевые слова:** бетон, карбонизация, оценка технического состояния, комплексный метод.

**Keywords:** concrete, carbonating, estimation of the technical state, complex method.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Объективная оценка технического состояния ЖБЭ и ЖБК, а тем более ее прогнозирование – одна из самых актуальных задач сегодняшнего дня, поскольку основную долю строительных конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых в настоящее

время в разных воздушных средах, составляют ЖБЭ и ЖБК различных типов.

Несмотря на то, что в воздушных эксплуатационных средах присутствуют различные кислые газы, подавляющее большинство эксплуатируемых ЖБЭ и ЖБК в первую очередь подвержены влиянию карбонизации, поскольку углекислый газ воздуха присутствует в эксплуатационных средах постоянно, и его концентрация в воздухе в  $10\text{--}10^4$  раз выше концентрации других кислых газов. Вызывая нейтрализацию бетона, карбонизация, как следствие, определяет потерю бетоном защитных свойств по отношению к стальной арматуре, что в соответствующих условиях способствует образованию и развитию процессов коррозии стальной арматуры различной степени интенсивности. Карбонизации подвержены все ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующиеся в любых воздушных средах, что и обуславливает необходимость исследования ее влияния на изменение технического состояния ЖБЭ и ЖБК в процессе эксплуатации [1].

На сегодняшний день, несмотря на многочисленные исследования параметров карбонизации различными авторами, нет единого мнения о способах ее оценки и прогнозирования, тем более об оценке ее влияния на коррозионную стойкость бетона и железобетона.

Это объясняется прежде всего следующими факторами:

- реакция карбонизации объясняется на основе теоретического расчета проскока молекул  $\text{CO}_2$  вглубь бетона за границу нейтрализованного слоя до момента их полного поглощения, и глубина зоны реакции не превышает 1 мм, что не подтверждается экспериментальными результатами исследования взаимодействия углекислого газа воздуха с гидроксидом кальция, составляющей основу поровой жидкости бетона [2];
- общепринятый механизм определяет течение карбонизации линейно вглубь бетона, что совершенно не соответствует протеканию карбонизации в реально эксплуатируемых ЖБЭ и ЖБК [2];
- скорость карбонизации определяется эффективным коэффициентом диффузии  $\text{CO}_2$  ( $D'$ ), искусственно введенным

для увязки параметров карбонизации с величиной прокарбонизированного слоя. Это, по-видимому, и определяет различие у разных авторов величин  $D'$  на несколько порядков для бетонов, выполненных из одинаковых составов и исследовавшихся в схожих условиях, отсутствие единого мнения об изменении плотности, пористости, прочности бетона под воздействием карбонизации и влиянии технологических факторов на изменение карбонизации [2]. Кроме того, величина  $D'$  считается постоянной для одного состава бетона, что не подтверждается авторскими экспериментальными результатами [2].

- в зоне нанесения фенолфталеина ФФТ показывает изменение показателя
- рН в пределах 8,3 до 14, а в зоне резкого перехода цвета цементно-песчаной фракции значение показателя рН составляет  $\approx 10,3$  [3];
- общепринято, что при рН = 9,0 бетон полностью теряет свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре [1], а в соответствии с термодинамическими расчетами В.И. Бабушкина [4], коррозия стальной арматуры возможна при рН < 11,8. Таким образом, значение рН = 10,3 не является граничным и никак не позволяет корректно судить о степени потери защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре.

Кроме того, практически нет работ по исследованию влияния карбонизации на техническое состояние железобетона, соответственно, отсутствуют критерии оценки потери защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, критерии оценки состояния бетона и технического состояния ЖБЭ и ЖБК.

Отсутствие единого мнения об оценке карбонизации и ее влиянии на коррозионное состояние ЖБЭ и ЖБК определяется применением метода определения толщины прокарбонизированного бетона, основанного на фенолфталеиновом тесте (ФФТ), не позволяющего оценивать защитные свойства бетона ни в переходной зоне, ни за ее пределами, т.е. объективно оценивать и прогнозировать величину и скорость развития карбонизации, ее влияние на изменение защитных свойств бетона по отношению

к стальной арматуре и как следствие – техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) [1, 2].

Таким образом, становится ясно, что существующая оценка и прогнозирование карбонизации бетона, основанные на ФФТ, являются очень частным случаем и не могут быть рекомендованы для использования при оценке и прогнозировании технического состояния проектируемых и реально эксплуатируемых ЖБЭ и ЖБК.

Оценка карбонизации и прогнозирование ее развития важны, прежде всего, с точки зрения изменения во времени защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре и, соответственно, влияния карбонизации на изменение технического состояния ЖБЭ и ЖБК, поскольку именно их состояние определяет техническое состояние подавляющего большинства эксплуатируемых зданий и сооружений.

Для создания методик, позволяющих реально оценивать и прогнозировать техническое состояние ЖБЭ и ЖБК с учетом карбонизации бетона и ее влияния на изменение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, необходимо исследование изменения карбонизации по сечению бетонов различных составов для основных классов по прочности сразу после изготовления бетона (начальной карбонизации) и во времени в зоне расположения стальной арматуры для бетонов различных классов по прочности; разработка расчетно-экспериментальной модели карбонизации бетона; исследование зависимости коррозионного состояния стальной арматуры от состояния защитного слоя бетона и зависимости степени карбонизации бетона от показателя щелочности поровой жидкости бетона; разработка критериев оценки технического состояния железобетонных элементов и конструкций с учетом карбонизации бетона.

Исследования и оценка параметров карбонизации должны выполняться на основе использования определения показателей водной вытяжки цементного камня (показателя рН), поскольку именно он определяет защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре и карбонатной составляющей (показателя КС), т.к. содержание карбонатов определяет нейтрализацию бетона).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для возможности объективной оценки и прогнозирования карбонизации и ее влияния на изменения защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре были выполнены многочисленные исследования параметров карбонизации (показателей КС и рН) и их влияния на коррозионное состояние стальной арматуры в зависимости от эксплуатационных условий. Исследования выполнялись на лабораторных образцах различных составов и образцах, отобранных из элементов и конструкций, эксплуатируемых различные сроки в разных атмосферных условиях. Проверка значимости полученных результатов осуществлялась методами математической статистики.

По результатам исследований карбонизации по сечению бетонов различных составов на классы по прочности  $C^{12}/_{15}-C^{30}/_{37}$  сразу после изготовления с применением ТВО и изменения карбонизации во времени в зоне расположения стальной арматуры в бетонах различных классов по прочности получены системы расчетно-экспериментальных зависимостей изменения карбонатной составляющей и степени карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности для эксплуатационных условий открытой атмосферы, сельскохозяйственных зданий, общественных зданий и промышленных – с неагрессивной эксплуатационной средой. Методика получения расчетно-экспериментальных зависимостей изменения карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности для разных эксплуатационных сред и результаты исследований приведены в [5].

В общем виде эвристическая модель карбонизации во времени по сечению бетона  $КС(t, l)$

$$КС(t, l) = \beta_0 + \left( \alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t} - \beta_0 \right) e^{\left( \left( \frac{15 - \beta_2}{\beta_3} \right)^{\beta_4} - \left( \frac{l - \beta_2}{\beta_3} \right)^{\beta_4} \right)}, \quad (1)$$

где  $t$  – величина прогнозного периода, лет,  $l$  – исследуемая толщина защитного слоя бетона, мм,  $\beta_0 - \beta_4$  – коэффициенты, определяющие соответственно:  $\beta_0$  – наименьшее значение  $КС(l)$  [обычно  $\beta_0 =$

КС ( $l > 100$  мм)];  $\beta_1$  – разность минимального и максимального значений КС( $l$ );  $\beta_2$  – минимальное значение глубины  $l$  (обычно  $\beta_2 = 0$ );  $\beta_3$  – форму кривой и координаты точек перегиба,  $\beta_3 > 0$ ;  $\beta_4$  – форму кривой и координаты точек перегиба,  $\beta_4 > 0$ ,  $\alpha_0$  – показатель начальной карбонизации, %;  $\alpha_1$  – показатель скорости карбонизации.

Параметры  $\beta_i$  ( $i = 0 \dots 4$ ) нелинейной функции (1) определялись численно на ЭВМ методом наименьших квадратов. При описании регрессионных уравнений были подобраны параметры  $\beta_0 - \beta_4$  для каждого класса бетона, соответственно, хоть и близки, но отличаются, что не дает возможности их использовать при создании единой системы уравнений – модели, позволяющей прогнозировать изменение генерального элемента (показателя КС<sub>0</sub>) для любого класса бетона по прочности по значению показателя, в первую очередь определяющего карбонизацию бетона (количеству использованного цемента). Поэтому в дальнейшем подбор параметров  $\beta_i$  осуществляли из условия равенства показателей  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  и  $\beta_4$  для всех классов бетона по прочности. Это несколько снизило показатель  $R^2$  для каждого регрессионного уравнения, но позволило создать систему взаимосвязанных уравнений с достаточной точностью.

В качестве примера в таблице 1 приведены в аналитическом виде регрессионные зависимости изменения карбонатной составляющей во времени по сечению бетонов классов по прочности  $C^{12}/_{15} - C^{30}/_{37}$  для условий повышенной агрессивности открытой атмосферы.

Таблица 1

**Регрессионные зависимости карбонизации различных классов бетона по прочности для условий повышенной агрессивности среды**

| Класс бетона по прочности на сжатие | Регрессионная зависимость  |
|-------------------------------------|--|
| $C^{12}/_{15}$                      | $КС(l, t) = 2,39 + (0,500 + 0,962\sqrt{t}) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)},$ $КС(l, t)_{\max} = 27,3\alpha$ |



| Класс бетона по прочности на сжатие | Регрессионная зависимость   |
|-------------------------------------|---|
| $C^{16}/_{20}$                      | $KC(l,t) = 2,77 + \left(0,565 + 0,906\sqrt{t}\right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)},$ $KC(l,t)_{\max} = 36,1\alpha$ |
| $C^{18}/_{22,5}$                    | $KC(l,t) = 3,04 + \left(0,600 + 0,869\sqrt{t}\right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)},$ $KC(l,t)_{\max} = 39,6\alpha$ |
| ...                                 | .....   |
| $C^{28}/_{35}$                      | $KC(l,t) = 4,12 + \left(0,760 + 0,717\sqrt{t}\right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)},$ $KC(l,t)_{\max} = 56,3\alpha$ |
| $C^{30}/_{37}$                      | $KC(l,t) = 4,32 + \left(0,790 + 0,692\sqrt{t}\right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)},$ $KC(l,t)_{\max} = 58,8\alpha$ |

В представленных зависимостях  $\alpha$  – степень гидратации цемента. Ее значения сразу после изготовления и изменение во времени рассчитывали по методике д.т. н., проф. В. В. Бабицкого.

Поскольку значения показателя КС зависят от количества использованного цемента, одно и то же численное значение карбонатной составляющей для одних бетонов может свидетельствовать о начале карбонизации, а для других – уже о полной карбонизации в рассматриваемом сечении. Поэтому для объективной оценки карбонизации бетона необходимо использование такого параметра, который независимо от состава бетона позволял бы оценивать его коррозионное состояние и влияние карбонизации на снижение защитных свойств по отношению к стальной арматуре. Таким показателем является степень карбонизации бетона (показатель СК) – величина, определяющая процент гидроокиси

кальция и гидратированных клинкерных материалов, перешедших в карбонаты на разной глубине бетона. Показатель СК рассчитывается из пропорции как процентное отношение измеренного фактического значения карбонатной составляющей (КС) к его максимальному значению ( $КС_{\max}$ ). Методика определения показателя  $КС_{\max}$  представлена в [6].

Предложенный показатель – СК – не имеет никакого отношения к общепринятому понятию степени карбонизации, в соответствии с которым она определяется количеством поглощенного бетоном  $CO_2$ .

По предложенной методике получены расчетно-экспериментальные зависимости изменения степени карбонизации во времени по сечению бетонов классов по прочности  $C^{12}/_{15} - C^{30}/_{37}$  для различных эксплуатационных условий.

В качестве примера в таблице 6 приведены в аналитическом виде регрессионные зависимости изменения степени карбонизации во времени по сечению бетонов классов по прочности  $C^{12}/_{15} - C^{30}/_{37}$  для условий повышенной агрессивности открытой атмосферы.

Таблица 2

**Регрессионные зависимости карбонизации различных классов бетона по прочности для условий повышенной агрессивности среды**

| Класс бетона по прочности на сжатие | Регрессионная зависимость   |
|-------------------------------------|---|
| $C^{12}/_{15}$                      | $СК(l,t) = 2,39 + \left(0,500 + 0,962\sqrt{t}\right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)} / (19,5\alpha)$ |
| $C^{16}/_{20}$                      | $СК(l,t) = 2,77 + \left(0,565 + 0,906\sqrt{t}\right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)} / (25,8\alpha)$ |
| ...                                 | .....   |
| $C^{30}/_{37}$                      | $СК(l,t) = 4,32 + \left(0,790 + 0,692\sqrt{t}\right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)} / (42,0\alpha)$ |

По результатам многолетних исследований коррозионного состояния стальной арматуры от физико-химических показателей защитного слоя бетона для оценки состояния стальной арматуры, выявляемой после вскрытия защитного слоя бетона, предложена балльная система (таблица 3).

Таблица 3

### Оценка состояния стальной арматуры

| Степень коррозии стальной арматуры (балл) | Граничные значения показателя рН | Внешние признаки коррозии стальной арматуры                     |
|---|----------------------------------|---|
| 0   | > 11,80                          | Чистая поверхность  |
| I   | 11,80–10,80                      | Сплошная коррозия глубиной до 0,20 мм                           |
| II  | <10,80–10,30                     | То же глубиной до 0,5 мм (малая степень интенсивности)          |
| III                                       | < 10,30–9,80                     | То же глубиной до 0,90 мм (средняя степень интенсивности)       |
| IV  | < 9,80–9,00                      | То же глубиной до 1,50 мм (высокая степень интенсивности)       |
| V   | < 9,00                           | То же глубиной более 1,50 мм (повышенная степень интенсивности) |

С учетом того, что именно показатель рН определяет защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре, по результатам многолетних исследований состояния стальной арматуры в зависимости от показателя рН предложено шесть категорий оценки потери защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре (таблица 4).

Таблица 4

### Категории потери защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре

| Категория потери защитных свойств бетона | Граничные значения показателя рН | Состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре           |
|--|----------------------------------|--|
| 0  | >11,80                           | Бетон полностью сохраняет защитные свойства по отношению к стальной арматуре |

| Категория потери защитных свойств бетона | Граничные значения показателя рН | Состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре                 |
|--|----------------------------------|--|
| I  | 11,80–10,80                      | Потеря защитных свойств по отношению к стальной арматуре. Начало деградации бетона |
| II                                       | <10,80–10,30                     | Деградация бетона малой степени интенсивности                                      |
| III                                      | <10,30–9,80                      | Деградация бетона средней степени интенсивности                                    |
| IV                                       | <9,80–9,00                       | Деградация бетона высокой степени интенсивности                                    |
| V  | <9,00                            | Полная деградация бетона   |

Для установления зависимости от карбонизации бетона состояния его защитных свойств по отношению к стальной арматуре исследовали показатели рН и СК в зоне расположения стальной арматуры. Полученная взаимосвязь между ними с учетом математической обработки представлена в таблице 5.

Таблица 5

### Взаимосвязь параметров рН и СК по сечению бетона

| Область значений показателя рН | Межквартильный размах показателя СК <sub>%</sub> с вероятностью 0,5 |
|--------------------------------|---|
| >11,80                         | 12,00–13,00   |
| 11,80–11,30                    | 14,00–18,00   |
| 11,30–10,80                    | 18,00–23,00   |
| 10,80–10,30                    | 28,00–34,00   |
| 10,30–9,80                     | 38,50–43,00   |
| 9,80–9,00                      | 51,00–66,00   |
| <9,00                          | 81,00–93,00   |

Полученная таким образом взаимосвязь состояния стальной арматуры, состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре со степенью потери защитных свойств при карбонизации для любого сечения бетона представлена в таблице 6.

Таблица 6

**Взаимосвязь состояния стальной арматуры, параметров pH и СК по сечению бетона**

| Степень коррозии стальной арматуры | Категория потери защитных свойств бетона | Граничные значения показателя pH | Степень карбонизации, СК | Граничные значения показателя СК, % |
|------------------------------------|--|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 0                                  | 0  | > 11,80                          | 0                        | < 13                                |
| I                                  | I  | 11,80–10,80                      | I                        | 13–26                               |
| II                                 | II                                       | < 10,80–10,30                    | II                       | > 26–36                             |
| III                                | III                                      | < 10,30–9,80                     | III                      | > 36–47                             |
| IV                                 | IV                                       | < 9,80–9,00                      | IV                       | > 47–74                             |
| V                                  | V  | < 9,00                           | V                        | > 74                                |

Длительная эксплуатация ЖБЭ и ЖБК в условиях агрессивности воздушных сред влияет на их долговечность, уменьшая остаточный ресурс, который значительно изменяется в зависимости от срока и условий эксплуатации.

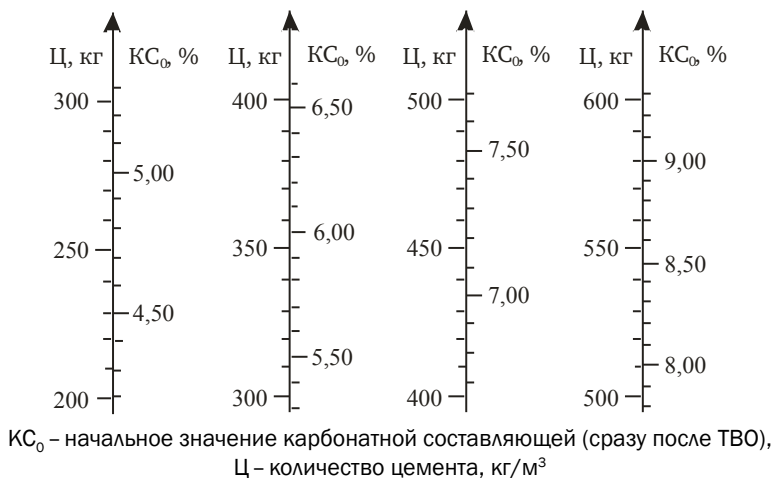
Результаты обследования различных типов ЖБЭ с использованием химического анализа и оценка состояния стальной арматуры от значений физико-химических показателей цементно-песчаной фракции бетона защитного слоя позволили назначить количественные критерии качественной оценки технического состояния ЖБЭ и ЖБК (таблица 7) в зависимости от степени карбонизации бетона.

### Критерии оценки технического состояния ЖБЭ и ЖБК с учетом карбонизации бетона

| СК,<br>% | Состояние бетона и стальной арматуры.<br>Техническое состояние железобетонного элемента<br>(ТКП 45–1.04–305–2016 (33020))   |
|----------|---|
| < 13     | <p>Структурные свойства бетона находятся в уровне свежеприготовленного. Происходит плавное снижение показателя рН, свидетельствующее о последующей нейтрализации бетона и падении его защитных свойств по отношению к стальной арматуре. Показатель рН приближается к границе, после которой бетон полностью нейтрализуется и потеряет свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре, что вызовет возможность развития ее коррозии в условиях переменной влажности.</p> <p>Бетон сохраняет защитные свойства по отношению к стальной арматуре, стальная арматура – в пассивном состоянии.</p> <p>0 степень карбонизации бетона, потери бетоном защитных свойств по отношению к стальной арматуре и коррозии стальной арматуры.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) – хорошее</p>             |
| 13–26    | <p>Начало деградации бетона. Происходит снижение показателя рН ниже граничного значения, свидетельствующее о потере бетоном защитных свойств по отношению к стальной арматуре.</p> <p>I степень карбонизации бетона, потери им защитных свойств по отношению к стальной арматуре и коррозии стальной арматуры.</p> <p>Образование сплошной коррозии стальной арматуры глубиной до 0,1 мм на отдельных участках при СК = 13–18%.</p> <p>Образование сплошной коррозии стальной арматуры глубиной до 0,2 мм на отдельных участках при СК = 18–26%.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ – удовлетворительное</p>  |
| Св.26–36 | <p>Развитие деградационных процессов в бетоне.</p> <p>Деградация бетона малой степени интенсивности.</p> <p>II степень карбонизации бетона, потери им защитных свойств по отношению к стальной арматуре и коррозии стальной арматуры.</p> <p>Возникновение сплошной коррозии стальной арматуры глубиной до 0,3 мм на отдельных участках, уменьшение площади сечения на 25% стальной арматуры диаметром 10 мм, образование и раскрытие волосяных трещин в местах расположения рабочей и конструктивной стальной арматуры диаметров до 10 мм, образование волосяных трещин в местах расположения рабочей и конструктивной стальной арматуры диаметров более 10 мм с недостаточной толщиной защитного слоя бетона при СК = 26–30%.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) – не вполне удовлетворительное</p> |

| СК,<br>% | Состояние бетона и стальной арматуры.<br>Техническое состояние железобетонного элемента<br>(ТКП 45–1.04–305–2016 (33020))   |
|----------|---|
| Св.26–36 | <p>II степень карбонизации бетона, потери им защитных свойств по отношению к стальной арматуре и коррозии стальной арматуры.</p> <p>Возникновение сплошной коррозии стальной арматуры глубиной до 0,5 мм на многочисленных участках, уменьшение площади сечения на 25% арматуры диаметром 14 мм, раскрытие волосяных трещин в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры при СК = 30–36%.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) – не вполне удовлетворительное</p>  |
| Св.36–47 | <p>Деградация бетона средней степени интенсивности.</p> <p>III степень карбонизации бетона, потери им защитных свойств по отношению к стальной арматуре и коррозии стальной арматуры.</p> <p>Возникновение сплошной коррозии стальной арматуры глубиной до 0,9 мм на многочисленных участках, уменьшение площади сечения на 25% арматуры диаметром 25 мм, уменьшение площади сечения на 30% арматуры диаметром 14 мм, интенсивное раскрытие трещин в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры, отслаивание защитного слоя на отдельных участках. Оголение стальной арматуры в местах недостаточной толщины защитного слоя бетона.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) – не вполне удовлетворительное</p>                              |
| Св.47–74 | <p>Деградация бетона высокой степени интенсивности.</p> <p>IV степень карбонизации бетона, потери им защитных свойств по отношению к стальной арматуре и коррозии стальной арматуры.</p> <p>Возникновение сплошной коррозии стальной арматуры глубиной до 1,5 мм на многочисленных участках, уменьшение площади сечения на 30% арматуры диаметром 22 мм, интенсивное раскрытие трещин в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры, отслаивание защитного слоя на многочисленных участках и его частичное разрушение с оголением арматуры на отдельных участках. Полное разрушение на отдельных участках стальной арматуры диаметрами до 10 мм.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) – неудовлетворительное</p>                          |
| Св. 74   | <p>Полная деградация бетона. Потеря сцепления цементного камня с заполнителем.</p> <p>V степень карбонизации бетона, потери им защитных свойств по отношению к стальной арматуре и коррозии стальной арматуры.</p> <p>Возникновение сплошной коррозии стальной арматуры глубиной более 1,5 мм на многочисленных участках, уменьшение площади сечения на 30% арматуры диаметром 25 мм, интенсивное раскрытие трещин в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры, отслаивание защитного слоя на многочисленных участках и его полное разрушение с оголением арматуры. Полное разрушение стальной арматуры диаметрами до 12 мм на многочисленных участках.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) – неудовлетворительное (предаварийное)</p> |

На основании исследования карбонизации была выявлена линейная зависимость карбонизации бетона в поверхностном слое от количества использованного цемента. Зависимость карбонизации бетона в поверхностном слое от количества использованного цемента приведена на рисунке 1.

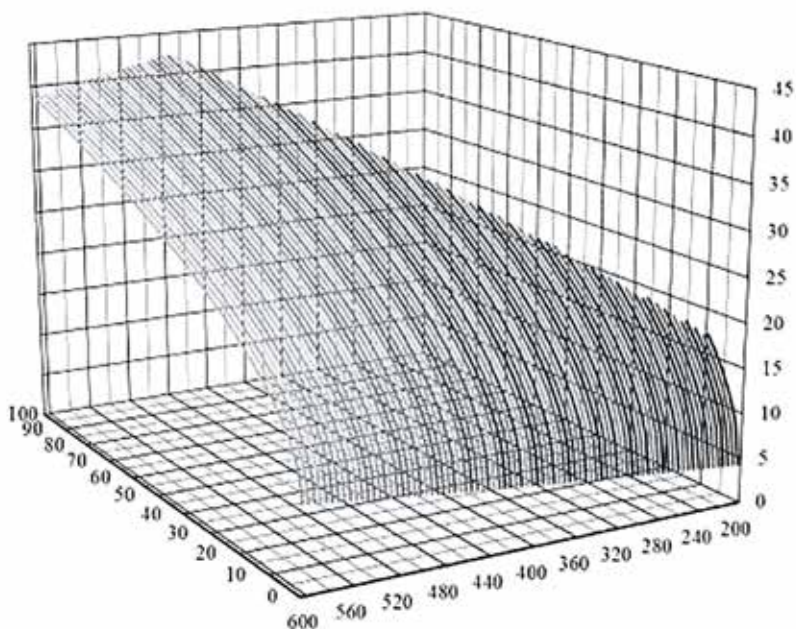


**Рисунок 1.** Зависимость КС<sub>0</sub> – Ц (для сечения 2,5 мм)

Полученная зависимость в совокупности с результатами исследования карбонизации во времени по сечению бетонов различных составов позволили предложить системы регрессионных зависимостей карбонизации от количества использованного цемента составов бетона с Ц = 200–600 кг/м<sup>3</sup> для различных эксплуатационных условий. В качестве примера на рисунке 2 приведена в графическом виде полученная зависимость для условий эксплуатации сельскохозяйственных зданий.

Приведенные зависимости позволяют использовать их для определения изначального содержания цемента в ЖБЭ и ЖБК. Для удобства использования предложены графические зависимости, диаграммы и номограммы для определения изначального содержания цемента в бетоне ЖБЭ и ЖБК, эксплуатируемых в различных атмосферных условиях. Они позволяют оценивать количество использованного цемента с шагом 5 кг/м<sup>3</sup>.



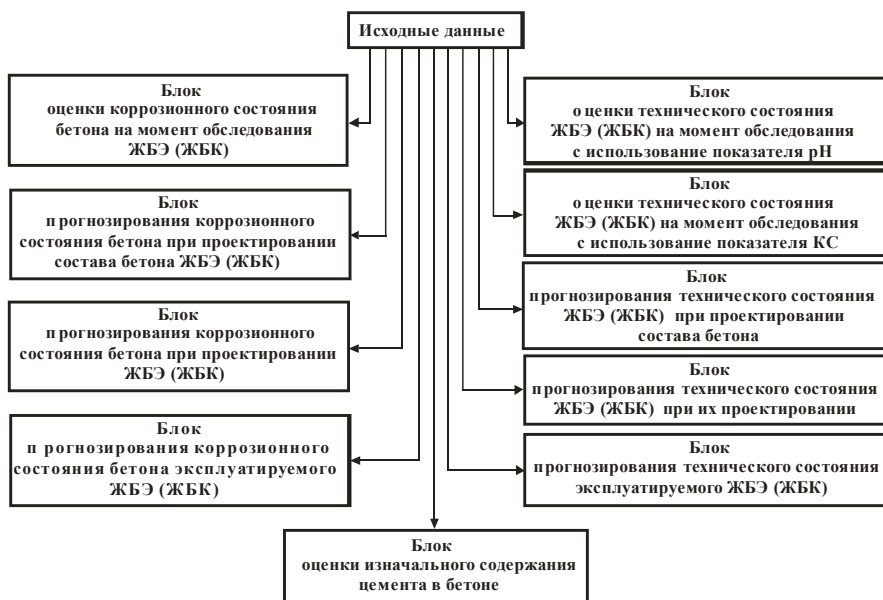


**Рисунок 2.** Расчетно-экспериментальная зависимость  $КС = f(l, t, Ц)$  для условий сельскохозяйственных помещений области ускоренной карбонизации

Результаты исследования карбонизации бетона и ее влияния на изменение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре и коррозионное состояние стальной арматуры (коротко представленные выше) позволили разработать комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях, с учетом карбонизации бетона, который, по сути, является дополнительным неразрушающим методом обследования ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах.

Он представляет собой набор методик, и его укрупненная структурная схема приведена на рисунке 3.

Для автоматизации расчетов, реализации предложенных оценочных и прогнозных моделей разработан соответствующий программный продукт – вычислительный комплекс «ОКАВА».



**Рисунок 3.** Структурная схема комплексного метода оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ (ЖБК), эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях, с учетом карбонизации бетона

Предлагаемый комплексный метод позволяет:

- оценивать и прогнозировать изменение во времени по сечению ЖБЭ и ЖБК карбонизацию бетона (карбонатную составляющую и степень карбонизации) для различных сроков и условий эксплуатации;
- по полученным фактическим параметрам карбонизации уточнять условия эксплуатации;
- оценивать и прогнозировать изменение во времени по сечению бетона ЖБЭ и ЖБК состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре;
- по предложенным системам расчетно-экспериментальных зависимостей изменения во времени по сечению бетона показателей карбонизации и «Критериям оценки технического состояния ЖБЭ и ЖБК с учетом карбонизации бетона» оценивать и прогнозировать техническое состояние ЖБЭ и ЖБК;
- определять изначальное содержание цемента в бетоне.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Выполненные исследования позволяют на базе химического анализа образцов бетона значительно повысить объективность как оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ и ЖБК для различных эксплуатационных условий, так и мероприятий по их восстановлению для дальнейшей длительной, безопасной эксплуатации зданий и сооружений.

Необходимо отметить, что параметры карбонизации можно оценивать и прогнозировать как на стадии проектирования, так и для эксплуатируемых различные сроки в разных атмосферных условиях ЖБЭ и ЖБК.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
2. Васильев, А. А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 304 с.
3. Кудрявцев, И. А. Исследование равномерности глубины залегания карбонизированного слоя по глубине в балке пролетного строения / И. А. Кудрявцев, В. П. Богданов // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений, подготовки инженерных кадров для строительной отрасли : материалы VII Междунар. науч.-практ. семинара. – Минск : Стринко, 2001. – С. 227–229.
4. Бабушкин, В. И. Термодинамика силикатов / В. И. Бабушкин, Г. М. Матвеев, О. П. Мчедлов-Петросян; под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна. – 4-е изд.– М.: Стройиздат, 1986. – 408 с.
5. Васильев, А. А. Расчетно-экспериментальная модель карбонизации бетона / А. А. Васильев ; М-во трансп. и

## REFERENCES

1. Vasilyev A. A. *Karbonizaciya i ocenka povrezhdennosti zhelezo-betonnyh konstrukcij* [Carbonating and estimation of damaged of reinforce-concrete constructions. Gomel: BelGUT, 2012. 263 p. (rus)
2. Vasilyev A. A. *Karbonizaciya betona (ocenka i prognozirovanie)* [Carbonating of concrete (estimation and prognostication). Gomel: BelGUT, 2013. 304 p. (rus)
3. Kudryavcev I. A., Bogdanov V. P. Issledovanie ravnomernosti glubiny zaleganiya karbonizirovannogo sloya po glubine v balke proletnogo stroeniya [Research of evenness of depth of bedding of the carbonated layer on a depth in the beam of flight structure] . *Problemy tekhnologii proizvodstva stroitel'nyh materialov, izdelij i konstrukcij, stroitel'stva zdaniy i sooruzhenij, podgotovki inzhenernyh kadrov dlya stroitel'noj otrasli : materialy VII Mezhdunar. nauch.-prakt. seminara*. Minsk: Strinko, 2001. pp. 227–229. (rus)
4. Babushkin V. I. Matveev G. M., Mchedlov-Petrosyan O. P. *Termodinamika silikatov* [Thermodynamics of silicates]. Moscow: Strojizdat, 1986. 408 p. (rus)
5. Vasilyev A. A. *Raschetno-ehksperimentalnaya model karbonizacii betona* [Calculation-experimental model of carbonating of concrete. Gomel: BelGUT, 2016. 263 p. (rus)

*Статья поступила в редакцию 17.11.2017.*