

УДК 691.32 : 620.193/.199

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАРБОНАТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ (ПОКАЗАТЕЛЯ КС) ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ ФРАКЦИИ БЕТОНА

Показана роль неразрушающего контроля в оценке качества основных параметров бетонных и железобетонных элементов и конструкций. Обоснована необходимость определения и оценки карбонатной составляющей бетона. По результатам многолетних исследований карбонизации бетона как сразу после изготовления, так и эксплуатируемых различные сроки в разных атмосферных условиях железобетонных элементов предложен экспресс-метод определения карбонатной составляющей цементно-песчаной фракции бетона. Приведены основные определения и общие положения экспресс-метода, подготовка к испытаниям и методика проведения испытаний.

**Введение.** Основной целью диагностики железобетонных элементов и конструкций строительных объектов является определение соответствия между их реальным техническим состоянием, фактической несущей способностью, эксплуатационной пригодностью и их расчетными схемами, архитектурно-строительными и другими нормативными требованиями современной эксплуатации. Сегодня она осуществляется с использованием различных средств измерений, действие которых основано на использовании разных методов неразрушающего контроля. Контролируются такие параметры и показатели, как прочность бетона на сжатие, толщина защитного слоя, дефекты и повреждения бетона, расположение стальной арматуры, диаметр стальной арматуры и степень ее коррозионных повреждений; влажность материалов; линейные и угловые размеры, отклонения элементов различных конструкций от горизонтали или вертикали и др. Для оценки их значений применяются различные приборы и оборудование, принцип действия которых основан на методах неразрушающего контроля [1].

Неразрушающий контроль (НК) – установление свойств и параметров объекта, при котором не должна быть нарушена его пригодность к использованию и эксплуатации. В соответствии с ГОСТ 18353 неразрушающий контроль подразделяют на десять видов в зависимости от физических явлений, положенных в его основу: электрический, тепловой, радиационный, вихрековый, радиоволновый, оптический, акустический, проникающими веществами, виброакустический и магнитный. Каждый вид НК осуществляют методами, классифицируемыми по следующим признакам: характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом; первичным информативным параметрам; способам получения первичной информации.

Современные методы НК позволяют с достаточной степенью точности оценивать основные параметры, определяющие несущую способность элементов и конструкций: прочность бетона на сжатие и степень коррозионных повреждений арматуры. Однако и прочностные характеристики бетона, и состояние стальной арматуры определяются внутренними процессами, которые происходят как в бетоне, так и в арматуре, в процессе эксплуатации не остаются постоянными и в зависимости от условий эксплуатации и степени агрессивности среды, под воздействием эксплуатационных нагрузок, изменяются в различной степени [2].

Важнейшими факторами, определяющими техническое состояние эксплуатирующихся железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК) являются коррозионные процессы в бетоне и стальной арматуре, являющиеся следствием воздействия агрессивных факторов внешней среды [3].

Основным видом коррозии бетона ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, является карбонизация. Взаимодействие углекислого газа воздуха с гидроксидом кальция, составляющей основу поровой жидкости бетона, приводит к образованию пленки карбонатов в зоне реакции. В реальных условиях эксплуатации периодическое изменение температуры и влажности вызывает изменение уровня раствора в поровой структуре бетона, причем в двух противоположных направлениях: при испарении влаги и при насыщении пор, нарушая сплошность пленки из-за возникающих деформаций. Происходит отложение карбонатов по периметру стенок пор, и интенсивность их накопления определяется в первую очередь эксплуатационными условиями [4].

По мере накопления карбонатов происходят структурные изменения цементного камня, приводящие к деградации бетона и снижению его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, способствуя возникновению (в определенных условиях) и развитию коррозии стальной арматуры различной степени интенсивности. Интенсификация этих процессов в итоге приводит к потере несущей способности ЖБЭ (ЖБК) [4].

Для оценки карбонизации бетона в Республике Беларусь используют единственный нормативный документ в данной области – СТБ 1481–2011 «БЕТОНЫ КОНСТРУКЦИЙ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ. Методы определения содержания хлоридов и степени карбонизации» [5]. В данном документе приведена методика определения количества поглощенного углекислого газа, так как общепринято под степенью карбонизации бетона подразумевать количество поглощенного  $\text{CO}_2$ . Безусловно, это не логично и, кроме того, ни в одной науке степень не определяется количеством. Также необходимо отметить, что анализ сложен, для определения количества поглощенного  $\text{CO}_2$  используется значительная масса цементно-песчаной фракции бетона, которую невозможно отобрать без причинения ущерба ЖБЭ (ЖБК) [6].

**Постановка задачи.** Исследование карбонизации бетона необходимо выполнять на основе определения карбонатной составляющей (показателя КС), поскольку

именно он определяет количество образовавшегося карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) и его влияние на изменение показателя pH (водной вытяжки цементного камня), который в свою очередь является основной количественной характеристикой перерождения цементного камня в карбонаты или другие продукты химического взаимодействия под воздействием агрессивности среды, и универсальной характеристикой состояния бетона и его защитных свойств по отношению к стальной арматуре [6].

**Основная часть.** В НИЛ «Диагностика, испытание и исследование строительных материалов и конструкций» им. профессора И. А. Кудрявцева Белорусского государственного университета транспорта на основании многолетних исследований карбонизации бетона как в зоне расположения стальной арматуры, так и по сечению эксплуатируемых ЖБЭ [3, 4, 6, 8–10] для объективной оценки параметров карбонизации (карбонатной составляющей) разработан экспресс-метод определения карбонатной составляющей цементно-песчаной фракции бетона [7], представленный ниже.

## 1 Общие положения.

### 1.1 Термины и определения.

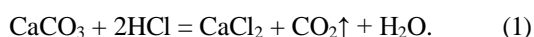
В экспресс-методе определения карбонатной составляющей в цементно-песчаной фракции бетона применяются следующие термины с соответствующими определениями: единичная проба – проба бетона из обследуемого бетонного (железобетонного) элемента, конструкции, отбираемая в определенное время в одном месте, достаточная для проведения испытаний; лабораторная проба – часть смешанной пробы, подготовленная посредством гомогенизации и уменьшения и предназначенная для приготовления средней аналитической пробы; смешанная проба – гомогенная смесь измельченной единичной пробы бетона, отобранной в определенное время в одном месте из одной железобетонной конструкции; средняя аналитическая проба – проба бетона, приготовленная из лабораторной пробы и предназначенная непосредственно для испытаний; титрованный раствор – раствор, приготовленный из стандарт-титра.

Остальные термины и определения приняты в соответствии с действующими нормативными документами.

### 1.2 Методика определения.

Карбонатная составляющая бетона характеризует процентное содержание карбонатов кальция в цементно-песчаной фракции бетона.

Определение карбонатной составляющей бетона в соответствии с настоящим методом основано на растворении навески, отобранной из средней аналитической пробы бетона, в соляной кислоте и измерении объема выделяющегося при этом диоксида углерода в соответствии с реакцией



При проведении анализа пробы бетона массу навески в граммах определяют с точностью до 0,0001 г, объемы, измеряемые бюреткой, – в сантиметрах кубических с точностью до 0,05 см<sup>3</sup>.

Концентрацию растворов выражают:

- массовой долей, в процентах, численно равной массе вещества в граммах на 100 г раствора;
- молярной концентрацией вещества – эквивалента в молях на кубический дециметр раствора (Н);

– соотношением объемных частей, где первое число обозначает объемную часть концентрированной кислоты, второе – объемную часть воды.

## 2 Средства измерений, испытательное оборудование, реактивы и материалы.

### 2.1 Средства измерений.

Весы аналитические с ценой деления 0,0001 г, пределом взвешивания 200 г по ГОСТ 24104.

Весы лабораторные с ценой деления 0,01 и 1,0 г по ГОСТ 24104.

### 2.2 Испытательное оборудование.

Сушильный шкаф, обеспечивающий автоматическое регулирование температуры в диапазоне  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ .

Сито с сеткой № 008 по ГОСТ 6613.

Прибор для определения степени карбонизации бетона (рисунок 1).

Пипетки по ГОСТ 29230.

Бюретки по ГОСТ 29251 II класса точности.

Колбы мерные с притертыми пробками вместимостью 100 см<sup>3</sup>, колбы круглодонные вместимостью 50 см<sup>3</sup> и стеклянные воронки диаметром 9–10 см по ГОСТ 25336.

Цилиндры вместимостью 10 и 25 см<sup>3</sup> по ГОСТ 1770.

Стеклянные стаканы для взвешивания с притертой крышкой.

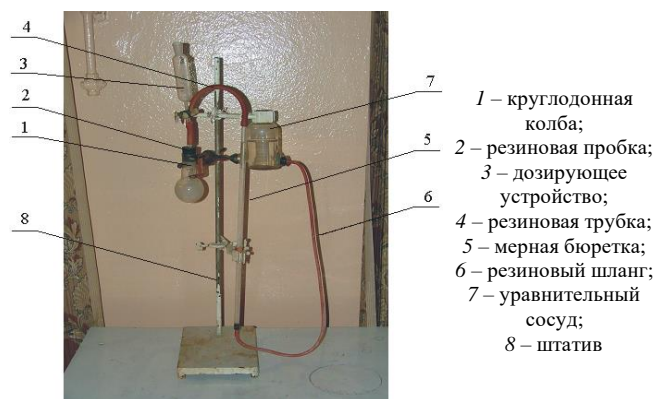


Рисунок 1 – Установка для определения карбонатной составляющей

### 2.3 Реактивы и материалы.

Кислота соляная ( $\text{HCl}$ ) плотностью 1,19 г/см<sup>3</sup> по ГОСТ 3118 и раствор соляной кислоты концентрацией 1:3.

Кислота соляная концентрацией  $\text{HCl} = 3$  моль/дм<sup>3</sup> (3Н).

Вода дистиллированная по ГОСТ 6709.

## 3 Испытания.

### 3.1 Условия испытаний.

При проведении испытаний внешние воздействующие факторы не должны превышать значений:

- температура воздуха –  $(20 \pm 10)^\circ\text{C}$ ;
- относительная влажность воздуха –  $(75 \pm 10)\%$ .

### 3.2 Требования безопасности при проведении испытаний.

Лабораторные помещения, в которых выполняются испытания бетона, должны быть оборудованы вентиляционными системами по ГОСТ 12.4.021. При эксплуатации электроприборов, используемых в процессе анализа, должны выполняться требования электробезопасности согласно ГОСТ 12.1.019.

При применении в качестве реактивов токсичных (вредных) веществ следует руководствоваться требова-

ниями безопасности, изложенными в нормативных документах на эти реактивы. Концентрация вредных веществ в воздухе рабочей зоны должна соответствовать гигиеническим регламентам, установленным ГОСТ 12.1.005 и СанПиН № 11-19.

Периодичность контроля содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны устанавливается в зависимости от их класса опасности в соответствии с п. 3.2.6 СанПиН № 11-19.

Определение концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны выполняют по методикам, входящим в Перечень методик, утвержденный Главным государственным санитарным врачом Республики Беларусь и согласованный Госстандартом Республики Беларусь 10 сентября 2002 г.

При работе с вредными веществами должны быть соблюдены правила безопасности, действующие в химических лабораториях. При этом следует применять индивидуальные средства защиты (респираторы) по ГОСТ 12.4.011 или ГОСТ 12.4.028, резиновые перчатки по ГОСТ 12.4.103, одежду по ГОСТ 27652, ГОСТ 27654, ГОСТ 29057 и ГОСТ 29058.

### 3.3 Подготовка к испытаниям.

#### 3.3.1 Приготовление реактивов.

Титрованный раствор соляной кислоты (3Н) готовят из стандарт-титра, для чего содержимое трех ампул кислоты переносят в мерную колбу вместимостью 100 см<sup>3</sup> в следующем порядке:

– наружную поверхность ампул промывают дистиллированной водой;

– в мерную колбу вместимостью 100 см<sup>3</sup> помещают воронку диаметром 9–10 см;

– держа ампулу над воронкой, с помощью стеклянного бойка пробивают отверстие в утонченном углублении ампулы, осторожно переворачивают ампулу, не вынося ее за пределы воронки, пробивают бойком отверстие в противоположном углублении и выливают содержимое ампулы через воронку в колбу;

– ампулу тщательно промывают изнутри через верхнее отверстие дистиллированной водой;

– для разбавления перенесенной кислоты добавляют в мерную колбу дистиллированную воду до 2/3 объема колбы;

– после полного растворения содержимого ампулы объем раствора в колбе доводят дистиллированной водой до метки, соответствующей объему, равному 100 см<sup>3</sup>, и тщательно перемешивают содержимое колбы.

#### 3.3.2 Отбор образцов бетона и подготовка пробы.

Для определения карбонатной составляющей бетона используют среднюю аналитическую пробу бетона, приготовленную из образцов-кернах, отобранных по ГОСТ 28570 из эксплуатируемых бетонных и железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК) образцов-сколов, получаемых при определении прочности бетона конструкций по ГОСТ 22690, а также образцов, отобранных другими способами.

Для анализа отбирают пробы защитного слоя бетона в зоне расположения арматуры, а также порошки, получаемые выбуриванием по сечению ЖБЭ и ЖБК до глубины 100 мм и кубов сеч. 100×100×100 мм до глубины 50 мм.

Отбор образцов производят при проведении обследований ЖБЭ и ЖБК.

Предварительно бетонная поверхность должна быть тщательно очищена от всякого рода загрязнений, штукатурного слоя, краски и, при наличии, слоя ремонтного материала.

В отобранных образцах отделяют слой бетона толщиной ≈10 мм. Отделенные фрагменты защитного слоя объединяют в единичную пробу. Количество отбираемых единичных проб определяют в зависимости от вида и эксплуатационного состояния конструкций.

Перед проведением испытания единичную пробу бетона измельчают в фарфоровой ступке ударами, не растирая, и отделяют крупный заполнитель. Из измельченной единичной пробы бетона формируют смешанную пробу, которую квартованием сокращают до лабораторной пробы массой 10 ± 2 г.

Лабораторную пробу высушивают при температуре 105 ± 5 °С до влажности 1,5 ± 0,5 %, дополнительно измельчают в фарфоровой или агатовой ступке для отделения цементного камня от заполнителя и формируют из нее для анализа среднюю аналитическую пробу массой 0,5 ± 0,005 г путем просеивания через сито с сеткой № 01 по ГОСТ 6613.

Подготовленную среднюю аналитическую пробу хранят в стеклянном стакане для взвешивания с притертой крышкой – для защиты от воздействия окружающей среды.

#### 3.3.3 Проведение испытаний.

Перед отбором навески подготовленную среднюю аналитическую пробу бетона, помещенную в стеклянный стакан для взвешивания, гомогенизируют и высушивают в сушильном шкафу при температуре 105 ± 5 °С до постоянной массы, после чего охлаждают в эксикаторе над хлоридом кальция.

Постоянство массы считается достигнутым, если разница между двумя последовательными взвешиваниями не превышает 0,0004 г. Если при повторном взвешивании масса навески увеличивается, то для расчета применяют массу, предшествующую ее увеличению. При этом первое взвешивание осуществляют через 1,5–2 ч.

Допускается проводить анализ из воздушно-сухой навески с последующим пересчетом на навеску, высушенную до постоянной массы (сухую). Массу сухой навески  $m$ , г, вычисляют по формуле

$$m = m_0(100 - W) / 100, \quad (2)$$

где  $m_0$  – масса навески в воздушно-сухом состоянии, г;  $W$  – массовая доля влаги в навеске, определенная по ГОСТ 5382.

Из высушенной до постоянной массы (воздушно-сухой) средней аналитической пробы бетона отбирают навеску массой (0,5 ± 0,005 г).

Собирают прибор для определения карбонатной составляющей (КС) бетона (см. рисунок 1).

Уровень воды в мерной бюретке 5 устанавливают на нулевую отметку вертикальным перемещением уравнительного сосуда 7.

Навеску анализируемой пробы 0,5 г засыпают в круглодонную колбу 1 и закрывают резиновой пробкой 2.

Перекрывают кран дозатора 3 и заливают в него раствор соляной кислоты (3Н).

Перед подачей раствора соляной кислоты в круглодонную колбу 1 в ней создают небольшой вакуум опус-

канием уравнительного сосуда 7 на 5 см ниже начального уровня воды в мерной бюретке 5.

Открывая кран дозатора 3, подают раствор кислоты (3 см<sup>3</sup>) в колбу 1.

Измеряют объем газа, выделившегося в мерную бюретку 5, с точностью до 0,05 см<sup>3</sup> при протекании реакции (1).

Из полученного значения объема вычитают объем залитой кислоты (3 см<sup>3</sup>).

Содержание карбонатной составляющей, %

$$КС = 0,16 \frac{P_p V_p}{m_n T}, \quad (3)$$

где  $P_p$  – парциальное давление газа, Па (мм рт. ст.);  $V_p$  – объем газа, выделяющегося при анализе, см<sup>3</sup>;  $m_n$  – масса навески анализируемой пробы, г;  $T$  – температура по шкале Кельвина; 0,16 – постоянный множитель, полученный приведением условий к нормальным.

Парциальное давление газа  $P_p$  рассчитывают по формуле

$$P_p = P_t - P_v - 0,125t', \quad (4)$$

где  $P_t$  – показания барометра в момент анализа, Па (мм рт. ст.);  $P_v$  – давление насыщенного водяного пара, Па (мм рт. ст.) в соответствии с таблицей 1; 0,125 $t'$  – поправка на показания барометра для приведения их к нормальным условиям;  $t'$  – температура воздуха в помещении, °С.

За результат анализа принимают среднее арифметическое значение двух определений, выраженное в процентах с точностью до ±1 %.

Допустимое расхождение между результатами параллельных определений не должно превышать 2 %. При большем расхождении проводят повторное определение.

Таблица 1 – Давление насыщенного водяного пара

$t$ , °С	$P_v$ , мм рт. ст.	$t$ , °С	$P_v$ , мм рт. ст.	$t$ , °С	$P_v$ , мм рт. ст.	$t$ , °С	$P_v$ , мм рт. ст.	$t$ , °С	$P_v$ , мм рт. ст.
10	9,2	15	12,8	20	17,5	25	23,8	30	31,8
11	9,8	16	13,6	21	18,6	26	25,2	31	33,7
12	10,5	17	14,5	22	19,8	27	26,7	32	35,7
13	11,2	18	15,5	23	21,1	28	28,3	33	37,7
14	12,0	19	16,5	24	22,4	29	30,0	34	39,9

Настоящий экспресс-метод определения карбонатной составляющей цементно-песчаной фракции бетона обеспечивает получение результатов испытаний с точностью ±1 %, что является достаточным, так как при отборе для анализа образцов в порошкообразном состоянии ошибка может достигать 3 % за счет вероятностного характера распределения карбонизированного цементного камня в смеси с песком.

Граничные критерии полученных результатов и использование экспресс-метода приведены в [3].

Получено 10.03.2021

**A. A. Vasilyev.** Express method of determination of carbonate component (CC index) of cement-sand fraction of concrete.

The role of nondestructive testing in the quality assessment of the main parameters of concrete and reinforced concrete elements and structures is shown. The need to determine and evaluate the carbonate component of concrete is justified. According to the results of long-term studies of concrete carbonation, both immediately after manufacture and operating different terms in different atmospheric conditions of reinforced concrete elements, an express method of determining the carbonate component of the cement-sand fraction of concrete is proposed. The main definitions and general provisions of the express method, preparation for tests and the test procedure are given.

**Заключение.** Экспресс-метод определения карбонатной составляющей цементно-песчаной фракции бетона позволяет исследовать карбонизацию, практически не разрушая бетона ЖБЭ и ЖБК. Преимущество предлагаемого метода – в скорости проведения анализа при достаточной для практических целей точности.

На основании предлагаемого экспресс-метода определения карбонатной составляющей цементно-песчаной фракции бетона необходимо создавать нормативный документ либо вводить экспресс-метод в существующие нормативные документы, связанные с обследованием ЖБЭ (ЖБК) и диагностикой их технического состояния.

#### Список литературы

- 1 **Васильев, А. А.** Техническое обследование строительных объектов : учеб. (с электронным приложением) / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2020. – 429 с.
- 2 **Васильев, А. А.** Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 215 с.
- 3 **Васильев, А. А.** Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 303 с.
- 4 **Васильев, А. А.** Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
- 5 СТБ 1481–2004. Бетоны конструкций мостовых сооружений. Метод определения степени карбонизации. – Введ. 2004-07-01. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2004. – 7 с.
- 6 **Васильев, А. А.** К вопросу объективности современной оценки и прогнозирования карбонизации бетона на основе индикаторного метода / А. А. Васильев // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2020. – № 1. – С. 77–80.
- 7 **Васильев, А. А.** Экспресс-метод определения карбонатной составляющей цементно-песчаной фракции бетона / А. А. Васильев // Сб. статей XXII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение». – 2019. – С. 29–34.
- 8 **Васильев, А. А.** Совершенствование оценки технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах с учетом их коррозионного износа / А. А. Васильев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2010. – № 6. – С. 17–23.
- 9 **Васильев, А. А.** Исследование различными методами распределения физико-химических показателей бетона по сечению железобетонных элементов / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 1 (40). – С. 51–53.
- 10 **Васильев, А. А.** Оценка и прогнозирование степени карбонизации бетона / А. А. Васильев // Инновационное развитие: потенциал науки и современного образования : [монография] / под общ. ред. Г. Ю. Гуляева. – Пенза : Наука и просвещение, 2018. – С. 148–158.